

На правах рукописи



Нгуен Ву Линь

**ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ УГОЛЬНЫХ ТЭС ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ  
ЧАСТИЦ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СЕПАРАТОРАХ**

05.14.14 –Тепловые электрические станции, их энергетические  
системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент,  
**Дмитриев Андрей Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Тукмаков Алексей Львович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение»

**Мракин Антон Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», доцент кафедры «Промышленная теплотехника»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится «29» апреля 2021 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/199?idDiss=114>

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.082.02



С.М. Власов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсификация технологических процессов и создание высокопроизводительных аппаратов в энергетической, химической и пищевой отраслях промышленности приводит к неизбежному росту выбросов в атмосферу значительного количества токсичной пыли и вредных газообразных примесей. По данным ООН ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн. тонн пыли.

Однако к процессу газоочистки необходимо подходить рациональным путем, совмещающим высокую эффективность, надежность и оправданную стоимость. В связи с подорожанием курса доллара и сложной экономической ситуации в стране особое внимание уделяется стоимости закупаемого оборудования для очистки газов от вредных частиц и их максимально эффективному использованию. Также следует обратить внимание на возможность повторного использования продуктов улавливания при очистке газовых выбросов аппаратами для очистки. Например, зола ТЭС находит широкое применение при изготовлении строительных материалов: кирпича, бетонных камней, аглопорита, керамзита и др.

Основными устройствами для очистки газов от золы на ТЭС и от других вредных частиц на химических и пищевых производствах являются электрофильтры, инерционные пылеуловители (различные модификации циклонов), рукавные фильтры и мокрые аппараты. Однако из-за низкой эффективности этого оборудования при улавливании средне- и мелкодисперсной пыли, необходимости частой замены или чистки фильтрующих элементов, область их применения ограничена. Кроме того, гидравлическое сопротивление таких аппаратов может достигать 3000 Па, что приводит к увеличению энергетических затрат на проведение процессов пылегазоочистки. В связи с этим разработка новых устройств для увеличения эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц на ТЭС является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4522.2018.8 на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Разработка перспективной технологии сепарации мелкодисперсных твердых или жидких частиц из газового потока».

**Объектом исследования** является очистка газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц в прямоугольных сепараторах.

**Предметом исследования** является сепарация мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС.

**Цель работы и основные задачи исследования.** Целью работы является разработка энергоэффективного устройства для очистки газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц.

В непосредственные задачи исследования входило:

1. На основе анализа недостатков существующих способов, предназначенных для очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц, разработать новую конструкцию устройства, позволяющую повысить степень очистки и улавливания мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС.
2. Разработка устройства для улавливания и очистки мелкодисперсных частиц

из газовых выбросов ТЭС, теоретическое и экспериментальное исследование влияния геометрических и технологических параметров на эффективность работы устройства.

3. Исследование процессов гравитационного и инерционного осаждения системы твердых частиц в предлагаемом сепараторе.
4. Разработать математическое описание процесса очистки дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц пыли в прямоугольном сепараторе.
5. Провести экспериментальные исследования устройства для проверки достоверности математического описания в зависимости от различных конструктивных параметров.
6. На основе анализа математического описания разработать инженерную методику расчета устройств очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц.

**Методы исследования.** В работе использованы методы экспериментальной физики и аэродинамики. Для расчетов и построения графических зависимостей использовались пакеты прикладных программ Microsoft Excel и ANSYS Fluent.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработано математическое описание процесса очистки дымовых газов угольных ТЭС от мелкодисперсных частиц в прямоугольном сепараторе и получены зависимости геометрических размеров аппарата от требуемой степени эффективности очистки.
2. Экспериментальным путем получены зависимости гидравлического сопротивления в прямоугольном сепараторе от скорости воздуха на входе в устройство и эффективности очистки газовых выбросов от чисел Стокса.
3. Получены экспериментальные зависимости эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц в предложенном аппарате от концентрации частиц в дымовых газах, скорости потока на входе в аппарат и размеров частиц.
4. Получены уравнения для расчета количества рядов и элементов в каждом ряду прямоугольного сепаратора в зависимости от параметров улавливаемых твердых частиц.

**Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов** математического моделирования подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения и переноса массы и импульса, а также удовлетворительным согласованием рассчитываемых и экспериментальных данных. Достоверность опытных данных подтверждается их воспроизводимостью в однотипных сериях экспериментов, а также использованием для их получения современного, сертифицированного и поверенного оборудования.

