

На правах рукописи

АВАТЕФ НАСРАТ

ТЕПЛОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА АППАРАТА МОКРОГО ТИПА ДЛЯ  
ОЧИСТКИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ОТ ОКСИДОВ СЕРЫ

05.04.01. - котлы, парогенераторы и камеры сгорания

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Харьков - 1995

621.18

ЛНБ ім. В. Стефаніка



00330590 (K)

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Харьковском государственном политехническом университете.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент Горбатенко Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор Редько Александр Федорович  
- кандидат технических наук, доцент Назарчук Альберт Павлович

Ведущая организация - Украинское государственное производственно-техническое предприятие "Укранергочермет" (г. Харьков)

Защита состоится "21" сентября 1995г. в 14<sup>30</sup> час. на заседании специализированного совета Д 02.09.12 в Харьковском государственном политехническом университете (310002, г.Харьков-2, МСП, ул. Фрунзе,21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "15" августа 1995г.

Ученый секретарь специализированного совета

 Потетенко О.В.  
ЛНБ ім. В. Стефаніка

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы и степень исследования тематики диссертации.

Ухудшение состояния окружающей среды, обусловленное неуклонным возрастанием антропогенных выбросов, вызывает серьезную озабоченность во всех промышленно развитых странах.

Одним из наиболее массовых и опасных загрязнителей окружающей среды является диоксид серы -  $SO_2$ . Основным источником выбросов  $SO_2$  в Украине являются объекты теплотэнергетики - тепловые электрические станции, промышленные котельные, районные отопительные котельные, подавляющее большинство которых работает на сернистых и высокосернистых топливах. Удельный выброс  $SO_2$  из котлов в зависимости от приведенного содержания серы в топливе составляет 1.5-3.4г/МДж, что в несколько раз превышает действующие в настоящее время нормативы: 0.175...0.250г/МДж для вновь проектируемых котлов и 0.850г/МДж - для действующих котлов. Поэтому становится очевидной необходимость снижения выбросов диоксида серы объектами теплотэнергетики.

В ряде промышленно развитых стран эта проблема решается путем применения сероочистки дымовых газов преимущественно мокрыми методами, основанными на абсорбции  $SO_2$  различными жидкими поглотителями. Эти методы обеспечивают высокую эффективность сероулавливания, но в то же время характеризуются большими капитальными затратами и эксплуатационными расходами.

Снижение указанных затрат требует поиска и применения абсорберов с высокой интенсивностью тепло-массообменных процессов при умеренном энергопотреблении. Одним из перспективных типов в этом отношении является абсорбер с динамическим двухфазным (пенным) слоем.

Однако опыт использования абсорберов этого типа в системах сероочистки дымовых газов ограничен, а имеющиеся материалы по расчету их гидродинамических и тепловых характеристик многочисленны, но противоречивы.

Цель работы: изучить качественно и количественно гидродинамику и теплообмен в пенных абсорберах с различными типами пенообразующих устройств; на основе физического эксперимента получить зависимости гидродинамических и тепловых характеристик от основных геометрических и режимных параметров и на их основе разработать рекомендации по расчету пенных абсорберов для сероочистки дымовых газов.

Методы исследований. При проведении исследований применено планирование эксперимента, статистическая и критериальная обработка его результатов с использованием метода наименьших квадратов.

Для измерения различных физических величин использовались известные методы и приборы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получены и обработаны в виде регрессионных и критериальных уравнений обширные экспериментальные данные, позволившие оценить влияние режимных факторов на основные параметры газожидкостного слоя - гидравлическое сопротивление, высоту слоя, брызгоунос и границы пенного режима в четырех типах контактных устройств; систематизированные данные для контактного устройства струйного типа получены впервые;

- получены и обработаны в виде критериальных уравнений экспериментальные данные по теплообмену между газом и рабочей жидкостью в газожидкостном слое, а также между газожидкостным слоем и поверхностью погруженного теплообменника; впервые показано, что коэффициент теплоотдачи от газа к жидкости зависит от разности температур точки росы газа и рабочей жидкости;

- получены новые экспериментальные данные о степени очистки дымовых газов котлов от оксидов серы в пенных абсорберах.

Практическое значение работы определяется:

повышением эффективности сероочистки дымовых газов мокрыми методами путем применения пенных абсорберов с высокой интенсивностью тепло-массообменных процессов;

повышением эксплуатационной надежности мокрой системы сероулавливания путем исключения из конструкции абсорбера элементов, подверженных налипанию кристаллизующихся продуктов сероочистки;

уточнением расчета основных гидродинамических и тепловых характеристик пенных абсорберов в условиях сероочистки дымовых газов на основе полученных критериальных уравнений.

