

На правах рукописи

Давыдов Юрий Фёдорович

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ НА
ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СЕПАРАТОРА

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2012

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Горбова Галина Михайловна

Официальные оппоненты:

Седалищев Виктор Николаевич доктор технических наук, профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, кафедра Информационных технологий

Шатохин Александр Семенович кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный университет, заведующий кафедрой вычислительной техники и электроники, проректор по инноватизации

Ведущая организация: ГОУ ВПО Сибирский государственный
Индустриальный университет МОН РФ

Защита состоится “ 17 ” мая 2012 г. в 14:00
на заседании диссертационного совета Д.212.004.06 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г.Барнаул, пр. Ленина, 46, ауд. 127 гл. к.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан 09 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук
Кривобоков Д.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При пирометаллургической переработке сульфидного сырья на предприятиях цветной металлургии, в том числе цинковых, неизбежно встает вопрос переработки сернистых газов с получением серной кислоты. Этот передел является неотъемлемой частью технологии и требует решения вопросов оптимизации производства по новым технологиям и экологическим нормативам. Вклад сернокислотных цехов в загрязнение промышленно развитых регионов связан с содержанием в выбросах токсичных соединений серного и сернистого ангидрида, а также паров серной кислоты. Возникающие в традиционной технологии получения серной кислоты полидисперсные двухфазные потоки являются нестационарными, что затрудняет проведение оперативного контроля качества технологического процесса ее производства.

В настоящее время контроль технологического режима получения серной кислоты осуществляется на основе данных по температурам в различных контрольных точках технологической схемы. В отходящих газах контроль концентрации серной кислоты и сернистого ангидрида осуществляются периодически силами лабораторий санитарного контроля на основе методических указаний N 4588 - 88, утвержденных Главным санитарным врачом в 1988 г. Существующие методики, связанные с периодическим отбором проб газов из газоходов, исключают возможность выполнения оперативного контроля технологического процесса и препятствуют снижению уровня экологического воздействия на окружающую среду. Это осложняется и тем, что технология получения серной кислоты включает в себя сложные режимы течения, формирующиеся при подаче или отводе жидкости или газа, при передаче энергии или информации через жидкую или газовую среду в технологической схеме. Подобные течения возникают в системах и устройствах очистки и отвода газовых и газожидкостных сред на предприятиях цветной металлургии, связанных с образованием значительных объемов запыленных технологических и вентиляционных газов.

Для преодоления перечисленных негативных факторов возникает необходимость разработки оптимальных трубопроводных систем, создающих монодисперсные, непрерывно и достоверно контролируемые двухфазные потоки. Таким образом, весьма актуальной задачей является создание единой автоматизированной системы, позволяющей непрерывно и с большой точностью оценивать

режимные состояния технологического процесса сернокислотного производства.

Цель работы. Усовершенствование оптического метода автоматизированного непрерывного контроля концентрации капельной фазы серной кислоты в технологическом процессе производства серной кислоты с помощью применения сепаратора, с целью улучшения технико-экономических показателей системы контроля.

С учетом этой цели поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор, определяющий степень изученности методов и средств контроля концентрации капельной серной кислоты при ее производстве;

- создать аэродинамический стенд для исследования двухфазного потока и последующего непрерывного измерения его основных параметров;

- экспериментально исследовать зависимости величины и стабильности пониженного давления в приосевой зоне сепаратора от вида завихрителя и степени закрутки потока, а также от величины числа Рейнольдса как основного критерия оценки; исследовать распределение осредненной скорости двухфазного потока и перепады статического и динамического давления в различных сечениях по длине сепаратора;

- разработать конструкцию сепаратора для различных режимов движения двухфазного газо-жидкостного потока на выходе из сернокислотного цеха;

- разработать измерительную схему автоматизированной оптической системы, описывающую процесс контроля концентрации в производстве серной кислоты.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- доказано, что для уменьшения случайной и систематической составляющей погрешности измерения оптической плотности необходимо создать монодисперсный поток капельной фазы серной кислоты, который позволяет получить линейную статическую характеристику оптического пылемера;

- установлено, что в отходящих газах капельная фаза серной кислоты, имеющая полидисперсный вид, переходит в монодисперсный вид при следующих условиях: в момент направленного формирования потока с числом Рейнольдса в пределах от $Re = 2000$ до $Re = 600000$, в зависимости от типа применяемого завихрителя, размера зоны приосевого пониженного давления и гидравлического сопротивления,

от интенсивности и степени закрутки потока;

- для выбора необходимых режимов работы сепаратора получены эмпирические формулы для расчета давления в поперечных сечениях сепаратора и определена универсальная функциональная зависимость, моделирующая движение закрученных двухфазных потоков различной плотности;

- на основе выполненных исследований предложена измерительная схема оптического пылемера;

- разработаны практические рекомендации по использованию измерительного комплекса с целью оптимизации процесса производства серной кислоты.

Практическая значимость. Созданная единая автоматизированная система контроля пылегазовых параметров сепаратор - оптический пылемер позволяет обеспечить непрерывный контроль технологических процессов и режимов работы приборов на сернокислотных производствах предприятий цветной металлургии.

Применение сепаратора делает возможным создать универсальный комплекс, оптимизирующий контроль технологического процесса получения серной кислоты и значительно улучшающий экологический контроль токсичных сернистых выбросов.

Реализация и внедрение полученных результатов.

Оптическая система контроля «сепаратор-пылемер» внедрена в Лениногорском цинковом заводе, что позволило снизить выброс паров серной кислоты в атмосферу на 20 %, увеличить срок службы оборудования, а также улучшить экологическую обстановку в регионе.

Результаты диссертационной работы приняты для дальнейшего внедрения на предприятиях цветной металлургии в экологическую программу Восточно-Казахстанской области на 2008-2014 гг.

Внедрены стенд, моделирующий движение закрученных потоков и модель с переменным расходом массы по ее длине в учебный процесс Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.