#### **Практическое значение работы:**

1. Показана экономическая целесообразность использования предлагаемого аппарата в технологических процессах очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц на ТЭС 1 г. Уонг Би (Вьетнам).
2. Разработана конструкция прямоугольного сепаратора для очистки газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц.
3. Разработана инженерная методика расчета устройства для очистки дымовых газов от мелкодисперсных частиц, обеспечивающая возможность определения

характерных параметров аппарата при различных характеристиках газовых потоков с целью оптимизации процесса их очистки дымовых газов ТЭС и технологических выбросов промышленных предприятий.

4. Предложенная конструкция устройства для очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц принята к внедрению на ООО «КАМАТЕК» г. Набережные Челны с целью повышения эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц пыли.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты теоретического и экспериментального исследований работоспособности разработанного устройства в зависимости от различных конструктивных параметров и свойств дымовых газов.
2. Математическое описание процесса очистки дымовых газов ТЭС, работающих на твердых видах топлива, от мелкодисперсных частиц разработанным устройством.
3. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц разработанным устройством.
4. Результаты исследований влияния формы элементов внутри устройства на эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц и его гидравлическое сопротивление.
5. Инженерная методика расчета характерных параметров устройства для очистки дымовых газов ТЭС от мелкодисперсных частиц.

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных аспирантско-магистерских научных семинарах (Казань, 2017, 2018); ежегодных международных молодежных научно-технических конференциях «Тинчуринские чтения» (Казань, 2017, 2018, 2019); ежегодных международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2019).

**Публикация работы.** По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работы, в том числе 3 статей, опубликованы в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук.

**Вклад автора в проведенное исследование.** Автор лично участвовал в постановке цели и задач исследований, разработке конструкции устройства, инженерных методиках расчета, в получении результатов, представленных в диссертации и публикациях.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» и охватывает следующие направления:

П1. Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом.

П3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии и тепла, использования топлива, водных и химических режимов, способов снижения

влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду.

П4. Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 140 страниц машинописного текста, которая включает 93 иллюстраций, 6 таблиц. Список литературы состоит из 123 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** сделан обзор существующих аппаратов по очистке газовых выбросов ТЭС от мелкодисперсных частиц. Показаны проблемы использования применяемых аппаратов для сепарации мелкодисперсных частиц. Дана постановка задач исследования.

Проведена оценка мощности вырабатываемой энергии на угольных ТЭС Вьетнама. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Примерный перечень угольных электростанций, работающих во Вьетнаме

№	Название ТЭС	Установленная мощность, МВт	Регион	Время пуска
1	Ан Хан 1	2x58	Тхай Нгуен	2015
2	Кам Пха	2x340	Коанг Нинь	2011
3	Као Нган	2x57.5	Тхай Нгуен	2006
4	Дуен Хай 1	2x622	Ца Винь	2015
5	Мао Хе	2x220	Коанг Нинь	2013
6	Монг Дыонг 1	2x540	Коанг Нинь	2015
7	Монг Дыонг 2	2x620	Коанг Нинь	2015
8	На Дыонг 1	2x55	Ланг Шон	2005
9	Нинь Бинь	4x25	Нинь Бинь	1974
10	Фа Лай 1	4x110	Хай Дыонг	1986
11	Фа Лай 2	2x300	Хай Дыонг	2001
12	Шон Донг	2x110	Бак Жанг	2009
13	Уонг Би 1	50x55	Коанг Нинь	1975
14	Тхай Бинь 1	2x300	Тхай Бинь	2017
15	Вунг Анг 1	2x600	Ха Тинь	2015

По данным на 2020 год, общая мощность электростанций Вьетнама составляет около 75000 МВт, из которых на угольные электростанции приходится 48% от общей мощности. Ожидается, что к 2030 году общая мощность электростанций должна достичь 146800 МВт, а доля угольных электростанций увеличится до 51,6% с общей мощностью почти 76000 МВт.

Во второй главе содержатся исследования по осаждению частиц на сепарационные элементы предлагаемого устройства (рис. 1).

Для удобства оценки влияния размеров двутаврового элемента на потери давления в аппарате был введен безразмерный коэффициент  $k$ , который вычисляется по формуле:

$$k = h_1/b, \quad (1)$$

где  $b$  – длина двутаврового элемента, м;  $h_1$  – длина выступа двутаврового элемента, м (рис. 2).