Достоверность результатов обеспечена использованием известных методов измерений основных параметров, высокоточных стандартных и тщательно отградуированных нестандартных измерительных устройств; дублированием измерений основных параметров различными методами; применением известных статистических методов обработки опытных данных; подтверждена удовлетворительным совпадением полученных результатов с данными других авторов для одинаковых условий.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований гидродинамических и тепловых характеристик пенных абсорберов четырех типов;

- критериальные и регрессионные уравнения для расчета этих ха-

рактических;

- результаты экспериментальных исследований эффективности очистки дымовых газов от  $SO_2$  в абсорберах пенного типа; рекомендации по расчету пенных абсорберов в условиях сероочистки дымовых газов.

Личный вклад соискательницы в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в том, что она принимала непосредственное участие в формулировании задач исследования и обсуждении его результатов. Ею выполнены: обзор литературы по теме, проектирование экспериментальной установки, участие в проведении экспериментальных исследований, обработка и обобщение опытных данных, разработка рекомендаций по расчету пенных абсорберов для систем мокрой сероочистки дымовых газов.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и получили положительную оценку на международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье", Харьков-Мишкольц, 1994г. и на международной конференции "Проблемы ресурсо- и энергосбережения в энергетике", г. Харьков, 1994г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 работы.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, пять глав, общие выводы, список литературы из 97 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 221 странице машинописного текста, содержит 58 рисунков и 12 таблиц.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, показаны научная новизна результатов и их практическая ценность, сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе содержится обзор литературных источников по теме работы и сформулированы основные задачи исследований. Рассмотрены современные технологии сероочистки дымовых газов и сделан вывод о перспективности применения в ближайшем будущем мокрых технологий с применением абсорберов с динамическим двухфазным слоем.

Проанализированы известные методы расчета гидродинамических и тепловых характеристик этих абсорберов, обоснована необходимость дополнительного их исследования в условиях сероочистки дымовых газов.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, методики проведения эксперимента, обработки и обобщения опытных данных. Принципиальная схема экспериментальной установки представ-

лена на рис.1. Основным элементом установки является модель абсорбционной колонны сечением 0.25\*0.25м и рабочей высотой 1.08м.

Пенный слой создавался с помощью четырех типов контактных устройств, геометрические характеристики которых приведены в табл.1.

Таблица 1.

Геометрические характеристики контактных устройств.

Тип контактного устройства	Толщина решетки диаметр труб; диаметр сопла, мм	Высота переливного порога, мм	Диаметр отверстий или ширина щелей решетки, мм	Свободное сечение тарелки, $S_0$ м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>
Дырчатая тарелка с переливом	5	60	4	0.206
Дырчатая противочувствительная тарелка	5	-	4	0.206
Трубчатая противочувствительная тарелка	16	-	4	0.136
Струйное	5	-	(1.5)	(0.24)

Газ для установки отбирался из основания дымовой трубы одного из котлов Харьковской ТЭЦ-3. Места основных измерений указаны на рис.1.

Расход газа через абсорбер измерялся стандартной диафрагмой с кольцевыми камерами. Перепады давлений измерялись микрометрами МММ-240.

Расходы рабочей и охлаждающей жидкостей измерялись нестандартными сужающими устройствами типа "сопло четверть круга", предварительно отградуированными; перепад давлений на них - стандартными дифманометрами ДТ-50.

Температура газа и жидкостей в различных сечениях потоков измерялась термометрами стандартной градуировки ХА, полупроводниковыми терморезисторами, и, в отдельных случаях, ртутными стеклянными термометрами с ценой деления 0.1С°.

Термо-э.д.с. термпар измерялась потенциометрами ПП-63; сопротивление терморезисторов - измерительным мостом МО-62. Температура пены измерялась медным термометром сопротивление ТСМ-0879-01(100м).

Содержание SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, в газе перед колонной и после нее измерялось приборами "Testo-33" германской фирмы "Testo-Term".

Брызгоунос определялся при использовании в качестве рабочей жидкости едкого натра. Проба газа пропускалась через дренсель с дистиллированной водой, после чего образовавшийся раствор титровали

