

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

**ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УДК 621.311.22 (574.25)**

На правах рукописи

Е.Е.Березовая

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ  
РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ В УСЛОВИЯХ АКСУСКОЙ ТЭС**

Магистерская диссертация на соискание  
академической степени магистра техники и технологий  
по специальности 6М071700 – Теплоэнергетика

ПАВЛОДАР – 2013

**Министерство образования и науки Республики Казахстан**

**Инновационный Евразийский университет**

Допущен (а) к защите:  
зав. кафедрой «Теплоэнергетики и  
металлургии»,  
кандидат технических наук,  
\_\_\_\_\_ А.К.Кинжибекова  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г

Магистерская диссертация

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ  
РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ В УСЛОВИЯХ АКСУСКОЙ ТЭС**

специальность: 6М071700 – Теплоэнергетика

Магистрант \_\_\_\_\_ Е.Е. Березовая  
(подпись)

Научный руководитель,  
кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Е.В. Приходько  
(подпись)

ПАВЛОДАР – 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Анализ эффективности работы газоочистных установок на тепловых электростанциях	
1.1 Общая характеристика и классификация газоочистного оборудования	9
2 Анализ эффективности работы электрофильтров Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)	
2.1 Классификация и конструкции электрофильтров	16
2.2 Характеристика и конструктивные особенности электрофильтра, установленного на Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)	18
2.3 Сравнительный анализ работы электрофильтров Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)	21
2.4 Расчет и анализ эффективности работы электрофильтра	24
3 Анализ эффективности рукавных фильтров в условиях работы Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)	
3.1 Классификация промышленных рукавных фильтров по их конструктивным признакам	38
3.1.1 Классификация рукавных фильтров по типу фильтрующих элементов	38
3.1.2 Классификация рукавных фильтров в зависимости от системы регенерации	39
3.2 Характеристика и основные конструктивные особенности рукавных фильтров	41
3.3 Процесс газоочистки в рукавных фильтрах	44
3.4 Материалы фильтровальных тканей рукавных фильтров	46
3.5 Влияние параметров работы ТЭС на эффективность эксплуатации рукавных фильтров	49
3.6 Расчет рукавного фильтра	50
4 Сравнительный анализ процесса газоочистки в рукавных и электрических фильтрах	57
5 Исследование возможности применения рукавных фильтров на Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)	
5.1 Исследование влияния степени запыленности ткани на гидравлическое сопротивление рукавных фильтров	61
6 Экономический расчет эффективности работы рукавного фильтра	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	86

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

1. Постановление Правительства Республики Казахстан от 14 декабря 2007 года № 1232 об утверждении Технического регламента «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций».

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей магистерской диссертации использованы обозначения и сокращения:

ТЭС - теплоэлектростанция;

тыс. тонн – тысяч тонн;

АО «ЕЭК» – Акционерное общество «Евроазиатская энергетическая корпорация»;

мкм - микрометр;

ГРЭС – городская районная электростанция;

США – Соединенные Штаты Америки;

КПД – коэффициент полезного действия;

ОАО – общество с ограниченной ответственностью;

МВт - Мегаватт;

мм - миллиметр;

мг/м<sup>3</sup> – миллиграмм на метр кубический.

1. Загрязнение атмосферного воздуха – поступление в атмосферный воздух или образование в нем вредных (загрязняющих) веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха.

2. Вредное (загрязняющее) вещество – химическое или биологическое вещество, либо смесь таких веществ, которые содержатся в атмосферном воздухе и которые в определенных концентрациях оказывают вредное воздействие на здоровье человека и окружающую природную среду.

3. Предельно допустимый выброс – норматив предельно допустимого выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух, который устанавливается для передвижных и стационарных источников выбросов, технологических процессов, оборудования и отражает максимально допустимую массу выброса вредного (загрязняющего) вещества в атмосферный воздух в расчете на единицу продукции, мощности пробега транспортных или иных передвижных средств и другие показатели.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном постоянно меняющемся мире, где многое подчинено постоянному прогрессу, совершенствованию и новым технологиям, как никогда важно уделять внимание экологии. Экологические исследования, проведенные в последние десятилетия во многих странах мира, показали, что всевозрастающее разрушительное воздействие антропогенных факторов на окружающую среду привело ее на грань экологического кризиса.

Охрана природы – это одна из главных проблем, которую надо учитывать при производстве электроэнергии на крупных промышленных электростанциях. На современном этапе охрана окружающей среды от промышленных выбросов - комплексная проблема, предусматривающая разработку организационных и технических мероприятий по внедрению эффективных методов улавливания и обезвреживания выбросов от пыли и вредных химических веществ, максимальное сокращение выбросов.

**Актуальность исследования.** Одна из сложных задач в энергетике – уменьшение вредных промышленных выбросов в атмосферу. На современном этапе для большинства промышленных предприятий охрана окружающей среды является сложной задачей, которая требует разработки природоохранных мероприятий.

В Концепции экологической безопасности Республики Казахстан на 2004-2015 намечено повысить эффективность работы очистных сооружений и установок, шире внедрять высокоэффективные установки для очистки промышленных выбросов. Данная Концепция экологической безопасности разработана исходя из приоритетов Стратегии "Казахстан-2030" в соответствии со Стратегическим планом развития Республики Казахстан до 2015 года и с учетом основных положений Повестки дня на XXI век и принципов Рио–де-Жанейрской декларации по окружающей среде и развитию 1992 года, а также решений Всемирного саммита по устойчивому развитию в Йоханнесбурге (2002 год) [1].

Снижение вредных промышленных выбросов ТЭС в пределах европейских экологических стандартов (концентрация выбросов до  $50 \text{ мг/м}^3$ ) возможно достигнуть за счет применения рукавных фильтров. Поэтому вопрос возможности использования данных фильтров в условиях работы Аксуской ТЭС является актуальным.

**Цель работы** – повышение эффективности процесса золоулавливания на Аксуской ТЭС (АО «Евроазиатская Энергетическая корпорация») путем установки рукавного фильтра.

### **Задачи исследования:**

1. определить возможность применения рукавных фильтров на крупных электростанциях мощностью 300 МВт и выше, работающих Экибастузском каменном угле с целью сокращения выбросов до  $50 \text{ мг/м}^3$ ;
2. произвести сравнительный анализ процесса газоочистки в рукавных и электрических фильтрах;
3. произвести исследование влияния степени запыленности ткани на

гидравлическое сопротивление рукавных фильтров;

4. произвести экспериментальное исследование с целью определения зависимости золowego выброса от степени запыленности газа;

5. произвести анализ процесса регенерации запыленной ткани продувкой сжатым воздухом, вывести зависимость продолжительности регенерации от гидравлического сопротивления ткани;

6. вывести зависимость концентрации пыли в очищенном газе от степени запыленности газа;

7. вывести зависимость эффективности работы рукавного фильтра ТЭС АО «ЕЭК» от дисперсного состава газа.

**Объектом исследования является** оборудование Аксуской ТЭС, работающей на Экибастузском каменном угле с зольностью 39,6 % и удельным электрическим сопротивлением  $10^{12}$  Ом\*м.

**Научная новизна исследования.** В диссертационном исследовании были получены следующие результаты:

- получена зависимость сопротивления ЦМ (цельнотканного материала) ткани рукава от продолжительности регенерации продувкой сжатого воздуха;

- получена зависимость перепада давления от заданного интервала времени между импульсами для иглопробивной ткани;

- получена зависимость золowego выброса от степени запыленности газа для оборудования Аксуской ТЭС;

**Практическая значимость исследования:**

- результаты, полученные в работе, представляют научную и практическую значимость при эксплуатации рукавных фильтров на крупных электростанциях мощностью 300 МВт и выше, работающих на высокозольных углях;

- построенный график зависимости сопротивления ткани от продолжительности регенерации дает возможность сделать правильный выбор ткани для рукавов фильтра, уберечь их тем самым от разрыва при эксплуатации;

- доказано, что замена электрофильтров рукавными фильтрами на ТЭС Аксу позволит сократить выбросы золы до  $50 \text{ мг/м}^3$  и уменьшить штрафы за высокую концентрацию вредных золowych выбросов в атмосферу, что приведет к улучшению экологической ситуации;

- проведен анализ зависимости концентрации пыли в очищенном газе от периодичности регенерации, который показал, что первоначальное снижение запыленности очищаемого газа обусловлено меньшим числом регенераций и их общей продолжительностью. По мере увеличения интервала между регенерациями постепенно начинает возрастать роль динамических пробоев слоя (срыва частиц) и проскока пыли в местах пробоев, вызывающих увеличение перепада давления в фильтрующей системе рукавного фильтра.

- путем экспериментального исследования на электростанции получена зависимость распределения частиц золы по размеру в пробах материала,

уловленного в аэродинамическом анализаторе на входе и на выходе рукавного фильтра, из которой видно, что на входе в рукавный фильтр размер частиц больше, чем на выходе из фильтра, это говорит о том, что основные частицы осели на материале рукавов фильтра.

- во время практического исследования и функции распределения частиц по размеру, в пробах материала получена зависимость эффективности рукавного фильтра ТЭС АО «ЕЭК», из которой видно, что рукавный фильтр имеет высокую степень улавливания при размере частицы около 10 мкм.

**Апробация работы.** По материалам работы имеется одна публикация в научном журнале «Вестник Инновационного Евразийского Университета» N3 (47) 2012 ISSN 1729-536X. Результаты работы докладывались на Международной научной конференции молодых ученых, магистрантов и студентов «XIII Сатпаевские чтения» Павлодарского Государственного университета имени С.Торайгырова. Статья диссертационного исследования опубликована в научном сборнике том XVIII «Жас галымдар» УДК 614.7.



# 1 Анализ эффективности работы газоочистных установок на тепловых электростанциях

## 1.1 Общая характеристика и классификация газоочистного оборудования

Под загрязнением окружающей среды следует понимать изменение свойств среды (химических, механических, физических, биологических), происходящие в результате естественных или искусственных процессов и приводящие к ухудшению функций среды по отношению к любому биологическому или технологическому объекту.

В нашей Республике основными загрязнителями атмосферного воздуха являются теплоэлектростанции. Они выделяют в атмосферный воздух различные вредные вещества, загрязняющие воздушную среду. В воздух поступают аэрозольные частицы (пыль, дым, туман), газы, пары, а также радиоактивные вещества.

Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха наблюдается в городах Казахстана: Балхаше (424,3 тыс. тонн), Темиртау (294,5 тыс. тонн), Екибастузе (287,8 тыс. тонн), Актобе (187,5 тыс. тонн), Павлодаре (155,5 тыс. тонн), Аксу (150,9 тыс. тонн), Жезказгане (96,9 тыс. тонн) [3], в соответствии с рисунком 1.

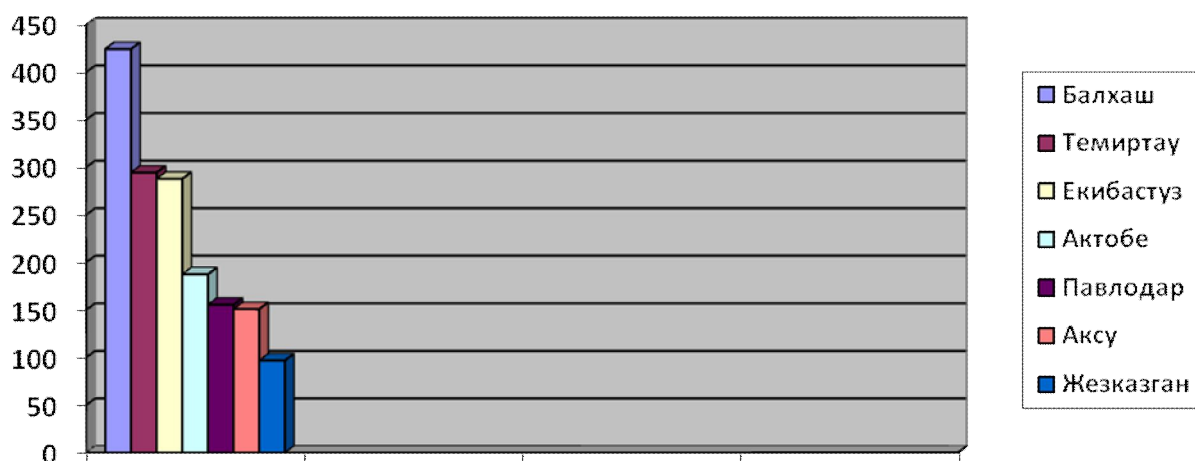


Рисунок 1 - Диаграмма загрязнения атмосферного воздуха в городах Казахстана

Основной объем электроэнергии в Казахстане вырабатывают 37 тепловых электростанций, работающих на углях Екибастузского, Майкубинского, Тургайского и Карагандинского бассейнов. Крупнейшая из построенных в Казахстане - ГРЭС-1 г. Екибастуза – представляет собой восемь энергоблоков с установленной мощностью 500 МВт каждый. Однако в настоящее время рабочая мощность станции составляет 2250 МВт. Наибольшую выработку электроэнергии осуществляет Аксуская ГРЭС. В

2012 году эта станция выработала 21 % всей электроэнергии, произведённой в Казахстане.

Крупными электростанциями Казахстана, работающими на Экибастузском угле являются:

1. ТОО «AES Экибастуз» – установленная мощность 4000 МВт;
2. ТЭС АО «ЕЭК» – установленная мощность 2425 МВт;
3. ОАО «Станция ЭГРЭС-2» – установленная мощность 1000 МВт;
4. Алматинская ТЭЦ-2 – установленная мощность 510 МВт;
5. Карагандинская ТЭЦ-3 – установленная мощность 440 МВт;
6. Павлодарская ТЭЦ-3 – установленная мощность 440 МВт;
7. Петропавловская ТЭЦ-2 – установленная мощность 380 МВт;
8. Павлодарская ТЭЦ-1 – установленная мощность 350 МВт;
9. Алматинская ТЭЦ-3 – установленная мощность 360 МВт.

При сжигании твердого топлива в атмосферу ежегодно выбрасываются сотни миллионов тонн различных веществ: твердых веществ – 130 млн. тонн, двуокиси серы от 180 до 200; окиси углерода от 350 до 400; окислов азота от 60 до 65 млн. тонн; углеводородов от 80 до 90 млн. тонн. Попадая в атмосферный воздух, пыль и вредные газы изменяют его состав, уменьшая количество кислорода, необходимого для жизнедеятельности всего живого, а также наносят значительный ущерб здоровью людей, ведению хозяйства в данном районе, организации отдыха людей, приводит к повреждению архитектурных сооружений, памятников истории и культуры. По общим объемам атмосферных выбросов в 2012 году первое место занимает Китай (19 % всех мировых выбросов), потеснив на второе место США (18,4 %). Третье место в рейтинге, принадлежит Евросоюзу (15,3 %), затем следует Россия (14,9 %), за ней Индия (13,7 %) и Казахстан (12,4 %) [4] (Рисунок 2).

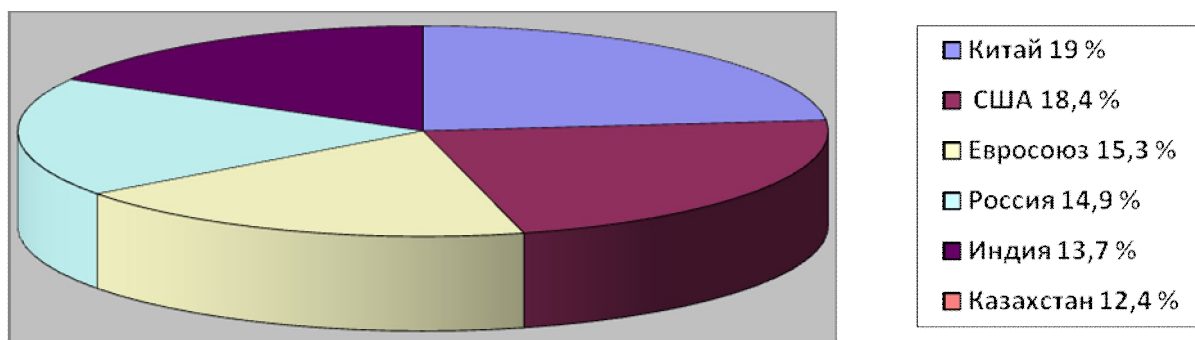


Рисунок 2 - Объем атмосферных выбросов в странах мира

Стремительный рост промышленных ТЭС способствует выбросу огромного количества вредных веществ в атмосферу, которые приводят к загрязнению нашей планеты. Реальная опасность проявляется в образовании газообразных, твердых отходов производства и выбросов энергии в окружающую среду, которые затем распространяются на большие расстояния и наносят большой ущерб соседним странам.

Проблема охраны воздушной среды от загрязнения оказалась настолько трудно управляемой в пределах одного государства, что вскоре потребовала международного регулирования. Наиболее важными актами, оказавшими значительное влияние на развитие международного сотрудничества в области защиты окружающей среды, явились Международные конференции ООН по окружающей среде (Стокгольм, 1972 г., Рио-де-Жанейро, 1992 г.) и совещание по безопасности и сотрудничеству в Европе (Хельсинки, 1975 г.) [5].

Учитывая наличие в котельных агрегатах систем пылеочистки, первым шагом к достижению европейских норм очистки уходящих газов должно быть обеспечение высокоэффективной очистки отходящих газов от твердых частиц (золы), чтобы концентрация их в дымовых газах не превышала для новых котлов  $50 \text{ мг/Нм}^3$  (по директиве 2001/80/ЕС). Это будет также способствовать выполнению страной требований Протокола по тяжёлым металлам 1997 г., а также Конвенции о трансграничном загрязнении атмосферы на большие расстояния 1979 г. [6].

В США допустимая концентрация твердых частиц  $27,8 \text{ мг/м}^3$ , в Германии -  $0,35 \text{ мг/м}^3$ , в Японии –  $0,1 \text{ мг/м}^3$  [7].

В настоящее время наиболее распространенный способ борьбы с загрязнениями воздуха заключается в удалении загрязняющих веществ с помощью применения газоочистного оборудования.

В мире техника пылеулавливания и очистки промышленных газов получила дальнейшее развитие. В то же время происходит модернизация существующего и разработка новых видов газоочистного оборудования, в котором осуществлена полная герметизация, автоматизация, дистанционное управление, достигается высокая степень очистки. Специализированные предприятия, такие как Спейс-Мотор (Россия), Alstom (Швеция), КОНДОР ЭКО-СФ НИОГАЗ (Россия), Dantherm Filtratio, ZVVZ-Enven Engineering (Чешская Республика), Ранком Энерго (Россия), LUENR FILTER (Германия) и многие другие обладают богатым опытом в проектировании и строительстве газоочистных систем, таких как электрофильтры различных конструкций (сухие, мокрые, горизонтальные, вертикальные), и рукавных фильтров различных марок. Данные газоочистные аппараты успешно работают на промышленных предприятиях мира: Казахстан, Китай, Дания, Англия, Финляндия, Франция, Германия, Польша, Швеция, Тайланд, Украина, Вьетнам, США [8].

На современном этапе для большинства промышленных предприятий очистка воздуха от вредных веществ является одним из основных мероприятий по защите воздушного бассейна. Благодаря очистке выбросов

перед их поступлением в атмосферу предотвращается загрязнение атмосферного воздуха.

Процесс обеспыливания воздуха в общем виде включает следующие основные этапы:

- предотвращение распространения «исходной» аэродисперсной системы в воздухе рабочей зоны и увеличения устойчивости этой системы в направлении строго ограниченной заранее выделенной области (процесс пылеулавливания);

- разрушение пылевого аэрозоля, заключающегося в выделении пыли из воздуха (процесс пылеочистки);

- дальнейшее снижение устойчивости пылевого аэрозоля, сохранившегося после реализации предыдущих этапов, заключающееся в интенсификации распространения оставшихся в воздухе пылевидных частиц и аэрации дисперсной среды в приземном слое атмосферы (процесс рассеивания пыли).

Основным элементом систем пылеочистки является аппарат очистки воздуха от пыли [9].

Среди исходных данных для выбора способов, технических средств и параметров пылеулавливания наиболее важным являются технологические и пылеаэродинамические.

На выбор золоуловителей влияет ряд факторов: вид топлива, и способ его сжигания, физико-химические свойства золы, возможность размещения газоочистного оборудования на реконструируемых ТЭС.

Пылеулавливающее оборудование при всем многообразии может быть классифицировано по ряду признаков: по назначению, по основному способу действия, по эффективности, по конструктивным особенностям.

В зависимости от природы сил, используемых в пылеулавливающих аппаратах для отделения частиц пыли от газового потока, их подразделяют на четыре основные группы гравитационные аппараты, аппараты мокрой очистки газов, пористые фильтры, электрические фильтры.

Пылеулавливающее оборудование в зависимости от способа отделения пыли от воздушного потока применяют следующих исполнений: оборудование для улавливания пыли сухим способом, при котором отделенные от воздуха частицы пыли осаждаются на сухую поверхность; оборудование для улавливания пыли мокрым способом, при котором отделение частиц от воздушного потока осуществляется с использованием жидкостей.

В зависимости от метода очистки газоочистные аппараты подразделяют на семь групп:

1 группа (С) - сухие механические пылеуловители (гравитационные, сухие инерционные и ротационные);

2 группа (М) - мокрые пылеуловители (инерционные, конденсационные), скрубберы (механические, ударно-инерционные, полые, насадочные, центробежные), скрубберы Вентури;

3 группа (Ф) - промышленные фильтры (рукавные, волокнистые, карманные, зернистые), с регенерацией (импульсной обратной промывкой ультразвуком), с механическим и вибровстряхиванием;

4 группа (Э) - электрические пылеуловители (сухие и мокрые электрофильтры);

5 группа (Х) - аппараты сорбционные (химической) очистки газа от газообразных примесей (адсорберы, абсорберы);

6 группа (Т) - аппараты термической и термokatалитической очистки газов от газообразных примесей (печи сжигания, каталитические реакторы);

7 группа (Д) - аппараты других методов очистки.

В таблице 1 приведена классификация пылеулавливающего оборудования [10].

Циклоны и батарейные циклоны не используются на ТЭС Аксу, так как не удовлетворяет главному условию – очистке большого объема запыленного воздуха и не обеспечивает высокую степень очистки. Поэтому далее будет рассматриваться иное высокоэффективное газоочистное оборудование, которое будет соответствовать этим основным требованиям.

Таблица 1 - Классификация пылеулавливающего оборудования

<b>Классификация пылеулавливающего оборудования</b>	<b>Вид оборудования</b>
Метод очистки	Сухой способ
Гравитационное	Полое
	Полочное
Инерционное	Камерное
	Жалюзийное
	Циклонное
	Ротационное
Фильтрационное	Тканевое
	Волокнистое
	Зернистое
	Сетчатое
	Губчатое
Электрическое	Однозонное
	Двухзонное

В связи с жесткими требованиями к концентрациям вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, было принято Постановление Правительства Республики Казахстан от 14 декабря 2007 года № 1232 об утверждении Технического регламента «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций» (далее - Технический регламент). Данный Технический регламент разработан в соответствии с Экологическим кодексом Республики Казахстан от 9 января 2007 года, Законом Республики Казахстан от 9 ноября 2004 года «О техническом регулировании» и устанавливает требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах

энергетических блоков тепловых электрических станций (далее - ТЭС), а также требования к размещению отходов после сжигания топлива (Таблица 2) [12].

На Аксуской ЭС массовая концентрация частиц в дымовых газах при коэффициенте избытка воздуха 1,4 мг/м<sup>3</sup> составляет 200 мг/м<sup>3</sup>. Требования к экологическим показателям эксплуатации энергоблоков в различных странах отличаются, но требования к новым энергоблокам в Европейских странах ориентируются на более жесткое законодательство и устанавливаются по выбросам твердых частиц золы в диапазоне 50 мг/м<sup>3</sup> [12].

Таблица 2 - Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу твердых частиц для котлов действующих, реконструируемых и вводимых на ТЭС с 1 января 2013 г., для твердого топлива всех видов

Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Приведенное содержание золы A, % кг/МДж	Массовый выброс твердых частиц на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс твердых частиц, кг/т.у.т	Массовая концентрация частиц в дымовых газах при α=1,4, мг/м <sup>3</sup>
до 299 (до 420)	менее 0,6	0,06	1,76	150
	0,6-2,5	0,06-0,10	1,76-2,93	150-500
	более 2,5	0,10	2,93	500
300 и более (420 и более)	менее 0,6	0,02	0,59	100
	0,6-2,5	0,02-0,06	0,89-1,76	100-200
	более 2,5	0,06	1,76	200

Примечание - При нормальных условиях (температура 0 °С, давление 101,3 кПа).