Рисунок 1 – Трехмерная модель устройства (вид с разрезом)

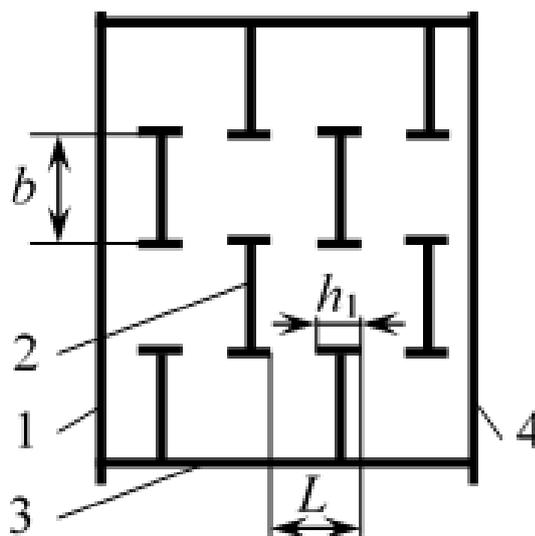


Рисунок 2 – Упрощенная двухмерная модель сепаратора (вид сверху): 1 – входной патрубок; 2 – двутавровые элементы; 3 – корпус; 4 – выходной патрубок

Для определения оптимального значения безразмерного коэффициента  $k$  была проведена серия численных исследований, в ходе которых изменялись линейные длины двутавровых элементов и длины их выступов.

В пределах  $k$  от 0,2 до 0,3 достигается наименьший коэффициент гидравлического сопротивления. В ходе анализа статистических данных было получено уравнение, отображающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от безразмерного параметра  $k$ :

$$\xi = 63,2k^2 - 30,9k + 8. \quad (2)$$

Решив уравнение (2), можно получить, что  $k = 0,25$ . Таким образом, при данном значении безразмерного параметра  $k$  достигается наименьшее значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$ .

В частности, исследована различная форма этих элементов. Результаты показали, что использование сепаратора с двутавровыми элементами по эффективности улавливания частиц является более выгодным, чем с П-образными и дугообразными элементами.

В ходе исследований было установлено, что существует несколько режимов работы сепаратора, влияющих на коэффициент гидравлического сопротивления устройства. Проявление различных режимов было обусловлено изменением структуры газового потока, которая изменялась вследствие увеличения количества точек вихреобразования и размеров самих вихрей, которые были вызваны ростом входной скорости газового потока.

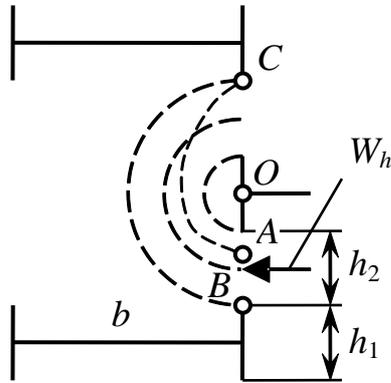


Рисунок 3 – Расчетная схема ступени прямоугольного сепаратора

Предлагается оценочная методика расчета эффективности прямоугольного сепаратора, основанная на решении относительно простых уравнений. Расчетная схема ступени приведена на рис. 3.

Предполагается, что сепаратор будет улавливать частицы небольшого диаметра, поэтому их смещением за счет силы тяжести можно пренебречь и использовать двухмерную модель движения частицы в

полярных координатах:

$$\begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3 \rho_G}{4 \rho_L} c_a \frac{|U_r|}{a} (-U_r), \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_r U_\varphi}{r} + \frac{3 \rho_G}{4 \rho_L} c_a \frac{|W_\varphi - U_\varphi|}{a} (W_\varphi - U_\varphi), \\ \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{U_\varphi}{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_r$ ,  $U_\varphi$  – радиальная и тангенциальная скорости, м/с;  $\tau$  – время полета капли, с;  $r$  – текущий радиус рабочей зоны на ступени, м;  $c_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho_L$  – плотность капли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_G$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

В описании принимаются следующие допущения: пренебрегается осевой скоростью газа и влиянием частиц на структуру потока газа из-за их малой концентрации.

Для расчета тангенциальной скорости обычно используется зависимость:

$$W_\varphi = W_h (r/r_{cp})^n, \quad (4)$$

где  $r_{cp} = (h_1 + h_2)/2$  – средний радиус, м;  $h_2$  – расстояние между соседними выступами, м;  $W_h$  – скорость в сужении прямоугольного сепаратора, м/с;  $n$  – показатель степени.