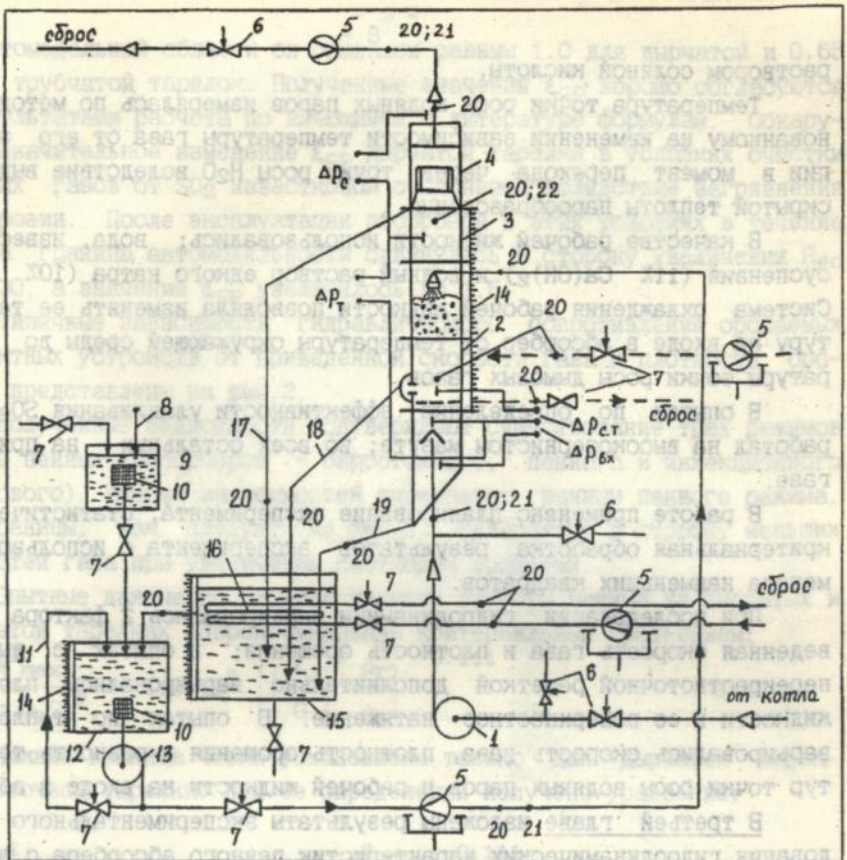


Рис. 1.

Схема экспериментальной установки.

1- вентилятор; 2-съемный блок с тарелками; 3-корпус абсорбера; 4-каплеуловитель; 5-расходомер; 6-регулирующая заслонка; 7-вентиль проходной и регулирующий; 8-подача реагентов; 9-бак для приготовления раствора; 10-фильтр; 11-рециркуляция рабочего раствора; 12-расходный бак; 13-насос; 14-измеритель уровня; 15-бак отстойник; 16-змеевик охлаждения отработавшего раствора; 17-сброс отсепарированной жидкости; 18-отвод жидкости из переливного окна; 19-отвод отработанной жидкости от провальных тарелок; 20-измеритель температуры; 21-измеритель давления; 22-измеритель брызгоуноса.

раствором соляной кислоты.

Температура точки росы водяных паров измерялась по методу, основанному на изменении зависимости температуры газа от его энтальпии в момент перехода через точку росы H<sub>2</sub>O вследствие выделения скрытой теплоты парообразования.

В качестве рабочей жидкости использовались: вода, известковая суспензия (11% Ca(OH)<sub>2</sub>) и водный раствор едкого натра (10% NaOH). Система охлаждения рабочей жидкости позволяла изменять ее температуру на входе в абсорбер от температуры окружающей среды до температуры точки росы дымовых газов.

В опытах по определению эффективности улавливания SO<sub>2</sub> котел работал на высокосернистом мазуте; во всех остальных - на природном газе.

В работе применено планирование эксперимента, статистическая и критериальная обработка результатов эксперимента с использованием метода наименьших квадратов.

При исследовании гидродинамики варьировались 2 фактора - приведенная скорость газа и плотность орошения; в опытах с дырчатой перекрестноточной решеткой дополнительно варьировались плотность жидкости и ее поверхностное натяжение. В опытах по теплообмену варьировались скорость газа, плотность орошения и разность температур точки росы водяных паров и рабочей жидкости на входе в абсорбер.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик пенного абсорбера с различными контактными устройствами. Изучалось влияние типа контактного устройства и различных факторов на основные гидродинамические характеристики: гидравлическое сопротивление контактного устройства, высоту динамического газожидкостного слоя, брызгоунос и границы пенного режима.

Общее сопротивление контактного устройства представлено в виде суммы трех составляющих - сопротивления сухого контактного устройства, статического сопротивления пенного слоя и сопротивления, обусловленного поверхностным натяжением рабочей жидкости. Последнее рассчитывалось по известным соотношениям. Сопротивление сухих и орошаемых контактных устройств определялось экспериментально.

Определены коэффициенты сопротивления сухих контактных устройств, отнесенные к скорости газовой фазы в свободном их сечении. Установлено, что при Re<sub>г0</sub> > 1200 для дырчатой тарелки и Re<sub>г0</sub> > 1500 для трубчатой коэффициент сопротивления не зависит от числа Рейнольдса.

В автомодельной области он оказался равным 1.0 для дырчатой и 0.65 - для трубчатой тарелок. Полученные значения  $\xi_{ср}$  хорошо согласуются с результатами расчета по имеющимся в литературе формулам. Обнаружено значительное изменение  $\xi_{ср}$  дырчатой тарелки в условиях очистки дымовых газов от  $SO_2$  известковой суспензией вследствие загрязнения и коррозии. После эксплуатации абсорбера в этих условиях в течение месяца граница автомодельности сдвинулась в сторону увеличения  $Re_0$  до 2100, а значение  $\xi_{ср}$  увеличилось до 1.5.

