

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
1 ПОНЯТИЕ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	15
1.1 Классификация аэродисперсных систем	15
1.2 Источники возникновения аэрозолей	17
1.3 Размер и форма дисперсных частиц	19
1.4 Антропогенные источники аэрозолей	20
1.4.1 Пыль, возникающая в металлургическом производстве	20
1.4.2 Источники пылеобразования в машиностроении	21
1.4.3 Характеристика вредных выбросов в химической промышленности	26
1.4.3.1 Источники пыли в сернокислотном производстве	27
1.4.3.2 Характеристика пыли при производстве фосфорсодержащих соединений и минеральных удобрений	29
1.4.4 Источники выделения пыли в цементной промышленности	30
1.4.5 Пылевыделение при сжигании топлива	31
1.5 Необходимость улавливания аэрозолей различных веществ	32
2 ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ	35
2.1 Классификация оборудования, механизмы и способы очистки промышленных газов	37
2.2 Оборудование для сухой очистки газов	37
2.2.1 Гравитационное осаждение	37
2.2.2 Инерционное осаждение	39
2.2.3 Центробежное осаждение	41
2.2.3.1 Ротационные пылеуловители	41
2.2.3.2 Циклоны	42
2.2.3.3 Циклоны низкого давления	45
2.2.3.4 Вихревые пылеуловители со встречно-закрученными потоками	47
2.2.4 Очистка газов фильтрования	50
2.2.5 Электрофильтры	52
2.3 Оборудование для мокрой очистки газов	56
2.3.1 Полые газопромыватели	56
2.3.2 Насадочные скрубберы	58
2.3.3 Тарельчатые аппараты	60
2.3.4 Аппараты ударно-инерционного действия	62
2.3.5 Скрубберы с подвижной насадкой	64
2.3.6 Центробежные скрубберы	66
2.3.7 Механические газопромыватели	68
2.3.8 Скоростные пылеуловители	69
2.3.9 Существующие способы распыления жидкостей в мокром газоочистном оборудовании	73
2.3.9.1 Гидравлический способ распыления	74

2.3.9.2 Механический способ распыления	75
2.3.9.3 Пневматический способ распыления	75
2.3.9.4 Электростатический способ распыления	76
2.3.9.5 Распыление жидкости с помощью ультразвукового воздействия	76
2.4 Повышение эффективности сухого газоочистного оборудования за счет предварительной подготовки газодисперсного потока	83
2.4.1 Кондиционирование	84
2.4.2 Охлаждение газов	85
2.4.3 Подогрев газов	85
2.4.4 Увлажнение газов	85
2.4.5 Укрупнение размеров частиц	87
2.4.5.1 Использование эффекта конденсации	88
2.4.5.2 Ионизация	88
2.4.5.3 Турболизация потока	89
2.4.5.4 Акустическая коагуляция	89
2.5 Проблемы существующего оборудования для очистки отходящих газов от дисперсных примесей	90
3 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОАГУЛЯЦИЯ	93
3.1 Анализ факторов, влияющих на эффективность процесса коагуляции	95
3.2 Акустические излучатели для воздействия на газовые среды	101
3.3 Аэродинамические излучатели	102
3.3.1 Газоструйные свистки	102
3.3.2 Динамические сирены	107
3.4 Электромеханические преобразователи (излучатели)	115
3.4.1 Электромеханические преобразователи магнитострикционным активным элементом	с 116
3.4.2 Электромеханические преобразователи пьезоэлектрическим активным элементом	с 118
3.4.2.1 Пьезоэлектрический ультразвуковой излучатель с малой площадью излучения	119
3.4.2.2 УЗКС с излучателями в виде изгибно-колеблющегося диска	121
3.5 Существующие варианты конструкций газоочистного оборудования, основанного на применении акустического воздействия	124
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ	128
4.1 Общий подход к выявлению оптимальных режимов акустического воздействия для коагуляции газодисперсных систем	129
4.2 Вероятностная модель Смолуховского парных соударений дисперсных частиц	130
4.3 Определение ортокинетической компоненты ядра коагуляции	135
4.4 Определение гидродинамической компоненты ядра коагуляции	136
4.5 Теоретический анализ оптимальных условий процесса	165