Для решения системы уравнений используются начальные условия:  $U_r(0) = 0$ ;  $U_\varphi(0) = 0$ ;  $\varphi(0) = -\pi/2$ ;  $r = r_0$ . Начальный радиус, на котором располагается частица выбирается из условия осаждения частицы на верхней грани (в точке С рис. 3).

Коэффициент аэродинамического сопротивления  $c_a$  рассчитывался по формуле:

$$c_a = \frac{24}{\text{Re}_a} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}_a}}, \quad (5)$$

где  $\text{Re}_a = U_{om} a / \nu_G$  – число Рейнольдса для частицы,  $a$  – диаметр частицы, м;  $\nu_G$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $U_{om}$  – относительная скорость движения частицы,  $\text{м}/\text{с}$ .

Точка С (рис. 3) совпадает с нижней точкой элемента прямоугольного сепаратора и соответствует концу траектории частицы, вылетающей из точки А. Эффективность сепарации частиц, определяется исходя из предположения, что частицы, вылетающие ниже начального радиуса, улавливаются ступенью сепаратора, а остальные частицы улетают на следующую ступень. Исходя из этого предположения эффективность сепарации частиц на одной ступени:

$$E = G_1 / G_0, \quad (6)$$

где  $G_0$  – расход газа, проходящий через одну сторону ступени сепаратора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G_1$  – расход газа, в котором частицы улавливаются,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Расход газа, проходящий через одну сторону ступени сепаратора можно определить:

$$G_0 = x \int_{h_1/2}^{h_1/2+h_2} W_\varphi(z) dz. \quad (7)$$

С учетом формулы (7)

$$G_0 = \frac{x W_{cp}}{r_{cp}^n (n+1)} \left( \left( \frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - \left( \frac{h_1}{2} \right)^{n+1} \right) \quad (8)$$

где  $x$  – высота участка, м.

Аналогично определяется расход газа, в котором частицы улавливаются

$$G_1 = \frac{x W_{cp}}{r_{cp}^n (n+1)} \left( \left( \frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - r_{тек}^{n+1} \right) \quad (9)$$

Тогда эффективность можно определить по соотношению

$$E = \frac{\left( \frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - r_{тек}^{n+1}}{\left( \frac{h_1}{2} + h_2 \right)^{n+1} - \left( \frac{h_1}{2} \right)^{n+1}} \quad (10)$$

Для оценочных расчетов можно принять  $n = 1$ , согласно проведенным ранее расчетам в прикладных программах. Следовательно, можно записать:

$$E = \frac{h_1^2 + 4h_1h_2 + 4h_2^2 - 4r^2}{4h_2(h_1 + h_2)} \quad (11)$$

В результате расчетов получены зависимости эффективности от геометрических размеров рабочей зоны.

При небольших значениях размера  $h_1$  эффективность убывает при всех значениях ширины ступени (рис. 4). Столь существенное снижение объясняется увеличением расхода той части газа, из которой частицы не успевают оседать. Центробежная сила возрастает, но увеличивается и длина траектории, по которой движется частица. С увеличением  $h_1$  на зависимости появляется локальный максимум. Причем значения ширины ступени, при котором он наблюдается примерно одинаковые.

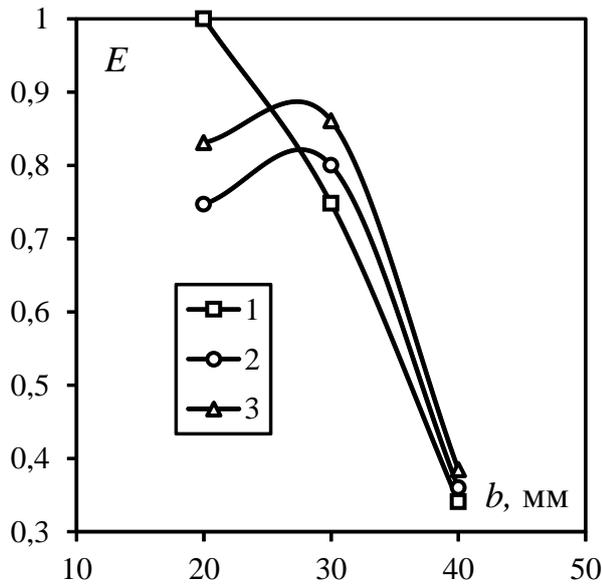


Рисунок 4 – Зависимость эффективности сепаратора от ширины элемента  $b$ , при  $W_{cp} = 10$  м/с,  $a = 10$  мкм,  $h_1$ , мм: 1 – 3; 2 – 5, 3 – 7