Типичные зависимости гидравлического сопротивления орошаемых контактных устройств от приведенной скорости газа и плотности орошения представлены на рис.2.

Полученные зависимости подтверждают существование трех режимов работы пенных абсорберов - барботажного, пенного и инжекционного (волнового). Изломы зависимостей определяют границы пенного режима. Эти границы, как следует из рис.2, сдвигаются в сторону меньших скоростей газа при увеличении плотности орошения.

Опытные данные по верхней границе пенного режима на дырчатых и трубчатой тарелках аппроксимированы критериальным уравнением:

$$\frac{W_{max}^2}{g d_3 S_0^2} = 1.8 \cdot 10^3 \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{ж}} \right]^{-0.111} \quad (1)$$

Нижняя граница четко установлена только для дырчатой перекрестноточной тарелки. Для ее определения получено уравнение:

$$\frac{W_{min}^2}{g d_3 S_0^2} = 0.353 \cdot 10^3 \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{ж}} \right]^{-0.111} \quad (2)$$

В опытах со струйным контактным устройством границы пенного режима не определены.

Аналогичный характер имеют и зависимости высоты пенного слоя от тех же факторов.

В результате статистической обработки опытных данных получены уравнения регрессии в виде:

- для дырчатой перекрестноточной тарелки:

$$\Delta P_T \text{ (или } H) = a_0 + a_1 L_0 + a_2 W_{\Gamma} + a_3 \rho_{ж} + a_4 \delta_{ж} + a_5 L_0^2 + a_6 W_{\Gamma}^2 + a_7 \rho_{ж}^2 + a_8 \delta_{ж}^2 + a_9 L_0 W_{\Gamma} + a_{10} L_0 \rho_{ж} + a_{11} L_0 \delta_{ж} + a_{12} W_{\Gamma} \rho_{ж} + a_{13} W_{\Gamma} \delta_{ж} + a_{14} \rho_{ж} \delta_{ж} \quad (3)$$

- для дырчатой и трубчатой противоточных тарелок и струйного контактного устройства:

$$\Delta P_T (H) = a_0 + a_1 L_0 + a_2 W_{\Gamma} + a_3 L_0^2 + a_4 W_{\Gamma}^2 + a_5 L_0 W_{\Gamma} \quad (4)$$

Значения коэффициентов приведены в табл.2.

Полученные уравнения позволили определить влияние каждого из варьируемых факторов на определяемый параметр.

Таблица 2.

Значения коэффициентов уравнений регрессии

Коэффици- енты	Тип контактного устройства							
	Дырчатая пере- крестноточная тарелка		Дырчатая проти- воточная тарелка		Трубчатая противоточная тарелка		Струйное	
	$\Delta P_T$	N	$\Delta P_T$	N	$\Delta P_T$	N	$\Delta P_T$	N
a <sub>0</sub>	410.13	100.51	423.97	209.91	230.46	134.41	359.3	331.96
a <sub>1</sub>	80.88	24.32	161.35	43.01	53.38	8.97	116.66	66.05
a <sub>2</sub>	201.96	95.31	301.82	85.94	204.97	65.34	187.79	177.78
a <sub>3</sub>	-70.88	-23.96	123.99	23.17	4.37	2.68	0.73	-4.84
a <sub>4</sub>	87.21	26.83	19.33	-19.75	23.07	-8.16	14.02	14.25
a <sub>5</sub>	85.84	16.25	74.80	-19.70	45.93	6.76	77.83	48.65
a <sub>6</sub>	-16.63	7.76						
a <sub>7</sub>	0.74	71.39						
a <sub>8</sub>	-3.45	-29.08						
a <sub>9</sub>	43.51	28.67						
a <sub>10</sub>	109.97	-15.06						
a <sub>11</sub>	-165.31	10.59						
a <sub>12</sub>	-36.51	-8.95						
a <sub>13</sub>	25.48	2.56						
a <sub>14</sub>	-70.96	-22.93						

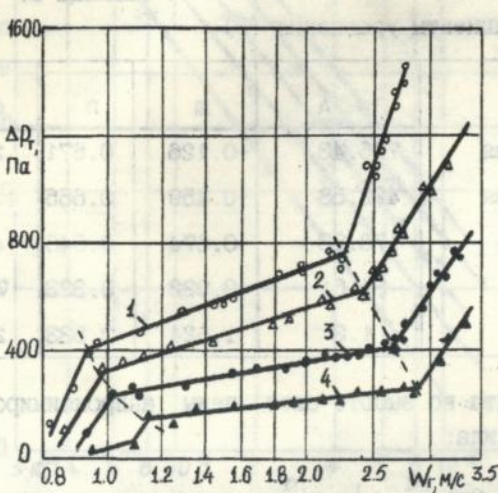
В результате критериальной обработки опытных данных по гидравлическому сопротивлению контактных устройств получены критериальные уравнения вида:

$$\frac{\Delta P_T}{\Delta P_{СКУ}} = 1 + A \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \right]^n \left( \frac{L}{L_{СТ}} \right)^m \quad (5)$$

Значения коэффициентов и среднеквадратичная погрешность аппроксимации приведены в табл.3.