К защите представлены основные положения:

- переход полидисперсного потока в монодисперсный поток, с помощью внедрения сепаратора, обеспечивает уменьшение погрешности измерения концентрации и упрощения измерительной схемы, за счет линеаризации статической характеристики оптического пылемера;

- при направленном изменении параметров движения потока с числом Рейнольдса в пределах от $Re = 2000$ до $Re = 600000$ капельная фаза серной кислоты в отходящих газах, имеющая исходно

полидисперсный вид, переводится в монодисперсный вид;

- изменения параметров движения двухфазного потока с требуемым числом Рейнольдса осуществляются с помощью сепаратора путем создания закрученного потока с непрерывным дозированным отбором массы отходящих газов по ходу их движения;

- качество работы сепаратора зависит от распределения полей приосевого давления и скоростей движения двухфазного потока, от интенсивности и степени его закрутки, формы и размеров закручивающих устройств;

- автоматизированная система контроля технологических процессов и режимов работы приборов и аппаратов на серноокислотных производствах предприятий цветной металлургии, на основе конструкции сепаратор-оптический пылемер.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке единого измерительного комплекса сепаратор - оптический пылемер;

- в разработке конструкции сепаратора двухфазных потоков;

- в определении функциональной зависимости между величиной и стабильностью приосевой зоны пониженного давления в сепараторе и интенсивности закрутки потока;

- в составлении условий моделирования двухфазных закрученных потоков;

- предложена упрощенная измерительная схема оптического пылемера.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на республиканской конференции "10 лет КамПИ" КАМАЗ-КамПИ (Набережные Челны, 1990 г.), конференциях "Проблемы научно-технического прогресса в развитии региона и отраслей народного хозяйства" (Усть-Каменогорск, 1990–2011 гг.), на семинарах кафедры ядерно-энергетических сооружений Санкт-Петербургского Государственного Университета (1991 г.), на семинарах кафедр Восточно-Казахстанского технического университета (1991–2012 гг.), международных конференциях в г. Алматы в 2000-2010 гг.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 15 печатных работах, в том числе 3 статьи в журналах рекомендованных ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 153 страницы, состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы и 3 приложений. Основная часть изложена на 147 страницах, а приложения на 6 страницах текста; диссертация включает 70 рисунков; 138 формул; список использованной литературы

содержит 167 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении сформулированы актуальность темы, цели и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны и практической ценности, отражены внедрение результатов работы и ее апробация, приведены структура и объем диссертации.

В первой главе «Обзор исследований и методов контроля концентрации аэрозольных смесей» рассмотрены возможности повышения степени автоматизации сернокислотных производств и эффективности измерения концентрации паров серной кислоты, проведен обзор методов измерения и определен выбор, как оптимального, оптического метода.

Совершенствование и интенсификация металлургических процессов производства цветных металлов, органичным составляющим которых является производство серной кислоты, в современных условиях невозможны без автоматического контроля, управления и оптимизации, базирующихся на вычислительной технике и электронных управляющих машинах.

Внедрение вычислительной техники и автоматизированных систем контроля и управления в цветной металлургии показало высокую эффективность даже при решении ограниченного круга задач. Положительные результаты получены для различных участков металлургических производств основного цикла. В то же время для сернокислотных производств единой системы контроля и управления, зависящей от концентрации капельной фазы серной кислоты на выходе газов из промывного отделения сернокислотного цеха не существовало.

Контроль концентрации паров серной кислоты в данной работе осуществляется с помощью оптического пылемера, эффективность работы которого определяется безынерционностью и достоверностью уровня выходного сигнала при работе с однородными средами. При работе с полидисперсным потоком статическая характеристика оптического пылемера имеет нелинейный вид, что приводит к возникновению погрешности при определении концентрации паров серной кислоты. На рисунке 1 показана нелинейная статическая характеристика оптического пылемера, вызванная измерением полидисперсного потока капельной фазы серной кислоты.

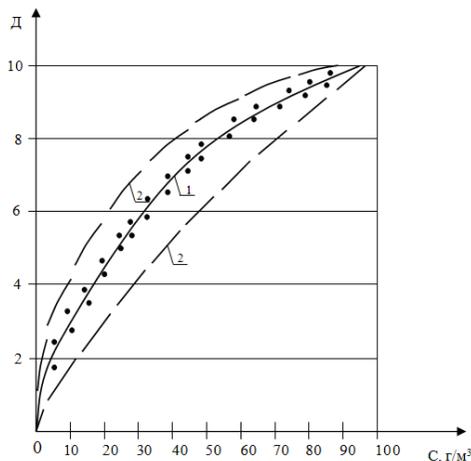


Рисунок 1. Статическая характеристика оптического пылемера: 1 – статическая характеристика; 2 – доверительный интервал.

Изменение температуры отходящих газов сернокислотных производств, в свою очередь, приводит к нестационарности распределения капель серной кислоты по диаметру трубопровода: колебанию в значительных пределах их крупности и, соответственно, ухудшает условия работы оптического пылемера. На рисунке 2 приведены значения выходного сигнала оптического пылемера, работающего на аэрозольном полидисперсном потоке, из которого видно, что сигнал имеет хаотический неустановившийся характер.

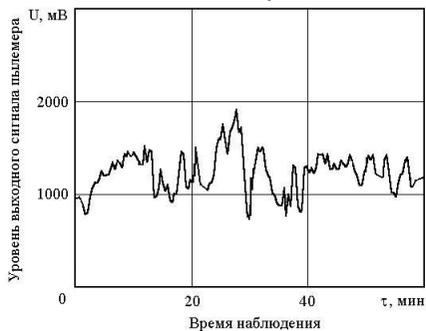


Рисунок 2. Изменение уровня выходного сигнала оптического пылемера во времени.

Таким образом, для повышения точности и надежности измерений оптического пылемера, в данной работе была поставлена задача перевода полидисперсного потока в монодисперсный в зоне

измерений. Для создания монодисперсного потока необходимо было определить условия равномерного распределения капельной сернокислотной фазы по диаметру трубы и условия формирования равных по величине капель серной кислоты, образующих ее парожидкую фазу.

На основе анализа рассмотренных работ сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические исследования характеристик двухфазных потоков» приведена теоретическая модель, рассматривающая движение закрученных потоков и систем с отбором массы через проницаемые стенки.