В связи с ужесточением экологического законодательства в области охраны окружающей среды, всем европейским странам приходится соблюдать установленный выброс твердых частиц золы в диапазоне 50 мг/м<sup>3</sup>. Возможно в будущем это норма будет введена и в Казахстане.

В настоящее время в мировой практике самый распространённый пылеочистной аппарат – электрофильтр. Анализ опыта использования их показывает, что эти аппараты могут обеспечить довольно высокую эффективность очистки газов ТЭС только при определённых условиях эксплуатации, а именно – низкой скорости газового потока, относительно крупных размерах частиц пыли, оптимальном удельном сопротивлении, оптимальном режиме встряхивания электродов, отсутствии вторичного уноса и т.д. Даже незначительное изменение одного из вышеперечисленных параметров приводит к снижению эффективности работы электрофильтра. Отрицательное влияние на его КПД оказывает также неравномерность концентрации твёрдых частиц по сечению фильтра на ТЭС.

С 2002 года на АО «Евроазиатской энергетической корпорации» в городе Аксу успешно используются электрофильтры фирмы Alstom (Швеция). Данные электрофильтры имеют ряд преимуществ: малое

энергопотребление, высокий КПД, оптимальная система мониторинга, современная система контроля и управления.

В связи с высокими требованиями к очистке атмосферного воздуха на крупных ТЭС мира и Казахстана находят применение рукавные (тканевые) фильтры, имеющие конечную концентрацию пыли в очищенном газе менее  $50 \text{ мг/м}^3$ . Данные фильтры имеют большие перспективы применения в будущем. Идет интенсивная работа по испытанию и изучению рукавных фильтров как на предприятиях, так и в исследовательских институтах.

В Казахстане рукавные фильтры используются в основном в металлургической промышленности. Примером служит рукавный фильтр, установленный на Аксуском заводе ферросплавов. В городе Темиртау используется фильтр РП-1 в агломерационном производстве на металлургическом комбинате. На Аксуской ТЭС используется рукавный фильтр очистки воздуха установки по отбору сухой золы Куйбышевского завода «Строммашина».

В последние годы в связи с появлением высокопрочных синтетических и минеральных волокон, используемых в рукавах фильтров, в ряде стран созданы и эксплуатируются установки очистки дымовых газов от золы котлоагрегатов большой производительности [13].

Например, руководство Рефтинской ГРЭС, входящей в ОАО «Энел ОГК-5», реализует крупнейший проект по реконструкции рукавного фильтра. Тепловая конденсационная электростанция располагается возле посёлка Рефтинский Свердловской области. Ее установленная мощность составляет 1800 МВт. В существующем энергетическом блоке № 5 установлены два котла, четыре воздухоподогревателя, два рукавных фильтра и два вытяжных дымососа. Благодаря установленному рукавному фильтру на одном из блоков на станции станет возможным уменьшить выбросы золы в окружающую среду на 99,9 %. Подобный тип установок газоочистки достаточно широко применяют при работе на угольных электростанциях в зарубежных странах, таких как Австралия, США.

Два угольных котла мощностью 660 МВт электростанции Kogan Creek в Queensland в Австралии вырабатывают электроэнергию с 1970 годов. В 2006 году природоохранный центр взял на себя ответственность за модернизацию и замену существующего электрофильтра рукавными фильтрами. Замена электрофильтра на рукавный фильтр позволила повысить эффективность улавливания с 99,6 % до 99,9 %. После завершения установки линия очистки на электростанции Vales Point встанет в один ряд с самыми современными и наукоемкими системами очистки в мире [14].

## **2 Анализ эффективности работы электрофильтров Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)**

### **2.1 Классификация и конструкции электрофильтров**

Электрофильтры можно классифицировать по многим признакам.

По расположению зон зарядки и осаждения электрофильтры подразделяют на однозонные и двухзонные. В однозонных электрофильтрах зоны зарядки и осаждения совмещены, а в двухзонных коронирующие и осадительные электроды разделены и размещены в разных конструктивных зонах.

В соответствии с направлением движения газового потока фильтры подразделяют на горизонтальные и вертикальные.

По форме осадительных электродов различают электрофильтры пластинчатые, трубчатые и иногда шестигранные.

В зависимости от числа последовательно расположенных полей электрофильтры бывают однополюсные и многополюсные, а в зависимости от числа параллельно работающих секций – односекционные и многосекционные.

Вывод уловленной пыли из электрофильтра может осуществляться в сухом виде посредством встряхивания электродов и в мокром виде смывом водой. В соответствии с этим различают сухие и мокрые электрофильтры [15].

В зависимости от условий эксплуатации, состава, температуры, давления и влажности газов, физико-химических свойств пыли, требуемой степени очистки и т. д. создано много различных конструкций электрофильтров. Эти конструкции включают следующие основные элементы: корпус электрофильтра, узлы подвода, распределения и отвода очищаемых газов; электроды (коронирующие и осадительные); устройства для удаления уловленной пыли с электродов; изоляторные коробки – узлы для подачи на электроды высокого напряжения; устройства для сбора и вывода уловленной пыли из аппарата.

Корпус электрофильтра выполняют из листовой стали, бетона, кирпича и других материалов в зависимости от температуры и агрессивности газов. При необходимости корпус футеруют или снабжают наружной теплоизоляцией. Корпус может быть прямоугольным или цилиндрическим. В нем размещаются коронирующие и осадительные электроды и собирается уловленная пыль.

Подвод газов к электрофильтру и отвод из него должны обеспечивать равномерное распределение газов в аппарате. Сечение подводящих и отводящих газопроводов определяют исходя из скорости газа (около 10 м/с), исключающей осаждение пыли в газопроводе. При присоединении газопроводов к электрофильтру устанавливают конфузоры и диффузоры, необходимые для осуществления плавного перехода от скорости газа в



газопроводе к значительно более низкой скорости газа в электрофилт্রে и обратно. При многосекционных электрофилтрах конструкция газопроводов должна позволять отключать отдельные секции. На входе газов в электрофилтър устанавливают специальные устройства, выравнивающие скорости газа в сечении электрофилтра: направляющие аппараты, распределительные решетки [16].

Основным технологическим элементом, решающим образом, влияющим на работу электрофилтра, являются электроды (коронирующие и осадительные). Коронирующие электроды могут быть гладкими или иметь фиксированные точки разряда. Гладкие электроды могут быть круглого, квадратного, звездообразного или ленточного сечений. Коронирующие электроды с фиксированными точками разряда снабжены иглами, на которых и возникает коронный разряд. Меняя шаг игл и их высоту, можно получать определенное значение тока короны. Чаще всего применяют электроды из ленты со штампованными зубцами или шипами.

Осадительные электроды трубчатых электрофилтров чаще всего применяют из труб круглого сечения диаметром от 200 мм до 300 мм, длиной от трех до пяти метров. Иногда применяют и трубы квадратного или шестиугольного сечений. Листовые пластинчатые осадительные электроды применяют только в мокрых электрофилтрах, так как в сухих при удалении пыли с электродов встряхиванием они дают значительный вторичный унос. Прутковые электроды применяют в условиях высоких температур, так как они меньше подвержены короблению.

В целях снижения вторичного уноса применяют коробчатые и желобчатые осадительные электроды. Коробчатый осадительный электрод представляет собой двухстенную коробку, в которую направляется стряхиваемая с электродов пыль. Таким образом, пыль выводится из зоны движения газового потока и падает вниз внутри изолированной от потока коробки. Коробчатые электроды бывают карманными, перфорированными, тюльпанообразными. Общие недостатки коробчатых электродов – сложность изготовления, значительный расход металла.

На практике все шире применяют желобчатые электроды, которым в меньшей мере присущи недостатки коробчатых электродов. В этих конструкциях стряхиваемая с электродов пыль осыпается внутри застойных зон, отделенных от газового потока, вследствие чего вторичный унос также снижается. Хотя условия падения пыли не так идеальны, как в замкнутом пространстве коробки, желобчатые электроды эффективнее, так как в застойную зону электрода попадает значительно больше пыли, чем внутрь коробчатого электрода [17].

Желобчатые электроды бывают волнистые, U – образные, э – образные, с – образные, w – образные, т.е. они отличаются друг от друга формой профиля. В России наибольшее распространение получили электроды открытого профиля, характеризующиеся относительной простотой изготовления, достаточной жесткостью и заметно меньшим расходом металла. Распределение пыли по поверхности пыли для этих электродов

значительно благоприятнее, чем, например, для перфорированных электродов, у которых внутрь коробки попадает не более 12 % осаждающейся на электроде пыли.

Сухое удаление пыли с электродов осуществляется встряхиванием, для чего используют различные системы. В России наибольшее распространение получили системы ударно-молоткового действия. В нижней части осадительные электроды связаны между собой полосой встряхивания. При вращении вала, приводимого от специального электродвигателя, молоток периодически ударяет по наковальне, передающий удар полосе встряхивания и связанным с ней электродам. Молотки насажены со смещением 24 градуса с тем, чтобы во избежание увеличения вторичного уноса не все электроды встряхивались одновременно.

Работа механизмов встряхивания значительно влияет на эффективность электрофильтра. Для каждого поля следует подбирать оптимальную программу включения механизмов встряхивания и интенсивности ударов.

В изоляторных коробках размещены изоляторы, обеспечивающие подачу напряжения на коронирующие электроды. Изоляторы работают в тяжелых условиях: высокая температура, загрязненный газ, значительные механические усилия, особенно в моменты встряхивания коронирующих электродов. Вынос изоляторов из газового потока и размещение их в изоляторных коробках существенно облегчают условия их работы вследствие снижения рабочей температуры и предотвращения попадания на их поверхности пыли, вызывающей утечку тока и пробой.

В зависимости от условий работы в электрофильтрах применяют изоляторы из фарфора, плавленого кварца, бакелита и других изоляционных материалов. Для предотвращения осаждения пыли на внутренних поверхностях изолятора в шапках изоляторов делают отверстия для подсоса воздуха.

Для сбора пыли, уловленной в электрофильтрах, служат бункера, размещаемые в нижней части аппарата. Как правило, для каждого поля отдельный бункер.

Во избежание больших присосов воздуха пыль выгружается из бункера периодически. Для выгрузки применяют роторные (ячейковые) питатели, шнеки или скребковые транспортеры.

## **2.2 Характеристика и конструктивные особенности электрофильтра фирмы «Альстом», установленного на Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)**

Электростанция АО «Евроазиатская энергетическая корпорация» находится в Павлодарской области в 10 км на север от города Аксу на левобережье реки Иртыш на расстоянии 1,4 км западнее ее основного русла.

Данная ТЭС с проектной мощностью 2400 МВт – восемь дубль-блоков мощностью по 300 МВт – относится к базовым электростанциям по выработке электроэнергии. На энергетическом блоке установлены два котла,

четыре воздухоподогревателя, два электрофильтра и два вытяжных дымооса.

На ТЭС города Аксу заменяют физически устаревшие фильтры фирмы «LUK» (Германия) на высокоэффективные электрофильтры «ALSTOM Пауэр Ставан», хорошо зарекомендовавшие себя по всему миру (Россия, Дания, Финляндия, Индонезия и др.) более чем в 4000 установок газоочистки [19].

Данный электрофильтр двухсекционный сухой горизонтальный ЭСГ 2x5-48x40x75x150x (5, 6,6,5,5). Изготавливаемый ЗАО «АЛЬСТОМ ПауэрСтаван» (Швеция), который по своим техническим характеристикам позволяет снизить выбросы в атмосферу пыли золы Казахстанских углей с эффективностью 99,6 % до концентрации 200 мг/Нм<sup>3</sup>, что соответствует требованиям Технического регламента «Требования к Эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций» [21].

Межведомственные испытания на электростанции показали возможность достижения эффективности золоулавливания до 99,6 % при сжигании высокозольных углей.

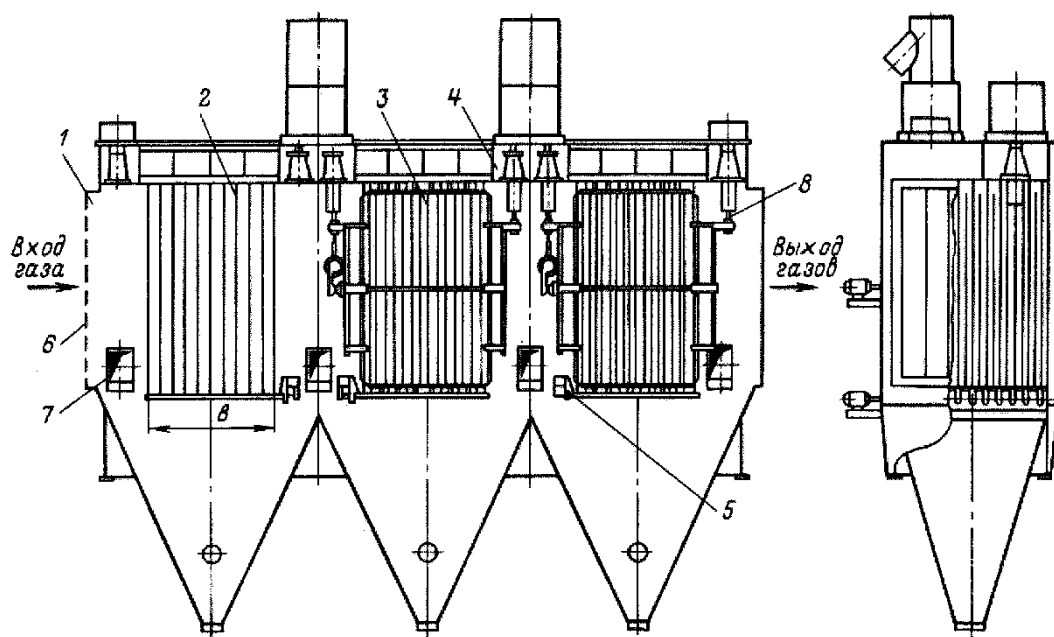
Кроме того, в процессе эксплуатации инструментальными измерениями установлено, что система электродов электрофильтров «ALSTOM Пауэр Ставан» обеспечивает снижение выбросов диоксида серы более 18 %.

Предназначенные для обеспыливания отходящие газы поступают в горизонтальном направлении в электрофильтр через отверстия для газа (диффузор). Конструктивно фильтр состоит: стальной корпус, две газораспределительные решетки с активной площадью 45 %, систем осадительных и коронирующих электродов, механизмов встряхивания, золовых бункеров пирамидального типа с золопускными трубами и золосмывными аппаратами типа «чайник».

Корпус электрофильтра – металлическая камера, в которой расположена система коронирующих и осадительных электродов. В нижней части корпуса расположены золовые бункера пирамидального типа. Корпус электрофильтра оборудован инспекционными люками-лазами, внутренними лестницами и площадками обслуживания. Во избежание больших потерь тепла, снижения температуры уходящих газов и предотвращения конденсации водяных паров на стенках электрофильтра, а также для безопасности обслуживания, вся наружная поверхность корпуса покрыта теплоизоляционным слоем – минеральной ватой, толщиной от 150 до 200 мм. Сверху слой закрыт оцинкованной ожеушкой.

Входные газораспределительные решетки смонтированы в два ряда из перфорированных листов металла и имеют активную площадь 45 %. Служат для равномерного распределения потока газа по всему объему электрофильтра и частичного улавливания крупной фракции золы с выпадением ее в бункера форкамер, расположенных под диффузором.

В активной зоне фильтра размещены широкополосные С-образные осадительные и игольчатые коронирующие электроды. Расстояние между одноименными электродами составляет 400 мм (Рисунок 3).



1 - корпус; 2 - электрод осадительный; 3 - электрод коронирующий; 4 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 5 - механизм встряхивания осадительных электродов; 6 - газораспределительная решетка; 7 - бункер для золы; 8 - изолятор

Рисунок 3 - Строение электрофильтра

Осадительные электроды безрамной конструкции эксцентрично подвешены на балке подвеса, что позволяет придавать электроду за счет удара молотка поступательно-возвратное движение. В нижней части осадительных электродов подвешена полоса встряхивания, к которой жестко прикреплены элементы электрода, что позволяет наиболее тщательно производить встряхивание. Встряхивание осадительных электродов предусмотрено молотковое, непрерывное, индивидуальное. Для лучшего распределения силы ударов и равномерной нагрузки на привод механизма молотки расположены «веером».

Коронирующие электроды рамной конструкции в плоскости рамы монтируются с шагом 180 мм. В каждом поле рамы коронирующих электродов при помощи нижних и верхних кронштейнов крепятся к рамам подвеса, образуя тем самым единую секцию, которая подвешивается на трубы подвеса, образуя тем самым единую секцию, которая подвешивается на трубы подвеса, опирающиеся на опорно-проходные изоляторы выполненные из кварца (фарфора). Встряхивание коронирующих электродов молотковое. Подвод постоянного тока высокого напряжения осуществляется

при помощи высоковольтного кабеля к концевой кабельной муфте, которая находится в коробе подвода [18].

Агрегаты питания электрических полей электрофильтра расположены на крыше и шкафы управления - в помещении преобразовательной подстанции.

### **2.3 Сравнительный анализ работы электрофильтров Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)**

Современный уровень оснащения электростанции пылегазоочистным оборудованием в результате реконструкции котлоагрегатов и его техническое состояние в целом позволяют выдерживать требования, регламентированные техническим регламентом «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций».

Дальнейшее переоснащение всех котлоагрегатов ЭС высокоэффективными электрофильтрами типа «ALSTOM Пауэр Ставан» позволит говорить о полном соответствии пылегазоочистного оборудования станции передовому научно-техническому уровню в стране и за рубежом.

Данные электрофильтры имеют ряд преимуществ: малое энергопотребление, высокий КПД, оптимальная система мониторинга, современная система контроля и управления.

Электрофильтр представляет собой пыленепроницаемые объемные корпуса двух секций, разделенные на электрические поля с помещенными в них коронирующими и осадительными электродами, к которым прилепают заряженные статическим электричеством высокого напряжения частички угольной золы.

С начала XX века и до настоящего времени электрофильтры прошли длительный путь совершенствования конструкции и повышения эффективности очистки газов от золы. Эти усовершенствования коснулись практически всех узлов электрофильтров. За время разработки нескольких поколений электрофильтров в определенной степени реализовано большинство возможных резервов. Тем более трудной представляется задача дальнейшего совершенствования этих газоочистных аппаратов.

Необходимость создания электрофильтров нового поколения определяется новыми задачами по защите атмосферы от загрязнения промышленными выбросами:

- ужесточением требований к содержанию пыли в газах после очистки;
- резким увеличением объемов газов, нуждающихся в газоочистке;
- расширением номенклатуры пылей, от которых необходимо очищать воздух.

Допустимая весовая концентрация частиц в дымовом газе после очистки уменьшена с 300 мг/м<sup>3</sup> до 200 мг/м<sup>3</sup>, и в ближайшем будущем неизбежен переход на общеевропейские нормы – 50 мг/м<sup>3</sup>. Увеличение объемов дымовых газов может быть проиллюстрировано примером

сооружения сверхмощных тепловых электростанций. Расширение номенклатуры пылей связано с вовлечением в производство новых веществ.

С 2002 года на электростанции «Евроазиатская энергетическая корпорация» города Аксу успешно используются электрофильтры фирмы Alstom (Швеция).

С 2013 г. электрофильтрами «ALSTOM Пауэр Ставан» будут оснащены котлоагрегаты 1А, 1Б, 2А, 2Б, 3А, 3Б, 4А, 5Б, 6А и 6Б.

В 2014, 2016 и 2018 гг. на котлоагрегатах 5А, 7А, 7Б, 8А и 8Б при их реконструкции будет осуществлена замена электрофильтров «LUK» на электрофильтры «ALSTOM Пауэр Ставан».

Электрофильтры «ALSTOM» по своим конструктивным особенностям в сравнении с «LUK» имеют ряд преимуществ (Таблица 3).

Принцип действия и строение электрофильтра «LUK» совпадают с электрофильтром «ALSTOM». Электрофильтры «LUK» - горизонтальные фильтры, изготавливаются в широком диапазоне типоразмеров с унифицированными узлами, что позволяет обеспечить высокие технико-экономические показатели. Максимальная температура применения 250 °С.

Таблица 3 - Основные технические данные (для сравнения) ЭФ ALSTOM (Швеция), и LUK (ГДР)

Технические данные	LUK	ALSTOM
1 Количество газовых проходов	64	48
2 Межэлектродное расстояние, мм	325	400
3 Активная длина полей, м		
Поле 1 (4)	3,6	3,75
Поле 2 (3)	4,8	4,5
4 Площадь активного сечения, м <sup>2</sup>	206	288
5 Общая площадь осаждения, м <sup>2</sup>	25560	23760
6 Высота осадительных электродов, м	12	15
7 Скорость газового потока в электрофильтре, м/с	1,2	0,934
8 Номинальный ток, мА	1000	1200
9 Номинальное напряжение, кВ	70	100
10 Потребляемая мощность, кВА	420	1056
11 Коронирующая система		
Секция 1 (2)	Игольчатые	Спиральные
Секция 3 (4)	Игольчатые	Спиральные
12 Система встряхивания осадительных электродов	Молотковое, непрерывное	Молотковое, прямой привод вала, интервал отряхивания
13 Система встряхивания коронирующих электродов	Молотковое, с системой кривошипов и тяг, разовое отряхивание секции, непрерывное	Молотковое, периодическое, с прямым верхним подводом вала

### Окончание таблицы 3

Технические данные	LUK	ALSTOM
14 Газораспределительная система	Две входные решетки	Две газораспределительные решетки на входе, одна щелевого типа на выходе
15 Общий вес оборудования, тонн	256	Внутренняя начинка 185,9
16 КПД, %	97,5	99,6

корпусе размещаются системы осадительных и коронирующих электродов, устройства для удаления золы, для равномерного распределения газа по сечению аппарата. Корпус электрофильтра снабжается форкамерой, которая служит для размещения в ней газораспределительной решетки.

Газораспределительные экраны на входе, в совокупности с газораспределительными решетками на выходе, гарантируют правильное распределение газа для обеспечения максимальной эффективности. Применение систем призм на входной газораспределительной решетке, позволяет произвести перераспределение пылегазового потока с выравниванием скоростей по всей плоскости активного сечения. У электрофильтров «LUK» отсутствие газораспределительной решетки на выходе не создает «подпираание» газа. Наличие данной решетки щелевого типа у «ALSTOM» дает полное распределение потока газа по всему объему электрофильтра и снижение скорости в межэлектродном пространстве.

Скорость потоков газов ниже у «ALSTOM» 0,934 м/с, чем у «LUK» -1,2 м/с, что приводит к увеличению эффективности работы данного фильтра.

В коронирующей системе электрофильтров «LUK» на секциях один и два применялись игольчатые электроды, которые имели большую плотность тока заряда, что не являлось оптимальным для высокоомной пыли. У электрофильтров «ALSTOM» более выраженную направленность тока заряда по сравнению с плавным распределением происходит на спиральных электродах.

Система отряхивания коронирующих электродов у электрофильтров «LUK» представляет собой привод со специальным кривошипом, системой тяг и молоткового одновременного разового отряхивания секции, в отличии от периодического веерного с верхним горизонтальным подводом привода «ALSTOM», который обеспечивает необходимое ускорение для гарантированной очистки электродов от осевшей пыли, снижая величину вторичного уноса.

Микропроцессорная система управления ЕРІС оптимальна с широким диапазоном регулирования. Данная система управляет системой высокочастотных трансформаторов, типа SIR, работающих на частоте десятки тысяч герц, а также ЕРІС позволяет достичь максимальной

эффективности при минимальном энергопотреблении, что не предусмотрено в электрофильтрах «LUK».

В электрофильтрах применяется система SIMIPULSE для подавления эффекта обратной короны, позволяющая использовать импульсное питание управляющих тиристоров, что отсутствует у «LUK».

Увеличение внутренней начинки электрофильтра «LUK» на 34 % привело к тому, что масса корпуса электрофильтра была утяжелена и дала дополнительные затраты при изготовлении корпуса. Вес внутренней начинки «ALSTOM» ниже электрофильтров «LUK» на 96,87 тонн, что дает большое преимущество при монтаже и работе электрофильтра.

В итоге все преимущества электрофильтра «ALSTOM» показывают несомненное превосходство над электрофильтром «LUK», как в обслуживании, так и в высокой эффективности очистки дымовых газов. Коэффициент полезного действия «ALSTOM» составляет 99,6 %, у «LUK» 97,5 %.