Корреляция опытных данных по сопротивлению на одном из контактных устройств (трубчатая тарелка) представлена на рис.3. Поскольку сопротивление сухого струйного контактного устройства весьма мало (1...2 Па) опытные данные по сопротивлению аппроксимированы со среднеквадратичной погрешностью 5.76% другим критериальным уравнением:

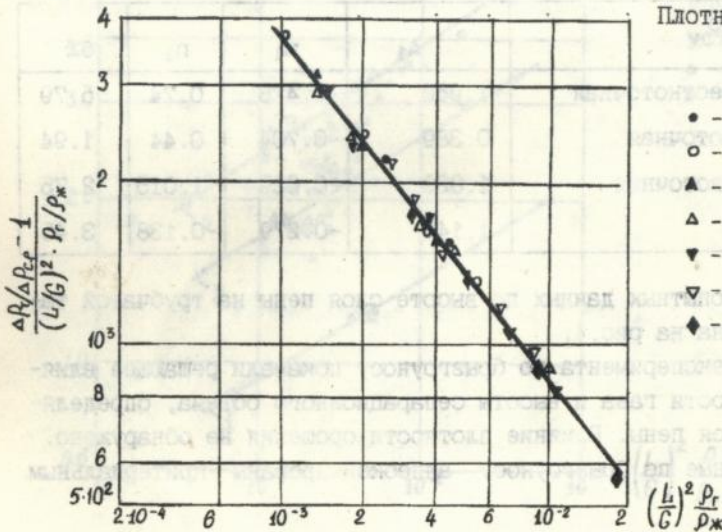
$$\frac{\Delta P_{Сл}}{(W_T^2 \rho_T)/2} = 18.6 \left( \frac{W_T^2}{g l} \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \right)^{-0.564} \left( \frac{L}{L_{СТ}} \right)^{0.482} \quad (6)$$



Плотность орошения  
 $\text{м}^2/\text{м}^3\text{ч}$ :

- 1 - 24.5
- 2 - 14.7
- 3 - 6.5
- 4 - 3.4

Рис. 2. Зависимость  $\Delta P_T$  от  $W_T$  для дырчатой перекрестноточной тарелки



Плотность орошения  
 $\text{кг}/(\text{м}^2\text{ч})$

- - 8300
- - 10200
- ▲ - 11900
- △ - 12300
- ▼ - 13000
- ▽ - 14700
- ◆ - 17200

Рис. 3. Корреляция данных по сопротивлению трубчатой тарелки

В этом уравнении в качестве линейного размера, входящего в критерий Фруда, принята капиллярная постоянная.

Таблица 3.

Коэффициенты уравнения (5)

Тип контактного устройства	A	m	n	б, %
Дырчатая перекрестноточная незагрязненная тарелка	766.43	-0.126	0.671	2.62
Дырчатая перекрестноточная загрязненная тарелка	422.58	-0.459	0.655	10.28
Дырчатая противоточная тарелка	178.83	0.674	0.548	4.27
Трубчатая противоточная тарелка	34.61	0.022	0.323	4.04
Струйное	1.3	1.624	-0.533	2.37

Результаты эксперимента по высоте слоя пены аппроксимированы критериальным уравнением вида:

$$\frac{W_0^2}{g H} = A_1 \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right]^{m_1} \left( \frac{L}{L_{\text{СТ}}} \right)^{n_1} \quad (7)$$

Значения коэффициентов уравнения приведены в табл.4.

Таблица 4.

Коэффициенты уравнения (7)

Тип контактного устройства	A <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>	б%
Дырчатая перекрестноточная тарелка	1.962	-0.478	0.74	5.79
Дырчатая противоточная тарелка	0.389	-0.704	0.44	1.94
Трубчатая противоточная тарелка	1.829	-0.629	1.015	2.75
Струйное	1.142	-0.279	-0.138	3.45

Корреляция опытных данных по высоте слоя пены на трубчатой тарелке представлена на рис.4.

Результаты эксперимента по брызгоуносу показали решающее влияние на него скорости газа и высоты сепарационного объема, определяемого высотой слоя пены. Влияние плотности орошения не обнаружено.