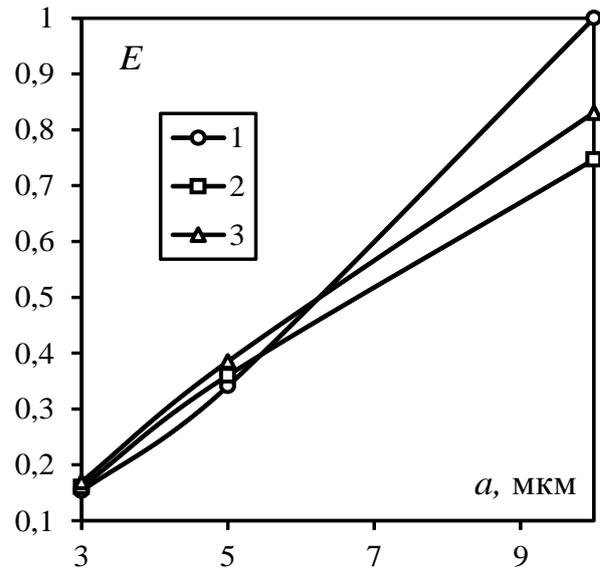


Рисунок 5 – Зависимость эффективности сепаратора от диаметра частицы при  $W_{cp} = 10$  м/с,  $b = 20$  мм,  $h_1$ , мм: 1 – 3; 2 – 5, 3 – 7

Как и во всех подобных устройствах, при увеличении диаметра частицы эффективность улавливания повышается (рис. 5). При улавливании частиц диаметром менее 6 мкм эффективность улавливания практически не зависит от значения размера  $h_1$ . При улавливании более крупных частиц эффективность больше у сепараторов с  $h_1 = 3$  мм.

Было обнаружено, что до значения  $h_1/b < 0,23$  эффективность не зависит от среднерасходной скорости газа. Эффективность равна 1 в диапазоне  $0,15 < h_1/b < 0,23$ . При значениях  $h_1/b < 0,15$  эффективность возрастает практически по линейной зависимости. Предложенная методика может использоваться для оценочных расчетов эффективности при подборе оптимальных значений геометрических размеров прямоугольных сепараторов.

С целью получения более точных данных было проведено трехмерное моделирование разрабатываемого прямоугольного сепаратора. В результате было выявлено, что структура газового потока на двух первых рядах исследуемого сепарационного устройства существенно отличается от структуры потока, которая наблюдается в рабочей зоне аппарата, так как структура потока в начале устройства не упорядочена. Следовательно, и эффективность будет другой. Таким образом, при расчете необходимого количества рядов элементов в сепараторе для достижения требуемой эффективности очистки газовых выбросов необходимо учитывать данные аспекты. Вследствие этого в работе рассматривалось несколько видов эффективностей: эффективность сепаратора  $E$ , эффективность ступени очистки  $E_1$  и эффективность первых двух рядов  $E_0$ . Ступенью очистки сепаратора является пространство между рядами дугообразных элементов, где газовые выбросы очищаются под воздействием центробежных сил.

В ходе работы были получены уравнения (12)-(14) эффективностей очистки газовых выбросов от чисел Стокса и коэффициента гидравлического сопротивления от чисел Рейнольдса, позволяющие при их совместном решении рассчитать необходимую входную скорость газового потока при конкретном

значении длины дугообразных элементов для достижения максимальной эффективности очистки газовых выбросов от твердых частиц при минимальном гидравлическом сопротивлении:

$$E = 1 - 0,4598e^{-1,21Stk}; \quad (12)$$

$$E_0 = 0,5 - 0,4006e^{-0,0327Stk}; \quad (13)$$

$$E_1 = 1 - 0,7945e^{-0,6304Stk}. \quad (14)$$

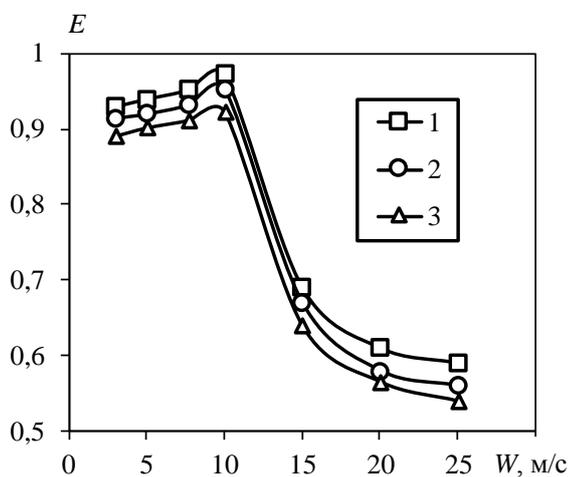


Рисунок 6 – Зависимость эффективности улавливания частиц диаметром 4 мкм из потока воздуха при различных формах элементов: 1 – двутавровые; 2 – П-образные; 3 – дугообразные