Равномерное распределение паров серной кислоты в трубах возможно при создании зон с пониженным приосевым давлением и перераспределением эпюр скоростей таким образом, чтобы их максимум от оси трубы смещался к периферии. Монодисперсный поток по капельной жидкой фазе серной кислоты, возникает лишь при ее равномерной концентрации по вертикальному сечению потока. Подобное распределение связано с принудительным перераспределением полей давления и скоростей, и требует создания устойчивой зоны искусственного пониженного давления в приосевой части сепаратора (рис. 3). Величина этой зоны и ее устойчивость зависит от интенсивности и вида закручивающего устройства и динамических характеристик перемещаемой среды.

Значительное изменение динамического режима работы сепаратора вызвало необходимость моделирования двухфазных закрученных потоков с целью применения предлагаемого устройства при различных эксплуатационных условиях. Предложена функциональная зависимость

$$E_U = f(R_e, W_e, \Phi^*),$$

где W_e - число Вебера, Φ^* - интегральный параметр закрученного потока.

При условии движения в сепараторе монодисперсного потока моделирование движения сводится к выполнению условий: $E_U = idem$ и $W_{em} = W_{en}$, где W_{em} - число Вебера для модели; W_{en} - число Вебера для натурального объекта.

Наличие вращательной составляющей скорости приводит к возникновению в потоке центробежных массовых сил и образованию радиального градиента статического давления. При этом, вектор скорости потока отклоняется от осевого направления, а основной характеристикой закрученного потока становится угол закрутки потока

между вектором его суммарной скорости и осью канала.

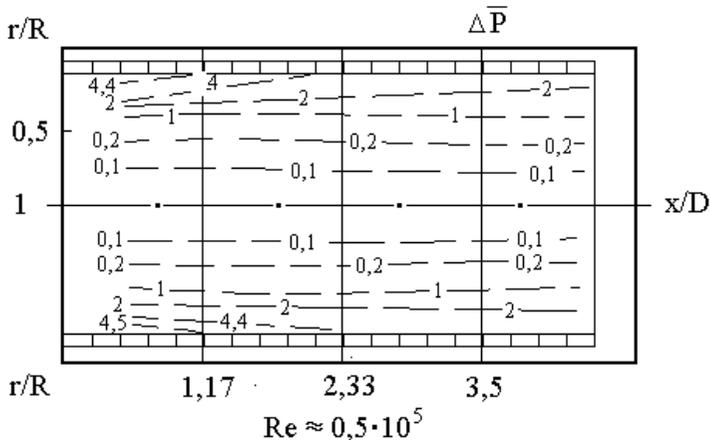
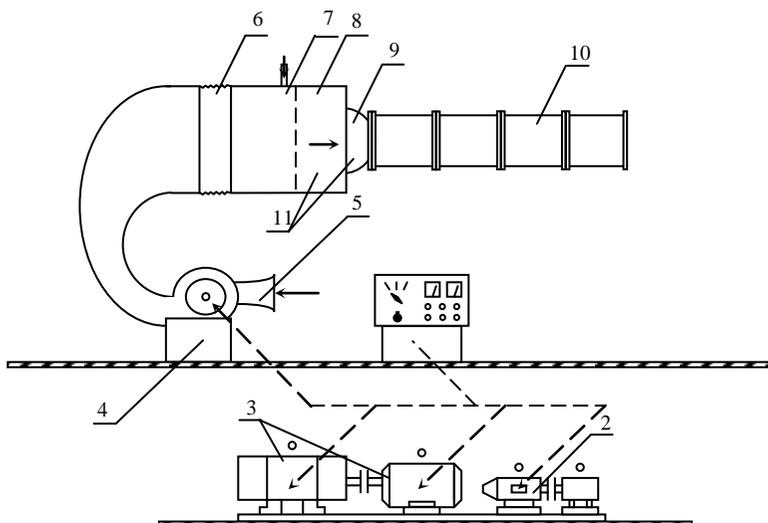


Рисунок 3. Распределение давления в потоке.

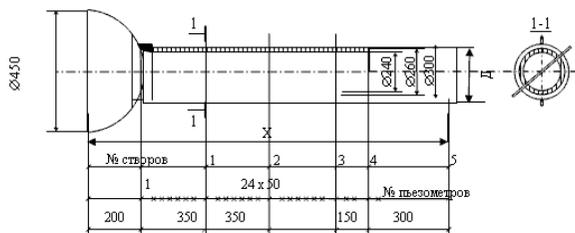
Поэтому, для проведения экспериментальных исследований был создан аэродинамический стенд, состоящий из электросилового оборудования, приводящего воздух в движение, и собственно аэродинамической части, формирующей течение потока необходимой для экспериментов структуры.

В третьей главе «Разработка аэродинамического стенда и экспериментальное исследование» представлены результаты экспериментальных исследований параметров движения аэрозольных потоков, проведенных на созданном экспериментальном стенде.

На стенде (рисунок 4,а) изучены параметры потока на различном расстоянии от завихрителя. В данной работе изучены завихрители трех типов: 1) с закруткой потока вдоль стенки трубопровода, внутренний диаметр завихрителя 210 мм, наружный 232 мм, высота 3 мм, число лопаток 30; 2) аксиальнолопаточный с полной закруткой потока переменным углом атаки. Диаметр внутреннего тела 150 мм, высота лопаток 53 мм; 3) аксиально-лопаточный завихритель с полной закруткой потока и переменным углом атаки. Внутренний диаметр - 76 мм, высота лопаток - 91 мм.



а) Аэродинамический стенд :1 - пульт управления; 2 – электромашинный усилитель; 3 – преобразовательный агрегат «двигатель-генератор»; 4 – электродвигатель и воздуходувка; 5 – воздухозаборник; 6 – гибкий патрубкок; 7 – напорная камера; 8 – сетки; 9 – радиусный вход (конфузор); 10 – модель сепаратора; 11 – отборы давления.



б) Схема экспериментальной модели сепаратора: X – длина модели, D – диаметр модели.

Рисунок 4. Экспериментальная установка.