акустической коагуляции	
5 АППАРАТЫ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ	169
5.1 Общие требования к аппаратам для ультразвуковой коагуляции аэрозолей	169
5.1.1 Основные требования к электронным генераторам	170
5.1.2 Основные требования к ультразвуковым колебательным системам и выбор оптимальной конструкции	173
5.2 Разработка полуволновых пьезоэлектрических колебательных систем	174
5.2.1 Разработка пьезоэлектрического преобразователя	176
5.2.2 Выбор типа пьезокерамических элементов преобразователя	177
5.2.3 Ультразвуковая колебательная система на основе одноэлементного электроакустического преобразователя	179
5.2.4 Тепловой режим одноэлементных электроакустических преобразователей	184
5.2.5 Ультразвуковая колебательная система на основе многоэлементного электроакустического преобразователя	189
5.2.6 Тепловой режим многоэлементных электроакустических преобразователей	192
5.3 Разработка бустерного звена	194
5.4 Концентратор механических колебаний	199
5.5 Дисковый излучающий элемент	208
5.6 Разработка излучателя для воздействия на газовой среде и передачи колебаний через газовой промежуток	212
5.6.1 Выбор диаметра и резонансной частоты излучателя	213
5.6.2 Выбор вида колебаний	214
5.6.3 Определение базовой толщины излучателя	215
5.6.4 Разработка конструкции присоединительного хвостовика	215
5.6.5 Определение формы фронтальной поверхности излучателя	217
5.6.5.1 Дисковый излучатель с плоской фронтальной поверхностью и корректирующим амплитуды ступенчатым профилем тыльной стороны	218
5.6.5.2 Дисковый излучатель с фазовыравнивающей фронтальной поверхностью, формирующий плоскую волну	220
5.6.5.3 Фокусирующий УЗ–дисковый излучатель	221
5.6.6 Корректировка амплитуд колебаний	223
5.6.7 Модель осесимметричных колебаний	225
5.6.7.1 Дополнительные критерии оптимизации	232
5.7 Разработка фазозакрывающей накладки для излучающего элемента с преимущественным излучением одной фазы	238
5.8 Разработка конструкции отражателя	242
5.9 Практические конструкции ультразвуковых аппаратов для коагуляции аэрозолей	243

5.9.1	Ультразвуковые колебательные системы	243
5.9.2	Определение основных технических параметров ультразвуковых колебательных систем	249
5.9.2.1	Определение амплитуды колебаний излучающей поверхности	249
5.9.2.2	Определение характеристик создаваемого акустического поля	255
5.10	Изготовленные ультразвуковые аппараты для коагуляции аэрозолей	264
6	<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b>	270
6.1	Предварительные экспериментальные исследования	270
6.2	Результаты экспериментов по определению возможности ультразвуковой коагуляции	272
6.2.1	Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований	272
6.3	Результаты измерений параметров ультразвукового поля	276
6.3.1	Определение коэффициента ослабления ультразвуковых колебаний	276
6.3.2	Определение распределения уровня звукового давления в аэрозольной камере	277
6.4	Проведение экспериментальных исследований по определению эффективности ультразвуковой коагуляции	282
6.4.1	Исследование эффективности УЗ коагуляции аэрозолей	282
6.4.2	Исследование эволюции дисперсного состава аэрозоля в ультразвуковом поле	290
6.4.3	Определение зависимости эффективности коагуляции аэрозолей от частоты воздействия	293
6.4.4	Определение зависимости эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей от уровня звукового давления	297
6.4.5	Определение оптимальных режимов ультразвуковой коагуляции аэрозолей, переносимых воздушными потоками	300
7	<b>РАЗРАБОТКА ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b>	304
7.1	Описание теоретической модели процесса центробежно- акустического отделения частиц в закрученном потоке	304
7.1.1	Принятые допущения в математической модели движения дисперсных частиц в закрученном потоке с одновременной УЗ коагуляцией	306
7.1.2	Математическое описание процесса центробежной сепарации высокодисперсных частиц	311
7.1.3	Математическое описание процесса УЗ коагуляции	313
7.1.4	Определение степени укрупнения частиц от времени УЗ воздействия	317
7.1.5	Определение оптимальной скорости газодисперсного	322

потока	
7.1.6	Определение степени укрупнения частиц при оптимальных ускорениях 326
7.1.7	Определение времени полной сепарации при различных значениях, уровня звукового давления, частоты воздействия скорости газового потока и начальной концентрации 327
7.1.8	Определение времени полной сепарации в зависимости от уровня звукового давления 329
7.1.9	Определение времени полной сепарации в зависимости от частоты УЗ воздействия 330
7.1.10	Определение времени полной сепарации в зависимости от начальной концентрации дисперсных частиц 332
7.2	Разработка оборудования для центробежно-акустического улавливания дисперсных примесей 336
7.2.1	Описание конструкции первой ступени очистки – агломератора 337
7.2.2	Описание конструкции аппарата со встречно-закрученными потоками, дополненного УЗ излучателями 339
7.3	Определение режимов работы и конструктивных параметров разработанного оборудования, обеспечивающих максимальную эффективность улавливания дисперсных примесей 342
7.3.1	Определение режимов работы и конструктивных параметров агломератора 343
7.3.2	Определение оптимального диаметра вихревой трубы 344
7.3.3	Определение оптимальной тангенциальной скорости газодисперсного потока 345
7.3.4	Определение площади сечения входного и выходного патрубка 346
7.3.5	Определение времени УЗ воздействия и длины вихревой трубы 347
7.4	Исследование функциональных возможностей агломератора 350
7.4.1	Расчет гидравлического сопротивления агломератора 351
7.4.2	Определения оптимального расположения УЗ излучателей 353
7.4.3	Методика расчета первой ступени газоочистного оборудования 356
7.5	Определение режимов работы аппарата со встречными закрученными потоками 357
7.5.1	Исследование фракционной эффективности аппарата со встречно-закрученными потоками 358
7.5.2	Анализ распределения звукового давления 360
7.6	Определение фракционной эффективности разработанного инерционно-акустического газоочистного оборудования 361
7.7	Экспериментальные исследования эффективности улавливания созданного центробежно-акустического газоочистного оборудования 363