В ходе расчета эффективности сепаратора с различными формами сепарационных элементов была определена эффективность улавливания мелкодисперсных частиц сепаратором при скорости газового потока до 10 м/с составляла 94,8, 92,9 и 90,7 % при использовании двутавровых, дугообразных и П-образных элементов соответственно. При скорости газового потока более 15 м/с эффективность устройства снижалась до 63,1, 60,3 и 58,1% при использовании двутавровых, дугообразных и П-образных элементов соответственно, вследствие перехода на другой режим работы (рис. 6).

В третьей главе представлены экспериментальные исследования улавливания мелкодисперсных твердых частиц сепаратором с прямоугольными элементами. Для проверки адекватности полученных зависимостей и выводов была спроектирована и создана экспериментальная установка (рис. 7).



Рисунок 7 – Экспериментальная установка: 1 – двутавровые элементы в прямоугольном корпусе (сепаратор); 2 – переходник от сепаратора к фильтру; 3 – фильтр; 4 – переходник от фильтра к воздуходувке; 5 – воздуходувка; 6 – патрубок для подключения дифманометра; 7 – анемометр; 8 – дифманометр

Проведенный эксперимент показал, что эффективность уловленных частиц двутавровыми элементами в прямоугольном корпусе составляет 79,5%, потери давления в установке составили в среднем 1930 Па. Отклонения улавливания мелкодисперсных частиц пыли размером 2 мкм между физическим и численным экспериментом составляют около 20%. Стоит отметить, что при проведении физического эксперимента размер частиц составлял преимущественно 2 мкм, однако за счет коагуляции их размер мог составлять более 2 мкм.

**В четвертой главе** исследована работоспособность сепаратора на промышленном производстве. Распечатанная на 3D принтере опытная модель данного устройства была установлена в системе энергоснабжения ООО «Каматек» на 4 месяца. Стоит отметить, что теплофизические параметры и размеры частиц в запыленном газовом потоке являлись практически идентичными аналогичным параметрам для частиц, которые образуются при сжигании твердых видов топлива. Поэтому установка сепаратора на предприятии позволила проверить процесс очистки газа от частиц пыли в энергетических системах. Прямоугольный сепаратор включал 4 ряда двутавровых элементов. В каждом ряду было по 5 элементов. Длина и толщина каждого двутаврового элемента составляла 14 и 1 мм соответственно. Сепаратор крепился 4 болтами в входном проеме системы циркуляции воздуха на предприятии «КАМАТЕК» перед фильтрами тонкой очистки. Для крепления сепаратора были сделаны 4 отверстия в дне устройства, по 2 отверстия с входной и выходной сторон сепаратора.

На предприятии реализовывалась следующая схема: газовый поток из цехового помещения через приточную систему поступал в предварительный фильтр, после чего направлялся в потолочный фильтр и в покрасочную камеру, далее газовый поток проходил через напольный фильтр волокнистого типа и двигался через входной проем вытяжки, в которой был установлен сепаратор. Стоит отметить, что размер входного проема составляет 1200 на 400 мм, поэтому через сепаратор проходила только часть газового потока.

После 4 месяцев работы сепаратора на предприятии ООО «Каматек» его масса увеличилась на 400 г. Анализ уловленных частиц позволил установить, что размер пойманных частиц пыли варьируется в диапазоне 1-10 мкм. Визуальный осмотр каждого ряда позволил установить, что менее эффективным является первый ряд (рис. 8), подтвердивший ранее описанные теоретические и математические исследования.



Рисунок 8 – Прямоугольный сепаратор после его применения в качестве предварительной ступени очистки на предприятии ООО «Каматек»

Одними из главных преимуществ прямоугольного сепаратора являются легкость в сборке и разборке (рис. 9), что позволяет сократить время на очистку устройства и его полное восстановление. Основой устройства служит блок двутавровых элементов, который образуется сборкой блочных 1 и поперечных блочных пластин 2. Блок двутавровых элементов заключается в прямоугольный

корпус, состоящий из крышки 3 и корпуса 4. Для исключения колебаний блока двутавровых элементов и обеспечения жесткости конструкции она фиксируется шпильками 5, проходящими через блок двутавровых элементов, тем самым исключая вероятность смещения пластин. На концах шпилек устанавливаются гайки 6.

