

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики**

На правах рукописи

Титов Дмитрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА
В СИСТЕМАХ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ
С ДИНАМИЧЕСКИМ СЕПАРАТОРОМ**

Направление подготовки:

13.06.01 – Электро- и теплотехника

Направленность:

13.06.01_09 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Титов Д.А.

Научный руководитель:
профессор, д.т.н. Михайлов В.Е.

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ

Калютик Александр Антонович,
к.т.н., доцент ИЭ СПбПУ

Научный руководитель:

Михайлов Владимир Евгеньевич,
д.т.н., профессор ОАО «НПО ЦКТИ»

Рецензент:

Скудицкий Виталий Ефимович,
к.т.н. ООО «Компания НТВ-энерго»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ДИНАМИЧЕСКИЕ СЕПАРАТОРЫ ПЫЛИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....	8
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАТОРОВ ТОПЛИВА НА ТЭС	10
3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ПЫЛИ В ДИНАМИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ	18
4 РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА.....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	32

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Энергетика является основной отраслью народного хозяйства. Электростанции, использующие твёрдое топливо, всё ещё сохраняют значимую роль на энергетическом рынке России, а в некоторых её регионах, таких как Сибирь и Дальний Восток, удерживают лидирующие позиции. Повышение эффективности пылеприготовительного оборудования и совершенствование процессов, происходящих в нём, способствуют поступательному развитию котельно-топочной техники. Применение динамических сепараторов пыли позволяет значительно сократить затраты энергии на размол топлива за счёт повышения эффективности разделения, при сопоставимой тонине помола пыли и производительности, кроме того, применение динамических сепараторов позволяет оперативно регулировать тонину помола топлива в широких пределах, при этом получая в качестве готового продукта как сверхтонкую пыль, так и грубую пыль. В отечественной энергетике известны лишь единичные случаи применения динамических сепараторов пыли на пылесистемах с валковыми среднеходными мельницами.

Степень разработанности темы. Исследованием процессов сепарации порошкообразных материалов занимались П.М. Лузин, Н.С. Клепиков, И.И. Климов, М.Д. Барский, С.Д. Ушаков, Н.Ф. Глухарев, Б.В. Дерягин, Г.Г. Михеев и др. Результаты этих исследований широко отражены в литературе. Кроме того, исследование конструкции динамического сепаратора в последнее время вызывает неподдельный интерес у отечественных учёных. В настоящий момент три крупные российские научные школы занимаются изучением этого вопроса: сотрудники ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» во главе с Н.С. Клепиковым, сотрудники Ивановского энергетического института, в частности С.И. Шувалов, А.А. Андреев, а также, сотрудники Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, в частности В.А. Уваров, Р.Р. Шарапов и В.Н. Трофимченко. Перечисленные учёные внесли большой вклад в изучения процесса сепарации сыпучих материалов. Однако на сегодняшний день так и не существует достаточно обоснованной инженерной методики расчёта динамического сепаратора применительно к отечественным углеразмольным устройствам. Кроме того, не было изучено влияние конструктивных элементов ди-

намического сепаратора на его аэродинамику и эффективность процесса сепарации в нём.

Цель работы – исследование влияния конструктивных элементов динамического сепаратора, разработка методического комплекса, позволяющего исследовать аэродинамические и сепарационные процессы в динамическом сепараторе, обосновать и оптимизировать конструктивные и технологические решения при создании новой, отечественной конструкции динамического сепаратора, а также создание методики расчёта динамических сепараторов при их различной производительности.

В качестве **объекта исследования** выбран динамический сепаратор.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Выполнить анализ развития конструкций и эксплуатации динамических сепараторов отечественного и зарубежного производства, методов их расчёта, и на этой основе обосновать постановку задач исследований.

2. Провести испытания и получить экспериментальные данные по работе современных образцов динамических сепараторов.

3. Проанализировать и обобщить результаты экспериментальных исследований динамических сепараторов в промышленных условиях.

4. Сформировать базу экспериментальных данных для верификации и валидации математических моделей.

5. Предложить *CFD* модель расчёта аэродинамики и процессов классификации в динамическом сепараторе.

6. На основе вычислительного эксперимента выявить особенности и влияние элементов конструкции на аэродинамические и сепарационные процессы в динамическом сепараторе.

7. На основе полученных закономерностей предложить методику расчёта динамических сепараторов при различной их производительности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

обоснован выбор расчетного комплекса на базе *CFD* пакета *ANSYS Fluent*, позволяющего исследовать аэродинамические и сепарационные процессы в динамическом сепараторе, оптимизировать конструктивные и технологические решения и на этой основе повысить эффективность их работы, а также разрабатывать перспективные конструкции динамических сепараторов;

установлено влияние конструктивных элементов динамического сепаратора на процесс классификации полидисперсного материала;

получены новые экспериментальные данные работы динамического сепаратора пыли модели *SLS-250*, а также обработаны экспериментальные данные работы сепаратора мельницы *MBC 195* производства АО «ТЯЖМАШ» (г. Сызрань);

предложена методика расчёта динамических сепараторов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

использование обоснованных расчётных *CFD* моделей на основе коммерческого продукта *Ansys Fluent* для численного моделирования двухфазных течений в сепараторах позволяет установить закономерности и особенности протекания гидродинамических и сепарационных процессов в аппаратах в зависимости от модификации их конструкции. Приведены обработанные результаты испытаний промышленных образцов динамических сепараторов. Исследовано влияния основных элементов сепаратора на процесс классификации полидисперсного порошка в нём.

Практическая значимость исследования обоснована тем, что:

предложенная CFD модель позволяет путем численного моделирования аэродинамических и сепарационных процессов в динамическом сепараторе оптимизировать конструктивные, технологические и режимные характеристики аппаратов и выбрать наиболее эффективные решения, обеспечивающие требуемое качество готовой пыли;

установлено влияние конструктивных особенностей динамического сепаратора на эффективность разделения полидисперсного материала в нём;

предложена усовершенствованная конструкция динамического сепаратора;

разработана методика расчёта динамического сепаратора;

Методы исследования: компьютерное моделирование, расчетные исследования и промышленный эксперимент.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методический комплекс (расчетные модели на базе *CFD* пакета *ANSYS FLUENT* и база экспериментальных данных) для численного моделирования аэродинамических и сепарационных процессов в динамическом сепараторе; результаты верификации моделей на экспериментальных данных.

2. Результаты испытаний промышленных образцов динамических сепараторов.

3. Результаты вычислительного эксперимента на натуральных моделях динамических сепараторов (закономерности и особенности протекания гидравлических процессов в динамических сепараторах).

4. Рекомендации по проектированию перспективных конструкций динамических сепараторов.