## 2.4 Расчет и анализ эффективности работы электрофильтра

### Исходные данные для расчета и анализа работы электрофильтра:

Топливо: Экибастузский каменный уголь

Состав:

$$W^p = 6,3 \%$$

$$A^p = 39,6 \%$$

$$S^p = 0,6 \%$$

$$C^p = 43 \%$$

$$H^p = 2,7 \%$$

$$N^p = 0,8 \%$$

$$O^p = 7 \%$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,25$  (измеренный на ЭС);

Низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу  $Q_p^H = 3929$  ккал/кг (40,08 МДж/кг);

Тепло горячего воздуха  $Q_{гв} = 1932$  кДж/кг;

Теоретический объем продуктов горения  $V_{пт}^0 = 4,423$  м<sup>3</sup>/кг;

Расход перегретого пара  $D_{пг} = 950$  т/ч (263,89 кг/с);

Коэффициент полезного действия котла  $\eta_k = 91,9 \%$ ;

Теплота, вносимая с топливом  $Q_{тл} = 22,052$  кДж/кг;

Теплота, вносимая в топку с воздухом  $Q_{гв} = 1932$  кДж/кг;

Механический недожог топлива  $q_4 = 1 \%$ ;

Химический недожог топлива  $q_3 = 1 \%$ ;

Доля горючих в уносе  $\Gamma_{yh} = 3 \%$ ;

Полный расход топлива, поступающего в топку котла  $B = 26,67$  кг/с;

Доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителе  $\eta_{3y} = 99,7 \%$ ;

Температура уходящих газов  $t_{yx} = 130$  °С;



Эффективность улавливания золы  $\eta_a=99,7\%$ ;

Диаметр устья дымовой трубы  $D_0=7$  м;

Скорость газов в устье трубы  $\omega_0=7,22$  м/с;

Высота дымовой трубы  $H=180$  м.

Объем продуктов сгорания и теплосодержание рассчитываются на 1 кг твердого топлива при нормальных условиях.

Все расчеты будут проводиться для нормального режима работы котла, работающего на пылеугольном топливе.

2.4.1. Теоретическое количество воздуха, необходимого для горения твердого топлива

$$V^0 = 0,0889 * (C^P + 0,375 * S^P) + 0,266 * H^P - 0,0333 * O^P = 0,0889 * (43 + 0,375 * 0,6) + 0,266 * 2,7 - 0,0333 * 7 = 4,29 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

2.4.2 Теоретические объемы продуктов сгорания

$$V_{RO_2} = 0,0187 * (C^P + 0,375 * S^P) = 0,0187 * (43 + 0,375 * 0,6) = 0,8 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 * V_e^0 + 0,008 * N^P = 0,79 * 4,29 + 0,008 * 0,8 = 3,4 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124 * (9 * H^P + W^P) + 0,0161 * V_e^0 = 0,0124 * (9 * 2,7 + 6,3) + 0,0161 * 4,29 = 0,45 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

2.4.3 Действительный объем водяных паров при избытке воздуха  $\alpha > 1$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 * (\alpha - 1) * V_e^0 = 0,45 + 0,0161 * (1,25 - 1) * 4,29 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

2.4.4 Объем дымовых газов

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha - 1) * V_e^0 = 0,8 + 3,4 + 0,5 + (1,25 - 1) * 4,29 = 5,77 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

2.4.5 Масса дымовых газов

$$G_r = 1 - \frac{A^P}{100} + 1,306 * \alpha * V_B^0 = 1 - \frac{39,6}{100} + 1,306 * 1,69 * 4,29 = 10,074 \text{ кг} / \text{кг}$$

2.4.6 Массовая концентрация золовых частиц в продуктах сгорания

$$\mu_3 = \frac{A^P * a_{yn}}{100 * G_r}$$

где:  $a_{yn}$  - доля золы топлива, уносимой газами, принимается равной 0,95 для пылеугольных топок с сухим шлакоудалением.

$$\mu_3 = \frac{A^P * a_{yn}}{100 * G_r} = \frac{39,6 * 0,95}{100 * 10,074} = 0,037 \text{ кг/кг}$$

Соотношение между наиболее токсичными выбросами ТЭС в атмосферу зависит от вида сжигаемого топлива, температурного уровня в топке и способа организации топочного процесса и колеблется для различных котлоагрегатов в достаточно широких пределах.

#### 2.4.7 При сжигании твердого топлива

$$C_{пг} = 1,58 + 0,122 * 0,8 = 1,67$$

Приведенная влажность топлива рассчитывается следующим образом

$$W^п = \frac{W^P}{Q_H^P} = \frac{6,3}{16,463} = 0,383 \text{ кг/МДж}$$

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000} = \frac{2044,97 - 1200}{1000} = 0,84$$

где:  $k_t$  - температурный коэффициент изменения теплоемкости;

$t_a$  - ожидаемая адиабатная температура, °С.

Ожидаемую адиабатную температуру находят по формуле

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} * (1 + 10^{-5} * Q_T) = \frac{1800}{1,25} * (1 + 10^{-5} * 40080) = 2017,15 \text{ °С}$$

2.4.8 В качестве определяющего температурного параметра принимается адиабатная температура в зоне горения

$$T_a = \frac{Q_T}{V_{пг}^0 * C_{пг} + 1,016 * (\alpha_{гор} - 1) * V_{г}^0 * C_{г} + 0,01 * \alpha_{yn} * A^P * C_{зл}} + 273 \text{ , К}$$

где:  $Q_T$  - тепловыделение в зоне горения,  $\text{кгДж/кг}$  ;

$Q_H^P$  - теплота сгорания,  $\text{МДж/кг}$  ;

$Q_{ГВ}$  – тепло горячего воздуха, кДж/кг;

$C_{ПГ}$  и  $C_B$  - теплоемкость продуктов горения и воздуха при ожидаемой адиабатной температуре;

$\alpha_{гор}$  - избыток воздуха в зоне горения, для газоплотных котлов принимается равной  $\alpha_T$ .

Коэффициент избытка воздуха в топке следует выбирать в зависимости от вида сжигаемого топлива (при камерных топках с сухим шлакоудалением  $\alpha_T=1,025$ ) [27].

$$Q_T = Q_H^P * 10^3 = 40,08 * 10^3 = 40080 \text{ кДж} / \text{кг}$$

#### 2.4.9 Теплоемкость воздуха при высокой температуре

$$C_B = 1,46 + 0,092 * k_i = 1,46 + 0,092 * 0,84 = 1,5$$

$$T_a = \frac{40080}{4,423 * 1,67 + 1,016 * (1,025 - 1) * 4,29 * 1,5 + 0,01 * 0,95 * 39,6 * 1,218} + 273 = 2247 \text{ К}.$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой  $t_a$  и необходимым значением ( $T_a - 273$ ) не должно превышать 50 °С, иначе следует принять новое  $t_a$  и уточнить значения  $C_{ПГ}$  и  $C_B$ .

Так как расхождение ( $T_a - 273$ ) -  $t_a = (2247 - 273) - 2017,15 = 26,85$  °С < 50 °С, то  $t_a$  и ( $T_a - 273$ ) приняты верно.

2.4.10 Расход перегретого пара  $D_{ПЕ}$  задан, а величиной продувки барабана котла задаются в пределах

$$D_{ПР} = (0,01 - 0,02) * D_{ПЕ} = 0,01 * 263,89 = 2,64 \text{ кг} / \text{с}$$

Энтальпии перегретого пара  $i_{ПЕ}$ , питательной воды  $i_{ПВ}$  определяют по соответствующим параметрам [28].

2.4.11 Располагаемая теплота на 1 кг твердого (жидкого) или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива определяется по формуле

$$Q_{PT} = Q_H^P + Q_{ТЛ} + Q_{ГВ} = 40080 + 1932 + 22,052 = 42034 \text{ кДж} / \text{кг}$$

где:  $Q_{ТЛ}$  - теплота, вносимая с топливом,  $\text{кДж} / \text{кг}$  ;

$Q_{ГВ}$  - теплота, вносимая в топку с воздухом,  $\text{кДж} / \text{кг}$  .

2.4.12 Суммарные объемы продуктов сгорания и воздуха, определяются по расчетному расходу топлива с учетом механической неполноты сгорания

$$B_p = B * \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 26,67 \left(1 - \frac{1}{100}\right) = 26,4 \text{ кг/с}$$

## 2.4.2 Определение выбросов вредных веществ в атмосферу

### 2.4.2.1 Расчет выбросов твердых частиц

Количество летучей золы и несгоревшего топлива, выбрасываемых с дымовыми газами, определяется по формуле

$$M_{ТВ} = B * \frac{A^P}{100 - \Gamma_{УН}} * a_{УН} * (1 - \eta_{ЗУ}), \text{ г/с}$$

где:  $B$  - расход натурального топлива, г/с;

$A^P$  - зольность топлива на рабочую массу, %;

$a_{УН}$  - доля золы в уносе ( $a_{УН} = 0,85$ );

$\eta_{ЗУ}$  - доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителе;

$\Gamma_{УН}$  - содержание горючих в уносе, ( $\Gamma_{УН} = 3\%$ ).

$$M_{ТВ} = B * \frac{A^P}{100 - \Gamma_{УН}} * a_{УН} * (1 - \eta_{ЗУ}) = 26,4 * \frac{39,6}{100 - 3} * 0,85 * (1 - 0,997) = 0,03 \text{ г/с}$$

### 2.4.2.2 Расчет выбросов оксидов серы

Количество оксидов серы  $SO_2$  и  $SO_3$  в перерасчете на  $SO_2 (M_{SO_2})$ , выбрасываемых в атмосферу, определяется как

$$M_{SO_2} = 0,02 * B * S^P * (1 - \eta'_{SO_2}) * (1 - \eta''_{SO_2}), \text{ г/с}$$

где:  $S^P$  - содержание серы в топливе на рабочую массу, %;

$\eta'_{SO_2}$  - доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле ( $\eta'_{SO_2} = 0,02$ ), [28];

$\eta''_{SO_2}$  - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе попутно с улавливанием твердых частиц (доля оксидов серы ( $\eta''_{SO_2}$ ), улавливаемых в сухих золоуловителях, принимается равной нулю) [28];

$B$  - расход твердого топлива, г/с.

Доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле, зависит от зольности топлива и содержания свободной щелочи в летучей золе.

$$M_{SO_2} = 0,02 * B * S^P * (1 - \eta'_{SO_2}) * (1 - \eta''_{SO_2}) = 0,02 * 26,4 * 10^3 * 0,6 * (1 - 0,02) * (1 - 0) = 25,3 \text{ } \frac{\text{г}}{\text{г}}$$

### 2.4.2.3 Расчет выбросов оксида углерода

Количество оксида углерода, выбрасываемое с дымовыми газами, определяется по формуле

$$M_{CO} = 0,001 * C_{CO} * B * (1 - \frac{q_4}{100}), \frac{\text{г}}{\text{г}}$$

где:  $C_{CO}$  - выход оксида углерода при сжигании топлива определяется

$$C_{CO} = \frac{q_3 * R * Q_H^P}{1013}, \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

где:  $q_3$  - потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, %;

$R$  - коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленную содержанием в продуктах неполного сгорания оксида углерода. Для твердого топлива  $R = 1,0$ .

$$C_{CO} = \frac{q_3 * R * Q_H^P}{1013} = \frac{1 * 1 * 40,08 * 10^3}{1013} = 39,57 \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

$$M_{CO} = 0,001 * C_{CO} * B * (1 - \frac{q_4}{100}) = 0,001 * 39,57 * 26,4 * 10^3 * (1 - \frac{1}{100}) = 589,57 \frac{\text{г}}{\text{г}}$$

### 2.4.2.4 Расчет выбросов оксидов азота

Суммарное количество оксидов азота ( $NO_x$ ) в пересчете на полное окисление оксидов азота в диоксид азота ( $NO_2$ ), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами каждого котла при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива, вычисляется по формуле

$$M_{NO_x} = 0,34 * 10^{-7} * K * B * Q_H^P * (1 - \frac{q_4}{100}) * \beta_1 * (1 - \varepsilon_1 * r) * \beta_2 * \beta_3 * \varepsilon_2 * (1 - \eta_{аз} * \frac{n''}{n_k}).$$

где:  $B$  - расход натурального топлива,  $\frac{\text{г}}{\text{г}}$ ;

$K$  - коэффициент, характеризующий выход оксидов азота;

$\beta_1$  - коэффициент, учитывающий влияние на выход оксидов азота качества сжигаемого топлива,  $\beta_1=1$ ;

$\beta_2$  - коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых горелок – 1);

$\beta_3$  - коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления (при твердом шлакоудалении – 1);

$\varepsilon_1$  - коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий подачи их в топку;

$\varepsilon_2$  - коэффициент, характеризующий снижение выбросов оксидов азота (при двухступенчатом сжигании) при подаче части воздуха помимо основных горелок;

$r$  - степень рециркуляции дымовых газов, %;

$\eta_{аз}$  - доля оксидов азота, улавливаемых в азотоочистной установке;

$n'', n_k$  - длительность работы азотоочистной установки и котла, ч/год.

Коэффициент  $K$  вычисляется в зависимости от паропроизводительности котлов, для котлов паропроизводительностью в 200 т/ч и более

$$K = \frac{12 * D_{\phi}}{200 + D_{H}} = \frac{12 * 950}{200 + 950} = 9,91$$

где:  $D_H, D_{\phi}$  - номинальная и фактическая паропроизводительность.

При сжигании твердого топлива в формулы вместо  $D_{\phi}$  и  $Q_{\phi}$  подставляются  $D_H$  и  $Q_H$ .

$$\begin{aligned} M_{NO_x} &= 0,34 * 10^{-7} * K * B * Q_H^P * \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) * \beta_1 * (1 - \varepsilon_1 * r) * \beta_2 * \beta_3 * \varepsilon_2 * \left(1 - \eta_{аз} * \frac{n''}{n_k}\right) = \\ &= 0,34 * 10^{-7} * 9,91 * 26,4 * 10^3 * 40,08 * \left(1 - \frac{1}{100}\right) = 201,21 \text{ г/с} \end{aligned}$$

Для расчета загрязнения атмосферы выбросами диоксида и оксида азота в суммарном содержании  $NO_x$  их величину следует определять из выражений

$$M_{NO_2} = 0,8 * M_{NO_x} = 0,8 * 201,21 = 160,97 \text{ г/с}$$

$$M_{NO} = 0,13 * M_{NO_x} = 0,13 * 201,21 = 26,16 \text{ г/с}$$

### 2.4.3 Расчет и выбор золоулавливающей установки

В процессе работы над проектом необходимо произвести расчет и выбор золоулавливающей установки (ЗУ), так как очистка дымовых газов не только снижает выбросы золы в атмосферу, но и повышает надежность работы рабочих колес дымососов.

#### 2.4.3.1 Электрофильтры (ЭФ)

Расчет ЭФ производим в следующем порядке:

Задаем степень улавливания золы  $\eta = 99,7 \%$ .

Для заданного топлива по таблице 11 [29] находим критерий электрофизических свойств,  $K_\phi = 177$ , напряженность поля  $E = 240$  кВ, коэффициент  $K_{o.k.} = 0,83$ . Выбираем скорость дымовых газов.

Для золы топлива с высоким удельным электрическим сопротивлением (УЭС) при  $K_\phi > 100$  принимается скорость газов в сечении ЭФ  $\omega_\Gamma = 0,9$  м/с.

Определяем необходимое сечение корпуса ЭФ

$$F = \frac{V_d}{Z * \omega_\Gamma}, \text{ м}^2$$

где:  $Z$  - число параллельно включенных ЭФ, которое желательно выбирать равным числу дымососов (обычно  $Z = 2$ );

$V_d$  – объем дымовых газов.

Объем дымовых газов вычисляется следующим образом

$$V_d = V_p * V_\Gamma * (t_{yx} + 273) / 273 = 26,4 * 5,77 * (138 + 273) / 273 = 229,33 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Тогда сечение электрофильтра

$$F = \frac{V_d}{Z * \omega_\Gamma} = \frac{229,33}{2 * 0,9} = 127,4 \text{ м}^2$$

В таблице 4 приведены тип и параметры ЭФ.

Таблица 4 - Технические характеристики ЭФ серии ЭСГ

Марка электрофильтра	Площадь активного сечения, $F, \text{ м}^2$	Активная длина поля, $L_\Pi, \text{ м}$	Общая площадь осаждения $A, \text{ м}^2$	Габаритные размеры, мм		
				Длина	Ширина	Высота
ЭСГ-2Х4-48Х40	288	3,75	23760	20900	22150	13000

Примечание - Расстояние между коронирующим и осадительным электродами  $t = 0,15$ .

Уточняем среднюю скорость газов в ЭФ

$$\omega_{\Gamma} = \frac{V_{\partial}}{Z * F_{\partial\phi}} = \frac{127,4}{2 * 288} = 0,7 \text{ м/с}.$$

По таблице 1 [29] находим медианный диаметр частиц  $d$ , а в пункте 1 - среднюю напряженность поля  $E$  и коэффициент обратной короны  $K_{o.k.}$ . Затем определяем теоретическую скорость дрейфа [30]:

$$v_T = 0,25 * (K_{o.k.} * E)^2 * d = 0,25 * (0,83 * 240)^2 * 17 * 10^{-6} = 0,17 \text{ м/с}$$

Рассчитываем коэффициент вторичного уноса по формуле

$$K_{yH} = K_H * K_{\text{эл}} * K_{BC} * [1 - 0,25 * (\omega_{\Gamma} - 1)] = 0,5 * 1 * 1,7 * [1 - 0,25 * (0,7 - 1)] = 0,79.$$

где:  $K_H = 7,5 / H = 7,5 / 15 = 0,5$  – коэффициент высоты электрода;

$K_{\text{эл}}$  - коэффициент, учитывающий тип электрода, принимается равным 1;

$K_{BC}$  - коэффициент, учитывающий влияние режима встряхивания на унос; при непрерывном встряхивании для четырехпольного  $K_{BC} = 1,7$  [7].

Находим параметр золоулавливания по выражению:

$$П = 0,2 * K_{yH} * \sqrt{\frac{v_T}{\omega_T}} * \frac{n * L_{\Pi}}{t} = 0,2 * 0,79 * \sqrt{\frac{0,17}{0,7}} * \frac{4 * 3,75}{0,15} = 7,8.$$

где:  $n$  - число полей,  $n=4$ .

Уточняем степень улавливания золы по формуле:

$$\eta = (1 - \varphi_H) * \eta_a - \varphi_{\Pi} * (\beta - 1) * \varepsilon_a = (1 - 0,001) * 99,7 - 0,01 * (2 - 1) * 0,07 = 99,6\%.$$

где:  $\varepsilon_a, \eta_a$  - степень проскока и эффективность улавливания золы для потока, движущегося между электродами;

$\varphi_{\Pi}, \varphi_H$  - доля пылегазового потока, движущегося в ослабленном поле, и потока вне полей.

Для потока, движущегося в ослабленном поле  $\beta = 2$ .

Так как степень улавливания  $\eta = 99,6\%$  не превышает предварительно принятый  $\eta=99,7\%$ , то пересчет не требуется.

$$\varphi_{\Pi} = 1 - \frac{H_K}{H_{oc}} = 1 - 15 / 15,25 = 0,01.$$

где:  $H_K$  - высота коронирующего электрода;



$H_{oc}$  - высота осадительного электрода.

Величину  $\varphi_H = 0,001$  определяем в зависимости от схемы бункерных перегородок (Таблица 14 [7]).

$$\varepsilon_a = (1 + R * \Delta \bar{\omega}_{cp}^{-2}) * \varepsilon_p = (1 + 8,58 * 0,096) * 0,04 = 0,07$$

где:  $R$  - коэффициент, отражающий влияние неравномерности газового потока, определяется из выражения

$$R = 0,125 * (1 + \Pi) * \Pi = 0,125 * (1 + 7,8) * 7,8 = 8,58$$

$\Delta \bar{\omega}_{cp}^{-2} = 0,096$  - среднее по объему ЭФ значение отклонения квадрата скорости газов, находим из Таблицы 15 [31].

$\varepsilon_p = 0,04$  - степень проскока при равномерном поле, принимаем из Рисунка 1 [7]

Далее определяем режим встряхивания электродов, т.е. расчетные интервалы времени встряхивания по полям из выражения

$$\tau = 16,7 * \frac{A_n * m_0}{V_d * C_{ex.n.} * \eta_n}, \text{ мин.},$$

где:  $A_n$  - площадь осаждения поля (Таблица 4);

$C_{ex.n.}$  - концентрация золы на входе в поле,  $\frac{г}{м^3}$ ;

$\eta_n$  - степень очистки поля ЭФ;

$m_0$  - значение оптимальной пылеемкости, определяется в зависимости от УЭС по соотношению

$$m_0 = 3 - 0,25 * \lg \rho_V = 3 - 0,25 * 10,7 = 0,325 \frac{кг}{м^3}.$$

Значение  $\lg \rho_V$  берется из Таблицы 5, значение рассчитывается методом интерполяции ( $\lg \rho_V = 10,7$ ).

Таблица 5

Характеристики топлива и УЭС летучей золы

Месторождение топлива	Марка топлива	Вид мельницы	Медианный размер частиц $d_{50} \times 10^6, м$	Среднеквадратичное отклонение, $\delta$	$\lg \rho_V$				
					температура, °С				
					50	100	150	200	50
Экибастузское	СС	ШБМ	17	3,2	7,6	8,8	11,3	10,4	0,4

Концентрация золы на входе в  $m$ -е поле определяется из соотношения

$$C_{BX.П.} = C_{BX} * \varepsilon_{П}^{m-1},$$

где:  $C_{BX}$  - концентрация золы при входе в первое поле ЭФ.

$$C_{BX.П.} = C_{BX} * \varepsilon_{П}^{m-1} = 1 * 0,41 = 0,41$$

$$C_{BX.П.} = C_{BX} * \varepsilon_{П}^{m-1} = 3,2 * 0,41^{2-1} = 1,3$$

$$C_{BX.П.} = C_{BX} * \varepsilon_{П}^{m-1} = 10 * 0,41^{3-1} = 1,7$$

$$C_{BX.П.} = C_{BX} * \varepsilon_{П}^{m-1} = 31,6 * 0,41^{4-1} = 2,21$$

Из таблицы 16 [31] определяем расчетные интервалы времени встряхивания по полям

$$\tau_1 = 16,7 * \frac{A_n * m_0}{V_\delta * C_{ex.n.} * \eta_n} = 16,7 * \frac{23760 * 0,325}{406,85 * 0,41 * 0,41} = 1885,57 \text{ мин}$$

$$\tau_2 = 16,7 * \frac{A_n * m_0}{V_\delta * C_{ex.n.} * \eta_n} = 16,7 * \frac{23760 * 0,325}{406,85 * 1,3 * 0,41} = 594,687 \text{ мин}$$

$$\tau_3 = 16,7 * \frac{A_n * m_0}{V_\delta * C_{ex.n.} * \eta_n} = 16,7 * \frac{23760 * 0,325}{406,85 * 1,7 * 0,41} = 454,741 \text{ мин}$$

$$\tau_4 = 16,7 * \frac{A_n * m_0}{V_\delta * C_{ex.n.} * \eta_n} = 16,7 * \frac{23760 * 0,325}{406,85 * 2,21 * 0,41} = 349,87 \text{ мин}$$

Степень очистки поля ЭФ определяем из выражения

$$\eta_{П} = 1 - \varepsilon_{П} = 1 - 0,51 = 0,41$$

где: степень проскока поля

$$\varepsilon_{П} = \varepsilon^{1/n} = 0,07^{1/4} = 0,51$$

где:  $n$  - число полей по ходу газов.

Рассчитываем мощность электроагрегата на каждое поле по выражению

$$J_{\Pi} = J_A * A_{\Pi}, \text{ мА}$$

где:  $J_A$  - удельный ток,  $\frac{\text{мА}}{\text{м}^2}$  ;

$A_{\Pi}$  - поверхность осадительных электродов, приходящихся на один агрегат.

$$A_{\Pi} = A/n = 23760/4 = 5940 \text{ м}^2$$

Удельный ток принимаем  $0,2 \frac{\text{мА}}{\text{м}^2}$  при сжигании каменного угля [31].

$$J_{\Pi} = J_A * A_{\Pi} = 5940 * 0,2 = 1188 \text{ мА}$$

Выбираем агрегат питания и определяем мощность агрегата питания на одно поле по формуле

$$P_{\Pi} = J_{\Pi} * U_A = 1188 * 10^{-3} * 100 = 118,8 \text{ кВт} * \text{А}$$

где:  $U_A$  - амплитудное значение напряжения принимается равным 100 кВ.