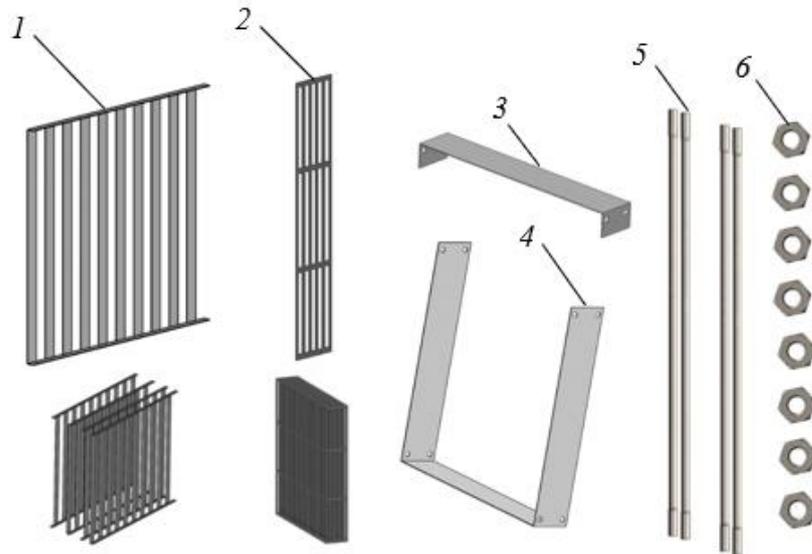


Рисунок 9 – Конструктивные элементы прямоугольного сепаратора:

1 – блочные пластины; 2 – поперечные блочные пластины; 3 – крышка корпуса;  
4 – корпус; 5 – шпильки; 6 – гайки

В диссертационной работе представлена инженерная методика расчета сепарирующего устройства, позволяющая рассчитать необходимые размеры конструктивных элементов сепаратора: размеры входного патрубка, длина и толщина двутавровых элементов, количество рядов двутавровых элементов и количество элементов в каждом ряду в зависимости от требуемой эффективности очистки газовых выбросов ТЭС, от параметров газовой среды (плотность, температура), от параметров частиц (размер, плотность) и от запыленности газового потока. Также инженерная методика позволяет спрогнозировать время работы сепарирующего устройства до его остановки и очистки от частиц.

Установка разработанного прямоугольного сепаратора в качестве предварительной ступени очистки перед фильтрами тонкой очистки может существенно снизить финансовые затраты предприятия, возникающие вследствие штрафов из-за выбросов продуктов сгорания в воздушный бассейн.

Приведенные результаты расчета экономического обоснования возможного внедрения разработанных прямоугольных сепараторов на ТЭС 1 города Уонг Би показывают, что внедрение разработанных прямоугольных сепараторов на предприятии для улавливания частиц пыли является экономически выгодным мероприятием. Общий экономический эффект за 10 лет от использования прямоугольных сепараторов в качестве предварительной ступени очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц перед фильтрами составляет 160000 руб. при сроке окупаемости 10 месяцев. Можно сделать вывод, что внедрение предлагаемых сепараторов позволит предприятию снизить постоянные финансовые затраты на закупку и замену фильтров на 29% за 10 лет. Следует отметить, что представленные расчеты являются ориентировочными, так как позволяют подвести итоги об экономической эффективности планируемого

мероприятия по интеграции прямоугольных сепараторов в технологическую линию предприятия.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. На основе анализа обзора существующих аппаратов для очистки и улавливания мелкодисперсных частиц из дымовых газов ТЭС разработано полностью разборное устройство, состоящее из простых элементов, улавливающее твердые частицы и капли диаметром 5 мкм с эффективностью более 99% при меньшем, чем у традиционных аналогичных аппаратов гидравлическом сопротивлении при сопоставимой производительности.
2. Получены уравнения для определения геометрических размеров элементов сепаратора, позволяющие подобрать конструкцию для достижения требуемой степени очистки от частиц из дымовых газов ТЭС.
3. Разработано математическое описание процесса очистки газового потока от мелкодисперсных частиц при различном количестве рядов элементов сепаратора и элементов в каждом ряду.
4. Экспериментально исследован сепаратор с двутавровыми элементами на промышленном предприятии ООО «КАМАТЕК» в г. Набережные Челны. Доказана возможность продления срока службы фильтров для тонкой очистки технических газов более чем в два раза.
5. Получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора от среднерасходной скорости потока газа. Определены два характерных режима работы сепаратора, при которых коэффициент гидравлического сопротивления существенно изменяется.
6. Определена конструкция сепарационных элементов, при которой устройство работает с наибольшей эффективностью очистки газовых выбросов. Использование двутавровых сепарационных элементов позволяет получить значение эффективности улавливания частиц из дымовых газов ТЭС на 5% больше чем при использовании дугообразных элементов.
7. Установлено, что при среднерасходной скорости прохождения дымовых газов через предлагаемый сепаратор равной 10 м/с эффективность достигает наибольшего значения.

### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.**

1. Исследовать эрозионный износ сепарационных перегородок в зависимости от параметров улавливаемых частиц и конструктивных особенностей устройства.
2. Исследовать дробление капель жидкости внутри сепарационного устройства с прямоугольными сепарационными перегородками.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

**В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:**

1. Нгуен В.Л. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Ву Л. Нгуен // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 138-144. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-138-144.

2. *Нгуен В.Л.* Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, В.Л. Нгуен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 74-81.

3. *Нгуен В.Л.* Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц / А.В Дмитриев, В.Э Зинуров, О.С Дмитриева, Ву Л.Нгуен // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 3-9. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.

**В изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS и Web of Science:**

4. *Nguyen V.L.* Separator for Separation of Finely Dispersed Droplets from Gas Flows Generated by Industrial Enterprises / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, S. V. Dang, V. L. Nguen // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – V. 55 – N. 4 – P. 329-335. DOI: 10.1007/s10556-019-00623-8.

5. *Nguyen V.L.* Estimation of Rectangular Separator Efficiency / O. S. Popkova, Wu Linh Nguyen, O. S Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1210. – P. 012114. DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012114.

6. *Nguyen V.L.* Separator design optimization for collecting the finely dispersed particles from the gas flows / V. E. Zinurov, O. S. Popkova, Vu L. Nguyen // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 126. – P. 00043. DOI:10.1051/e3sconf/201912600043.

7. *Nguyen V.L.* Evaluation of the efficiency of rectangular separators to collect the particles from the gas flows / O. S. Dmitrieva, Vu L Nguen, N. D. Yakimov, E. G. Sheshukov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 337. – P. 012057. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012057.

**Публикации в других изданиях и материалах конференций :**

8. *Нгуен В.Л.* Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Ву Линь Нгуен // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 15. – С. 78-80.

9. *Нгуен В.Л.* Оценка эффективности прямоугольных сепараторов для улавливания частиц из потоков газа / А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, Э. И. Салахова, Ву Линь Нгуен // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 59-62.

10. *Нгуен В.Л.* Эффективность ступени прямоугольного сепаратора / Ву Линь Нгуен, О. С. Попкова // XXI аспирантско-магистерский семинар, посвященный Дню энергетика. В 3 т. Т. 2: тезисы докладов (Казань, 5–6 декабря 2017 г.) / под общ. ред. ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – С. 167.

11. *Нгуен В.Л.* Улавливание твердых частиц из газов в промышленной энергетике / Ву Линь Нгуен, Суан Винь Донг, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев // XII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 26–28 апреля 2017 г.) : материалы докладов конференции в 3 т. Т. 2. – Казань: КГЭУ под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 344-346.

12. *Нгуен В.Л.* Исследование процесса очистки газового потока прямоугольным сепаратором при различных толщинах двутавровых элементов /

Ву Линь Нгуен, А. В. Дмитриев, О. С. Попкова // XIII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 24–27 апреля 2018 г.) : материалы докладов конференции в 3 т. Т. 2. – Казань: КГЭУ под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – С. 96-99.

13. *Нгуен В.Л.* Разработка прямоугольного сепаратора для интенсификации процессов газоочистки / В. Э. Зинуров, Ву Линь Нгуен, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева // XXV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 14-15 марта 2019 г.) : тез. докл. – М: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга”», 2019. - С. 845. 307-309

14. *Нгуен В.Л.* Исследование процесса очистки газового потока прямоугольным сепаратором при различных толщинах двутавровых элементов / Ву Линь Нгуен, М.О. Григорьева // XIV Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 23–26 апреля 2019 г.) : материалы докладов конференции в 3 т. Т. 2. – Казань: КГЭУ под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – С. 307-309.

---

Подписано в печать 26.02.2021. Форм. бум. 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1. Тираж 90. Заказ № 2602/3.

Отпечатано с готового оригинал – макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: westfalika@inbox.ru

---