Опытные данные по брызгоуносу аппроксимированы критериальным уравнением вида

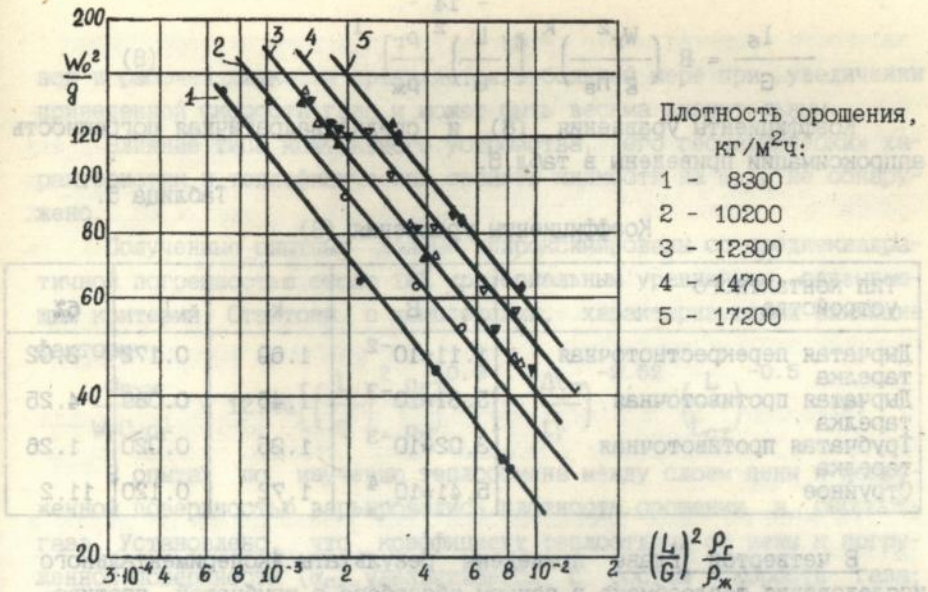


Рис. 4. Корреляция данных по высоте слоя пены на трубчатой тарелке

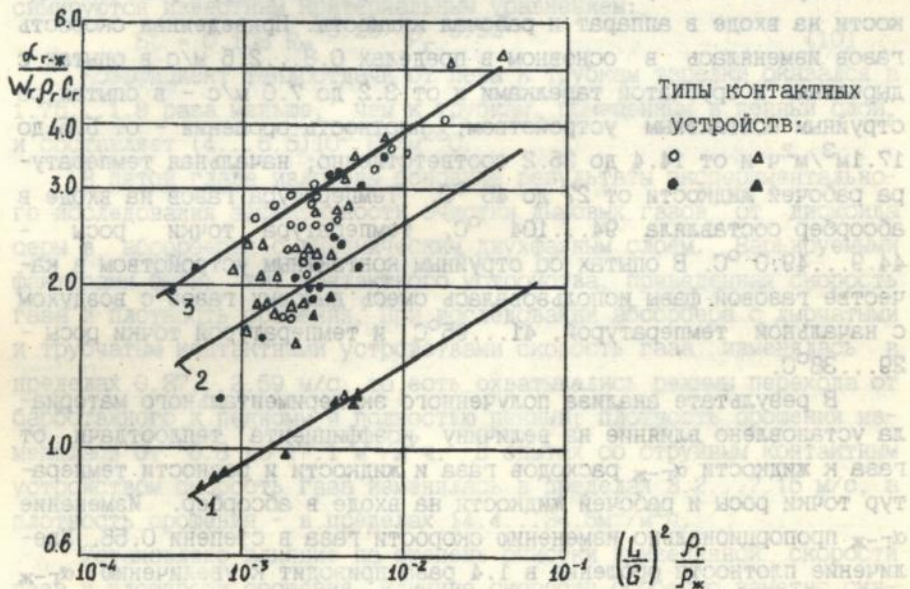


Рис. 5. Корреляция опытных данных по  $\alpha_{r-j}$ .

$$\frac{l_g}{G} = B \left( \frac{w_{\Gamma}^2}{g h_a} \right)^k \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{ж}} \right]^l \quad (8)$$

Коэффициенты уравнения (8) и среднеквадратичная погрешность аппроксимации приведены в табл.5.

Таблица 5.