Затем находим мощность на все поля ЭФ

$$P = n * P_{\Pi} = 4 * 118,8 = 475,2 \text{ МВт} * \text{А}$$

Определяем затраты потребляемой мощности на  $1 \text{ м}^3$  очищаемого газа по соотношению

$$\frac{P}{V_0} = 475,2 / 229,33 = 2,07 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$$

#### **2.4.4. Расчет и выбор дымовой трубы**

##### **2.4.4. 1 Расчет дымовой трубы**

Принимаем предварительно высоту дымовой трубы  $H=180 \text{ м}$ .

Минимально допустимая высота дымовой трубы  $H$ , при которой обеспечивается  $C_m \leq \text{ПДК}$  для нескольких дымовых труб одинаковой высоты при наличии фоновой загазованности  $C_{\phi}$  от других источников вредности, рассчитывается по формуле

$$H = \sqrt{\frac{A * M * F * m}{\text{ПДК} - C_{\phi}} * \sqrt[3]{\frac{N}{V * \Delta T}}}, \text{ м}$$

где:  $A$  - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы при неблагоприятных метеорологических условиях и

определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ в атмосфере, принимается для Казахстана равным 200 мг/м<sup>3</sup>;

$M$  - суммарное количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, г/с;

$F$  - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе для газообразных примесей  $F = 1$

$V$  - общий объем дымовых газов на ТЭС, м<sup>3</sup>/с;

$m$  - безразмерный коэффициент, учитывающий условия выхода газозвушной смеси из устья источника выброса.

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 * \sqrt{f} + 0,34 * \sqrt[3]{f}}$$

где: параметр  $f$  определяется как

$$f = \frac{10^3 * \omega_0^2 * D_0}{H^2 * \Delta T}$$

где:  $D_0$  - диаметр устья дымовой трубы, м;

$\omega_0$  - скорость газов в устье трубы, м/с;

$N$  - число одинаковых дымовых труб ( $N=2$ );

$\Delta T$  - разность между температурой выбрасываемых газов и средней температурой воздуха, под которой понимается средняя температура самого жаркого месяца в 14.00 часов.

$$\Delta T = t_{yx} - t_b = 130 - 35 = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$f = \frac{10^3 * \omega_0^2 * D_0}{H^2 * \Delta T} = \frac{10^3 * 7,22^2 * 7}{180^2 * 95} = 364,9$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 * \sqrt{f} + 0,34 * \sqrt[3]{f}} = \frac{1}{0,67 + 0,1 * \sqrt{364,9} + 0,34 * \sqrt[3]{364,9}} = 0,2$$

При выбросе сернистого ангидрида и оксида азота учитывается их совместное действие в атмосфере. В этом случае выброс приводится к выбросу по оксиду серы из выражения

$$M = M_{SO_2} + 5,88 * M_{NO_2} = 25,3 + 5,88 * 160,97 = 971,8 \text{ г/с}$$

Определение высоты трубы с учетом суммарного воздействия SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>

$$H_{SO_2+NO_2} = \sqrt{\frac{A * M * F * m}{ПДК - C_{\phi}} * \sqrt[3]{\frac{N}{V * \Delta T}}} = \sqrt{\frac{200 * 971,8 * 1 * 0,2}{0,085} * \sqrt[3]{\frac{2}{229,33 * 95}}} = 135,25 м$$

Определение высоты дымовой трубы при выбросе твердых частиц

$$H_{тв} = \sqrt{\frac{A * M * F * m}{ПДК - C_{\phi}} * \sqrt[3]{\frac{N}{V * \Delta T}}} = \sqrt{\frac{200 * 0,03 * 2 * 0,2}{0,5} * \sqrt[3]{\frac{2}{229,33 * 95}}} = 44 м$$

Так как высоты труб  $H_{SO_2+NO_2} = 135,25 м$  и  $H_{тв} = 44 м$  не превышают предварительно принятую высоту  $H=180 м$ , то расчет трубы закончен.

Для обеспечения наилучшего рассеивания вредных примесей в атмосфере желательно иметь минимальное количество дымовых труб.

Вывод: при расходе пылевидного Экибастузкого угля, равного 26,67 кг/с, поступающего для сгорания в топку котла, расчеты показали, что электрофильтр обеспечивает степень улавливания золы на 99,6 %, что в реальных условиях работы на ЭС АО «ЕЭК» реально. Поэтому проведенный анализ работы электрофильтра и расчеты верны.

### **3 Анализ эффективности рукавных фильтров в условиях работы Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)**

В настоящее время в энергетике получают применение рукавные фильтры, использовавшиеся ранее в других отраслях промышленности для улавливания пыли. Поскольку электрофильтры плохо улавливают частицы размером 10 мкм и меньше, это стало причиной того, что в США на новых ТЭС электрофильтры заменяют рукавными фильтрами. Фильтрация в них осуществляется через гибкую ткань, изготовляемую из тонких нитей диаметром от 100 до 300 мкм. Фильтры благодаря цилиндрической форме получили название рукавных. С помощью рукавных фильтров можно достичь высокой степени улавливания пыли до 99,9 % [32].

Основные преимущества использования рукавных фильтров в энергетике:

- рентабельное решение, как для стандартного применения, так и для сложных проблем загрязнения воздуха и окружающей среды;
- нет необходимости в обширных и загрязняющих золоотвалах;
- возможность дальнейшего коммерческого применения отфильтрованной сухой золы;
- небольшая занимаемая площадь;
- герметичность, отсутствие утечек воздуха и золы;
- серийные, взаимозаменяемые, унифицированные компоненты;
- быстрая и удобная сборка;
- быстрая и удобная установка и съем фильтрующих рукавов без входа в пылесборную камеру и при ограниченной площади;
- рациональное соотношение фильтрующей поверхности внутреннего объема;
- энергосбережение – низкое потребление сжатого воздуха;
- автоматический контроль и диагностика перегрузки и забивания рукавов;
- легкое и удобное техобслуживание;
- обслуживание отдельных секций без отключения всей установки.

#### **3.1 Классификация промышленных рукавных фильтров по их конструктивным признакам**

Конструктивное исполнение промышленных (рукавных) фильтров весьма разнообразно. Основные классификационные признаки: тип фильтрующих элементов, из которых формируется поверхность фильтрации; система регенерации фильтровального материала и тип устройства регенерации.

##### **3.1.1 Классификация по типу фильтрующих элементов**

В промышленных фильтрах тканевых и из нетканых материалов применяются два основных типа фильтрующих элементов: бескаркасные

рукава, в основном цилиндрические, и жесткокаркасные, состоящие из каркаса, обтянутого тканью или нетканым материалом.

Применение бескаркасных элементов предполагает подачу фильтруемого газа внутрь рукава в сохранение формы элемента вследствие подпора давления в нем.

Применение жесткого каркаса в конструкции фильтрующего элемента позволяет придавать последнему любую форму – цилиндрическую, плоскую, клиновую, звездчатую и другую, сохраняемую неизменной в процессе фильтрации и регенерации; поддерживать постоянное натяжение фильтрующего материала за счет плотного крепления его на каркасе, а также осуществлять фильтрацию газа, подавая его снаружи внутрь фильтруемого элемента [33].

Применение жесткокаркасных элементов позволяет улучшить использование рабочего объема фильтров, а также применять интенсивные способы регенерации ткани, которые невозможно осуществить в бескаркасных рукавных фильтрах.

К недостаткам цилиндрических фильтрующих элементов следует также отнести сложность раскроя и пошива фильтрующего материала, закрепления и герметизации его краев на каркасе. В аппаратах с жесткокаркасными элементами стенки необходимо выполнять съемными или предусматривать в них большие проблемы для извлечения элементов, что затрудняет герметизацию корпуса.

### **3.1.2 Классификация рукавных фильтров в зависимости от системы регенерации**

Наиболее передовым способом регенерации фильтров является процесс импульсной продувки, разработанный фирмой MikroPul, который в настоящее время уже применяется в качестве стандартного. При этом рукава фильтра продуваются снаружи внутрь, а опорная корзина придает рукаву необходимую устойчивость. Регенерация на установках с импульсной продувкой осуществляется за счет интенсивного воздействия воздушной струи, которая обеспечивает раздувание рукава, удаляет фильтровальный осадок на фильтре за счет передачи импульса и изменяет направление воздушного потока на короткое время. В большинстве случаев регенерация может производиться и «на ходу» - в ходе рабочего цикла фильтрования [38].

Существенное влияние на конструкцию фильтров оказывает способ регенерации фильтровального материала.

В промышленных фильтрах регенерацию проводят по двум основным принципам:

- изменение направление хода газа через фильтровальный материал – обратная продувка, во время которой происходит выдувание уловленной пыли из ткани;

- разрушение пылевого слоя на фильтровальном материале его деформацией различными способами – встряхивание рукавов; встряхивание может производиться как с помощью механизмов, так и воздействием на ткань аэродинамических сил и звуковых импульсов.

Обратная продувка – более универсальное средство, так как при любой обратной продувке происходит одновременно и некоторая деформация пылевого слоя, т.е. имеется определенный эффект механического разрушения этого слоя [34].

Современные рукавные фильтры снабжены системами регенерации, включающими устройства обратной продувки или сочетающими устройства обратной продувки с устройствами для встряхивания рукавов.

Фильтры с посекционной системой регенерации фильтровального материала характеризуются тем, что регенерации подвергается целая секция многосекционного фильтра. На период регенерации секцию отключают от подачи в нее газа.

В фильтрах с поэлементной системой регенерации обратной продувке подвергают не всю секцию фильтра, а последовательно отдельные фильтрующие элементы или их группы.

Конструктивное исполнение фильтров с поэлементной продувкой сложнее, чем фильтров с посекционной продувкой, вследствие введения каркасных фильтрующих элементов, устройства сложных подвижных систем внутри фильтров и т.д (Рисунок 4).

Существенное преимущество поэлементной системы регенерации состоит в том, что она весьма интенсивна, так как воздействует непосредственно на запыленные участки ткани и поэтому продолжительность регенерации значительно сокращается по сравнению с посекционными способами, а это в свою очередь ведет к сокращению количества продувочного газа. Регенерацию ткани осуществляют, не прекращая подачи запыленного газа в фильтр пыли в отдельные его участки. При этом на регенерацию и очистку продувочного газа отвлекается незначительное число элементов и таким образом эффективно используется вся фильтрующая поверхность [35, 36].

Интенсификация процесса регенерации позволяет использовать в фильтрах с поэлементной системой регенерации плотные фильтровальные материалы (например, войлоки), которые в фильтрах с посекционной продувкой регенерировать трудно или невозможно, а также дает возможность повысить нагрузки на ткань.





Рисунок 4 - Классификация рукавных фильтров

### 3.2 Характеристика и основные конструктивные особенности рукавных фильтров

Рукавные фильтры – это надежные и эффективные пылеулавливающие аппараты, предназначенные для сухой очистки промышленных пылегазовоздушных выбросов. Рукавные фильтры находят широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, целлюлозно-бумажной, теплоэнергетической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других областях.

В настоящее время конструкции рукавных фильтров и ассортимент производимых фильтроматериалов позволяют применять их в любых отраслях промышленности. Применение рукавных фильтров обусловлено с одной стороны, постоянно возрастающими требованиями к защите окружающей среды, с другой – высокими технико-экономическими показателями и надежностью.

Частицы зольной пыли отделяются от дымового газа в двух одинаковых расположенных параллельно друг - другу корпусах фильтра. Каждый фильтр обрабатывает дым, исходящий от одного котла. Каждый корпус фильтра разделен на два расположенных рядом друг с другом отсека или модуля. Каждый отсек фильтра, включая его подводящий и отводящий газоходы, можно также назвать линией рукавного фильтра. Рукавные фильтры будут располагаться на том же месте, где сейчас находится существующий электрофильтр.

В каждом корпусе фильтра имеются две отдельные камеры – входная и выходная. Каждая входная камера доставляет дымовой газ в

соответствующий отсек фильтра. Поступающий снаружи насыщенный пылью дымовой газ проходит через рукава фильтра, далее через проходную камеру, и в соответствующей выходной камере собирается чистый воздух.

Пусовой газход расположен между двумя входными камерами.

Пыль накапливается на наружной поверхности рукавов фильтра слой за слоем. Для сброса пыли в пирамидальные бункеры-хопперы, предусмотрена интерактивная пульсирующая воздушно-реактивная система. Для транспортировки пыли из выпускного проема бункера в бункер для хранения золы предусмотрена система золоудаления [37].

### **Строение рукавных фильтров**

Рукавный фильтр имеет следующее строение (Рисунок 5):

Каждый корпус рукавного фильтра состоит в основном из следующих частей:

- отдельные входная и выходная камеры в каждом отсеке фильтра;
- два отсека фильтра, расположенные рядом друг с другом. Каждый отсек фильтра выполнен из листовой стали толщиной 5 мм. Отсеки фильтра опираются на балочную конструкцию.
- экраны, направляющие газ в верхнюю часть фильтровальных рукавов; отсюда газ течет вниз вдоль фильтровальных рукавов; вниз течет лишь малая часть потока газа;
- рукава фильтра и опорные платы рукавов;
- две проходные камеры, образующие верхний этаж фильтра;
- четыре пирамидальных, сужающихся книзу бункера под каждым отсеком фильтра. Бункеры выполнены из листовой стали 6 мм толщиной;
- система очистки фильтра;
- опорная структура и погодозащитный навес;

#### **1) Впускной коллектор (патрубок) и демпфер**

Форма воздуховода перед рукавным фильтром имеет значительное влияние на производительность. Впускной коллектор обеспечивает равномерное течение каждого компонента, поэтому внутренние изгибы следует избегать. Коническая форма коллектора призвана по возможности сохранить постоянными скорости газа.

#### **2) Выпускной канал (патрубок) и демпфер**

Выходной канал может быть спроектирован для малых значений скоростей потока газа, чтобы сохранить перепад давления. Выходной демпфер изготавливается в виде перегородки. Этот тип заслонки гарантирует, что когда она находится в закрытом положении, практически нет утечки газа. Демпфер имеет вертикальный вал, а лопасти могут быть круглыми или эллиптическим.

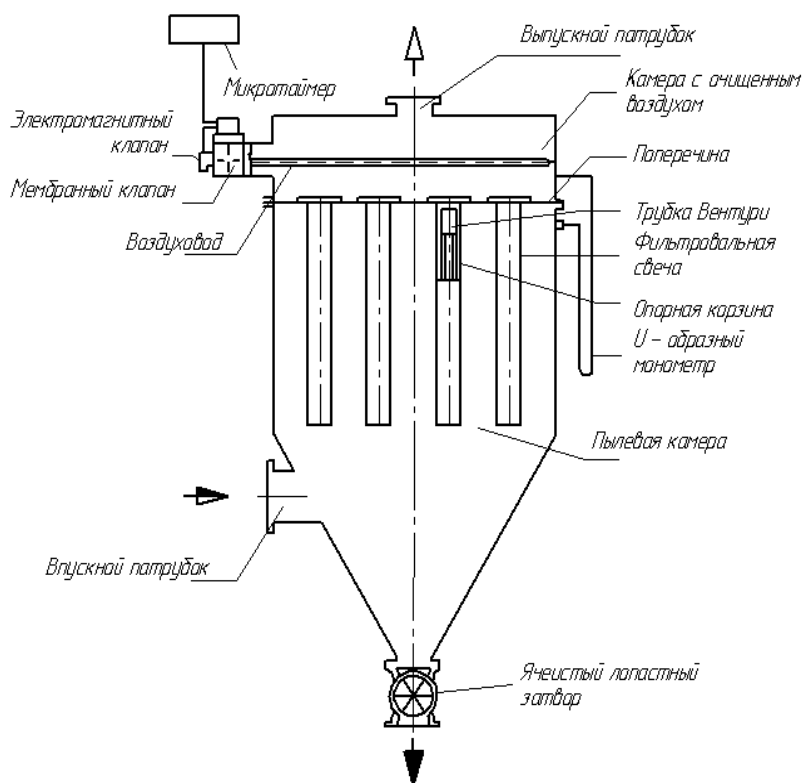


Рисунок 5 - Строение рукавного фильтра

### 3) Корпус

Конструкция корпуса фильтра предусматривает различное количество фильтрующих отсеков, работающих параллельно, с общим входным и выходным коллекторами.

Разделение всего корпуса на отсеки определяется стандартными конструктивными элементами, состоящими из внешних усиленных стен и внутренних стен со стороны коллектора, соединенных друг с другом при помощи перегородок, что позволяет изолировать компоненты друг от друга.

Каждое отделение состоит из камеры «грязного газа» (ниже) и камеры «чистого газа» (выше), разделенные пластинами, поддерживающими рукава. Нижняя камера состоит из корпуса фильтра и содержит фильтрующие рукава и заканчивается пылесборным бункером.

### 4) Система управления рукавного фильтра

Системой управления рукавного фильтра является контроллер, который при помощи новых технологий, предлагает улучшить контроль за выбросами и снизить техническое обслуживание и эксплуатационные расходы. Система может оптимизировать толщину слоя пыли на рукавах, обеспечивая максимальную эффективность сбора с минимальным использованием сжатого воздуха. Система управления рукавного фильтра автоматически обнаруживает механические и электрические неисправности очистных клапанов, тем самым упрощая доступ к ним. Специальной функцией является анализ отказов рукава, обнаружение и идентификация утечки в рукавах.

### 5) Импульсная система очистки

Возможности системы очистки:

- низкое давление / низкий расход воздуха;
- непрерывная очистки;
- низкий уровень выбросов субмикронной пыли.

Ключевым моментом этой системы очистки Alstom состоит из уникального запатентованного импульсного клапана, интегрированного в коллектор для максимальной эффективности.

Каждый питатель связан с импульсным клапаном, установленном на резервуаре сжатого воздуха.

Сжатый воздух устремляется из внутренней части рукава наружу, навстречу потоку неочищенного газа. Поверхность рукава, которая при фильтрации грязного газа прилипает к клетке за счет перепада давления, из-за действий сжатого потока воздуха, отстает от клетки. При импульсном повторении процесса пыль стряхивается с внешней поверхности рукава и попадает в бункер сбора [39].

#### б) Конструкция рукава и каркаса

Рукавный фильтр является ключевым элементом в обеспечении надежного высокого показателя качества. Конструкция рукава включает в себя бамперы в нижней части, чтобы избежать столкновения между рукавами. Поддерживающий каркас имеет жесткую конструкцию, чтобы обеспечить надлежащую поддержку фильтрующему элементу в любых условиях. Предусмотрены процедуры жесткого контроля качества сварных соединений, чтобы избежать перемещения рукавов. Каркас можно удалить без использования инструментов. Важными элементами являются низ рукава и опорные кольца [40].

Важной особенностью является возможность обходиться без инструментов. Это повышает производительность установки. Для быстрого и удобного доступа к рукавам область фильтра была разработана с большими верхними крышками, которые могут быть легко сняты при помощи лебедки. Практически все проверки и ремонт осуществляются с чистой стороны фильтра в условиях нормальной атмосферы [41].

### **3.3 Процесс газоочистки в рукавных фильтрах**

В подавляющем большинстве случаев размер осаждаемых частиц во много раз меньше среднего размера пор фильтра. Когда ткань чистая, улавливание частиц пыли из газа основано не на отсеивающем ее действии, а на столкновении частиц с волокнами и нитями ткани под действием различных механизмов осаждения, рассмотренных выше. При осаждении частиц на волокнах и нитях ткани уменьшается размер пор между ними, что приводит к более быстрому осаждению следующих порций пыли. Поэтому после пропускания через ткань некоторого количества запыленного газа в слое ее со стороны входа газового потока практически все поры заполняются пылью и в дальнейшем газовый поток проходит через поры в слое осевшей пыли. Этот слой называют первичным и он непосредственно соприкасается с волокнами и нитями ткани [42].

При образовании пылевого слоя из частиц какого-либо размера поры между ними обычно бывают такого же размера, как эти частицы, или даже меньше. Поэтому первичный слой осевшей пыли улавливает частицы из газа, как бы отсеивая их, практически полностью. Основная масса частиц не проникает внутрь ткани, а оседает снаружи первичного слоя или в его порах и толщина слоя пыли растет.

Вначале прохождения газа через чистую ткань улавливается только часть пыли, часто небольшая. При заполнении пор пылью степень очистки быстро возрастает и после образования первичного сплошного слоя пыль улавливается практически полностью.

В тканевых фильтрах, работающих с регенерацией методами встряхивания, обратной продувки и их сочетанием, применяют обычно скорости фильтрации от 0,3 до 1,2 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>\*мин) [43].

Система очистки рукавного фильтра является ключевой частью в успешной работе установки. Система ОРТИРОВА была разработана и продолжает совершенствоваться на протяжении 25 лет.

Качество работы системы очистки влияет на:

- срок службы рукавов;
- газообразные или твердые выбросы;
- потерю давления на фильтровальных рукавах;
- общее потребление энергии.

Основным параметром, влияющим на отделение слоя пыли от фильтровального рукава является сила пульсации, генерируемая внутренним давлением и ослабляющая рукав.

Основным принципом пульсационной системы очистки является создание повышенного давления внутри фильтровального рукава, путем быстрого вдувания большого количества сжатого воздуха в направлении, противоположном рабочему направлению фильтрации.

В системе очистки требуется использовать компоненты с низкой потерей давления, с большой площадью сечения потока и оптимальной геометрией в зоне впрыска воздуха в рукав [44].

Оптимальная система потребляет большое количество сжатого воздуха/газа. В результате кратковременного действия, рукав растягивается минимально (менее 2 % от объема ткани) при расширении до круглой формы. В то же время не происходит изгиба или трения ткани о каркас рукава.

Быстрая и эффективная очистка не повлияет на срок службы фильтровального рукава. Напротив, она продлевает срок службы ткани, сохраняет ткань чистой и работоспособной весь период эксплуатации. Система «постепенного расширения» напротив, приводит к забиванию частей фильтровальной поверхности.

Когда давление импульса на фильтровальном рукаве уменьшается до значений, меньших чем давления вокруг фильтровального рукава, рукав возвращается в исходное состояние на каркас.. При коротком (быстром) импульсе, возвратная сила имеет ту же величину, что и сила очистки, что

приведет к резкому возврату рукав каркас, что в свою очередь, приведет к истиранию и локальным напряжениям в чувствительных изгибающих частях.

Эффект резкого возврата рукава может быть значительно снижен путем постепенного уменьшения давления импульса управляемым способом, «мягкий возврат» фильтровального рукава.

Наибольшее количество пыли проникает в фильтр во время импульса; на самом деле во время обратного импульса, когда рукав возвращается на каркас.

Если обратный импульс уменьшить до «мягкого возврата», совместно с уменьшением зазора между рукавом и каркасом, проникновение пыли сведется к минимуму. Меньшее проникновение пыли означает уменьшение количества пыли внутри рукава, которая механически и химически реагирует с волокнами ткани, тем самым увеличивается срок службы фильтровального рукава.

Система импульсной очистки основана на системе ОРТИРОВА. Данная система включает сбалансированное сочетание пульсационных рукавов, объема пульсационных резервуаров, раздающих пульсационных труб и давления в ресиверах.

Система ОРТИРОВА играет важную роль в обеспечении длительного жизненного цикла фильтровальных рукавов, а также в очистке всех рукавов. Крайне важно оказывать как можно меньшее воздействие на рукава, во время очистки, расширения и возвращения их на каркас [45].

### **3.4 Материалы фильтровальных тканей рукавных фильтров**

На сегодняшний день для использования в работе при температуре свыше 260 градусов Цельсия, экстремальных рН значениях и высоких концентрациях абразивной пыли в газе существуют различные виды материалов из оптоволокна. Полиэстер, полиакриловый материал, полифениленсульфит и полиамид – самые распространенные материалы.

В наиболее распространенных промышленных фильтрах – рукавных применяют фильтровальные материалы двух видов: ткани и нетканые материалы, изготавливаемые из различных природных и синтетических волокон.

Длина природных волокон составляет от нескольких до десятков сантиметров. Синтетические волокна для фильтровальных материалов получают в виде очень длинных нитей – филаментного волокна или коротких отрезков – штапельного волокна длиной несколько сантиметров. Филаментная нить состоит из большого числа скрученных тонких волокон.

Диаметр природных и синтетических волокон составляет от нескольких до десятков микрометров (применяют при филаментных нитях и минофиламентную нить, состоящую из одного элементарного волокна, т.е. моноволокна, диаметром 50 мкм и больше) [46].

Фильтровальные ткани изготавливают кручением волокон в нити (пряжу) с последующем переплетением нитей в ткань определенной структуры.

При изготовлении фильтровальных тканей применяют три главных переплетения (структуры) нитей основы (продольных нитей) и утка (поперечных нитей): полотняное, саржевое и сатиновое.