Рабочий участок модели сепаратора - аккумулятора состоит из двух коаксиальных цилиндрических трубопроводов. Внутренний перфорированный трубопровод выполнен диаметром 260 мм с отверстиями диаметром 4 мм (пористость 49%) и длиной 1200 мм, на его конечном участке установлена непроницаемая заглушка. Наружный трубопровод изготовлен из оргстекла диаметром 300 мм и длиной 1500 мм как показано на рисунке 4,б. Для измерения давления на стенках трубопровода использовались дренажные отверстия по четырем мерным сечениям с диаметром 0,5 мм.

Измерения давления и скоростей проводились в четырех мерных

сечениях по радиусу модели. Гидравлическое сопротивление моделей рассчитывалось по перепаду давления на рабочем участке. Перепад давления измерялся дифференциальным микроманометром ММН-240 и МКВ-250. Отбор давлений P_1 и P_0 проведен на начальном и конечном участке исследуемой модели.

$$P_1 - P_0 = m \cdot g \cdot A \cdot \rho_{сп} , \quad (1)$$

где m – тангенс угла наклона трубки микроманометра, g – ускорение свободного падения, $\rho_{сп}$ – плотность спирта, A – отсчет по шкале микроманометра.

Коэффициент местного сопротивления вычисляется по формуле:

$$\xi = \xi_{общ} - \xi_{тр} , \quad \xi_{общ} = \frac{P_1 - P_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2} , \quad (2)$$

где $\xi_{тр}$ – коэффициент сопротивления трения участка между измерительными сечениями.

В работе измерения проведены вращением однониточного термоанемометра с использованием предварительных пространственных тарировок. Использовался термоанемометр постоянной температуры ТАП-1 и основное уравнение этого термоанемометра, имеющее вид:

$$E^2 = E_0^2 + e \cdot V^{0,5} , \quad (3)$$

где E – величина напряжения на выходе термоанемометра, V – скорость потока, коэффициенты E_0^2 и e определялись по аппроксимации экспериментальных точек калибровочной зависимости.

Значение осредненной скорости определено по формуле:

$$V = \frac{1}{e} \cdot (E^2 - E_0^2)^2 . \quad (4)$$

Величина погрешности измерений в зависимости от применяемого метода изменялась в пределах от 0,8 % до 4 %. Для изучения сопротивления модели использовались зависимости коэффициента сопротивления рабочего участка от чисел Рейнольдса, как показано на рисунке 5. Опыт показывает, что основной расход воздуха (около 85 %) проходит через перфорированную стенку на участке трубы между сечениями с $X/D = 4,4$ и $X/D = 5,0$. В кольцевом зазоре до $X/D = 51,5$ скорость движения потока незначительна, где X/D – отношение расстояния до мерного сечения к линейному размеру кольцевого зазора. Распределение скорости в данном сечении близко к равномерному (Δ – размер кольцевого зазора).

Установлено, что наибольшие скорости в потоке наблюдаются у перфорированной стенки, образуя, во внутреннем трубопроводе кольцевую область максимальных скоростей как показано на рисунке 6.

На расстоянии $X/D = 3,5$ градиент скорости имеет минимальное значение, а профиль скорости в кольцевом канале имеет более развитый вид, чем в предыдущих сечениях, где наибольшие скорости наблюдались у стенок.

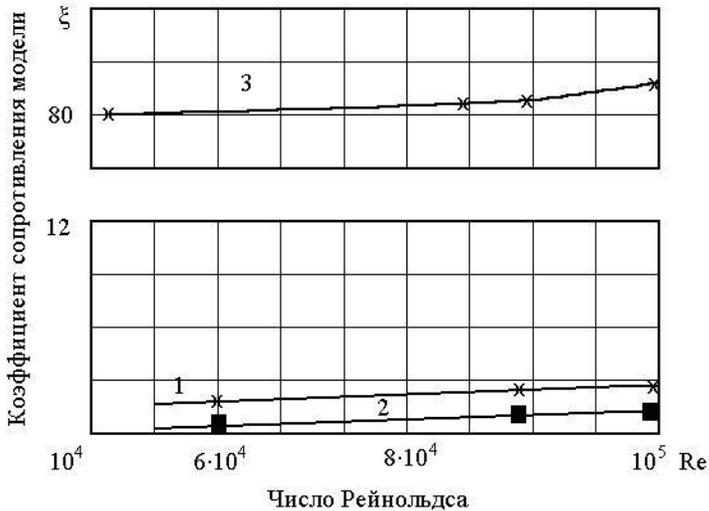


Рисунок 5. Зависимости коэффициента сопротивления рабочего участка модели от чисел Рейнольдса: 1 - АЛ-завихритель с $d_0 = 150$ мм, 2 - пристеночный завихритель, 3 - без закрутки потока.

Изучение распределения осевой и вращательной скорости показывает отношение безразмерных осевой и вращательной составляющих скорости

$$V_s = \frac{V_w}{V} \quad \text{и} \quad V_{mx} = \frac{V_x}{V}, \quad (5)$$

что составляет от 2 до 9 в зависимости от X/D , причем при возрастании последнего, значение V/V_x уменьшается. Вращательная составляющая скорости достигает максимальных значений на расстоянии от стенки r/R от 0,1 до 0,25 во всех измерительных сечениях и независима от числа Рейнольдса в пределах $Re =$ от 2000 до 10000, как показано на рисунке 7.

Для создания закрученного потока вдоль стенки внутренней перфорированной трубы был использован завихритель, центральное

тело которого представляет собой непроницаемый диск. Внутренний диаметр завихрителя 210 мм, высота лопатки 3,3 мм. Угол закрутки 30° при числе лопаток $m = 30$ шт. и 24° при $m = 60$ шт., $n^* = 1,597$ при $m = 30$ шт., и $n^* = 1,13$ при $m = 60$ шт.