5. Методика расчёта динамических сепараторов.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, планировании и организации основных этапов работы. Диссертанту принадлежат: результаты экспериментальных, аналитических и численных исследований; обработка и обобщение экспериментальных данных промышленных испытаний. Часть работ (эксперименты в промышленных условиях) выполнена совместно с сотрудниками ОАО «НПО ЦКТИ», чье участие отмечено в тексте диссертации.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций определяется физической обоснованностью разработанных математических моделей и исходных предпосылок для расчетов; использованием апробированных методик исследований; удовлетворительным согласованием расчетных данных с экспериментальными данными автора и других исследователей.

Внедрение. Результаты работы использованы в проектах завода «ГЯЖ-МАШ»: проект динамического сепаратора цементной мельницы для предприятия «Ахангаранцемент» (Узбекистан), проект динамического сепаратора для мельницы *XRP803* (Индия), а также при создании инерционного сепаратора для пылесистемы на ТЭЦ Костолац Б (Сербия).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на I и II Международной научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (Москва, 2016 и 2017); III и IV Международной научно-технической конференции «Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 2016 и 2018); Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017); XLVI и XLVII научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2017 и 2018); XXIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2018); II Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные тенденции котлостроения» (г. Барнаул, 2018); X Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2018); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловские чтения «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» (Екатеринбург, 2018); IX Международном симпозиуме по сжиганию угля – ISCC-9 (г. Циндао, Китай, 2019); XIV и XV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – “Энергия-2019” и “Энергия-2020” (г. Иваново, 2019 и 2020) и НТС в ОАО «НПО ЦКТИ» (2019).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 17 работ, в т. ч. 2 – в изданиях их перечня ВАК, одна из которых имеет переводную версию в издании, индексируемом в МБД Scopus и Springer; 12 работ опубликовано в трудах международных конференций; получено 3 патента на полезную модель Российской Федерации.

1 ДИНАМИЧЕСКИЕ СЕПАРАТОРЫ ПЫЛИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

В данной главе проведён обзор литературы по теме диссертационного исследования [1–46]. Рассмотрен процесс совершенствования воздушно-проходных сепараторов, приведены примеры основных конструкций сепараторов, а также рассмотрены системы классификации основных сепараторов порошкообразных материалов.

Рассмотрены четыре основных направления развития сепарационных воздушных проходных устройств:

- Гравитационные сепараторы, область применения, в энергетике, которых ограничена низкокачественными топливами в связи с низкой эффективностью сепарации топлива в них. Из-за громоздкости и неудобством эксплуатации, в последнее время гравитационные сепараторы вытесняются инерционными. Блочные гравитационные сепараторы, такие как зигзаг сепаратор и сепаратор с пересыпными полками не нашли своего применения в энергетике в связи с высоким их аэродинамическим сопротивлением и большими габаритами.

- Инерционные сепараторы, так же, как и гравитационные применяются в основном на низкосортных топливах, содержащих большое количество летучих, в связи с тем, что эффективность сепарации у них также не велика. Достоинствами сепараторов данного вида являются низкие эксплуатационные затраты (низкое аэродинамическое сопротивление, не превышающее, как правило 100 мм. в. ст.), простота конструкции и небольшие габариты, по сравнению с гравитационными сепараторами. Применяются сепараторы данного типа в основном совместно с мельницами-вентиляторами и молотковыми мельницами [51, 52, 58, 60].

- Центробежные пневматические сепараторы являются самым распространённым типом сепараторов в энергетике благодаря широкому диапазону регулирования (R_{90} в них изменяется от 5 до 40 %). Данный тип сепараторов применяется практически со всеми типами мельниц, вне зависимости от реакционных способностей сепарируемого топлива. В качестве недостатка, можно отметить повышенное содержание готового продукта в материале, поступающем на домол.

- Центробежные механические сепараторы по своей эффективности подразделяются на три поколения. Динамические сепараторы, являющиеся их третьим поколением, имеют более широкий диапазон регулирования, нежели центробежные статические, а также дают возможность получения сверхтонких порошков (с $R_{90} = 0$ %). Ещё одной отличительной чертой динамических сепараторов является высокая эффективность сепарации, недостижимая на

воздушно-проходных сепараторах других типов. Повышение эффективности сепарации позволяет повысить производительность измельчительной установки в целом, а также сократить затраты электроэнергии на 10...20 %. В энергетике сепараторы данного типа применяются со среднеходными мельницами. Однако в цементной промышленности динамические сепараторы успешно применяются в установках, оснащённых шаровыми трубными (барабанными) мельницами. Мировой опыт развития пылеприготовительной техники на электростанциях показал, что применение динамических сепараторов на системах пылеприготовления прямого вдувания с валковыми среднеходными мельницами позволяет снизить затраты электроэнергии на размол топлива, изменять тонину помола готовой пыли в широких пределах, при этом обеспечивая однородный фракционный состав готовой пыли (коэффициент полидисперсности пыли n при использовании динамических сепараторов обычно более 1).

Исследованием центробежных механических сепараторов занимались такие учёные как Лузин П.М., Клепиков Н.С., Телетов С.Г., Сыркин С.Н., Климов И.И., Ушаков С.Г., Мизонов В.Е., Маргулис М.Л., Дин-Уайт, Ханкок С., Богданов В.С., Пироцкий В.З., Барский М.Д., Шишкин С.Ф., Пономарев В.Б., Зверев Н.И. и др. Ими были предложены методики расчёта аэродинамики и процессов разделения порошкообразных материалов в сепараторах. Предложенные методики основываются на решение уравнения Новье-Стокса при помощи критериального метода или методом математического моделирования.

Также в этой главе были рассмотрены уравнения, описывающие распределение частиц пыли по классам. Исходя из проделанного обзора, для описания гранулометрического состава было выбрано уравнение Розина-Рамлера, как удовлетворяющее требованиям поставленной задачи с точки зрения совпадения с экспериментальными данными, так и обладающее достаточной простотой и понятностью записи.

По результатам обзора литературы уточнена постановка задач исследований.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАТОРОВ ТОПЛИВА НА ТЭС

В данной главе приведены результаты испытаний промышленных и опытно-промышленных образцов динамических сепараторов установленных на пылесистемах мельниц МВС-125, МВС-195 и *MPS-200* на следующих объектах – ТЭЦ-17 Ленэнерго, Черепетской ГРЭС и Троицкой ГРЭС соответственно. Все пылесистемы – прямого вдувания, особенности сепараторов отображены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики конструкций сепараторов

Наименование	MPS-200	MBC-195	MBC-125
Диаметр корпуса, мм	3880	2745	2270
Высота сепаратора (от фланца мельницы до выходного патрубка), мм	2700	1510	950
Объем сепаратора, м ³	23,5	7,81	3,8
Площадь сечения на входе в сепаратор (выходе из мельницы), м ²	7,17	4,83	
Площадь сечения на выходе из сепаратора, м ²	6,6	2,1	0,5
Характеристика статорного аппарата:			
внешний диаметр решетки, мм	2800	1880	–
высота решетки на входе потока, мм	1410	710	–
количество лопаток, шт.	50	24	–
длина лопаток (по ходу потока), мм	195	185	
Характеристика корзины ротора:			
диаметр (средний), мм	2600	1377	1070
то же максимальный, мм	-	1480	1300
то же минимальный, мм	-	1270	825
высота на входе потока, мм	1410	782	560
количество лопаток, шт.	100	32	24
длина лопаток (по ходу потока), мм	110	95	165
Скорость вращения ротора сепаратора на номинальной нагрузке, мин ⁻¹	100	200	130

Испытания сепараторов МВС-125 были проведены сотрудниками ЦКТИ, а сепараторов МВС-195 сотрудниками ОАО «ВТИ», автором же были обработаны результаты данных испытаний в вид, пригодный для верификации и валидации математических моделей динамических сепараторов. Испытания сепараторов мельниц *MPS-200* были проведены автором, при участии сотрудников ООО «Интертехэнерго» и цеха наладки Троицкой ГРЭС, обработка и анализ экспериментальных данных выполнена лично автором.