Общая пористость фильтровальных тканей (в процентах) складывается из расходных (сквозных) мер между нитями основы и утка и межволоконных пор, находящихся в промежутках между волокнами нитей. Ее величина составляет (в зависимости от вида ткани) от 50 до 60 % и более.

Размеры сквозных пор в типовых фильтровальных тканях составляют от 100 до 200 мкм.

В последнее время за рубежом большое внимание уделяется материалам, используемым в мешочных фильтрах.

Рабочую поверхность фильтровального рукава можно представить в виде многослойной решетки, через которую проходит запыленный пылегазовый поток. В начальный момент фильтрации по мере запыления чистого фильтровального материала на волокнах образуются пылевые наросты, которые постепенно смыкаясь, образуют пористую фильтрующую перегородку. Этот период работы фильтра характеризуется увеличением его гидравлического сопротивления.

После регенерации фильтровальной ткани процесс повторного запыления протекает аналогично. Однако осаждаемые частицы пыли заполняют трещины уже существующего, но разрушенного регенерацией слоя. Таким образом, фильтровальный материал не только выполняет роль подложки, а от его свойств зависят эффективность фильтрации и гидравлическое сопротивление аппарата.

Увеличение температурного интервала применяемых тканей, производимых из простого волокна, примесей искусственных тканей (стекло волокно, металл) позволяют улавливать мелкие частицы, увеличить поток газа через фильтр, поднять температуру газа уменьшить сопротивление фильтра, что приводит в конечном результате к понижению расхода электроэнергии и, следовательно, к уменьшению эксплуатационных расходов и дает возможность упростить обслуживание фильтров а также повысить их КПД

Известно около тридцати модифицированных тканей, работающих в интервале температур от 140 до 1250 °С. через некоторые ткани можно пропускать газы в интервале температур от 600 до 1800 °С. Все виды ткани как правило, работают при максимальной влажности (не выше шести процентов), выдерживают воздействие максимальных температур практически при незначительной влажности.

Большое внимание уделяется стойкости ткани при воздействии на них кислот, щелочей, органических соединений типа сальвент и прочих. Как правило, ткани хорошо стоят при температуре газа порядка 160 °С. Однако если температура газа намного выше указанной, выбор ткань небольшой. Следует отметить, что в настоящее время в зарубежной практике большое внимание оказывается улавливанию частиц мелкого размера до 2,5 мкм.

Большую трудность создают газы, имеющие большое количество золы. В этом случае необходимо выбирать прочную ткань со специальной

обработкой. Ткани, выполненные из игольчатого волокна, обеспечивают большой срок эксплуатации фильтра в сочетании с небольшой стоимостью, имеют высокие механические свойства, эластичны, и могут очищаться пульсационной струей воздуха [47].

Сухой войлок производится на основе натуральной или синтетической ткани с набором свойств, необходимых для удлинения срока службы фильтра, исключение его быстрого выхода из строя. В процессе его изготовления обеспечивается первый класс прочности и эластичности, что очень важно в процессе эксплуатации фильтра.

Механические свойства достигаются тепловой обработкой, химической обработкой (пропиткой смазочных материалов), увеличением прочности за счет использования стальной проволоки, что позволяет повышать огнестойкость материала.

Технологи расширяют возможности войлока за счет создания микроскопической оболочки на его поверхность, увеличивается эффективность улавливания за счет регулирования размера пор и их распределения на поверхности ткани. Создается возможность улавливать мельчайшие частицы размеров 0,5 мкм.

Для производства простого волокна используется твил, сатин, штапель, много- и однопрядная нитевая ткань со специальной химической обработкой. Предусматривается удаление статических зарядов специальной конструкцией ткани.

Ткань, выполненная из 100 % тефлонового каучука, предотвращает глубокое проникновение частиц в материал, не ограничивает пропускную способность фильтра, создает водонепроницаемую оболочку ткани. Материалы применяемые итальянскими фирмами, как синтетические, так и натуральные для повышения их химических и термических свойств и устойчивой работы до температуры 280 °С подвергаются тепловой и термической обработки [48].

При химической обработке они пропитываются антистатическими и огнестойкими материалами, подвергаются ламинированию тефлоновым каучуком. Материал изготавливается из ткани и смеси ткани и пряжи. Сама пряжа, изготовленная из многослойной нити, полностью задерживает частицы в процессе фильтрации. В зависимости от диаметра улавливаемых частиц подбирается диаметр нити для того, чтобы задерживать частицы размером от одного мкм и более. В результате образуются поры, как малого, так и большого диаметра, позволяющие улавливать частицы различного размера [49].

К тканям и нетканым материалам, применяемым в качестве фильтровальных материалов, предъявляются следующие требования:

- 1) высокая пылеемкость в процессе фильтрации и способность удерживать после регенерации пыль в количестве, достаточном для обеспечения высокой эффективности улавливания высокодисперсных частиц;



- 2) сохранение оптимально высокой воздухопроницаемости в равновесно запыленном состоянии повышая регенерируемость;
- 3) высокая механическая прочность и стойкость к истиранию при многократном изгибе, стабильность размеров и свойств при повышенных температурах и агрессивном воздействии химических компонентов газа;
- 4) минимальное влагопоглощение;
- 5) низкая стойкость, обеспечивающая оптимальные технико-экономические показатели очистки пыли в тканевых фильтрах.

Выполнение перечисленных требований связано с выбором в каждом конкретном случае очистки фильтрующего материала, который будет работать в определенных, наиболее благоприятных для них условиях.

### **3.5 Влияние параметров работы ЭС на эффективность эксплуатации рукавных фильтров**

При очистке газов от пылей с высоким электрическим сопротивлением, фильтровальные материалы из синтетических и стеклянных волокон заряжаются, а это создает опасность возникновения пожара в фильтре в результате электрического пробоя воздушного промежутка между рукавом и корпусом фильтра. Для защиты от электролиза в материалы вплетают тонкие электропроводящие волокна или пропитывают их антистатическими электропроводящими составами. Для предотвращения трудноудаляемых отложений материалам придают водоотталкивающие свойства. Для этого их обрабатывают метил - или фенилсиликонами. Такие покрытия сохраняют свои свойства длительное время при температуре до 200 градусов С.

Срок службы фильтроэлементов в рукавных фильтрах одна из основных проблем при применении фильтрующих установок для очистки дымовых газов золы. Достижение  $50 \text{ мг/м}^3$  на выходе из рукавных фильтров не является какой-нибудь проблемой, особенно если используется правильно подобранные, современные фильтроматериалы, а замеры происходят в течении первых двух лет. С течением времени эксплуатации фильтроэлементов выходная запыленность растет из-за старения фильтроматериала. Если зола является абразивной пылью, то кроме фактора износа фильтроэлементов потоком входящих в установку дымовых газов, следует учитывать фактор износа материала фильтроэлементов трением и перегибом его вокруг элемента каркаса, импульсом сжатого воздуха при регенерации, или вокруг кольца, вшитого в фильтроэлемент, или элементов каркаса другой формы, когда применяется для регенерации рукава обратная продувка, механическое встряхивание или другой способ удаления улавливаемой пыли с поверхности и из структуры фильтроматериала [50].

Разделим фактор износа фильтроэлементов на две составляющие:

- механический износ фильтроматериала;
- химический (в основном), старение фильтроматериала.

Механический износ зависит от частоты регенерации (встряхивания) фильтроэлементов и зависит прямо пропорционально от запыленности

дымовых газов, входящих в фильтровальную установку. Экибастузские угли в при высокой зольности дают запыленность дымовых газов после котла до  $50 \text{ г/м}^3$  (иногда и более). Устойчивая работа рукавного фильтра имеет место при запыленности газов входящих в установку фильтрации до  $10 \text{ г/м}^3$ , особенно, если медианный диаметр частиц менее 10-15 мкм.

Химический износ (старение) фильтроэлементов определяется правильным выбором фильтроматериала. Это успешно делают ведущие в мире разработчики фильтроматериала, по исходным данным, которые выдаются разработчиками установок фильтрации. Данные, которые определяет разработчик фильтроматериала по сроку химического износа также можно улучшить, путем подготовки газов, снизив величину характерных внешних факторов.

Задачей разработки установки очистки дымовых газов, кроме обеспечения экологических показателей, является ее минимальное влияние на КПД энергоблока.

Для этого надо:

- чтобы дымосос обеспечивал условия оптимального сжигания топлива в котле;
- чтобы по причинам, возникающим в установке очистки газов, котел не останавливался.

В процессе работы рукавных фильтров происходит постепенное отложение пыли в порах фильтровального материала и на его поверхности. По мере роста слоя пыли растет и гидравлическое сопротивление аппарата. Если периодически не удалять пылевой слой с поверхности материала произойдет «запирание фильтра», т.е. тягодутьевой аппарат (обычно вентилятор) будет не в состоянии протягивать газ через забившуюся фильтровальную перегородку. В результате постепенного забивания, будет падать эффективность фильтра и в конце концов, движение газа через фильтр прекратится. Для поддержания фильтра в работоспособном состоянии необходимо периодически удалять пыль с поверхности фильтровального материала из пор[51].

### **3.6 Расчет рукавного фильтра**

Эффективность очистки газов в рукавных фильтрах достаточно высока, но величина эта часто зависит от многих факторов и может снижаться при браке фильтровальной ткани, плохом прижиме фильтровальных рукавов на патрубках, износе или вытяжке фильтровальных рукавов. С учетом того, что величина выходной концентрации в значительной мере обусловлена проскоком пыли в периоды, следующие сразу за регенерацией, и уносом частиц из фильтровальной

ткани в результате локальных изменений скоростей газов и чрезмерной деформации фильтровальной ткани, при расчетах газовую нагрузку не следует завышать.

Таким образом, основным фактором, определяющим площадь фильтровальной ткани в установке, является перепад давления на фильтровальной ткани, а не величина эффективности очистки газа. Только в отдельных случаях допустимая газовая нагрузка на фильтровальную ткань может определяться величиной выходной концентрации пыли.

### **Исходные данные для расчета рукавного фильтра**

Расчет рукавного фильтра из иглопробивной ткани, нить РТФЕ профильного типа 204/450S, материал Rastex, производства Alstom. Расчет рукавного фильтра будет произведен на нормальный режим котла, работающего на пылеугольном топливе. Рукавный фильтр с импульсной продувкой предназначен для очистки газов от котла ПК-39-II, приняв следующие исходные данные (данные взяты из лабораторных анализов ЭС АО «ЕЭК», расчетов производственно-технического отдела):

Расход газа при нормальных условиях  $V_{ог} = 648694 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

Температура газа перед фильтром (температура уходящих газов);

$T_{yx} = t_r = t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Барометрическое давление  $p_{бар} = 101,3 \text{ кПа}$ ;

Температура холодного воздуха  $T_{хв} = t_b = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Разрежение перед фильтром  $p_r = 350 \text{ Па}$ ;

Расход острого пара  $D_{оп} = 400,68 \text{ т/ч}$ ;

Расход перегретого пара  $D_{пп} = 357,19 \text{ т/ч}$ ;

Зола рабочая  $A^p = 39,6 \text{ } \%$ ;

Низшая теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 3924 \text{ ккал/кг}$ ;

Содержание горючих в уносе  $C_{ун}^r = 1,7 \text{ } \%$ ;

Содержание горячих в шлаке  $C_{шл}^r = 1,2 \text{ } \%$ ;

Влага на рабочую массу  $W^p = 4,7 \text{ } \%$ ;

Энтальпия острого пара  $I_{оп} = 800,1 \text{ ккал/кг}$ ;

Энтальпия питательной воды  $I_{оп} = 258,8 \text{ ккал/кг}$ ;

Энтальпия горячего промперегрева  $I_{пп} = 849,26 \text{ ккал/кг}$ ;

Энтальпия холодного промперегрева  $I_{пп} = 718,37 \text{ ккал/кг}$ ;

Площадь сечения трубы  $F = 6 \text{ м}^2$ ;

Плотность газа  $\rho_0 = 1,33 \text{ кг/м}^3$ ;

Концентрация пыли в газе перед фильтром  $z_0 = 13,3 \text{ г/м}^3$ ;

Средний размер частиц  $d_m = 1,75 \text{ мкм}$ ;

Плотность частиц пыли  $\rho_{ч} = 1250 \text{ кг/м}^3$ ;

Гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p = 1,5 \text{ кПа}$ ;

Потери тепла с уходящими газами  $q_2 = 8 \text{ } \%$ .

3.6.1 Допустимая температура газа для иглопробивной ткани, нить РТФЕ профильного типа 204/450S, материала Rastex равна  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  (паспортные данные). Определяем подсос воздуха с температурой  $t_b = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  перед фильтром, необходимый для охлаждения газа с  $t_r = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры  $t_r = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Объемный расход воздуха, подаваемый на импульсную продувку и подмешивающийся к очищаемому газу

$$V_{\text{ов}} = V_{\text{ог}}' * \frac{t_2' - t_2}{t_2 - t_2} = V_{\text{ог}}' * \frac{150 - 130}{130 - 30} = 0,2 * V_{\text{ог}}' \text{ м}^3/\text{ч}$$

3.6.2 Полный расход газа, идущего на фильтрование при нормальных условиях

$$V_{\text{ог}} = V_{\text{ог}}' + V_{\text{ов}} = 648694 + 0,2 * V_{\text{ог}}' = 648694 + 0,2 * 648694 = 778433 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3.6.3 Расход газа, идущего на фильтрование, при рабочих условиях

$$V_{\text{г}} = V_{\text{ог}} * \frac{(273 + t_2) * 101,3}{273 * (p_{\text{бар}} - p_2)} = 778433 * \frac{(273 + 30) * 101,3}{273 * (101,3 - 0,35)} = 864061 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3.6.4 Запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях

$$z_1 = (z_{01} * V_{\text{ог}}') / V_{\text{г}} = (13,3 * 648694) / 864061 = 9,98 \text{ г}/\text{м}^3$$

3.6.5 Допустимая газовая нагрузка на фильтр (скорость фильтрации) в данных условиях,  $\text{м}^3/\text{м}^2 * \text{мин}$

$$q_{\text{ф}} = q_{\text{н}} C_1 C_2 C_3 C_4 C_5,$$

где:  $q_{\text{н}}$  – нормативная удельная газовая нагрузка,  $\text{м}^3/\text{м}^2 * \text{мин}$ . Согласно табличным данным для угольной пыли  $q_{\text{н}} = 1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 * \text{мин}$ ;

$C_1$  – коэффициент, учитывающий способ регенерации, для импульсной продувки  $C_1 = 1$ ;

$C_2$  – коэффициент, учитывающий начальную запыленность газа. При запыленности  $z < 3 \text{ г}/\text{м}^3$  определим  $C_2 = 1,15$  [67].

$C_3$  – коэффициент, учитывающий дисперсный состав пыли. Преобладают частицы диаметром менее 10 мкм. Определим  $C_3 = 0,9$  [67].

$C_4$  – коэффициент, учитывающий температуру газа. Примем  $C_4 = 0,72$  [67].

$C_5$  – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки. Если принять, что запыленность на выходе  $50 \text{ мг}/\text{м}^3$  и выше, то  $C_5 = 0,95$ .

$$q_{\text{ф}} = q_{\text{н}} C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 = 1,2 * 1 * 1,15 * 0,9 * 0,72 * 0,95 = 0,85 \text{ м}^3/\text{м}^2 * \text{мин}$$

При  $q_{\text{ф}} = 0,85 \text{ м}^3/\text{м}^2 * \text{мин}$ ,  $\omega_{\text{ф}} = 0,0095 \text{ м}/\text{с}$  [67]

3.6.6 Полное гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p$  складывается из сопротивления корпуса  $\Delta p_{\text{к}}$  и сопротивления фильтровальной перегородки  $\Delta p_{\text{ф}}$

$$\Delta p = \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{ф}}$$

### 3.6.7 Плотность газа при рабочих условиях

$$\rho_r = \rho_0 * \frac{273 * (p_{бар} - p_2)}{(273 + t_2) * 101,3} = 1,33 * \frac{273 * (101,3 - 0,35)}{(273 + 130) * 101,3} = 0,9 \text{ кг/м}^3$$

### 3.6.8 Гидравлическое сопротивление корпуса фильтра

$$\Delta p_k = \xi \omega_{вх}^2 \rho_r / 2 = 2 * 8^2 * 0,9 / 2 = 58 \text{ Па}$$

где:  $\omega_{вх}$  – 8 м/с принимаемая скорость газа при входе в фильтр;

$\xi=2$  – задаваемый коэффициент сопротивления.

3.6.9 Сопротивление фильтровальной перегородки складывается из сопротивления запыленной ткани  $\Delta p_1$  и сопротивления накапливающегося слоя пыли  $\Delta p_2$ . Постоянные фильтрования принимаем по данным таблицы П.2.3.12 [52]

$$A = 2300 * 10^6 \text{ м}^{-1}; B = 80 * 10^9 \text{ м/кг}$$

3.6.10 Динамический коэффициент вязкости газа  $\mu_0$ , вычисляется по формуле

$$\mu_0 = 1,75 * 10^{-6} * \frac{(273 + t)^{0,683}}{273^{0,683}} = 1,75 * 10^{-6} * \frac{(273 + 150)^{0,683}}{273^{0,683}} = 2,36 * 10^{-6} \text{ Па*с}$$

3.6.11 Динамический коэффициент вязкости газа при рабочих условиях

$$\mu = \mu_0 * \frac{273 + C}{T_{abc} + C} * \left(\frac{T_{abc}}{273}\right)^{1,5} = 2,36 * 10^{-6} * \frac{273 + 124}{423 + 124} * \left(\frac{423}{273}\right)^{1,5} = 3,31 * 10^{-6} \text{ Па*с}$$

где:  $C=124$  (по Графику 1.17 и Таблицы П.2.3.12 [52]).

3.6.12 Гидравлическое сопротивление собственно фильтровальной перегородки при  $\Delta p=1500$  кПа может быть равно

$$\Delta p_\phi = \Delta p - \Delta p_k = 1500 - 58 = 1442 \text{ Па.}$$

3.6.13 Продолжительность периода фильтрования между двумя регенерациями по формуле (П.2.3.31 [52]) равна

$$t_\phi = \frac{(\Delta p_\phi / \mu \omega_\phi) - A}{B \omega_\phi z_1} = \frac{(1442 / 3,31 * 10^{-6}) - 2300 * 10^{-6}}{80 * 10^9 * 9,5 * 10^{-3} * 9,98 * 10^{-3}} = 600 \text{ с}$$

3.6.14 Количество регенераций в течение 1 ч

$$n_p = 3600 / (t_\phi + t_p) = 3600 / (600 + 40) = 6 \text{ регенераций}$$

где:  $t_p = 40$  с – задаваемая продолжительность процесса регенерации.

3.6.15 Расход воздуха на регенерацию, принимая, что скорость обратной продувки равна скорости фильтрования

$$V_p' = V_r n_p t_p / 3600 = 864061 * 6 * 40 / 3600 = 57604 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3.6.16 Предварительно определяем необходимую фильтровальную площадь фильтра

$$F_\phi' = 2 * (V_r + V_p') / 60 q_\phi = 2 * (864061 + 57604) / 60 * 0,85 = 36144 \text{ м}^2$$

3.6.17 Так как  $F_\phi'$  близка к расчетной площади, то выбираем для установки фильтр марки 2 MEGA 2\*1-3511-8 с поверхностью фильтрования  $F_\phi = 44536 \text{ м}^2$ , состоящий из четырех секций ( $N_c = 4$ ) с поверхностью фильтрования по  $F_c = 11134 \text{ м}^2$ .

3.6.18 Площадь фильтрования  $F_p$ , отключаемая на регенерацию в течение 1 ч

$$F_p = N_c F_c n_p t_p / 3600 = 4 * 11134 * 6 * 40 / 3600 = 2969 \text{ м}^2$$

3.6.19 Уточненное количество воздуха, расходуемое на обратную продувку в течение 1 ч

$$V_p = \omega_\phi N_c F_c n_p t_p = 0,0095 * 4 * 11134 * 6 * 40 = 101542 \text{ м}^3$$

3.6.20 Окончательная площадь фильтрования

$$F_\phi = 2 * \left( \frac{V_r + V_p}{60 q_\phi} + F_p \right) = 2 * \left( \frac{864061 + 101542}{60 * 0,85} + 2969 \right) = 43804 \text{ м}^2$$

что близко к площади фильтрования для выбранной марки фильтра ( $F_\phi = 44536 \text{ м}^2$ ).

3.6.21 Продолжительность периода фильтрования должна быть выше суммарного времени регенерации остальных секций

$$\begin{aligned} t^\phi &> (N_c - 1) t_p \\ 600 &> (4 - 1) * 40 \\ 600 &> 120 \end{aligned}$$

3.6.22 Фактическая удельная газовая нагрузка

$$q_{\phi} = \frac{V_c / 60 + F_c q_{\phi}}{F_{\phi} - F_c} = \frac{864061 / 60 + 11134 * 0.85}{44536 - 11134} = 0,71 \text{ м}^3/(\text{м}^2 * \text{мин})$$

т.е. очень близка к расчетной

### 3.6.23 Потери тепла в окружающую среду

$$q_5 = \frac{0.4 * 475}{D_{on}} = \frac{0,4 * 475}{400,68} = 0,47\%$$

### 3.6.24 Потери тепла с физическим теплом шлака

$$q_6 = \frac{A^p * 0,05 * 0,223 * 600 * 100}{Q_n^p * (100 - C_{шл}^z)} = \frac{39,6 * 0,05 * 0,223 * 600 * 100}{3924 * (100 - 1,2)} = 0,07\%$$

### 3.6.25 Потери тепла с механическим недожогом

$$q_4 = \frac{A^p * 7830}{Q_n^p} * \left( \frac{0,05 * C_{шл}^z}{(100 - C_{шл}^z)} + 0,95 * \frac{C_{ун}^z}{(100 - C_{ун}^z)} \right) = \frac{39,6 * 7830}{3924} * \left( \frac{0,05 * 1,2}{(100 - 1,2)} + \frac{0,95 * 1,7}{(100 - 1,7)} \right) = 1,35\%$$

### 3.6.26 Коэффициент полезного действия котлоагрегата «брутто»

$$\text{КПД}^{\text{бп}} = 100 - (q_2 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - (8 + 1,35 + 0,47 + 0,07) = 90 \%$$

### 3.6.27 Расход топлива, сжигаемого в котле за опыт

$$B = \frac{D_{on} (I_{on} - I_{не}) + D_{nn} (I_{znn} - I_{xnn})}{Q_n^p * \text{КПД}^{\text{бп}} * 10^{-5}} = \frac{40068 * (8001 - 2588) + 35719 * (84926 - 71837)}{3924 * 89 * 10^{-5}} = 7554,175 \text{ кг/ч}$$

ч

### 3.6.28 Количество золы, поступающее с дымовыми газами в установку

$$G_{\text{п}} = \frac{B * A^p * 0,95}{100 - C_{ун}^z} = \frac{0,95 * 7554,175 * 39,6}{100 - 1,7} = 28619,14 \text{ кг/ч}$$

### 3.6.29 Количество золы, поступающее с дымовыми газами в атмосферу

$$G_{\text{ун}} = 4 * g_0 * F / (1000 * 3,14 * 0,000081) = 28,32 \text{ кг/ч}$$

3.6.30 Коэффициент очистки дымовых газов золоулавливающей установкой

$$\text{КПД} = \frac{G_n - G_{yn}}{G_n} = \frac{28619,14 - 28,32}{28619,14} = 99,9\%$$



#### **4 Сравнительный анализ процесса газоочистки в рукавных и электрических фильтрах**

Проведем сравнительную характеристику электрофильтра и рукавного фильтра.

Очистка газов от пыли в рукавных фильтрах происходит за счет прохождения загрязненного газа сквозь фильтровальную ткань. Взвешенные в газе частицы пыли, оседая на рукавах, создают дополнительный фильтрующий слой, что позволяет добиваться эффективной очистки до  $50 \text{ мг/м}^3$ .

В отличие от рукавных фильтров, в электрофильтре очистка производится за счет придания частицам пыли электрического заряда. Частицы, имеющие диаметр менее  $1 \text{ мкм}$  плохо принимают и отдают заряд, вследствие чего практически не улавливаются в электрофильтрах. Слишком мелкие частицы, имеющие низкую остаточную влажность – высокоомные – так же плохо улавливаются [53].