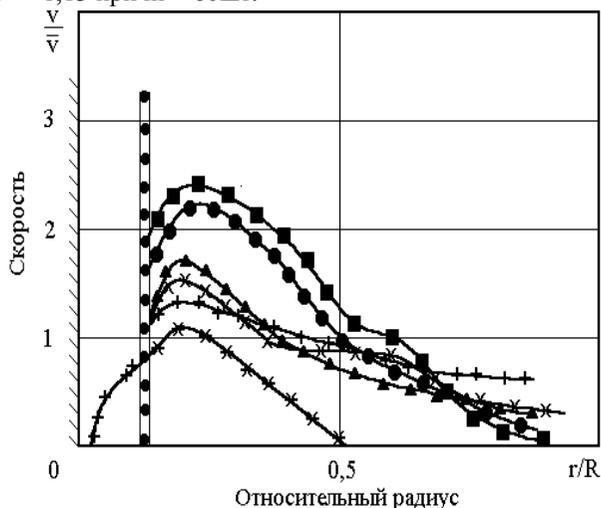


Рисунок 6. Форма профилей скорости в модели 2:

\blacktriangle - $Re=1050$, $x/D=1,17$, \blacksquare - $Re=5500$, $x/D=1,17$, \times - $Re=3800$, $x/D=1,17$, \bullet - $Re=5800$, $x/D=2,33$, $+$ - $Re=6200$, $x/D=3,50$, $*$ - $Re=5500$, $x/D=3,50$.

Характер распределения по длине рабочего участка сепаратора позволяет предположить, что основная часть потока переходит через перфорированную стенку в кольцевой канал на участке от $X/D = 1,0$ до $X/D = 2,5$.

Равномерное распределение давления по длине модели, без резких перепадов, объясняется особенностями течения потока при закрутке его вдоль стенок внутреннего трубопровода.

Вблизи внутренней стенки наблюдается увеличение давления до $r/R = 2$, затем давление уменьшается, причем градиент давления уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Зона пониженного давления мало изменяется по величине в зависимости от чисел Рейнольдса и отличается стабильностью по всей длине модели. Скорость потока достигает максимальных значений у перфорированной стенки. По радиусу значения скорости изменялись неодинаково в зависимости от удаления завихрителя, числа Рейнольдса и числа лопаток завихрителя, как показано на рисунке 8.

Наибольший перепад скоростей наблюдался при числе лопаток 60 на расстоянии $X/D = 1,17$ (при этом резко увеличивалось сопротивление модели). При $m = 30$ этот перепад уменьшается, причем режим движения особой роли не играет. Отношение безразмерной вращательной скорости к осевой составляющей по длине модели уменьшается от начальных сечений к конечным.

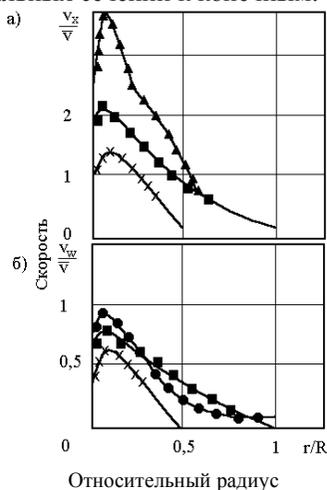


Рисунок 7. Профиль вращательной и осевой составляющей скорости \blacktriangle - $Re=5500$, $x/D=1,17$, \bullet - $Re=10050$, $x/D=1,17$, \blacksquare - $Re=5800$, $x/D=2,33$, \times - $Re=6000$, $x/D=3,50$

Максимальные значения вращательной составляющей скорости уменьшается по длине модели. Сформулированы условия формирования структуры потока, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований и проведено сравнение возможности применения различных моделей сепаратора при конкретных условиях протекания потока.

Показано, что изменение диаметра центрального тела d_o позволяет в широких пределах варьировать значение геометрического параметра закрутки n^* от $n^* = 1,13$ при $d_o = 232$ мм и чисел лопаток $m = 60$ шт. до $n^* = 1,6$ при $d_o = 150$ мм, а также получить самые разнообразные условия входа потока в рабочую часть устройства и оптимизировать работу сепаратора.

Для характеристики закрученных потоков за завихрителем применяются два параметра: а) интегральный Φ^* - для полностью закрученных потоков; б) локальный $tq\phi$ - для пристенных закрученных струй.

Из расчетов Φ^* и t_{ϕ} видно, что найденные их значения значительно зависят от диаметра внутреннего тела завихрителя. С увеличением относительного внутреннего тела закручивающего устройства d_0 интенсивность закрутки возрастает, что обуславливает, в свою очередь, рост местных потерь энергии в завихрителе. Кроме того, при изменении угла ϕ на наружном радиусе завихрителя возможно увеличение интенсивности закрутки.

Показано, что в исследуемой модели потока на всем ее протяжении распределение скоростей и давления зависит от способа закрутки, но экспериментальные данные позволяют допустить существование участка (от 4,5 калибров) на котором характер движения потока сохраняется независимо от способа закрутки.

Максимальная осевая скорость потока определена по формуле:

$$V_{mx} = 0,92 + 0,55 \cdot \Phi^* . \quad (6)$$

Для определения вращательной составляющей скорости используется выражение $V_{mx} = 2,04 \Phi^*$, а радиус на котором достигается это значение $m = 0,51 \Phi$ предлагается максимальное значение вращательной скорости V_{mx} определено из выражения:

$$V_{mx} = 2,04 \cdot \kappa_1 \cdot \Phi_{1,1}^* , \quad (7)$$

где $k_1 = 9,36 \cdot 10^{-6} \text{ Re}$, при $\text{Re} < 0,5 \cdot 10^5$ и $k_1 = 0,655$ при $\text{Re} > 0,5 \cdot 10^5$.

Из приведенных выражений видно, что построенное по зависимостям (6) распределение вращательной скорости (рис. 7) фактически совпадает с данными эксперимента для завихрителя с $d_0 = 150$ мм. Для закрученного потока вдоль стенки устройства разница между экспериментальными и расчетными данными существенна, при этом, величина приосевой зоны пониженного давления существенно зависит от условий закрутки потока.