Далее для примера приведены методики исследований и результаты испытаний на примере СПП с мельницей *MPS-200* на Троицкой ГРЭС.

Испытания проводились по общепринятым методикам с учетом специфических особенностей СПП с МВС [36–39]. Все средства измерений предварительно прошли госповерку.

Целью испытаний было определение основных параметров, характеризующих работу динамических сепараторов среднеходных мельниц типа *MPS-200* котла ст. № 10. Испытания сепараторов проведены на мельницах ст. №1, №2 и №3. Все результаты испытаний были сведены в таблицу 2 приложения А.

Проектным топливом мельницы *MPS* является Кузнецкий каменный уголь марок Г и Д со следующими характеристиками: коэффициент размолоспособности в диапазоне от 1,06 до 1,2 [40], влажность топлива на рабочую массу W^r от 12,8 до 14,8%, зольность A^r при в диапазоне от 14 до 16%, выход летучих на сухое беззольное состояние, V^{daf} от 42,6 до 44%, при теплотворной способности от 5070 до 5150 ккал/кг (21225 – 21560 кДж/кг).

На рисунке 1 приведена зависимость остатка на сите 90 мкм от частоты вращения ротора сепаратора. Зависимость получена для двух средних за опыт расходов топлива: на *MPS* ст. №2 – 27,6 т/ч и *MPS* ст. №1 – 39,4 т/ч. Диапазон изменения числа оборотов ротора для производительности $B = 39,4$ т/ч находился в пределах 65÷105 об/мин, для $B = 27,6$ т/ч в пределах 60÷99 об/мин.

Расходы топлива и сушильного агента в сериях опытов незначительно изменялись, на этом и последующих графиках указаны их среднеарифметические значения. Как следует из рисунка 1, с увеличением числа оборотов ротора сепаратора остаток готовой пыли на сите 90 мкм уменьшается, при этом кривая, соответствующая средней для опытов № 1, 2, 3 производительности $B = 39,4$ т/ч в диапазоне изменения оборотов от 65 до примерно 100 об/мин, расположена выше кривой зависимости для средней для опытов № 6, 7, 8 производительности при $B = 27,6$ т/ч. Так, при $B = 39,4$ т/ч и изменении оборотов ротора от 65 до 105 об/мин остаток на сите 90 мкм снижается от $R_{90} \sim 50\%$ до $R_{90} \sim 13,4\%$, а при производительности $B = 27,6$ т/ч и изменении числа оборотов от 60 до 99 остаток на сите 90 мкм уменьшается от 33,8 до 16,2%.

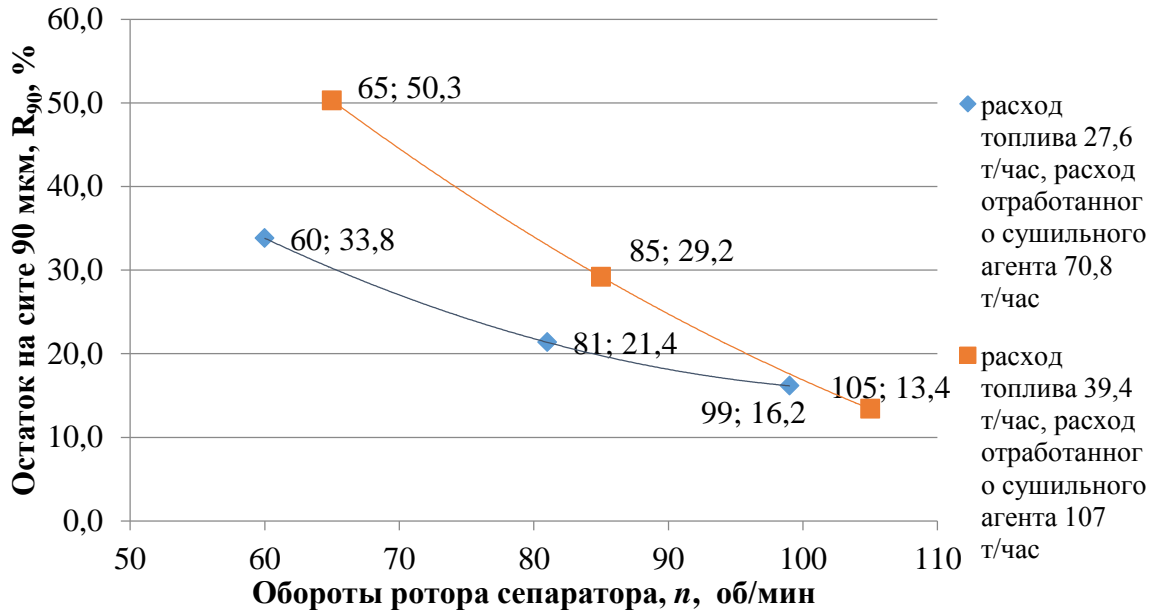


Рисунок 1 – Зависимость остатка на сите 90 мкм от частоты вращения ротора сепаратора

Указанные зависимости являются характерными для динамических сепараторов, а различие их остатков R_{90} при одинаковых величинах оборотов связано, в первую очередь, с неодинаковыми значениями их производительностей по топливу (39,4 и 27,6 т/ч), соответственно разными величинами средних за опыт расходов сушильного агента (107 и 71 т/ч), что также влияет на величину R_{90} . При более высоком расходе сушильного агента пыль угрубляется за счёт увеличения влияния силы давления потока на частицу. Таким образом, изменяется баланс сил в зоне разделения, что и приводит к увеличению среднего размера частиц в готовом продукте. Этот эффект отражен кривыми зависимостей рисунка 1.