Максимально возможная степень очистки газа в электрофильтре  $100 \text{ мг/м}^3$ , но обычно степень очистки в электрофильтрах не превышает  $200 \text{ мг/м}^3$ . К тому же эффективность электрофильтра замеряется в стационарном режиме при отсутствии встряхивания электродов. При этом в период встряхивания запыленность после электрофильтров достигает  $400 \text{ мг/м}^3$  и более. К тому же при переходных режимах работы системы (печи, котла) входящая запыленность повышается в несколько раз, а поскольку эффективность электрофильтра определяется его КПД, а это величина постоянная, то и на выходе запыленность также повышается в несколько раз.

Рукавные фильтры рассчитаны на давление  $5\ 000 \text{ Па}$  и имеют гидравлическое сопротивление от  $800$  до  $1200 \text{ Па}$ . Сопротивление электрофильтра составляет  $300 \text{ Па}$ , это позволяет использовать для рукавного и электрофильтра дымососы одного типоразмера. Кроме того, электрофильтр требует дополнительного электропотребления для питания механизмов встряхивания и агрегатов питания электродов. Соответственно оба фильтра имеют энергопотребление одного порядка [54].

#### **Конструктивные различия и экономические преимущества рукавных фильтров перед электрофильтрами.**

Обычно габариты рукавного фильтра как минимум в 2 раза меньше габаритов электрофильтра при равной производительности. Уменьшение металлоемкости фильтра позволяет существенно снизить не только стоимость самого фильтра, но и минимизировать затраты на строительство фундаментов под фильтр. Блочность конструкции позволяет сократить срок монтажа. Срок эксплуатации рукавов составляет более пяти лет, так же как и электродов для электрофильтра. Цена фильтровального материала гораздо ниже, чем цена механического оборудования заменяемого в электрофильтре. Кроме того, плановые ежегодные осмотры электрофильтра приводят к простой газоочистки в течение  $14$  суток/год.

Рукавные фильтры лишены таких недостатков, потому что обслуживание производится без остановки фильтра. Длина рукава составляет от 1 до 2,5 м, а высота всего 0,32 м. При этом рукав закреплен с двух сторон, а материал опирается на прочный металлический каркас, который имеет специальный профиль для более эффективного отделения частиц от материала в момент регенерации. Это позволяет одному рабочему без дополнительных грузоподъемных устройств легко производить осмотр и замену рукавов. При этом для обслуживания даже самых больших фильтров достаточно не более трех рабочих.

Сравнительная характеристика электрофильтра и рукавного фильтра представлена в таблице 6.

Таблица 6 - Сравнительная таблица газоочистных фильтров

<b>Электрофильтр</b>	<b>Рукавный фильтр</b>
Низкое гидравлическое сопротивление (200 Па) (+)	Высокое гидравлическое сопротивление (2200 Па) (-)
Проскок частиц в поле коронного разряда и в конструкции всего электрофильтра (в последнем бункере, а также проскок при встряхивании одного электрода) (-)	Проскок частиц практически отсутствует (+)
Запирание коронного разряда на первом и следующих полях электрофильтра (-)	По мере роста слоя пыли на фильтроматериале растет гидравлическое сопротивление аппарата, что приведет к «запиранию» фильтра (-)
В строении фильтра имеются движущиеся части (отбивные молотки, крепления коронирующего и осадительного электродов, механизмы встряхивания), что часто приводит к поломке (-)	Нет движущихся частей, что повышает надежность в эксплуатации. (+)
Электрофильтры имеют сложную конструкцию, требуют высококвалифицированный персонал при обслуживании, часто требуют ремонта из-за движущихся частей (-)	Имеют простую конструкцию, высокую надежность в работе и не требуют высококвалифицированного персонала для обслуживания (+)
Имеют большие габариты и как правило очень тяжелые (-)	Имеют небольшие габариты и массу, чем электрофильтры таких же габаритов (+)
Для замены и ремонта элементов электрофильтров, необходимо остановить работу всего блока, чтобы устранить поломку.(-)	Легкость замены и ремонта элементов без остановки основного оборудования (+)
Температура очищаемых газов до 160 °С (-)	Температура очищаемых газов до 400 °С (+)
-	За счет существенного снижения металлоемкости капитальные затраты на строительство составляют 50-65 % от стоимости установок с электрофильтрами

Окончание таблицы 6

Электрофильтр	Рукавный фильтр
Удельный расход электроэнергии на очистку 1000 м <sup>3</sup> газа составляет 1 кВт/ч (-)	Удельный расход электроэнергии на очистку 1000 м <sup>3</sup> газа составляет 0,5 кВт/ч (+)
-	Время на монтаж и ввод в эксплуатацию значительно меньше, что является критически важным, при проведении реконструкции, требующих остановки основного технологического оборудования (+)
Чувствительны к электрофизическим свойствам пыли и входной запыленности. (-)	Нечувствительны к электрическим свойствам пыли и входной запыленности. (+)
Срок службы осадительных и коронирующих электродов 1 год (потом возможна замена на новые). (-)	Срок службы рукавов (5 лет до замены рукавов). (+)
-	Использование фильтров снимает проблемы с износом колес дымососов, а также исключает коррозию дымовых труб. (+)
Аварийное отключение одного полуполя приводит к увеличению общего выброса золы на 20-30 %. (-)	При отключении одного полуполя, три остаются в работе, тем самым обеспечивая неизменную степень очистки дымовых газов. (+)
Слой золы с высоким удельным сопротивлением, осевшей на осадительных электродах, является эффективным изолятором, что приводит к росту потенциала на осевшей пыли, тем эффективность золоуловителя снижается. (-)	Слой золы, осевшей на рукаве является дополнительным фильтрующим слоем, затем при продувке вся пыль осыпается. (+)
Достигается выходная запыленность 200 мг/нм <sup>3</sup> (+)	Достигается выходная запыленность 50 мг/нм <sup>3</sup> (++)
Срок службы не менее 15 лет (-)	Срок службы не менее 25 лет (+)

Вывод: в Европе применение рукавных фильтров для очистки газов энергетических котлов является практически повсеместным. Это обусловлено экологическими европейскими нормами. В странах ЕС действует директива Евросоюза которая обязывает обеспечивать эффективность фильтрации, при которой остаточная запыленность не превышает 50 мг/м<sup>3</sup>, по эффективности улавливания частиц менее 2,5 мкм. Данному стандарту не удовлетворяет ни один электрический фильтр. Поэтому когда этот стандарт будет введен, все электрические фильтры перестанут удовлетворять экологическим требованиям.

На сегодняшний день на ведущих промышленных предприятиях Европы электрофильтры устанавливаются только как первая ступень очистки от пыли в общей технологической цепочке газоочистки. Газы, прошедшие

очистку в электрофильтрах, требуют установки дополнительных агрегатов для доочистки их до степени, установленной нормативными документами [55].

Следовательно, самый лучший способ очистки золовых выбросов на ТЭС, работающих на высокозольных углях, является применение рукавных фильтров.

## 5 Исследование возможности применения рукавных фильтров на Аксуской ТЭС (АО «ЕЭК»)

### 5.1 Исследование влияния степени запыленности ткани на гидравлическое сопротивление рукавных фильтров

Экологический проект предполагает в будущем установку рукавного фильтра с пульсовой очисткой воздушными струями на ТЭС АО «ЕЭК».

Данный фильтр будет очищать дымовые газы от энергоблока мощностью 300 МВт с Экибастузским угольным топливом. Блок состоит из двух котлов производительностью 950 т/ч. На каждый котел предполагается установить один рукавный фильтр.

Важнейшим процессом, определяющим эффективную работу рукавных фильтров, является регенерация запыленной ткани. Отсутствие в настоящее время основ расчета оптимальных параметров режима регенерации обуславливает важность проведенного исследования. Кроме того, продолжительность, периодичность и интенсивность регенерации оказывает существенное влияние на степень обеспыливания газов рукавными фильтрами и стойкость фильтровального материала. Оптимальные условия регенерации должны обеспечить надежную и экономичную работу рукавных фильтров.

Целью исследования явилось изучение характеристик режима регенерации для повышения надежности и экономичности работы рукавных фильтров при сохранении заданной эффективности улавливания.

Промышленная эксплуатация показала, что ткани, работающие при повышенных гидравлических сопротивлениях, изнашиваются быстрее. *Гидравлическое сопротивление запыленной ткани* определяет величину растягивающего усилия, стремящегося сорвать рукав с мест крепления.

Удельная газовая нагрузка является важным показателем, определяющим срок службы материала. Мировая практика показывает, что оптимальная удельная газовая нагрузка в общепромышленных фильтрах находится в пределах от 0,25 до 2,5 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>мин [57].

Снижение проницаемости фильтроткани является результатом двух одновременно протекающих процессов - кольтматации ткани (отложение пыли на волокнах ткани рукава) и эвакуации отложений из ее пор. При эффективном удалении засоряющих частиц из пор ткани ее проницаемость в течение определенного времени не изменяется и в работе ткани устанавливается индукционный период. Индукционный период - время от момента начального контакта частицы пыли золы с тканью рукава до момента полного прилипания в поры материала рукавного фильтра.

Неполное удаление частиц способствует быстрому накоплению отложений в порах. Такой режим работы фильтроткани характеризуется отсутствием индукционного периода и ростом *гидравлического сопротивления R ткани* с самого начала фильтрования.

Гидравлическое сопротивление фильтров является одним из основных показателей их работы. Обычно сопротивление запыленной ткани составляет от 750 до 1500 Па, исключение составляют стеклоткани 1500-2000 Па.

Очистку тканевых рукавов производят несколькими способами: механическим встряхиванием, обратной струйной и импульсной продувкой рукавов.

Механическое встряхивание вертикальных рукавов осуществляют волнообразным изменением натяжения ткани рукавов с помощью механических вибраторов. Изготовители фильтров рекомендуют выполнять встряхивание через каждый час работы в течение 15 с.

При обратной струйной продувке, применяемой при отложении пыли на внутренней поверхности рукава, изменяют направление дутья, подавая на регенерацию свежий или очищенный воздух. Для выполнения обратной продувки фильтр отключают посекционно или полностью. Расход воздуха на обратную продувку принимают до 10 % от количества очищаемого газа.

При импульсной продувке очистка рукавов происходит посредством пульсации сжатого воздуха, который вдувается вдоль оси в открытый верхний конец рукава. Пульсовой клапан, подсоединенный к резервуару, в котором содержится сжатый воздух, короткими импульсами осуществляет распределение сжатого воздуха. Пульсирующие струи сжатого воздуха поступают к ряду рукавов по трубке, снабженной маленькими инжекторами. Эти инжекторы с высокой скоростью направляют выбросы сжатого воздуха в верхние концы рукавов. По мере того, как воздушный взрыв распространяется по рукаву вниз, давление и ударная волна передаются вниз вдоль рукава. Рукав расширяется, и поскольку его форма стремительно меняется, становясь не вогнутой, а выпуклой, то перегиб ткани и слои золы трескаются. По мере расширения рукава до его полной емкости и быстрого убывания скорости ударной волны, в результате действия инерции частицы в слое золы отслаиваются. Оторвавшиеся фрагменты спрессованной пыли собираются в бункер, расположенный под рукавами [59].

Снижение гидравлического сопротивления ткани при регенерации обусловлено разрушением пылевого слоя. Характер изменения сопротивления ткани в зависимости от продолжительности регенерации не зависит от свойств фильтровальных материалов [70].

Исследуем сопротивление ткани в зависимости от продолжительности регенерации.

В Таблице 7 приведены значения гидравлических сопротивлений ткани в зависимости от разных видов ткани [71].

Таблица 7 - Эксплуатационные показатели установок рукавных фильтров

Тип фильтра	Фильтровальный материал	Температура газов, °С	Запыленность газов, г/м	Скорость фильтрации, м/мин	Гидравлическое сопротивление ткани, Па	Срок службы ткани, мес
РФГ-5	ЦМ цельнотканый материал арт. 83	90-100	10-36/0,01-0,1	0,4-0,8	690-880	3-9
РФГ-5	НЦМ нитронный цельнотканый материал	100-120	10-36/0,015	0,4-1,1	1370	5-8
РФГ-5	лавсан арт.86031	130	20-24/0,005	1,4	1275	10
РФГ-5	лавсан арт.931505	80	2,6/0,013	1,1	980	9
УРФМ-1	оксалон	200	9,7/0,09	0,25	1080	8
УРФМ-2	оксалон	180	8-9/0,05-0,08	0,8-0,9	1760	8

Зададим значения гидравлического сопротивления  $P$  (Па) по оси  $X$  и продолжительность регенерации  $t$  (с) по оси  $Y$  для фильтровального материала ЦМ (цельнотканый материал).

В таблице 8 приведены заданные параметры.

Таблица 8 - Таблица заданных значений для построения графика

$t$ , с	$P$ , Па
10	690
20	700
30	710
40	720
50	740

По средством стандартной программы Excel построен график зависимости сопротивления на примере ткани ЦМ от продолжительности регенерации продувкой сжатого воздуха (Рисунок 6). Данный график построен по усредненным значениям пятнадцати проведенных опытов.

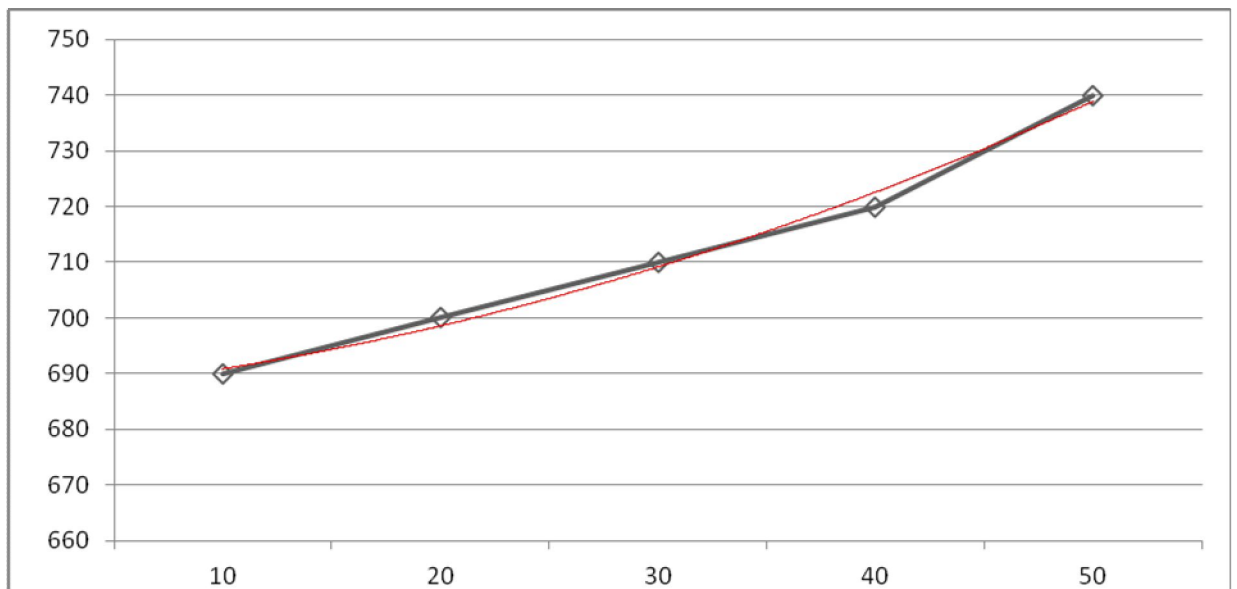


Рисунок 6 - График зависимости сопротивления ткани ЦМ (цельнотканного материала) от продолжительности регенерации продувкой сжатого воздуха

Данный график представляет полиномиальную функцию, уравнение которой имеет следующий вид:

$$t=1,4286P^2+3,4286P+686$$

Коэффициент достоверности равен 0,9923, что доказывает действительность и точность аппроксимации.

Из графика видно, что чем больше продолжительность регенерации, тем выше растет гидравлическое сопротивление ткани. Поэтому при подборе материала на рукава фильтра, необходимо тестировать их в исследовательских лабораториях и при эксплуатации задавать необходимую продолжительность регенерации, так как гидравлическое сопротивление влияет на величину растягивающего усилия, что может привести к разрыву рукава.

Вывод: полученные расчеты и построенный график на Рисунке 5 дают право утверждать, что чем больше интервал времени на регенерацию фильтра, тем больше текущий перепад давления газов в рукавном фильтре, следовательно, будет расти слой пыли на ткани рукавов, тем самым увеличивая гидравлическое сопротивление фильтра и ухудшая степень очистки рукавов.

Рассмотрим пример, когда котлы будут работать на угольном топливе непрерывно. Температура будет поддерживаться в пределах допустимых значений. Все отсеки с рукавами фильтра расположены в ряд, но иногда один отсек может быть отключен от линии в целях инспекции, обслуживания или устранения неполадок. Все вспомогательное оборудование включено. Рассмотрим, как будет меняться перепад давления рукавного фильтра  $p$  (Па),



в зависимости от заданных интервалов времени  $t$  (мин) между импульсами воздуха, идущих на очистку рукавов в оставшихся работающих секциях.

Способ управления регенерацией рукавных фильтров включает подачу запыленных газов в рукавный фильтр, регенерацию рукавных фильтров путем продувки сжатым воздухом и через определенный период времени, измерение давления газов до и после модуля рукавных фильтров. Промежутки времени между регенерациями рукавных фильтров устанавливают в зависимости от перепада давления до и после модуля рукавных фильтров, при этом устанавливают максимальный и минимальный промежутки времени между импульсами на регенерацию фильтров, а также минимальное и максимальное значения перепада давления на модуле рукавных фильтров, и в случае минимального и максимального заданных значений перепадов давления устанавливают, соответственно, максимальный и минимальный заданные промежутки времени между импульсами на регенерацию.

На основе каталога пылеочистного оборудования [72] за основу построения графика взяты следующие технические данные ( $p$ , Па – перепад давления,  $t$ , мин – промежуток времени между импульсами) (Таблица 9).

Таблица 9 – Значения перепада давления и промежутков между импульсами

$p$ , Па	$t$ , мин
1200	32,7
1800	12
1800	12,1
1800	11,8
1800	12,3

Построенный график зависимости перепада давления от времени между импульсами воздуха (Рисунок 7) в программе Excel дает технический результат: автоматическое регулирование интервала времени между регенерациями фильтров и действиями струй сжатого воздуха в зависимости от перепада давления на рукавном фильтре, увеличение уровня очистки газов, снижение расхода сжатого воздуха на регенерацию.

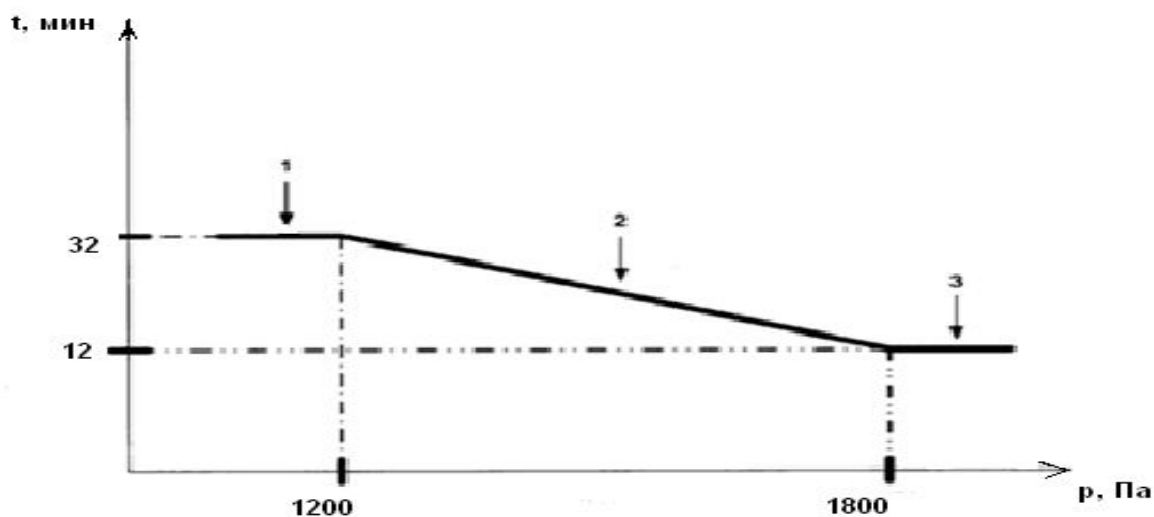


Рисунок 7 - График зависимости перепада давления от заданного интервала времени между импульсами для иглопробивной ткани.

Данный график построен по усредненным значениям пятнадцати проведенных опытов.

В качестве основного способа регенерации ткани рукавов будем использовать импульсную продувку, так как она будет обеспечивать высокоэффективный процесс очистки, с низким падением давления на фильтре и как следствие обеспечит снижение энергопотребление дымососа.

Исследуем непрерывный процесс очистки импульсами сжатого воздуха запыленной ткани при регенерации рукавных фильтров. Регенерация рукавных фильтров включает следующие основные этапы: подачу запыленных газов в рукавный фильтр, регенерацию путем продувки сжатым воздухом рукавных фильтров и через определенный период времени изменение давления газов до и после установки рукавных фильтров.

В рукавном фильтре фирмы Альстом управление регенерацией рукавных фильтров, происходит на базе микропроцессорного контроллера серии "Elex-2200", который производит регенерацию каналов рукавного фильтра, отслеживая следующие параметры регенерации: длительность импульса и промежуток между импульсами. Временные интервалы задаются непосредственно на самом устройстве оператором.

Известно, что эффективность очистки обратно пропорциональна фильтрационной способности фильтра, определяемой степенью засорения рукавного фильтра. Для увеличения степени газоочистки при этом, в случае работы рукавных фильтров с циклом для регенерации путем подачи сжатого воздуха предлагается промежуток времени между регенерациями устанавливать в зависимости от степени засорения фильтра, которая, в свою очередь, осуществляется перепадом давления до и после рукавного фильтра.

#### **Практическое исследование зависимости выброса золы от запыленности газа**

Данное исследование проводилось на Аксуской ТЭС. Целью исследования является определение зависимости выброса золы от

запыленности загрязненного газа, идущего на рукавный фильтр, а также построение графика данной зависимости, и получение уравнения зависимости.

Входная запыленность газа обычно колеблется в пределах от 200 мг/нм<sup>3</sup> до 300 мг/нм<sup>3</sup>. Объем газов идущих на очистку примем постоянным и равным 600000 м<sup>3</sup>/ч.

Построим график зависимости золowego выброса в атмосферу от запыленности газа, идущего на рукавный фильтр.

Исходные данные представлены в Таблице 10 [70].

Таблица 10 - Значения зависимости золowego выброса от запыленности газа для рукавного фильтра

Степень запыленность газа, мг/нм <sup>3</sup>	Золовой выброс, г/с
200	45
250	51,98
280	52
289	47
270	48
265	45

По средством стандартной программы Excel построен график зависимости золowego выброса от степени запыленности газа (Рисунок 8). Данный график построен по усредненным значениям пятнадцати проведенных опытов.

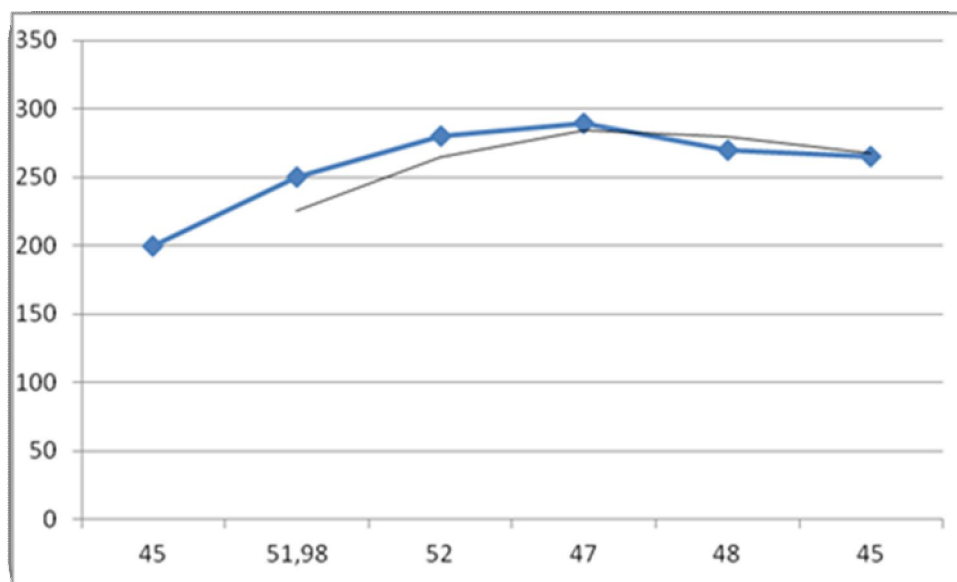


Рисунок 8 - График зависимости золowego выброса от степени запыленности газа

Данный график представляет линейную функцию и построен в стандартной программе Excel по усредненным значениям пятнадцати проведенных опытов.