Из рисунка 8 видно, что при минимальном диаметре внутреннего тела перепад давления значительно увеличивается, но соответственно уменьшаются абсолютные размеры по радиусу зоны пониженного давления, то есть, возможно, в зависимости от поставленной задачи создавать различные ситуации движения потока в приосевой зоне. При необходимости создания зоны пониженного осевого давления со значительным перепадом давления $P_{\max}/P_{\min} > 50$, рекомендуется наряду с проницаемыми границами потока использовать полную принудительную закрутку потока с аксиально-лопаточным завихрителем. На основании проведенных исследований была получена эмпирическая зависимость распределения давления во внутренней части модели по радиусу:

$$P_{ir} = P_{\max r} \cdot (2,5 \cdot 10^7 \cdot \text{Re})^r \quad (8)$$

для одного сечения. При переходе к другому произвольному сечению выражение (8) преобразуется в (9)

$$P_{ir} = P_{\max} \cdot (2,5 \cdot 10^7 \cdot \frac{X_1}{X_i} \cdot 5 \cdot \text{Re}) \quad , \quad (9)$$

где X_1 - расстояние от первого сечения до входа в модель.

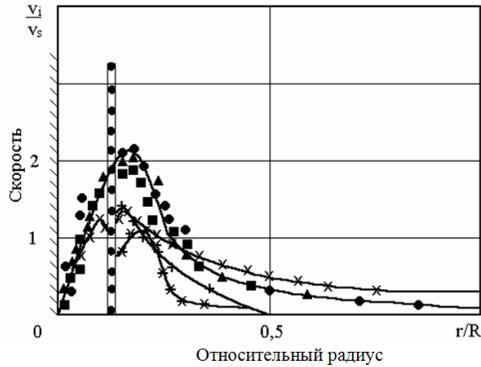


Рисунок 8. Профиль скорости в модели 4.

▲- $\text{Re}=2400$, $x/D=1,17$, ■ - $\text{Re}=4900$, $x/D=1,17$, ● - $\text{Re}=6200$, $x/D=1,17$, × - $\text{Re}=4600$, $x/D=2,33$, + - $\text{Re}=2700$, $x/D=3,50$, * - $\text{Re}=6500$, $x/D=3,40$.

Экспериментальные данные по распределению давления в потоке, в диапазоне изменения относительных давлений P_i/\bar{P} от 0 до 6, по точкам измерения имеют следующие значения: 1,4; 1,8; 3,4; 4,0; 4,8; 5,4; 5,8. Из расчетов давлений по зависимости 8 получаем: 1,35; 1,76; 3,48; 4,1; 4,6; 5,32; 5,7. Погрешность измерения экспериментальных и расчетных данных составляет от 1,5 % до 4,1 %. Расхождение в погрешности измерения можно объяснить неравномерностью распределения скоростей по поперечному сечению потока. При переходе к другим измерительным сечениям погрешность измерений экспериментальных и расчетных значений давления составляет от 3,0 % до 6,0 %, что объясняется неравномерностью оттока массы через перфорированные внутренние стенки сепаратора и изменением сопротивления устройства при разных числах Рейнольдса. Изученные типы сепараторов позволяют получить перераспределение капельной фазы серной кислоты по диаметру трубы таким образом, чтобы достигалось ее равномерное распределение в виде монодисперсного потока, как показано на рисунке 9.

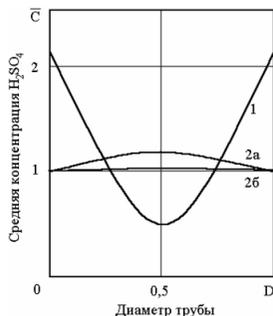


Рисунок 9. Распределение средней концентрации серной кислоты по диаметру трубы: \bar{C} - относительная концентрация H_2SO_4 в потоке, $\bar{C} = c_{\max} / c_{\text{ср}}$, 1 - естественный поток; 2 - поток при установке сепаратора: а - с АЛ – завихрителем, б - с пристеночным завихрителем.

В четвертой главе «Совершенствование оптического метода контроля концентрации серной кислоты путем введения сепаратора и практическая реализация автоматизированной непрерывной системы в технологический процесс» рассматривается возможность уменьшения выбросов капельной серной кислоты в атмосферу за счет автоматического контроля процессов и отдельных приборов.

Измерения оптической плотности в потоке капельной серной кислоты проводились в соответствии с ГОСТ 4204-77 «Серная кислота. Технические условия». Оптический пылемер работал с длиной волны $\lambda=530$ нм. Чистота оптики пылемера обеспечивается непрерывной подачей чистого сжатого воздуха в его внутренний корпус, что предотвращает диффузионное распространение капельной фазы серной кислотой во внутренней части оптического пылемера.

Результаты измерений приведены на рис. 10. Использование комплексной измерительной системы «сепаратор – оптический пылемер» позволяет получить линейную зависимость $D=f(C)$, в отличие от явно нелинейной зависимости полидисперсного потока. Экспериментальные даны хорошо согласуются с теоретическим законом Бугера-Ламберта-Бера, из которого получается известная прямая пропорциональность оптической плотности от концентрации.

Необходимость формирования монодисперсного потока в сечениях установки оптического пылемера связана с его конструктивными и технологическими особенностями, приводящими к снижению эффективности работы измерительно-контрольного устройства при наличии полидисперсных сред. Это связано с закономерностями прохождения сигнала оптического пылемера в потоках содержащих капли серной кислоты различной крупности. Процесс ослабления излучения запыленной газовой средой

описывается законом ослабления Бугера-Ламберта-Бера. В качестве независимой переменной вводится массовая концентрация пыли C . В качестве величины, определяющей степень ослабления излучения, применяется коэффициент ослабления $\beta_{ом}$, нормированный на единицу массы контролируемого компонента.

$$\beta_{ом} = \frac{\beta_{ос}}{\rho} = \frac{\beta_0}{C} = \frac{3k}{4} \int_0^{\infty} \frac{\varphi_{n(x)}}{X} K_0(X) dx, \quad (\text{м}^2/\text{г}), \quad (10)$$

где: $\beta_{ос}$ - коэффициент ослабления, нормированный на единицу объема контролируемого компонента;

ρ - плотность вещества ($\text{г}/\text{м}^3$);

β_0 - объемный коэффициент ослабления [$\text{м}^2/\text{м}^3$];

X - размер одиночной частицы;

$\varphi_{n(x)}$ - плотность распределения числа частиц по размерам;

$K_0(X)$ - безразмерный фактор эффективности ослабления частицы размером K ;

$k = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны облучающего света (мкм).