Упомянутая зависимость остатка на сите 90 мкм от расхода отработанного сушильного агента G_2 приведена на рисунке 2 для постоянного числа оборотов ротора сепаратора равного 80 об/мин. Из приведенной зависимости следует, что с увеличением расхода G_2 возрастает остаток на сите 90 мкм, так при расходе отработавшего сушильного агента $G_2 = 73,8$ т/ч остаток на сите 90 мкм $R_{90} = 21,4\%$, а при $G_2 = 112,0$ т/ч $R_{90} = 29,2\%$. Указанная зависимость $R_{90} = f(G_2)$ является также характерной для данного типа сепараторов и используется наряду с изменением числа оборотов ротора сепаратора для регулирования тонкости помола готовой пыли.

В то же время следует отметить, что качество готовой пыли может существенно зависеть от состояния уплотнения (его герметичности) между поверхностью ротора и верхней неподвижной стенкой сепаратора.

На рисунке 3 приведены зависимости потребляемой мощности двигателя привода динамического сепаратора от частоты вращения его ротора. Зависимости потребляемой мощности двигателя сепаратора от величины его оборотов даны для двух производительностей по топливу $B = 27,6$ т/ч и

$B = 39,4$ т/ч при расходах отработанного сушильного агента соответственно 70,8 и 107 т/ч.

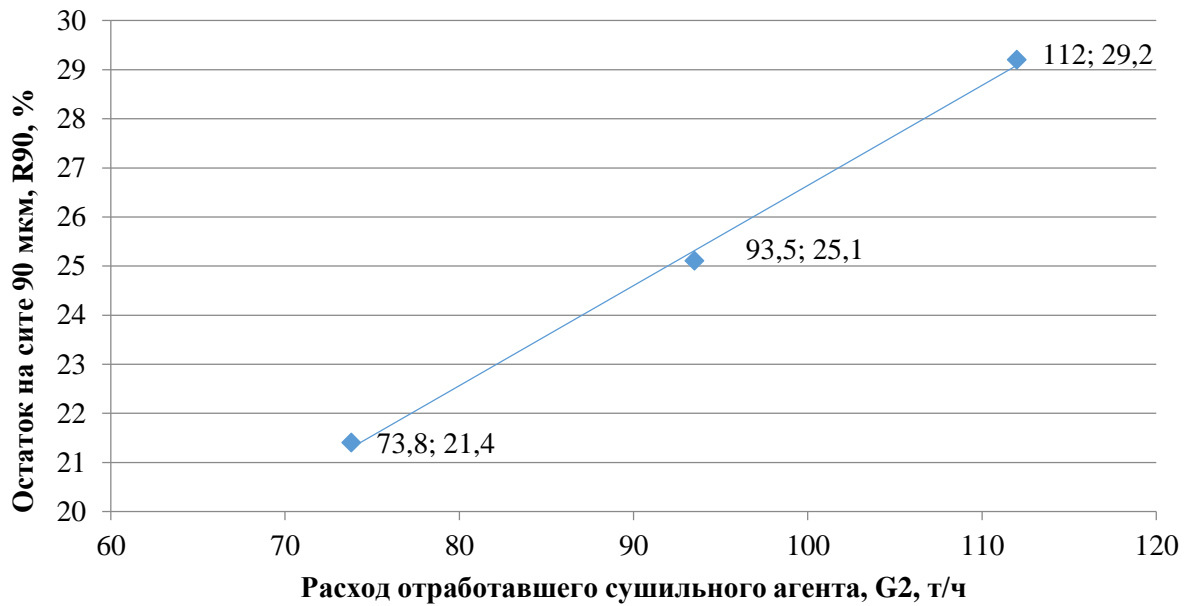


Рисунок 2 – Зависимость остатка на сите 90 мкм от расхода сушильного агента при скорости вращения ротора 80 об/мин

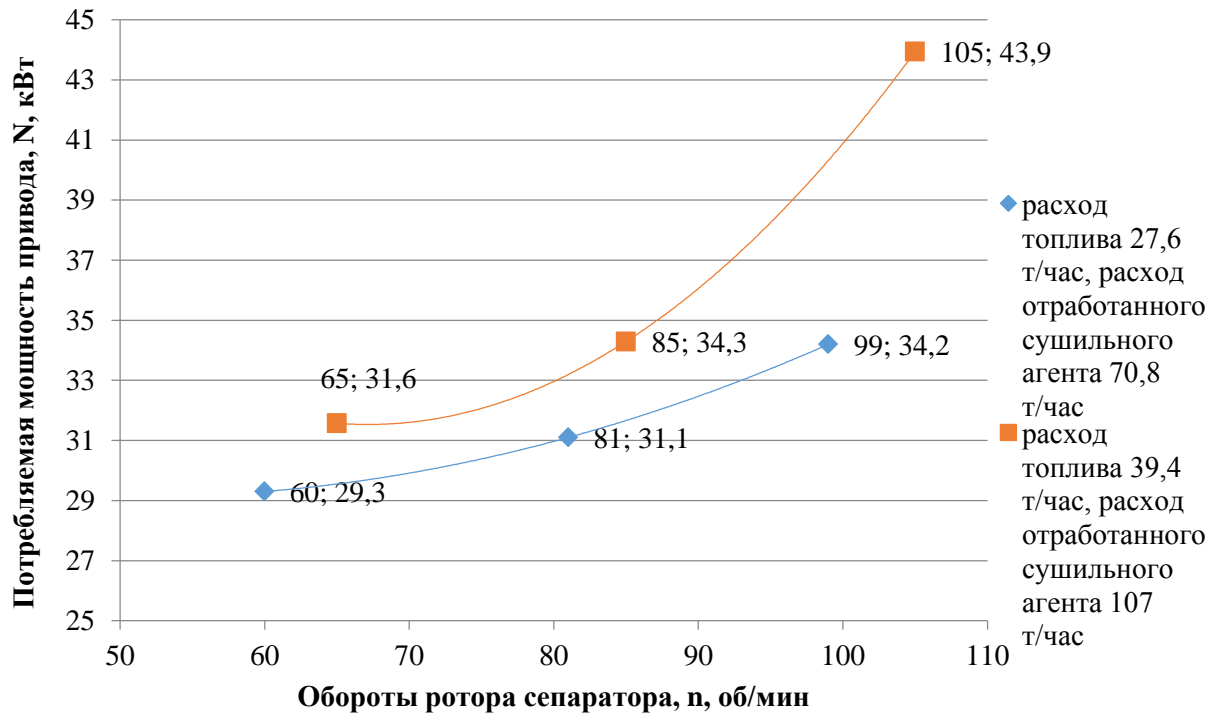


Рисунок 3 – Зависимость потребляемой мощности привода от частоты вращения ротора сепаратора

Как следует из рассмотрения указанных зависимостей мощность, потребляемая двигателем привода ротора сепаратора, с увеличением топливной производительности и расхода отработанного сушильного агента при одинаковых величинах оборотов ротора также возрастает, причём характер зависимости квадратичный, то есть, потребляемая мощность привода мельницы пропорциональна квадрату линейной скорости вращения лопаток ротора, которая, в свою очередь, определяется частотой вращения ротора. Так, при производительности 39,4 т/ч и расходе сушильного агента 107 т/ч, при изменении числа оборотов ротора с 65 до 105 об/мин, мощность двигателя увеличивается с 31,6 до 43,9 кВт. При производительности 27,6 т/ч и расходе сушильного агента 70,8 т/ч при повышении числа оборотов ротора с 60 до 99 об/мин, мощность возрастает с 29,3 до 34,2 кВт.