Проведем практическое исследование в условиях Аксуской ТЭС и проверим результаты построения графика (Рисунок 8).

Точка отбора запыленного газа находится за дымососом. При исследовании использовали следующие приборы: газоанализатор нового поколения – «Тесто», микроманометр. Были сделаны замеры газопылевого потока (Таблица 11), идущего на рукавный фильтр.

Таблица 11 - Показатели газоанализатора «Тесто»

Измеренный показатель	Наименование	Величина
Барометрическое (атмосферное) давление	$P_{ат}$ , кПа	101,5
Температура газа	$T$ , °C	150
Отчет по шкале микроманометра при изменении динамического давления (среднее значение)	$p_{ср}$ , мм	140,0
Наклон микроманометра	$\beta$	0,8
Коэффициент трубки	$K_T$	0,565
Плотность газа при нормальных условиях	$\rho_N$ , кг/м <sup>3</sup>	1,33
Площадь сечения	$S$ , м <sup>2</sup>	7,33
Расход отбираемого газа	$V_p$ , л/мин	20
Время отбора пробы	$t_1$ , мин	3
Масса пыли, осевшей на пылеуловителе	$m$ , г	0,0114

Таблица 12 - Расчет запыленности газопылевых потоков, идущих на рукавный фильтр

Название параметра	Наименование	Формула	Величина
Динамическое давление	$P_d$ , Па	$P_d = p_{ср} * 9,81 * \beta * K_T$	620,78
Статическое давление	$P_{ст}$ , Па	$P_{ст} = p * 9,81 * \beta * K_T$	509,92
Плотность газа	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{ср} = \rho_N * 273 * (P_{ат} - P_{ст} / 1000) / 101,3 * (273 + T)$	0,86
Скорость газового потока	$v$ , м/с	$v = (2 * P_d / \rho_{ср})^{1/2}$	38,09
Расход газа	$V_{д.г.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$V_{д.г.} = v * S * 3600$	1005119,3
Расход газа, приведенный к нормальным условиям	$V_{н.у.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$V_{н.у.} = V_{д.г.} * 273 / (273 + T)$	648694,0
Количество вредного вещества (входная запыленность газа)	$Z_{вх}$ , мг/м <sup>3</sup>	$Z_{вх} = m * 1000 * 101080 * (273 + T) * 1000 / V_p * t_1 * 273 * (P_{ат} * 1000 + P_{ст})$	291,7
Выброс	$G_3$ , г/с	$G_3 = V_{н.у.} * Z_{вх} / 1000 * 3600$	52,56

Практическое исследование зависимости выброса золы от запыленности газа показало, что данная зависимость носит пропорциональный характер. Поэтому необходимо соблюдать режимные карты работы котла с целью более полного сгорания топлива в топке котла, следить за качеством тошины помола топлива, за составом пылеугольного топлива (особенно за процентом содержания золы в топливе). Абсолютная погрешность между заданным значением выброса золы и полученным в ходе исследования составляет  $\pm 0,58$ , абсолютная погрешность прибора «Тесто» составляет  $\pm 0,00001$ , общая погрешность -  $\pm 0,58001$ , что говорит о точности полученной зависимости выброса золы от запыленности газа.

Из расчета видно, что для входной запыленности газа  $291,7 \text{ мг/нм}^3$  выброс золы после рукавного фильтра составляет  $52,56 \text{ г/с}$ , что соответствует графику на Рисунке 8.

Анализ литературных источников [70] и [71] показывает, что при увеличении интервала между регенерациями запыленность очищаемых газов сначала уменьшается, а затем возрастает. Первоначальное снижение запыленности очищаемого газа обусловлено меньшим числом регенераций и их общей продолжительностью. По мере увеличения интервала между регенерациями постепенно начинает возрастать роль динамических пробоев слоя (срыва частиц) и проскока пыли в местах пробоев, вызывающих увеличение перепада давления в фильтрующей системе рукавного фильтра [70].

Построим график зависимости концентрации пыли в очищенных газах от периодичности регенерации. Значения концентрации пыли и периодов регенерации приведены в таблице 13 [70].

Таблица 13 - Зависимость концентрации пыли от периода регенерации импульсами сжатого воздуха

Период регенерации $t, \text{ с}$	Концентрация пыли $C, \text{ мг/м}^3$
10	38
20	23
30	18
40	10
50	13
60	17
70	25
80	45

Обработка этих данных позволила получить график зависимости концентрации пыли в очищенных газах от периодичности регенерации (Рисунок 9).

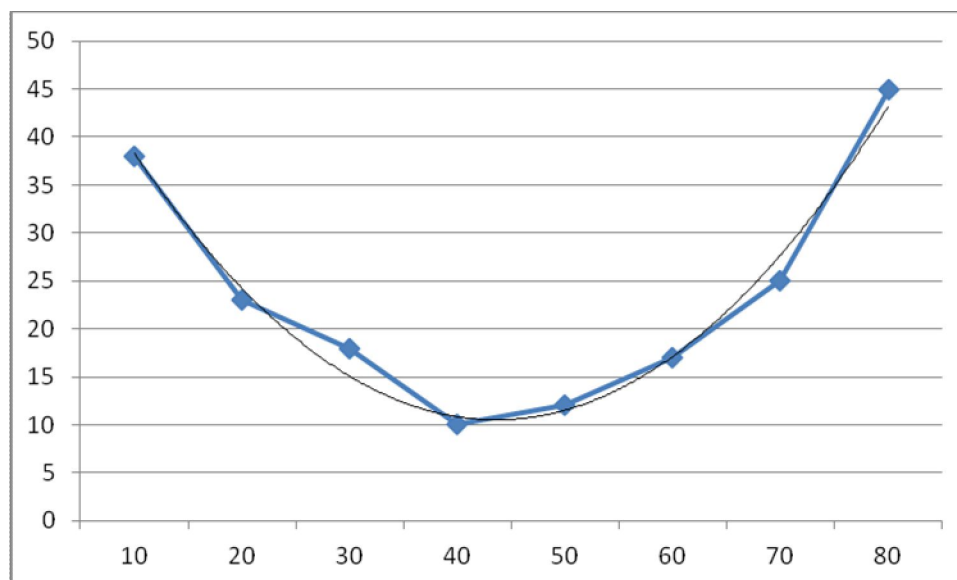


Рисунок 9 - Зависимость концентрации пыли в очищаемом газе от периодичности регенерации

Полученный график зависимости является результатом 20 опытов.

Исследование зависимости концентрации пыли в очищаемом газе от периодичности регенерации показало, что данная зависимость задана полиномиальной функцией, уравнение которой имеет следующий вид:

$$C=2,4643 t^2-21,488 t +57,357$$

Коэффициент достоверности равен 0,9795, что доказывает действительность и точность аппроксимации.

Из Рисунка 9 видно, что при увеличении интервалов между импульсами запыленность газа сначала уменьшается, а затем возрастает. Уменьшение запыленности обусловлено меньшим числом регенераций и их общей продолжительностью. По мере увеличения интервала между регенерациями начинает возрастать роль динамических пробоев слоя и проскока пыли в местах пробоев, вызывающие перепад давления в фильтре.

Произведем оценку функции распределения частиц угольной пыли по размерам в самом потоке, идущем на рукав.

**Описание установки.** Склад сухой золы ЭС АО «ЕЭК» состоит из 2-х накопительных емкостей объемом 250 м<sup>3</sup> каждая. Зола в емкости транспортируется по напорным трубопроводам. Каждая емкость оснащена рукавными фильтрами с отсосным вентилятором и выхлопной трубой высотой H=31 м (Рисунок 10). Измерение концентрации золы в воздухе на входе и на выходе из фильтров производились в штатном режиме загрузки емкостей.

На АО «ЕЭК» успешно эксплуатируются два рукавных фильтра очистки воздуха установки по отбору сухой золы Куйбышевского завода «Строймашина». 1985 год (Рисунок 10).

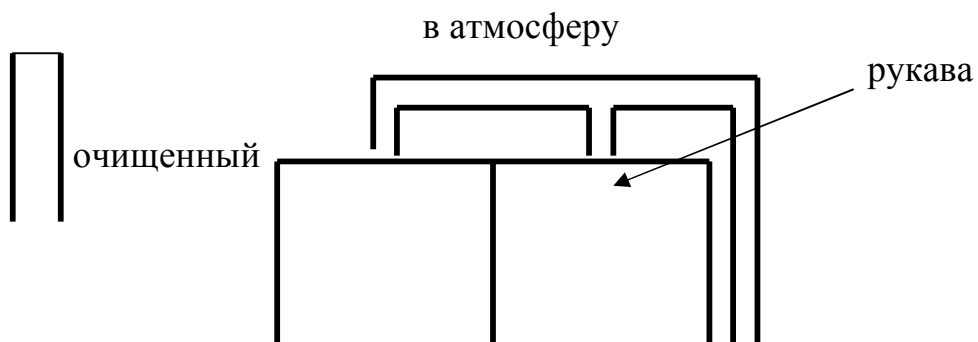
Основные технические характеристики фильтра и рукавов приведены в Таблице 14 и Таблице 15.

Таблица 14 - Основные технические данные установки очистки газа

Наименование показателей	Единица измерения	Значения
1. Расчётная производительность	м <sup>3</sup> /час	3960
2. Площадь фильтрации, не мене	м <sup>2</sup>	55
3. Температура обеспыливаемого газа	°С	140
4. Запыленность газа на входе в фильтр	г/м <sup>3</sup>	50
5. Запыленность газа на выходе из фильтра, не более	мг/м <sup>3</sup>	80
6. Скорость фильтрации	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> мин	0,8...1,2
7. Диаметр рукава	мм	200
8. Длина рукава рабочая	мм	2450
9. Количество рукавов в камере в фильтре	шт. шт.	18 32
10. Сопротивление фильтра перед регенерацией рукавов	Па	1900

Таблица 15 - Характеристика рукавов фильтра

Наименование	Материал	Марка	ГОСТ, ТУ
Рукав диаметром 200 мм	Лавсан	Фильтр «Луч»	ТУ17 РСФР 8174-75



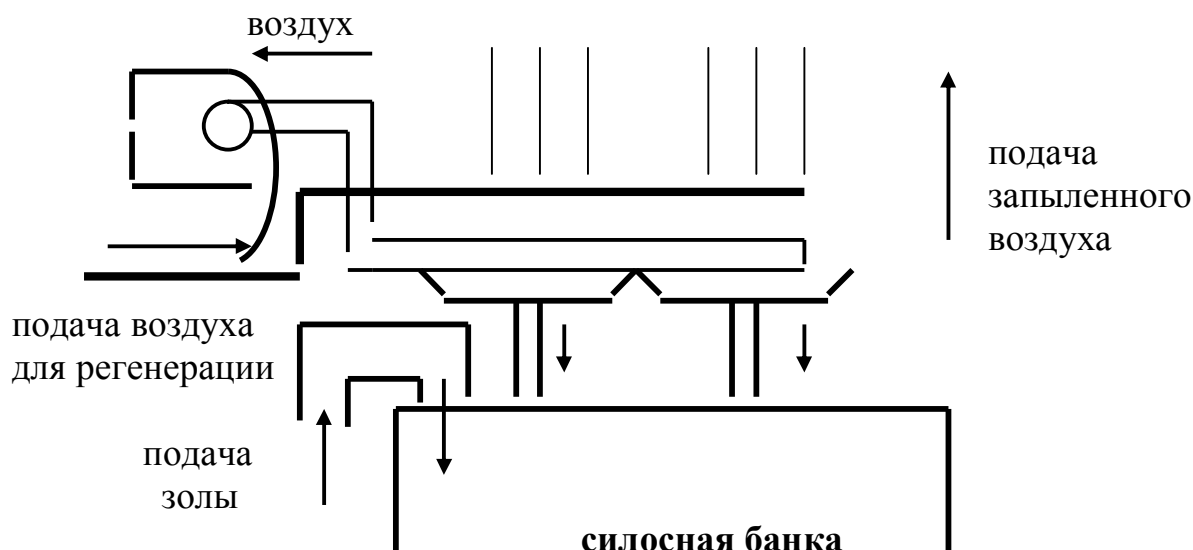


Рисунок 10 - Схема установки очистки газа с рукавным фильтром

Отбор проб готового продукта – запыленного газа, уловленного рукавном фильтре, производили на входе и на выходе рукавного фильтра. Отобранные пробы были проанализированы в лабораторных условиях электростанции с помощью лазерного дифракционного анализатора дисперсного состава аэрозолей Malvern Mastersizer 2000, в результате чего получены фракции частиц по размерам, представленные на Рисунке 11.

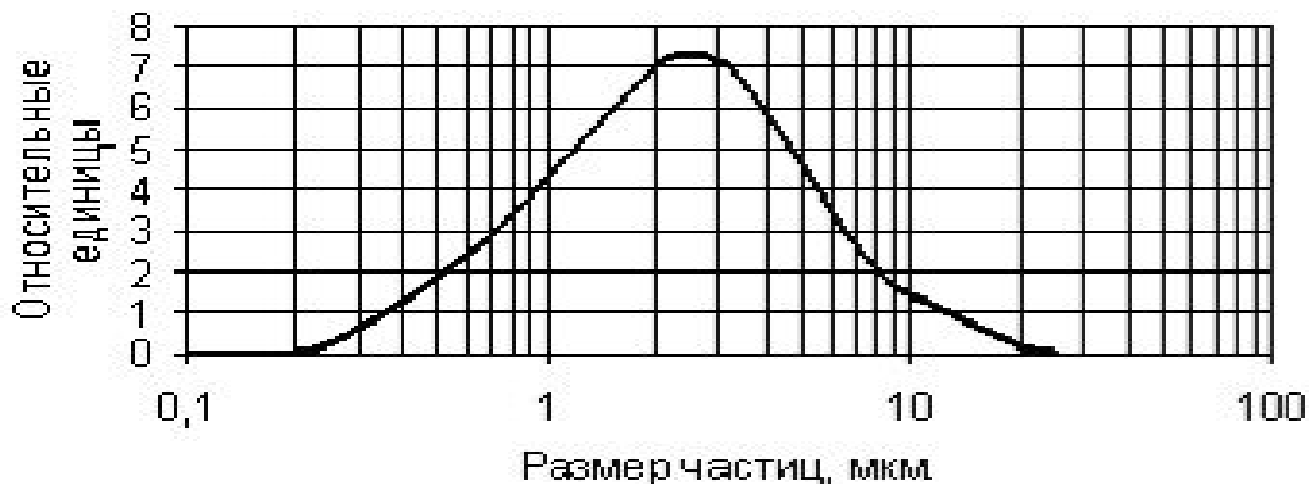


Рисунок 11 - Функция распределения частиц по размеру в пробах материала, уловленного в аэродинамическом анализаторе на входе в рукавный фильтр



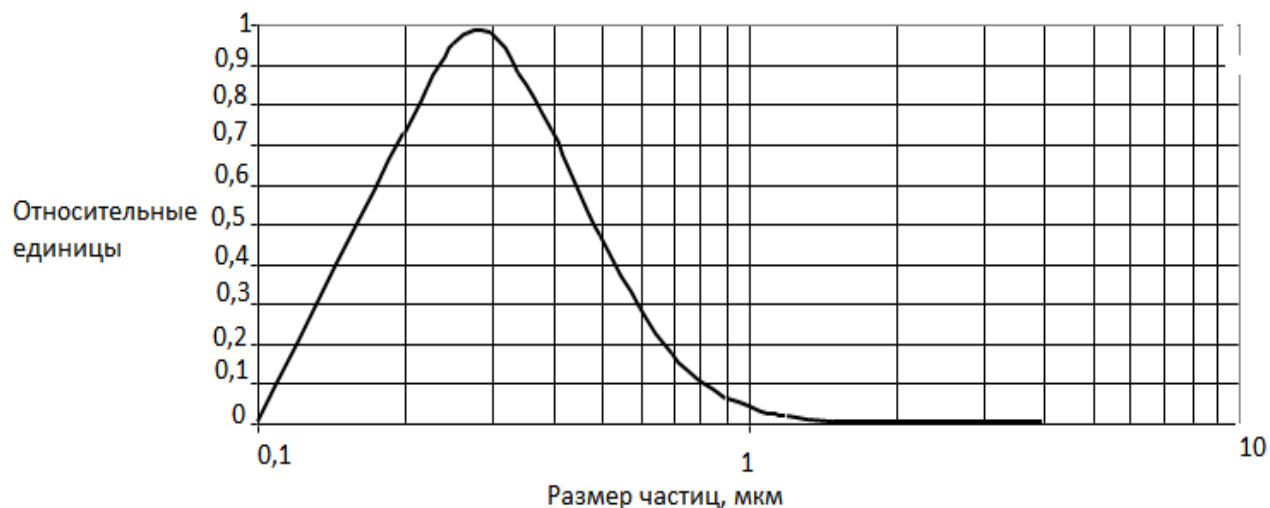


Рисунок 12 - Функция распределения частиц по размеру в пробах материала, уловленного в аэродинамическом анализаторе на выходе из рукавного фильтра

На Рисунках 11 и 12 видно, что на входе в рукавный фильтр размер частиц больше, чем на выходе из фильтра, это говорит о том, что основные частицы осели на материале рукавов фильтра.

Затем были проведены измерения температуры воздуха, подачи воздуха вентилятором, а также запыленность воздуха на входе в установку и на выходе из нее. При работе использовались следующие средства измерений:

- для определения расхода воздуха использовалась поверенная напорная трубка НИИОГаза № 041 с  $K_{тр}=0,57$ ;

- запыленность воздуха определялась пылезаборной трубкой «нулевого» типа конструкции КазНИИЭ с  $K_{тр}=1,00$ .

Замеры проводились в тарированных сечениях на входе и на выходе пылеулавливающей установки.

Получены следующие показатели замеров и расчет эффективности рукавного фильтра (Таблица 16).

Таблица 16 - Значения показателей измерений

Температура воздуха, $t_{возд}$ , °С	21
Подача развиваемая вентилятором, $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	3838,4
Запыленность на входе в установку, $z_1$ , г/м <sup>3</sup>	10,6695
Запыленность на выходе из установки, $z_2$ , г/м <sup>3</sup>	0,4220
Эффективность улавливания составляет: $[(1-(z_1/z_2))*100]$ , %	96,04

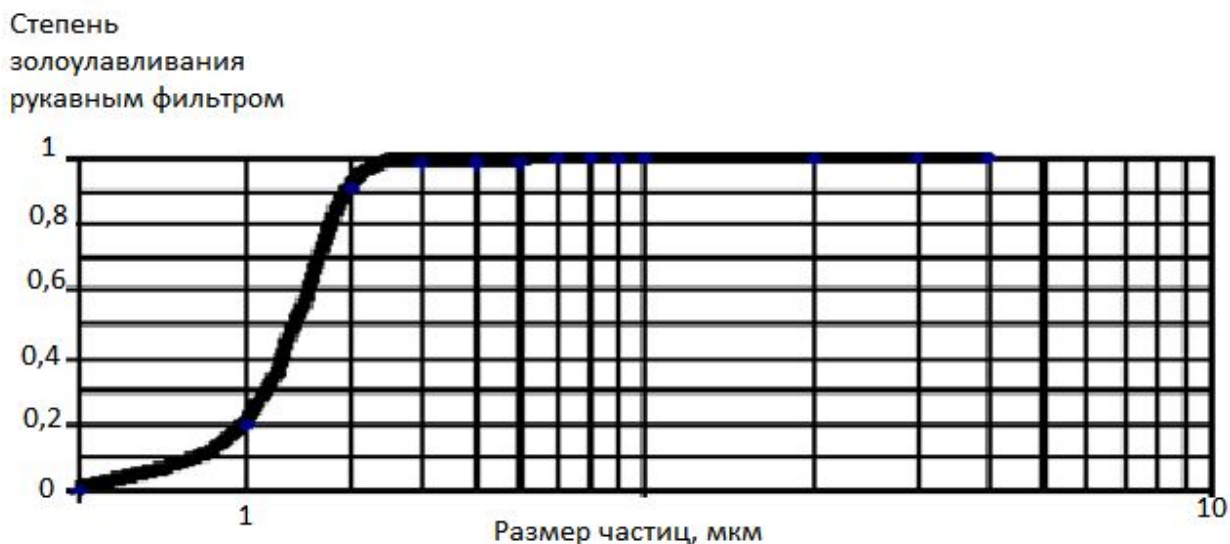


Рисунок 13 - Зависимость эффективности рукавного фильтра от дисперсного состава газа

На Рисунке 13 приведено влияние размера частиц на эффективность рукавного фильтра, из которого видно, что рукавный фильтр имеет высокую степень улавливания при размере частицы около 10 мкм. Поэтому необходимо осуществлять контроль за качеством пылеугольного топлива.

Таким образом, проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- термостойкость материала должна быть около 200° С. Этому требованию соответствуют метаарамидные, тефлоновые, полиамидные материалы и фильтроматериалы на основе стекловолокна;

- фильтровальные ткани, используемые в фильтрах, должны отличаться высокой пылеемкостью, воздухопроницаемостью, механической прочностью, стойкостью к истиранию, антистатическими свойствами, стабильностью свойств, при повышенной температуре и агрессивном воздействии химических примесей, а также минимальным влагопоглощением и способностью к легкому удалению накопленной пыли. При выборе фильтровальной ткани также необходимо учитывать расстояние между волокнами, чтобы частицы с размером 10 мкм не проскакивали, тем самым не уменьшали эффективность рукавного фильтра;

- удельная газовая нагрузка определяется технологом при выборе типа фильтровального материала и должна быть принята не очень большой приблизительно равной 1,2 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>мин (п.3.6 (5) удельная газовая нагрузка равна 0,85 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>мин); – в качестве основного способа регенерации должна быть принята обратная или импульсная продувка. Желательно сочетание обратной или импульсной продувки с дополнительными методами регенерации, которые уменьшали бы расход сжатого воздуха и снижали нагрузки на фильтроматериал при регенерации. Один из методов регенерации - дополнительно к импульсной обратной продувке осуществление

электрического воздействия на заряженный слой пыли, сформировавшийся на фильтровальном материале, путем подачи постоянного или знакопеременного напряжения на каркас, изолированный от корпуса фильтра. Конструкция каркаса и его изоляция выполняются из условия обеспечения коронного разряда. На каркасе могут быть установлены коронирующие электроды, обеспечивающие подзарядку слоя и фильтровального материала [60];

– должны быть приняты меры, исключающие снижение температуры очищаемого газа и основного оборудования фильтра ниже точки росы. При снижении температуры газа до точки росы происходит конденсация паров воды и кислот, в результате чего пыль, осевшая на ткань, слипается, замазывает поры ткани и резко повышает гидравлическое сопротивление аппарата. Для предотвращения конденсации паров температура газа на выходе из аппаратов должна быть на 15-30 °С выше температуры точки росы. При обратной продувке ткани воздухом его нужно подогревать. Это достигается дополнительной установкой трех компрессорных блока вместе с тремя осушителями воздуха – масляные, винтовые (обычно два компрессора в работе и один резервный на один фильтр);

- для снижения гидравлического сопротивления необходимо производить замену дымососа. Применение рукавных фильтров для энергоблоков более 500 МВт сталкивается именно с проблемой подбора дымососа. Разработчик установки очистки дымовых газов вынужден увеличивать число дымососов, при этом должен учитывать, что гидравлическое сопротивление рукавного фильтра составляет 1800 МПа, учитывать сопротивление установки по подготовке газов, установки сероочистки, гидравлическое сопротивление газоходов, необходимость запаса на стабильную работу котла, установку каталитического дожига  $\text{NO}_x$  и др. (Пример: на Рефтинской ГРЭС был установлен дымосос итальянской фирмы FLECOOD марки PFSU-280-190-64, производительностью  $2,38 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/ч) [61];

- необходимо следить за гидравлическим сопротивлением фильтра, так как промышленные аэродисперсные потоки характеризуются значительными концентрациями зольных частиц.

В качестве газоочистного аппарата возможна установка на ЭС АО «ЕЭК» рукавного фильтра фирмы Альстом с импульсной продувкой, с очистными рукавами из иглопробивной нити PPS, с шахматным расположением рукавов для снижения скорости газа в пространстве между рукавами. Данный рукавный фильтр отвечает всем требованиям как с экономической точки зрения, так и с технической, описанным в диссертационной работе.