7.7.1	Оборудование для проведения экспериментальных исследований	363
7.7.2	Описание стенда для экспериментальных исследований разделения газодисперсного потока	364
7.7.3	Описание центробежно-акустического газоочистного оборудования	364
7.7.4	Определение исходных размеров дисперсных частиц используемых материалов	368
7.7.5	Экспериментальные исследования УЗ коагуляции частиц в закрученном потоке	371
7.7.6	Экспериментальное определение оптимальных тангенциальных скоростей газа	371
7.7.7	Исследование распределения размеров агломератов по длине коагуляционно-сепарационной камеры	374
7.7.8	Экспериментальное исследование функциональных возможностей разработанного центробежно-акустического газоочистного оборудования	375
7.7.9	Определение оптимального расхода газа	377
7.7.10	Исследование влияния массовой концентрации частиц на эффективность сепарации	379
7.7.11	Исследование влияния уровня звукового давления на эффективность сепарации	380
7.7.12	Определение фракционной эффективности улавливания центробежно-акустическим оборудованием	381
7.8	Перспективные конструкции пылеулавливающего оборудования, основанные на ультразвуковом воздействии	383
7.8.1	Примеры разработанных установок для коагуляции аэрозолей в газоходах	383
7.8.2	Усовершенствованная конструкция инерционного пылеуловителя	387
7.8.3	Применения ультразвуковой коагуляции для повышения степени очистки попутного нефтяного газа	391
<b>8 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ</b>		<b>395</b>
8.1	Разработка теоретической модели инерционной газоочистки в трубе Вентури с одновременным ультразвуковым воздействием	396
8.1.1	Принятые допущения в математической модели движения дисперсных частиц в скруббере Вентури при ультразвуковом воздействии	397
8.1.2	Математическое описание движения газа в скруббере Вентури	401
8.1.3	Математическое описание движения дисперсных частиц в скруббере Вентури	402
8.1.4	Математическое описание процесса ультразвуковой	403

коагуляции дисперсных частиц в трубе Вентури	
8.1.5 Реализация численной модели мокрой очистки газов в скруббере Вентури	409
8.2 Численный расчет эффективности очистки газов в скруббере Вентури без ультразвукового воздействия	414
8.2.1 Исходные данные для проведения численных расчетов скруббера Вентури	414
8.2.2 Моделирование движения газового потока	417
8.2.3 Определение времени пребывания и скорости движения дисперсных частиц в скруббере Вентури	418
8.2.4 Расчет изменения объемного содержания твердых частиц в скруббере Вентури в результате их коагуляции с каплями жидкости	424
8.2.5 Определение дисперсного состава частиц на выходе трубы Вентури	428
8.2.6 Определение эффективности газоочистки в скруббере Вентури	430
8.3 Определение эффективности очистки газов в скруббере Вентури при ультразвуковом воздействии	434
8.3.1 Определение эффективности улавливания частиц от режимов ультразвукового воздействия в трубе Вентури	434
8.3.2 Определение эффективности улавливания частиц от угла направления и зоны распространения УЗ колебаний в трубе Вентури	439
8.3.3 Определение эффективности работы скруббера Вентури при воздействии УЗ колебаниями	449
8.3.4 Определение эффективности скруббера при известном дисперсном составе золы, получаемой при сжигании различных углей	453
8.4 Основные результаты теоретических исследований ультразвуковой коагуляции в трубах Вентури для повышения эффективности мокрой газоочистки	456
8.5 Исследование процесса газоочистки в неоднородном акустическом поле	458
8.5.1 Определение эффективности скруббера Вентури при неоднородном УЗ поле	458
8.5.2 Определение мест установки УЗ излучателей в трубе Вентури	460
8.6 Методика проведения численных расчетов эффективности золоулавливания в зависимости от количества, размера и угла установки УЗ излучателей	462
8.7 Выявление зависимости эффективности золоулавливания от направления ввода УЗ колебаний в трубе Вентури	463
8.7.1 Расчет распределения уровня звукового давления при различных углах установки УЗ излучателей в трубе Вентури	464
8.7.2 Экспериментальное подтверждение теоретически	468

рассчитанного распределения акустического поля в трубе Вентури	
8.7.3 Расчет эффективности газоочистки при различных углах установки УЗ излучателей в трубу Вентури	471
8.8 Выявление зависимости эффективности золоулавливания от количества и площади поверхности УЗ излучателей в трубе Вентури	474
8.8.1 Расчет эффективности газоочистки при установке 2-х излучателей в трубу Вентури	475
8.8.2 Расчет эффективности газоочистки при установке 4-х УЗ излучателей в трубу Вентури	481
8.8.3 Расчет эффективности газоочистки при установке 6-ти УЗ излучателей в трубу Вентури	487
8.9 Основные результаты теоретических исследований эффективности работы скруббера Вентури в неоднородном звуковом поле	494
8.10 Ультразвуковое оборудование	495
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>501</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>502</b>