На рисунке 4 приведены кривые зависимостей удельного расхода электроэнергии двигателя привода сепаратора от частоты вращения его ротора.

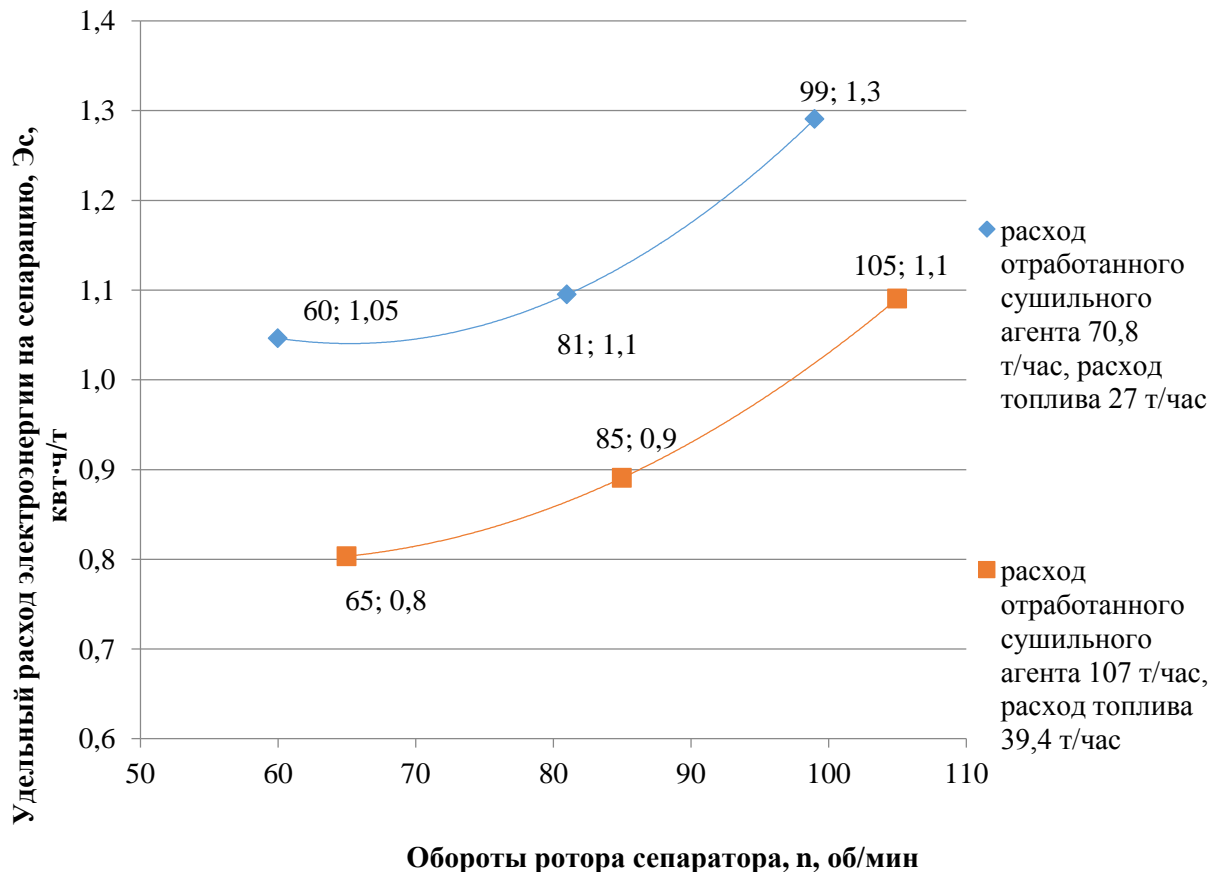


Рисунок 4 – Зависимость удельного расхода электроэнергии двигателя привода сепаратора от частоты вращения его ротора

Из указанного рисунка следует, что с ростом частоты вращения двигателя при постоянной производительности по топливу удельный расход электроэнергии привода сепаратора также возрастает. Так, при производительно-

сти $B = 27,6$ т/ч при изменении числа оборотов от 60 до 99 об/мин удельный расход электроэнергии возрастает от 1,05 до 1,3 кВт·ч/т, а при топливной производительности $B = 39,4$ т/ч и увеличении числа оборотов ротора с 65 до 105 об/мин удельный расход электроэнергии изменяется от 0,8 до 1,1 кВт·ч/т. То есть, при большей производительности по топливу $B = 39,4$ т/ч по сравнению с $B = 27,6$ т/ч удельный расход электроэнергии на тонну топлива снижается, что является характерным и для других типов мельниц.

На рисунке 5 приведена зависимость суммарного удельного расхода электроэнергии на размол и сепарацию для МПС-200 от оборотов ротора сепаратора.