Коэффициенты уравнения (8)

Тип контактного устройства	B	k	l	6%
Дырчатая перекрестноточная тарелка	$1.11 \cdot 10^{-2}$	1.69	0.172	3.02
Дырчатая противоточная тарелка	$5.31 \cdot 10^{-3}$	1.45	0.089	4.25
Трубчатая противоточная тарелка	$3.02 \cdot 10^{-3}$	1.35	0.020	1.26
Струйное	$5.41 \cdot 10^{-4}$	1.72	0.120	11.2

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена в пенном абсорбере с трубчатой противоточной тарелкой в системе "вода-дымовые газы". В опытах по изучению теплообмена между газом и жидкостью варьировались: приведенная скорость газов, плотность орошения, температура рабочей жидкости на входе в аппарат и рабочая жидкость. Приведенная скорость газов изменялась в основном в пределах 0.8...2.6 м/с в опытах с дырчатыми и трубчатой тарелками и от 3.2 до 7.0 м/с - в опытах со струйным контактным устройством; плотность орошения - от 5.5 до  $17.1 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  и от 14.4 до 35.2 соответственно; начальная температура рабочей жидкости от 27 до 45 °С. Температура газов на входе в абсорбер составляла 94...104 °С, температура точки росы - 44.9...49.0 °С. В опытах со струйным контактным устройством в качестве газовой фазы использовалась смесь дымовых газов с воздухом с начальной температурой 41...95 °С и температурой точки росы - 29...38 °С.

В результате анализа полученного экспериментального материала установлено влияние на величину коэффициента теплоотдачи от газа к жидкости  $\alpha_{\Gamma-ж}$  расходов газа и жидкости и разности температур точки росы и рабочей жидкости на входе в абсорбер. Изменение  $\alpha_{\Gamma-ж}$  пропорционально изменению скорости газа в степени 0.56. Увеличение плотности орошения в 1.4 раза приводит к увеличению  $\alpha_{\Gamma-ж}$  в 1.2 раза. Влияние разности начальных температур точки росы га-

зов и рабочей жидкости проявляется в большей мере при увеличении приведенной скорости газа и может быть весьма значительным.

Влияние типа контактного устройства, его геометрических характеристик и теплофизических свойств жидкости на  $\alpha_{г-ж}$  не обнаружено.

Полученные опытные данные аппроксимированы со среднеквадратичной погрешностью около 12% критериальным уравнением, связывающим критерий Стэнтона с комплексами, характеризующими влияющие факторы:

$$\frac{\alpha_{г-ж}}{W_{г-сг} \rho_{г}} = 12.44 \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \right]^{0.3} \left( 1 - \frac{\Delta t_{п}}{t_{г}} \right)^{-2.52} \left( \frac{L}{L_{сг}} \right)^{-0.5} \quad (9)$$

В опытах по изучению теплообмена между слоем пены и погруженной поверхностью варьировались плотность орошения и скорость газа. Установлено, что коэффициент теплоотдачи от пены к погруженной поверхности ( $\alpha_{п}$ ) увеличивается с ростом скорости газа; темп роста  $\alpha_{п}$  с ростом  $W_{г}$  снижается. Плотность орошения не оказывает заметного влияния на  $\alpha_{п}$ .

Полученные результаты с достаточно высокой точностью аппроксимируются известным критериальным уравнением:

$$St = 0.108 R_w^{-0.26} P_r^{-0.52} \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи от пены к трубкам тарелки оказался в 1.75...1.8 раза меньше, чем к трубкам, помещенным в пенный слой, и составляет  $(4...6.5)10^3$  Вт/м<sup>2</sup>С.

В пятой главе изложены основные результаты экспериментального исследования эффективности очистки дымовых газов от диоксида серы в абсорберах с динамическим двухфазным слоем. Варьируемыми факторами были: тип контактного устройства, приведенная скорость газа и плотность орошения. При исследовании абсорбера с дырчатыми и трубчатыми контактными устройствами скорость газа изменялась в пределах 0.37...2.59 м/с, то есть охватывались режимы перехода от барботажного к пенному и полностью пенный; плотность орошения изменялась от 6.8 до 17.1 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч. В опытах со струйным контактным устройством скорость газа изменялась в пределах 3.2...7.15 м/с, а плотность орошения - в пределах 14.4...34.5 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

Установлено влияние на степень очистки приведенной скорости газа и плотности орошения. Влияние скорости особенно заметно сказывается в области переходного режима. По мере приближения к верхней границе пенного режима это влияние уменьшается. Влияние

плотности орошения менее существенно и проявляется через изменение высоты слоя пены. Тип контактного устройства и его геометрические характеристики не оказывают влияния на степень очистки газов. Абсолютные значения степени очистки дымовых газов от  $SO_2$  для всех типов контактных устройств весьма близки между собой: при работе с суспензией  $Ca(OH)_2$  они находятся в пределах 40...97.3% (на одной ступени контакта); при работе с  $NaOH$  - 40...95.3% (в указанных выше пределах изменения определяющих параметров).

Обнаружено значительное загрязнение дырчатых тарелок кристаллами  $CaSO_4$  и продуктами коррозии при работе с известковой суспензией.

Отмечено, что в пенных абсорберах попутно происходит улавливание  $NO_x$ , содержащихся в дымовых газах. Степень очистки составляет 39...53%.

В этой же главе приведены некоторые рекомендации по выбору и расчету пенных абсорберов для установок сероочистки дымовых газов, вытекающие из результатов исследования.