При движении потоков включающих в себя полидисперсную фазу капельной серной кислоты выражение (10) является нестационарной функцией, зависящей от различных факторов. В случае приведения потока к виду монодисперсной среды выражение (10) значительно упрощается, так как $\varphi_{n(x)} = \text{const}$, X - не меняется во времени, $X = \text{const}$ и, соответственно, коэффициент $\beta_{ом}$ не зависит, в исследуемом сечении, от изменения параметров газового потока во времени.

Из данных рисунка 10 видно, что погрешность измерения оптической плотности при полидисперсном и монодисперсном потоках составляет при концентрации $C=30 \text{ г}/\text{м}^3$, соответственно, $\pm 26\%$ и $\pm 3,5\%$. Получение достоверного сигнала концентрации паров серной кислоты в газоходе при измерении полидисперсного потока производится с применением измерительной пары, в которую входит сепаратор-оптический пылемер, позволяющий производить измерения в стабилизированном монодисперсном потоке. Сепаратор размещается непосредственно в газоходе и в период своей работы формирует струю монодисперсного потока в общем потоке газов. Таким образом, в предложенной измерительной схеме, сепаратор выполняет функцию первичного преобразователя, который преобразует сигнал «неудобный» для дальнейшей обработки, в частности полидисперсный поток, в «удобный» сигнал, то есть в монодисперсный поток. Фокусировка оптической пары пылемера устроена так, что измеряемый телесный угол располагается в центре стабилизированной монодисперсной части потока, поэтому на период измерения

обеспечивается достоверная пропорциональная взаимосвязь выходного сигнала, в данном случае оптической плотности, от массовой концентрации паров серной кислоты.

На рисунке 11 показано, что применение сепаратора не только убирает случайную составляющую погрешности, связанную с полидисперсностью потока, но и обнаруживает наличие систематической погрешности оптического пылемера, которая уменьшается в 1,5 раза.

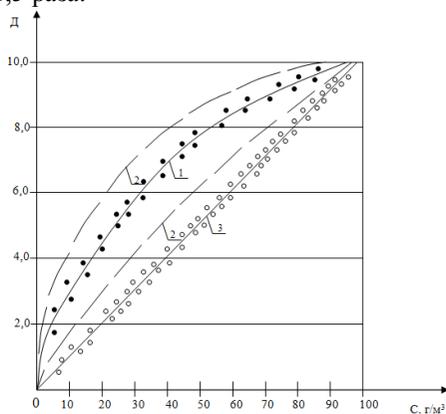


Рисунок 10. Статическая характеристика оптического пылемера: 1 – без применения сепаратора; 2 – доверительный интервал; 3 – с применением сепаратора.

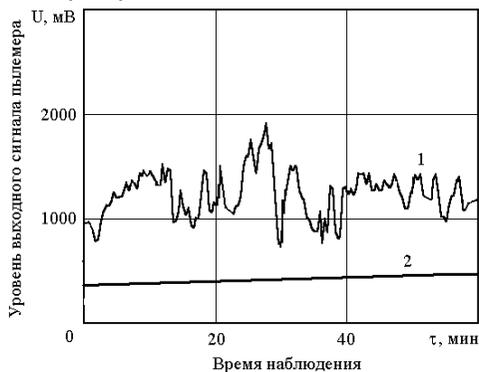


Рисунок 11. Изменение уровня выходного сигнала оптического пылемера во времени: 1 - до установки сепаратора; 2 - после установки сепаратора.

Измерительная схема оптической системы контроля показана на рисунке 12, откуда видно что измерительная схема оптического

пылемера без применения микроконтроллера, преобразующего нелинейную статическую характеристику в линейную становится более простой и точной. В результате применения измерительного комплекса сепаратор-оптический пылемер осуществляется непрерывный автоматизированный контроль за выбросами в атмосферу по всем основным компонентам, появляется возможность непосредственно влиять на содержание паров серной кислоты, SO_2 и SO_3 в отводящих потоках путем изменения параметров процесса производства серной кислоты: температуры и качества воды при охлаждении, сушки, изменении технологического режима. При этом происходит более полная нейтрализация токсичных компонентов выбросов.

Таким образом, применение сепаратора позволяет, за счет линеаризации статической характеристики оптического пылемера, значительно повысить точность измерения концентрации серной кислоты, а также упростить измерительную схему, и следовательно, сделать систему контроля более надежной и недорогой.

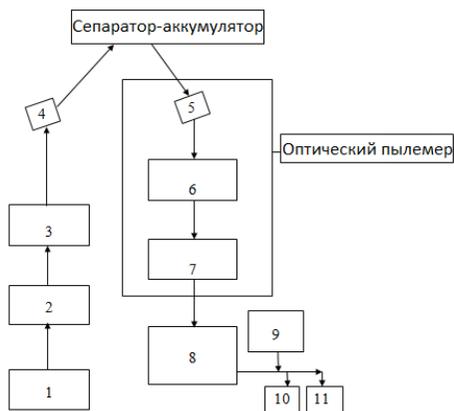


Рисунок 12. Измерительная схема оптической автоматизированной системы контроля концентрации капельной серной кислоты: 1 – напряжение от сети; 2 – трансформатор; 3 – блок стабилизатора по току; 4 – осветитель 24 ГК; 5 – фотоприемник ФД 24 К; 6 – усилитель тока; 7 – преобразователь в аналоговую форму сигнала; 8 – блок дистанционной передачи сигнала; 9 – сигнализация; 10 – самописец; 11 – пульт ЭВМ.

Основные результаты и выводы

1. Усовершенствован оптический метод контроля концентрации капельной фазы серной кислоты, позволяющий за счет линеаризации статической характеристики оптического пылемера, уменьшить случайную составляющую погрешности измерения оптической плотности при полидисперсном и монодисперсном потоках, соответственно, с $\pm 26\%$ до $\pm 3,5\%$, а систематическую составляющую уменьшить в 1,5 раза, а также значительно упростить измерительную схему, и следовательно, сделать систему контроля более надежной и недорогой.