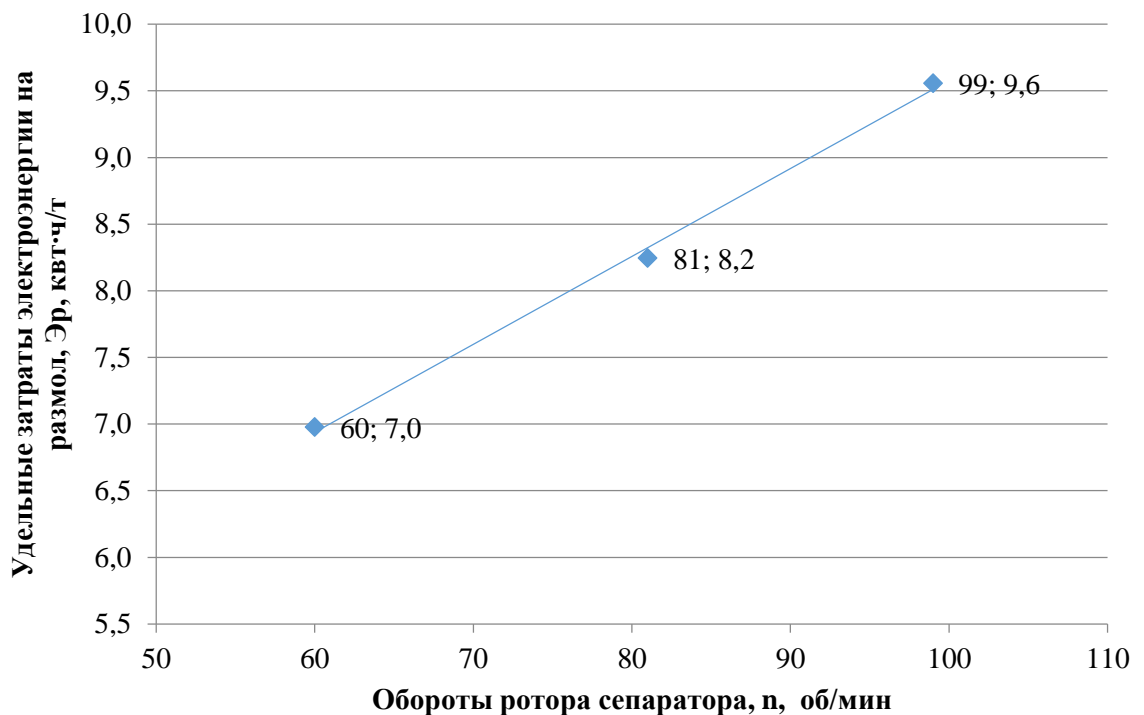


Рисунок 5 – Зависимость удельных затрат э/э на размол от частоты вращения ротора сепаратора, расход сушильного агента 70,8 т/ч, расход топлива 27,6 т/ч

Как следует из кривой рисунка 5 зависимости $\mathcal{E} = f(n)$, (где \mathcal{E} – удельный расход электроэнергии, а n – число оборотов ротора сепаратора), при изменении числа оборотов с 60 до 99 об/мин удельный расход электроэнергии увеличивается с 7,0 до 9,6 кВт·ч/т. Таким образом при пониженной производительности мельницы по топливу $B = 27,6$ т/ч с увеличением числа оборотов ротора сепаратора удельный расход электроэнергии на размол и сепарацию также возрастает, что объясняется тем, что с увеличением оборотов ротора возрастает объём возврата на мельницу, тем самым повышается кратность циркуляции топлива.

Аэродинамическое сопротивление СПП зависит как от производительности мельницы так и от скорости вращения ротора сепаратора. При повышении скорости вращения ротора сепаратора, растёт кратность циркуляции

мельницы, и, следовательно сопротивление СПП в целом. На рисунке 6 представлена зависимость аэродинамического сопротивления мельницы с сепаратором при различных производительностях по топливу и расходах отработанного сушильного агента.

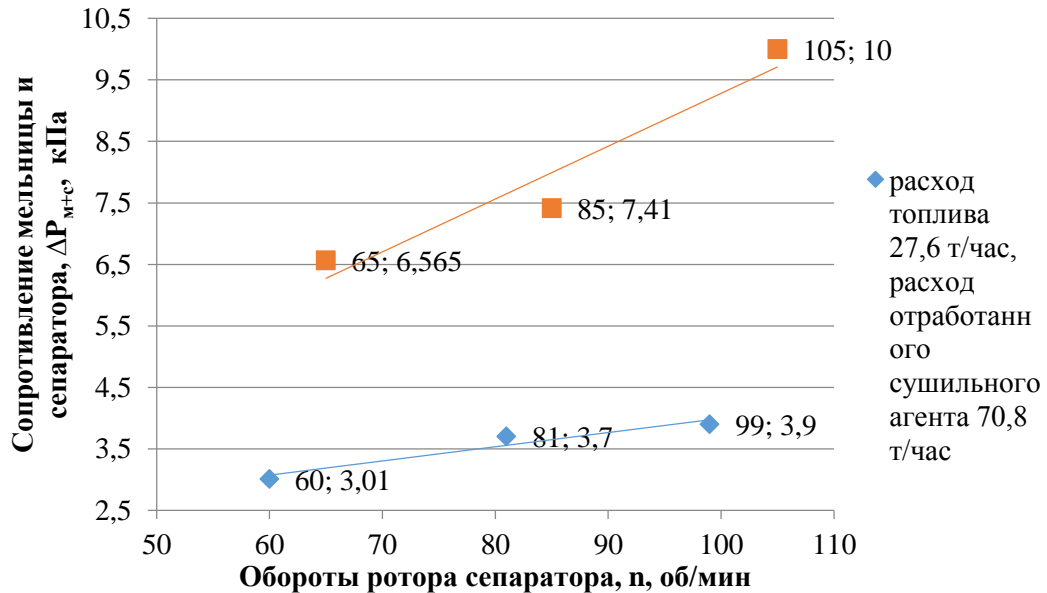


Рисунок 6 – Зависимость сопротивления мельницы и сепаратора от частоты вращения ротора сепаратора

Так, при повышенной производительности по топливу $B = 39,4$ т/ч и расхода отработанного сушильного агента $G_2 = 107$ т/ч с изменением оборотов ротора с 65 до 105 об/мин, измеренное суммарное аэродинамическое сопротивление мельницы и сепаратора возрастает от 6,56 кПа (656 мм вод.ст) до примерно 10 кПа (1000 мм вод.ст.). При пониженной величине производительности $B = 27,6$ т/ч и расходе отработавшего сушильного агента $G_2=70,8$ т/ч величина измеренного суммарного аэродинамического сопротивления мельницы и сепаратора уменьшается и составляет при изменении числа оборотов от 60 до 99 об/мин соответственно 3,01 кПа (301 мм вод. ст.) и 3,9 кПа (390 мм вод. ст.).

В результате проведенного экспериментального исследования были созданы базы экспериментальных данных описывающие процесс работы динамических сепараторов различных конструкций. Были изучены на основе экспериментальных данных основные зависимости работы динамических сепараторов, такие как влияния режимных параметров (расхода транспортирующей среды, скорости вращения динамической части сепаратора, тонина помола на входе в динамический сепаратор) на эффективность сепарации и затраты энергии на размол и транспортировку готовой пыли. Полученные данные позволяют производить валидацию и верификацию математических моделей сепараторов. Кроме того, учитывая исследования различных конструк-

ций сепараторов, как с точки зрения производительности, так и с точки зрения конструктивных особенностей, полученные данные позволяют произвести обобщение влияния различных конструктивных элементов на работу динамических сепараторов.

3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ПЫЛИ В ДИНАМИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ

В данной главе предложена математическая модель классификации пыли в динамическом сепараторе. При создании математической модели были приняты следующие предположения [53...57]:

- процессы сушки и измельчения топлива завершились в мельнице,
- конденсация водяных паров в сепараторе отсутствует,
- тепловыми потерями в окружающую среду от наружного охлаждения сепаратора, а также изменением температуры потока вследствие его диссипации можно пренебречь,
- турбулентная вязкость является изотропной скалярной величиной.

Для описания движения двухфазной смеси использовался подход Эйлера-Лагранжа, а именно, подход Эйлера для описания движения непрерывной (газ) фазы и Лагранжа для дискретной (частицы) фазы. Выбор данного метода обусловлен тем, что в исследуемых динамических сепараторах объёмная доля твёрдого материала в двухфазной смеси не превышает критического для данного модуля значения 10%, и, например, в сепараторе мельницы МВС-195 Черпетской ГРЭС составляет на входе не более 0,26% при кратности циркуляции топлива в контуре “мельница – сепаратор” равной 7.