В заключении кратко резюмированы основные результаты и обобщающие выводы.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены основные гидродинамические характеристики абсорберов с динамическим двухфазным слоем: гидравлическое сопротивление, высота газо-жидкостного слоя, брызгоунос и границы пенного режима. Установлено влияние геометрических и режимных факторов (типа контактного устройства, приведенной скорости газовой фазы, плотности орошения, плотности и поверхностного натяжения жидкой фазы).

2. Получены уравнения регрессии, связывающие указанные гидродинамические характеристики с перечисленными режимными факторами для абсорберов с четырьмя типами контактных устройств.

3. получены обобщающие критериальные уравнения, позволяющие определять расчетным путем основные гидродинамические характеристики в зависимости от определяющих режимных и конструктивных факторов.

4. Определены основные факторы, влияющие на интенсивность теплообмена между газом и рабочей жидкостью в пенных абсорберах для сероочистки дымовых газов: расходные характеристики газовой и жидкой фаз и разность температур точки росы газов и жидкости на входе в абсорбер. Получено обобщающее критериальное уравнение для

расчета коэффициента теплоотдачи от газа к жидкости в пенном слое.

5. Подтверждена применимость известного критериального уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи от слоя пены к поверхности погруженного теплообменника. Предложено аналогичное критериальное уравнение для коэффициента теплоотдачи от газо-жидкостной смеси к поверхности трубчатой решетки.

6. Получены новые опытные данные об эффективности сероочистки дымовых газов мокрыми методами с использованием абсорберов пенного типа. Степень очистки вблизи верхней границы пенного режима достигает 90...95% на одной ступени контакта.

7. Приведены рекомендации по расчету пенных абсорберов для сероулавливающих установок, основанные на результатах исследования.

Публикации по работе.

1. Горбатенко В.Я., Насрат А. Гидродинамика и теплообмен в пенных абсорберах для очистки дымовых газов от оксидов серы. - Тезисы доклада на международной научно-технической конференции: "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Харьков - Мишкольц, 1994, с.176.

2. Горбатенко В.Я., Насрат А. Гидравлические характеристики абсорберов с динамическим двухфазным слоем в условиях сероочистки дымовых газов. - Тезисы доклада на международной научно-технической конференции: "Проблемы ресурсо- и энергосбережения в энергетике". - Харьков, 1994, с.133.

#### Анотація

Насрат Аватеф. "Теплообмін та гідродинаміка апарату мокрого типу для очищення продуктів згоряння від оксидів сірки".

Дисертація у формі рукопису на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.04.01 - котли, парогенератори та камери згоряння. Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1995.

Виконано експериментальне дослідження гідродинаміки та теплообміну в абсорберах з динамічним двофазовим шаром в умовах очищення димових газів від оксидів сірки.

Визначено вплив конструктивних та режимних факторів на основні параметри абсорберів з різними контактними пристроями - гідравлічний опір, висоту газо-рідинного шару, винос бризок, теп-

ловіддачу від газу до робочої рідини та від газо-рідинного шару до зануреного теплообмінника. Запропоновано критеріальні рівняння для розрахунку означених параметрів.

Представлені результати експериментального дослідження ефективності очищення димових газів котлів від діоксиду сірки лужними розчинами в абсорберах з динамічним двофазовим шаром. Приведені рекомендації відносно розрахунку цих абсорберів.

Ключові слова: очищення газів, оксиди сірки, абсорбер, динамічний двофазовий шар, гідравлічний опір, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, контактний пристрій.

#### Abstract

Nasrat Awatef. Heat exchanges and hydrodynamic of the wet-type devices for cleaning of combustion products from Sulphur oxides.

The dissertation in form of a manuscript is submitted for a Candidate Degree in Technical Sciences, speciality 05.04.01 - boilers, steam-generations and combustion boxes.

Kharkov State Polytechnic University, Kharkov, 1995.


The experimental investigation of hydrodynamics and heat exchange in absorbers with dynamic two-phase layer under the conditions of smoke-gases sulphur-purification has been carried out.

The influence of construction and regime factor on basic parameters of absorbers with different contact system-hydraulic resistance, height of gas-liquid layer, splashe-carrying away, heat-return from gases to working liquid and from gas-liquid layer to immersed surface - has been defined.

The criterion equations for calculation of parameters enumerated have been suggest.

The results of experimental investigation of cleaning efficiency of boiler smoks gases from sulphur dioxide by alkaline solutions in absorbers with dynamic two-phase layer have been presented.

The recomendations for calculations of absorbers of the indicated type have been given.



Подписано к печати 07.06.95. Формат 60x84. 1/16.  
Бумага типографская. Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз.

---

Редакционно-издательский отдел  
Харьковский государственный политехнический университет  
310002, г. Харьков-2, ГСП, ул. Фрунзе, 21.

AB 32.906