### 6.1.2 Экономия платежа за выброс золы в атмосферу

$$D = \gamma * Z, \text{ тг}$$

где:  $\gamma$  – экологическая ставка ( $\gamma = 5193$  тг);

$Z$  – снижение выбросов золы, т/год ( $Z = 11656,91272$  т/год)

$$D = \gamma * Z = 5193 * 11656,91272 = 60534348 \text{ тг}$$

### 6.2 Обоснование производственной мощности проектируемого рукавного фильтра

Производственная мощность (ПМ) рукавного фильтра определяется из соотношения

$$ПМ = n * П_{ч} * T_0$$

где:  $n$  – количество единиц ведущего оборудования;

$П_{ч}$  – часовая производительность единицы ведущего оборудования ( $П_{ч} = 28291,57$  кг/ч);

$T_0$  – эффективный фонд времени работы оборудования в год, ч.

Для определения эффективного фонда времени работы оборудования за год составляется баланс рабочего времени ведущего оборудования (Таблица 18).

Таблица 18 - Баланс рабочего времени ведущего оборудования

Элементы времени	Значение
1. Календарный фонд рабочего времени, дни	365
2. Выходные и праздничные дни	0
3. Номинальный фонд рабочего времени, дни (п. 1 – п. 2)	365
4. Планируемые остановки, дни:	21
– на капитальный ремонт	14
– на текущие ремонты	5
– по технологическим причинам	2
5. Эффективный фонд рабочего времени, дни (п. 3 – п. 4)	344
6. Эффективный фонд рабочего времени, ч (п. 5 количество часов работы в сутки), $T_0$	8256
7. Коэффициент использования оборудования во времени (п. 5/п. 1)	0,9

Примечание - Все данные в таблице указаны для одного фильтра, на блоке их установлено по одному на каждый корпус котла (котел состоит из двух корпусов).

$$ПМ = n * П_{ч} * T_0 = 2 * 28291,57 * 8256 = 467150,404 * 10^3 \text{ кг/ч}$$

Основой разработки баланса является режим работы оборудования. На электрических станциях, характеризующихся в основном непрерывным режимом работы, номинальный фонд времени совпадает с календарным.

Эффективный фонд времени работы оборудования определяется как разность между номинальным временем и планируемыми остановками.

Количество дней планируемых остановок на ремонт определяется в соответствии с установленной на предприятии системой планово-предупредительных ремонтов.

Определяем необходимое количество оборудования ( $n$ ) на годовую очистку дымовых газов по формуле на один корпус котла

$$n = V / (П_{\text{ч}} * T_o) = 247834153 / (28291,57 * 8256) = 1 \text{ фильтр}$$

где:  $V$  – годовая очистка золы с одного корпуса котла,  $V=247834153$  кг/год

### **6.3 Расчет капитальных вложений (инвестиций) на строительство рукавного фильтра**

Под инвестициями понимают вложение капитала в любом виде в объекты предпринимательской и других видов деятельности с целью получения прибыли или социального эффекта. Инвестиции в воспроизводство основных фондов осуществляются в форме капитальных вложений. В объем капитальных вложений включаются затраты на новое строительство, расширение действующих предприятий, реконструкцию, техническое перевооружение.

Капитальные затраты на строительство рукавного фильтра складываются из затрат на строительство, транспортные расходы, монтаж оборудования и прочие затраты (проектно-изыскательские и другие работы).

Для рукавных фильтров задается срок службы не менее 25 лет.

Расчет стоимости оборудования производится на основании спецификации (согласно предлагаемой в проекте (работе) технологической схеме) и цен на него.

В полную стоимость газоочистного оборудования кроме цен поставщика включаются дополнительные затраты, в которые, в свою очередь, входят транспортные расходы (15-20 % от стоимости оборудования), затраты на установку фундаментов, площадок, футеровку и изоляцию аппаратов, стоимость трубопроводов (7–10 % от стоимости оборудования), монтаж оборудования (20–25% от его стоимости) и др. Таким образом, дополнительные затраты составляют 40–50 % от стоимости оборудования.

Стоимость прочего силового и вспомогательного оборудования, принимается в размере от 10 до 15 % от стоимости основного.

Рукавный фильтр фирмы Альстом стоит 388880000 тенге.

Кроме основных компонентов рукавного фильтра, следует учитывать стоимость основных производственных фондов вспомогательно-

обслуживающего производства. К ним относятся объекты вспомогательного и обслуживающего назначения:

- склады сырья, материалов, готовой продукции, ремонтно-механические цеха или мастерские, заводоуправление и др.;
- объекты энергохозяйства (подстанция, наружная кабельная сеть и др.);
- объекты транспортного хозяйства и связи (автомшины, башенный кран);
- объекты внешних коммуникаций (внешние водопровод и канализация, внешние сетки теплофикации).

Полная стоимость оборудования определяется по Таблице 19.

Таблица 19 - Расчет капитальных затрат на реконструкцию рукавного фильтра

Оборудование	Количество единиц	Цена за единицу, тнг	Общая стоимость, тнг
<p>Основные компоненты рукавного фильтра:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- фильтровальные рукава (20% от стоимости фильтра)</li> <li>- два вентилятора нагрева</li> <li>- корпус фильтра</li> <li>- осадительная камера</li> <li>- шкаф контроллеров</li> <li>- коллектор регенерации с клапанами</li> <li>- система пожаротушения</li> <li>- система продувочных труб</li> <li>- шкаф управления регенерацией фильтра</li> </ul>	14136	5501,98	77776000
<p>Прочее оборудование (10–15 % от стоимости рукавного фильтра):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- дымосос</li> <li>- компрессор</li> <li>- АСУ</li> <li>- электрооборудование</li> <li>- система пульсовой очистки сжатым воздухом</li> <li>- датчики</li> </ul>	1 3		31110400
Итого (стоимость оборудования)			342214400

## Окончание таблицы 19

Оборудование	Количество единиц	Цена за единицу, тнг	Общая стоимость, тнг
Транспортные расходы (15–20 %)			51332160
Устройство фундаментов, площадок, конструкций под оборудование, трубопроводов и т. д. (7– 10%)			34221440
Монтаж оборудования (20–25 %)			68442880
Дополнительные эксплуатационные затраты (6 % от стоимости оборудования)			20532864
Всего (капитальных затрат на оборудование)			516743744

### 6.3.1 Определение издержек предприятия (цеха)

В данном подразделе определяется потребность предприятия (цеха) в материальных и энергетических ресурсах (в натуральном и стоимостном выражении), необходимых для выполнения производственной программы. Кроме того, рассчитывается необходимая численность работающих по категориям, фонд их заработной платы, уровень производительности труда и среднегодовая заработная плата одного среднесписочного работающего.

#### 6.3.1.1 Определение затрат на оплату труда работающих

Расходы на заработную плату

$$ЗП = Ч_{сп} * ЗП_{ср} * 12 = 4 * 100000 * 12 = 2400000 \text{ тнг}$$

где:  $Ч_{сп}$  – увеличение числа работников при переходе на рукавные фильтры (2 человека);

$ЗП_{ср}$  – среднемесячная зарплата работника, 100000 тнг.

### 6.3.2 Расчет срока окупаемости оборудования

#### 6.3.2.1 Расчет уменьшения платежей за счет уменьшения сверхлимитных выбросов вредных веществ в атмосферу

Поскольку платежи за сверхлимитный выброс в атмосферу осуществляются из прибыли предприятия, оставшейся в его распоряжении после уплаты налогов, то все рассчитанные суммы являются экономическим эффектом от реализации проектных реконструктивных мероприятий.

Таким образом, общая годовая сумма получаемой предприятием экономии за счет снижения платежей составит 60534348 тенге (п. 6.1.2).

#### 6.3.2.2 Эксплуатационные расходы



Амортизационные расходы принимаются равными 3,7 % от капитальных затрат

$$I_a = 0,037 * K_3^{ни} = 0,037 * 516743744 = 19119518 \text{ тнг}$$

Затраты на ремонт принимаются равными 5 % от капитальных затрат.

$$I_{рем} = 0,05 * K_3^{ни} = 0,05 * 963\,635\,120 = 25837187,2 \text{ тнг}$$

Прочие расходы равны  $I_{пр} = I_a * 0,1 = 1911952 \text{ тнг}$

Расходы на электроэнергию

$$I_{э/э} = \mathcal{E}_{рук.ф.} * C_{э/э} = 105000 * 4,5 = 472500 \text{ тнг}$$

Сумма эксплуатационных расходов

$$I_{сум} = 19119518,528 + 25837187,2 + 1911951,8528 + 472500 = 47341157 \text{ тнг}$$

### 6.3.2.3 Прибыль от сдачи старого электрофильтра на металлолом

Масса металла электрофильтра 200 тонн. Одна тонна металла стоит на рынке 29000 тенге [69]

$$K_{мет} = 200 * 29000 = 5800000 \text{ тнг}$$

Прибыль от сокращения расхода электроэнергии на очистку дымовых газов

$$K_{э/э} = (\mathcal{E}_{эл.ф.} - \mathcal{E}_{рук.ф.}) * C_{э/э} = (720000 - 105000) * 4,5 = 2767500 \text{ тнг}$$

где:  $\mathcal{E}_{эл.ф.}$  – годовое потребление э/э электрофильтром;

$\mathcal{E}_{рук.ф.}$  - годовое потребление э/э рукавным фильтром;

$C_{э/э}$  – себестоимость э/э на станции (4,5 – стоимость электроэнергии на 2013 год).

Срок окупаемости рукавного фильтра равен

$$T_{ок} = \frac{K_3^{ни} - K_{мет}}{D + K_{э/э} - I_{сум} - 3П} = \frac{516743744 - 5800000}{60534348 + 2767500 - 47341157 - 2400000} = 37,68 \text{ лет.}$$

Вывод: прибыль от сокращения расхода электроэнергии на очистку дымовых газов 2767500 тнг, экономия платежа за выброс золы в атмосферу составит 60534348 тнг.

Газоочистные установки, как правило, не дают прибыли, возможность использовать уловленный продукт обычно лишь частично окупает их

сооружение. Поэтому в числе технико-экономических показателей обычно отсутствуют данные, характеризующие рентабельность капитальных затрат, их окупаемость за счет прибыли. Технико-экономическая оценка газоочистных сооружений строится в основном на базе сравнительных данных. Объект газоочистки, подлежащий оценке, сравнивается с лучшим действующим или запроектированным аналогичным объектом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертации приведены новые научно обоснованные результаты, использование которых необходимо при эксплуатации рукавных фильтров в условиях промышленных ТЭС. Предложены рекомендации по практическому применению полученных автором научных результатов.

### **Краткие выводы по результатам диссертационных исследований**

1. Выполнена оценка эффективности рукавного фильтра, коэффициент очистки дымовых газов золоулавливающей установкой при количестве золы поступающей в установку 28619,14 кг/ч и выбрасываемой в атмосферу 28,32 кг/ч равен 99,9 %.

2. Выполнен анализ применения высокоэффективного газоочистного оборудования – рукавных фильтров на крупных электростанциях мощностью 500 МВт и выше.

3. Расчёт рукавного фильтра показал, что при работе на Экибастузском угле количество выбросов будет соответствовать норме выбросов до 50 мг/Нм<sup>3</sup>, что приведёт к уменьшению штрафов за высокую концентрацию вредных золowych выбросов в атмосферу.

4. Доказана эффективность рукавных фильтров по сравнению с электрофильтрами при работе на Экибастузском угле.

5. Выведена зависимость сопротивления ткани ЦМ р (Па) от продолжительности регенерации t (с) при продувке сжатым воздухом  $t=1,4286P^2+3,4286P+686$

6. Выведена зависимость концентрации пыли от периодичности регенерации  $C=2,4643 t^2-21,488 t +57,357$ .

7. Выведена зависимость эффективности очистки рукавного фильтра от дисперсного состава газа. Размер частиц влияет на эффективность рукавного фильтра. Высокая степень улавливания достигается при размере частиц золы около 10 мкм.

8. Практическое исследование зависимости выброса золы от запыленности газа показало, что золовой выброс зависит от степени запыленности, чем выше запыленность газа, идущего на очистку в рукавном фильтре, тем выше будет золовой выброс.

### **Разработка рекомендаций и исходные данные по конкретному использованию результатов исследований.**

Таким образом, проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы при использовании рукавных фильтров на ЭС АО «ЕЭК»:

– термостойкость материала должна быть около 200° С. Этому требованию соответствуют метаарамидные, тефлоновые, полиамидные материалы и фильтроматериалы на основе стекловолокна;

- фильтровальные ткани, используемые в фильтрах, должны отличаться высокой пылеемкостью, воздухопроницаемостью, механической прочностью, стойкостью к истиранию, антистатическими свойствами, стабильностью свойств, при повышенной температуре и агрессивном

воздействии химических примесей, а также минимальным влагопоглощением и способностью к легкому удалению накопленной пыли. При выборе фильтровальной ткани также необходимо учитывать расстояние между волокнами, чтобы частицы с размером 10 мкм не проскакивали, тем самым не уменьшали эффективность рукавного фильтра;

– удельная газовая нагрузка определяется технологом при выборе типа фильтровального материала и должна быть принята не очень большой приблизительно равной  $1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{мин}$ .

– в качестве основного способа регенерации должна быть принята обратная или импульсная продувка. Желательно сочетание обратной или импульсной продувки с дополнительными методами регенерации, которые уменьшали бы расход сжатого воздуха и снижали нагрузки на фильтроматериал при регенерации. Один из методов регенерации - дополнительно к импульсной обратной продувке осуществление электрического воздействия на заряженный слой пыли, сформировавшийся на фильтровальном материале, путем подачи постоянного или знакопеременного напряжения на каркас, изолированный от корпуса фильтра. Конструкция каркаса и его изоляция выполняются из условия обеспечения коронного разряда. На каркасе могут быть установлены коронирующие электроды, обеспечивающие подзарядку слоя и фильтровального материала [60];

– должны быть приняты меры, исключаящие снижение температуры очищаемого газа и основного оборудования фильтра ниже точки росы. При снижении температуры газа до точки росы происходит конденсация паров воды и кислот, в результате чего пыль, осевшая на ткань, слипается, замазывает поры ткани и резко повышает гидравлическое сопротивление аппарата. Для предотвращения конденсации паров температура газа на выходе из аппаратов должна быть на  $15\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$  выше температуры точки росы. При обратной продувке ткани воздухом его нужно подогревать. Это достигается дополнительной установкой трех компрессорных блока вместе с тремя осушителями воздуха – масляные, винтовые (обычно два компрессора в работе и один резервный на один фильтр);

- для снижения гидравлического сопротивления необходимо производить замену дымососа. Применение рукавных фильтров для энергоблоков более 500 МВт сталкивается именно с проблемой подбора дымососа. Разработчик установки очистки дымовых газов вынужден увеличивать число дымососов, при этом должен учитывать, что гидравлическое сопротивление рукавного фильтра составляет 1800 МПа, учитывать сопротивление установки по подготовке газов, установки сероочистки, гидравлическое сопротивление газоходов, необходимость запаса на стабильную работу котла, установку каталитического дожигателя  $\text{NO}_x$  и др. (Пример: на Рефтинской ГРЭС был установлен дымосос итальянской фирмы FLECOOD марки PFSU-280-190-64, производительностью  $2,38 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) [61];

- необходимо следить за гидравлическим сопротивлением фильтра, так как промышленные аэродисперсные потоки характеризуются значительными концентрациями зольных частиц.

В качестве газоочистного аппарата возможна установка на ЭС АО «ЕЭК» рукавного фильтра фирмы Альстом с импульсной продувкой, с очистными рукавами из иглопробивной нити PPS, с шахматным расположением рукавов для снижения скорости газа в пространстве между рукавами. Данный рукавный фильтр отвечает всем требованиям как с экономической точки зрения, так и с технической, описанным в диссертационной работе.

#### **Оценка технико-экономической эффективности внедрения**

Установка рукавных фильтров на блок обеспечивает ежегодную прибыль от сокращения расхода электроэнергии на очистку дымовых газов в размере 2767500 тенге, экономия платежа за выброс золы в атмосферу составит 60534348 тенге.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.В. Юшин, В.М. Попов, П.П. Кукин Техника и технология защиты воздушной среды. – М.: Высш. шк., 2005. – 391с.
2. Тулеубаев Б.А., Глазырин А.И., Глазырин С.А. Краткий курс инженерной экологии. - Павлодар: НПФ «ЭКО», 2003. - 136 с.
3. Каталог пылегазоочистного оборудования подготовлен к выпуску центром экологических проблем международного фонда конверсии. - М.: Стройиздат, 1990 год.
4. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
5. М.В. Василевский, Е.Г. Зыков Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах. - Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 86 с.
6. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. - М.: Стройиздат, 1974. - 207 с.
7. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 176 с.
8. Носков А.С., Савинкина М.А. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба. - Новосибирск: Изд-во ГПНТБ СО АН СССР, 1990.
9. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. - 616 с.
10. Высокоэффективная очистка воздуха под ред. Уайта П. и Смита С.: Пер с англ. Б.И. Мягкова и В.Г. Лапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1967.
11. М.И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, А.А. Русанов Справочник по пыле- и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
12. Технический регламент «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций», Утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 14 декабря 2007 года № 1232.
13. Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы). - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004.
14. Рихтер Л.А. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. - М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с.
15. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. – М.: Металлургия, 1986 - 544 с.
16. Хотунцев Ю. Л. Человек, технологии, окружающая среда. - М.: Устойчивый мир, 2001. – 224 с.
17. Алиев Г.М. Эксплуатация и ремонт электрофильтров. - М.: Энергия, 1976.
18. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок, Алиев Г. М. - М.: Металлургия, 1980. - 368 с.
19. Экология производства. Научно- практический журнал, №9 сентябрь 2011 года //www.ecoindustry.ru//1\_3№fgghh/fjlinome%%/112233.

20. Каталог промышленного газоочистного оборудования 2011. - Санкт-Петербург, 2011.
21. Хотунцев Ю.Л. Экология и экологическая безопасность. - М.: Издательский центр «Академия», 2002. - 480 с.
22. Теоретические основы процессов газоочистки, Белоусов В.В.. - М.: Metallurgy, - 1988. – 256 с.
23. Фомина Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнений по международным стандартам: Справочник. – М.: Проректор, 2002. - 432 с.
24. Ладыгичев М.Г., Бернер Г.Я. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. - 696 с.
25. Пористые фильтры в системах газоочистки в СССР и за рубежом: Аналитическая справка. -М: Информэлектро, 1991. - 17 с.
26. Газоочистное оборудование. Электрофильтры: Каталог. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. - 16 с.
27. Газоочистные и пылеулавливающие установки: Каталог. - М.: ЦНИИ "Электроника", 1990. - 48 с.
28. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. - Л.: Химия, 1990.
29. Кузнецов И.Е. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник. - К: Техника, 1989. - 303 с.
30. Васильченко Н.М. Газоочистное оборудование. Рукавные фильтры: Каталог. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1989. - 12 с.
31. Кузнецов Е.И., Шмат К.И. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник. - Киев: Техника, 1989. - 304 с.
32. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки - М.: Metallurgy, 1988. - 256 с.
33. Газоочистное оборудование: Приборы и устройства контроля и автоматизации пылеулавливания: Каталог. – М.: Цинтихимнефтемаш, 1987. - 12 с.
34. Колесник А.А., Николаев Н.А. Опыт испытаний и наладки газопылеулавливающих установок на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. - 80 с.
36. Современная технология электрофильтровой очистки дымовых газов котлоагрегатов на угле. – М.: Черметинформация, 1986. - 37 с.
37. Газоочистное оборудование - Электрофильтры: Каталог. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1986. - 25 с.
38. Ю.А. Попов Газоочистные аппараты сухого и мокрого типов: Каталог. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1986. - 92 с.
39. Губайдуллин Р. З. Современные аппараты каталитической очистки газовых выбросов – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1985. - 19 с.
40. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. - М.: Metallurgy, 1983. - 296 с.
41. Шкатов Е.Ф. Автоматизация промышленной и санитарной очистки газов в химической промышленности. - М.: Химия, 1981. - 200 с.

42. Юдашкин М.Я. Очистка газов в металлургии. - М.: Металлургия, 1976. - 384 с.
43. Вилесов Н.Г., Костюковская А.А. Очистка выбросных газов. - М.: Техника, 1971. - 196 с.
44. Коуль Артур Л. Очистка газа. – М.: Недра, 1968. - 392 с.
45. Залогин Н.Г., Шухер С.М. Очистка дымовых газов. - Л.: Гос. энерг. изд., 1954. - 224 с.
46. Алиев Г.М. Оглы А. Агрегаты питания электрофильтров. - М.: Энергоиздат, 1981. - 136 с.
47. Дымовые электрофильтры. Архипов В.А. - М.: Энергия, 1980. - 447 с.
48. Защита воздушного бассейна: Техника для предотвращения пылегазовых выбросов: Обзор. - М.: ВНИИПИ, 1990. - 92 с.
49. М.Л. Моргулис Рукавные фильтры - М.: Машиностроение, 1977. - 255 с.
50. Ужов В.Н. Борьба с пылью в промышленности. - М: Госхимиздат, 1962. - 184 с.
51. Ермаков Е.В. Высокоэффективная газоочистка ЗАО «ФИНГО ИНЖИНИРИНГ»// II Международная конференция «Пылегазоочистка»: Тез. докл. - М.: 2009. - 9 с.
52. Троицкий А.А., Гузаев В.А. Электрофильтры, рукавные фильтры, трубы Вентури и другие типы газоочистного оборудования, ООО "НТЦ ФИНГО ИНЖИНИРИНГ" // II международная конференция «Пылегазоочистка»: Тез. докл. - М.: 2009. - 15 с.
53. Достал П., Гертъе В.И. Презентация фирмы ZVVZ-Enven Engineering, a.s. - Чехия //Сборник докладов второй международной конференции «Пылегазоочистка-2009». - М.: 2009. - 24 с.
54. Шилли М. Газоочистное оборудование фирмы Dantherm Filtration GmbH для предприятий цветной металлургии //Первый Международный конгресс «Цветные металлы Сибири». - М.: - 2009. - 761 с.
55. Пористые фильтры в системах газоочистки в СССР и за рубежом: Аналитическая справка. - М: Информэлектро, 1991. - 17 с.
56. Газоочистные и пылеулавливающие установки: Каталог. - М: ЦНИИ "Электроника", 1990. - 48 с.
57. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990. - 288 с.
58. Васильченко Н.М. Газоочистное оборудование. Рукавные фильтры: Каталог. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1989. - 12 с.
59. Колесник А.А., Николаев Н.А. Опыт испытаний и наладки газопылеулавливающих установок на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях. - М: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. - 80 с.
60. Вилесов Н.Г., Костюковская А.А. Очистка выбросных газов. – М.: Техника, 1971. - 196 с.
61. Залогин Н.Г., Шухер С.М. Очистка дымовых газов. – Л.: Гос. энерг. изд., 1954. - 224 с.



62. Теплотехнические расчеты металлургических печей Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин, В. Ф. Ратников. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
63. Эстеркин, Р.И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие для техникумов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
64. Афитов, Э. А. Планирование на предприятии. - Минск: Выш. шк., 2006. – 302 с.
65. Карпей, Т. В. Экономика, организация и планирование промышленного производства – Минск: Дизайн - ПРО, 2004. – 328 с.
66. Мокрецова Л.О. Совершенствование режимов регенерации рукавных фильтров на базе исследования их динамических характеристик. – Диссертация. – М.: УДК 669.041.067.33.001.24 - 1985 г.
67. Профос П. измерения в промышленности: Справочное изд-е. - М.: Металлургия, 1930. – 648 с.
68. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных полей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1977.
69. Прейскурант цен металлолома в Казахстане на 2013 год//chernyj-metall.i-r.kz
70. Закономерности распределения газового потока и осаждения пыли в рукавных фильтрах со струйной продувкой Комиссаров О.Г., Гордон Г.М., - Цветные металлы, - 1975. - 32 с.
71. Исследование закономерностей осаждения пыли в рукавном фильтре со струйной продувкой Комиссаров О.Г., - Цветные металлы, 1971. – 27 с.
72. Лысенко Н.В., Чартий П.В. Определение мелкодисперсной фракций аэрозольных частиц в аэродисперсных средах в реальном времени. – М.: Химия, 2007. – 281 с.
73. Березовая Е.Е. Применение нового поколения газоочистного оборудования в условиях Аксуской ТЭС//XIII Сатпаевские чтения: Тез. докл. – Павлодар: 2013. – С. 50-53.
74. Березовая Е.Е. Сравнительный анализ газоочистного оборудования, используемого на Аксуской ТЭС АО ЕЭК//Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2012. - № 3 (47) 2012. – С.133-136.