Для описания течения газа использовались уравнения неразрывности (1), сохранения импульса (2) [41]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\nabla \bar{v} \cdot \rho) = S_m, \quad (1)$$

где ρ – плотность, v – скорость среды, S_m – источниковый член, ∇ – оператор набла.

$$\frac{\partial(\rho \cdot \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{v}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \cdot \bar{g} + \bar{F} \quad , \quad (2)$$

где p – статическое давление, $\rho \cdot \bar{g}$ – сила гравитации, \bar{F} – сторонние силы, $\bar{\tau}$ – тензор напряжений определяющийся по следующей формуле:

$$\bar{\tau} = \mu \cdot \left[(\nabla \cdot \bar{v} + \nabla \cdot \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \cdot \nabla \cdot \bar{v} I \right], \quad (3)$$

где μ – молекулярная вязкость, I – единичный тензор, второе слагаемое правой части уравнения – эффект объёмного расширения.

Для описания турбулентности использовалось осреднение указанных уравнений при помощи выражения:

$$v_i = \bar{v}_i + v_i', \quad (4)$$

где \bar{v}_i и v_i' – среднее значение скорости и её отклонение соответственно ($i = 1, 2, 3$).

Подставляя значение v_i в выражение (1) получается осреднённое по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса. Для его замыкания использовалась стандартная двухпараметрическая k - ε модель турбулентности.

Для описания движения твёрдых частиц использовалась модель дискретной фазы. Дискретная фаза задавалась полидисперсным ансамблем частиц, имитирующих частицы неправильной формы за счёт задания коэффициента формы частицы φ , определяемого по уравнению (4):

$$\varphi = \frac{s}{S}, \quad (4)$$

где s – площадь поверхности сферы, имеющей такой же объем, что и частица, S – фактическая площадь поверхности частицы. 4

Зерновая характеристика описывалась уравнением Розина – Раммлера, а полидисперсность материала определялась разбиением гранулометрической характеристики на сто равных по массе классов частиц. Для каждой частицы решались следующие уравнение движения:

$$\frac{d\bar{v}_p}{dt} = F_D \cdot (\bar{v} - \bar{v}_p) + \frac{\bar{g} \cdot (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \bar{F} \quad (5)$$

где v_p , ρ_p – скорость и плотность частицы, $F_D \cdot (\bar{v} - \bar{v}_p)$ – сила сопротивления на единицу массы, \bar{F} – дополнительное ускорение (отношение силы к единице массы) за счёт действия сторонних сил.

Так как конструкция сепаратора состоит из подвижных и неподвижных частей, для решения задачи в стационарной постановке, объём сепаратора разбивался на неподвижные и вращающиеся с постоянной угловой скоростью ω_r части (см. рисунок 7). Скорость среды может быть преобразована из неподвижной системы координат в подвижную при помощи следующего уравнения:

$$\bar{v}_r = \bar{v} - \bar{\omega} \cdot \bar{r}, \quad (6)$$

где \bar{r} – вектор соединяющий начало неподвижной и вращающейся систем координат, \bar{v}_r – относительная скорость, а \bar{v} – абсолютная скорость.

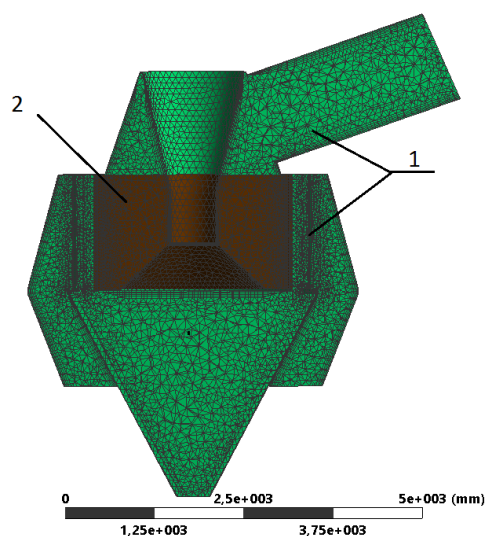


Рисунок 7 – Разделение модели сепаратора на вращающуюся и неподвижные части: 1 – неподвижные части; 2 – вращающаяся часть

В качестве граничных условий задавались: массовые расходы фаз – на входе и статическое давление потока – на выходе из сепаратора. Взаимодействие твёрдых частиц со стенкой учитывалось с помощью экспериментально определённых коэффициентов отскока, равных 0,2 – для нормального и 0,8 – для тангенциального [42, 47, 48].

Валидация математической модели с экспериментальными данными проводилась на основе опытных данных по трём объектам, описанным в главе 2. Для примера приведена валидация с опытными данными по Троцкой ГРЭС.

В период испытаний характеристики кузнечного каменного угля марки Д, поступавшего в мельницу, изменялись в следующих пределах: влажность 10 – 15%, зольность 13 – 16% и удельная теплота сгорания (низшая) 21,2 – 21,5 МДж/кг (5000 – 5200 ккал/кг).

Режимные показатели мельницы варьировались в следующих пределах: расход сырого топлива 7,77 – 13,8 кг/с (28 – 50 т/ч); температура сушильного агента после сепаратора 65 – 70°C и частота вращения ротора сепаратора 1 – 1,75 с⁻¹ (60 – 105 мин⁻¹). Тонина помола (по величине R₉₀) изменялась в пределах 12,5 – 33,8%. Поля скоростей при работе сепаратора на скорости 1,75 с⁻¹ (105 мин⁻¹) представлены на рисунке 8.