2. Для формирования монодисперсного распределения жидкостных фаз в потоке создан аэродинамический стенд, позволяющий исследовать течение двухфазного потока при непрерывном измерении его давления и скорости в различных координатах и определение гидравлического сопротивления рабочих участков по ходу движения потока.

3. Установлено, что в отходящих газах капельная фаза серной кислоты, имеющая полидисперсный вид, переходит в монодисперсный вид при следующих условиях: в момент направленного формирования потока с числом Рейнольдса от 2000 до 600000; в зависимости от типа применяемого завихрителя и размера зоны приосевого пониженного давления; гидравлического сопротивления; от интенсивности и степени закрутки потока в сепараторе.

4. Определены эмпирические зависимости распределения осевой и вращательной составляющей скорости потока, а также распределения давления в потоке по радиусу сепаратора и проведено их сравнение с экспериментальными данными, что составило в среднем 4%.

5. На основе исследований разработаны практические рекомендации по контролю параметрами технологического процесса получения серной кислоты в зависимости от концентрации H_2SO_4 в потоке.

6. Создана автоматизированная система контроля «сепаратор-пылемер», обеспечивающая непрерывный контроль основных параметров технологического процесса и экологического контроля, которая без значительных доработок может быть использована в промышленных производствах на всех участках перемещения многофазных промышленных потоков газов.

7. Оптическая система контроля «сепаратор-пылемер» внедрена на Лениногорском цинковом заводе, что позволило снизить выброс

паров серной кислоты в атмосферу на 20%, увеличить срок службы оборудования, а также улучшить экологическую обстановку в регионе.

8. Результаты диссертационной работы приняты для дальнейшего внедрения на предприятиях цветной металлургии в экологическую программу Восточно-Казахстанской области на 2008-2014 гг.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. . Давыдов Ю.Ф. Контроль процессов производства серной кислоты // Цветные металлы. – 2003. - № 11. – С.92-95.

2. Давыдов Ю.Ф., Горбова Г.М. Оптический линейный преобразователь контроля концентрации серной кислоты // Ползуновский вестник. – 2010 – № 2. – С. 113-114.

3. Давыдов Ю.Ф., Горбова Г.М. Конструкция оптической системы контроля процессов производства серной кислоты // Ползуновский вестник. – 2010 – № 2. – С. 102-104.

4. Боченинский В.П., Давыдов Ю.Ф. Гидравлические исследования устройств по разделению и соединению потоков. Материалы научно-технической конференции КАМАЗ-КАМПИ-Набережные челны, КАМПИ, 1990. – С.26.

5. Давыдов Ю.Ф., Колесников А.А. Применение сепараторов-аккумуляторов для формирования двух и многофазных потоков. //Новые строительные технологии. Сборник научных трудов, посвященный 40-летию строительного факультета. Сиб. ГИУ.-Новокузнецк, 2000. – С.277-285.

6. Вишняков С.Н., Седелев В.А., Давыдов Ю.Ф. Стабилизация неочищенных пылегазовых потоков при непрерывном контроле пылегазовых параметров пирометаллургических процессов // Интеграция науки, образования и производства в современных условиях (ВКТУ, 29-31 марта, 2000 г.): Материалы республиканской научно-технической конференции, ВК ТУ. - г.Усть-Каменогорск, 2000. - с.84-85.

7. Давыдов Ю.Ф., Седелев В.А., Вишняков С.Н. Применение сепараторов двухфазных потоков для непрерывного контроля концентрации паров серной кислоты // Вестник ВК ТУ. - 2000. - N 1. - с.85-89.

8. Седелев В.А., Вишняков С.Н., Давыдов Ю.Ф. Проблемы и решения непрерывного контроля параметров пылегазовых потоков поступающих в атмосферу от предприятий цветной металлургии. // Международная конференция. Научно-технические проблемы рационального потребления воздуха “Воздух Азии – 21 век”: Материалы конференции, Алматы, Казахстан, Сентябрь 26-28, - 2000.

- С.54-55.

9. Седелев В.А., Вишняков С.Н., Давыдов Ю.Ф. Контроль теплового режима работы отдельных узлов сернокислотного производства предприятий цветной металлургии на основе непрерывного измерения концентрации паров серной кислоты в отходящем потоке. // Меры по борьбе с загрязнением атмосферы. Материалы международного семинара Каз. Гос. Академия им. Рыскулова Т.- Алматы, 2000г - С.10

10. Седелев В.А., Вишняков С.Н., Давыдов Ю.Ф. Перспективы применения контроля параметров пылегазовых потоков на предприятиях цветной металлургии // Повышение технического уровня Горно-Металлургических предприятий Казахстана: сб. науч. тр./ ВНИИцветмет. - Усть-Каменогорск, 2000 - 310 с.

11. Давыдов Ю.Ф. Оптимизация и контроль производства серной кислоты на предприятиях цветной металлургии. // Труды ВНИИЦветмета. – 2003. - № 1-2, г.Усть-Каменогорск. – С.99-102.

12. Давыдов Ю.Ф. Методы оптимизации контроля концентрации сернистых компонентов в выбросных трубах сернокислотных производств. // Техника и технологии для защиты окружающей среды (4-5 октября, 2005 г.): Материалы международной научно-практической конференции, г.Усть-Каменогорск, 2005 г. – С.97-100.

13. Давыдов Ю.Ф. Измерительная система для контроля параметров производства серной кислоты // Системы. Методы. Технологии. – 2006. – Т. 2, БГУ, Братск. – С. 117-119.

14. Давыдов Ю.Ф. Автоматизация контроля процессов производства серной кислот на предприятиях цветной металлургии // Strategiczne pytania swaitowej nauki – 2009: Materialy V miedzynarodowej naukowi konferencji, Przemysl –2009 – S. 3-5.

15. Давыдов Ю.Ф. Оптимизация производства серной кислоты на предприятиях цветной металлургии // Актуальные проблемы строительной отрасли: материалы 2-ой всероссийской конференции НГАСУ (Сибстрим), г. Новосибирск, 2009 г. – С 145-146.