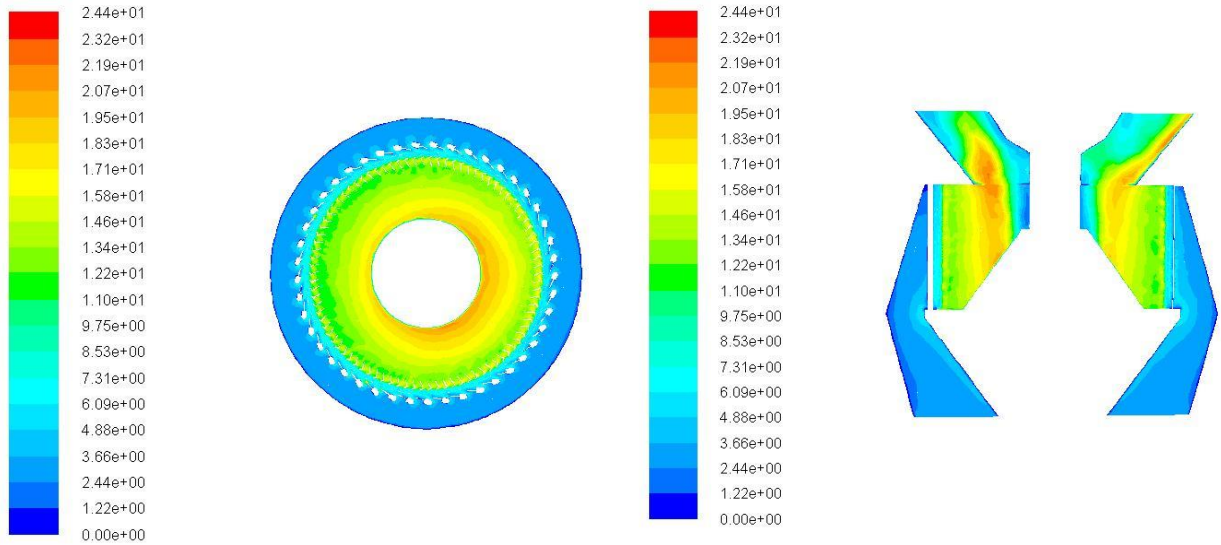


Рисунок 8 – Поля скоростей сепаратора *SLS-250* мельницы *MPC 200* Троицкой ГРЭС, при скорости вращения $2,93 \text{ с}^{-1}$ (176 мин^{-1})

Из рисунка 8 видно, что скорости газовой фазы в сепараторе нагнетаются за счёт вращения ротора, и увеличиваются по мере сужения сечения. Максимальная скорость при этом не превышает 25 м/с , что также совпадает с данными, полученными в результате физических испытаний сепаратора *SLS-250* Троицкой ГРЭС.

Гранулометрический состав угля задавался ($R_{90} = 50\%$ и $R_{1000} = 13\%$) и затем уточнялся в зависимости от доли возврата топлива в мельницу. Кажущаяся плотность топлива определялась по его составу и варьировалась в пределах $1730 - 1760 \text{ кг/м}^3$.

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными (см. табл. 2) проводилось по контрольной характеристике пыли на выходе из сепаратора (величине R_{90}) и показало удовлетворительное как качественное, так и количественное согласование расчета и опыта (см. рисунок 9). Расхождение расчета с опытом (от $-2,7$ до $+4,5\%$) находилось практически в пределах погрешности опытного определения величины R_{90} .

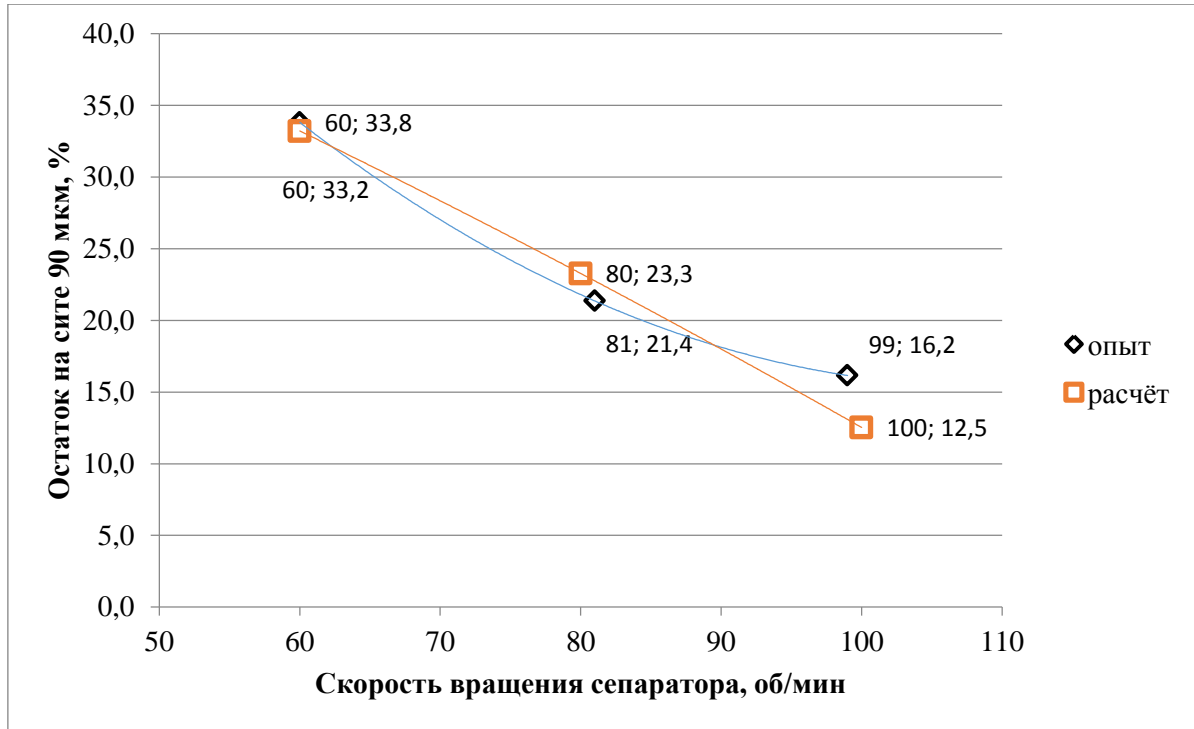


Рисунок 9 – Зависимость тонины готового продукта от скорости вращения ротора

Т а б л и ц а 2 – Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом

Режимные параметры (по данным эксперимента)			Характеристика пыли на выходе из сепаратора R_{90} , %		Расхождение расчётного и опытного значений величины R_{90} (абсолютное), %
Расход угля B_m , кг/с	Расход сушильного агента G_s , кг/с	Обороты ротора n_r , с ⁻¹	Эксперимент	Расчёт	
8,3	27,7	1	33,8	33,2	-0,6
8,3	27,7	1,33	21,4	23,3	+1,9
8,3	27,7	1,66	16,2	12,5	-3,7

4 РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

В данной главе автором работы было проведено исследование влияния различных элементов динамических сепараторов на эффективность их работы, с целью определения оптимальной конструкции, с точки зрения эффективности сепарации угольной пыли.

В ходе данной работы было исследовано влияние следующих элементов на эффективность сепарации:

- Формы ротора динамического сепаратора (а именно, влияние угла конусности ротора на эффективность сепарации);
- Количества и геометрических характеристик роторных лопаток;
- Зазора между статорными и роторными лопатками;
- Количества и геометрических характеристик статорных лопаток.

Объектом исследования послужил сепаратор к мельнице *XRP 803* Индийского завода *BHL*. Данная мельница выбрана как наиболее распространённая на Индийском рынке угольной генерации, который в настоящее время наиболее динамично развивается. Замена статических центробежных сепараторов на динамические с целью уменьшения потерь с механическим недожогом и снижения вредных выбросов в атмосферу – крайне распространена при модернизации угольных электростанций этой страны.

Сравнения производилось по качеству готовой пыли, полученной сепараторами с различными формами ротора. Эффективность сепарации оценивалась при помощи среднего вероятного отклонения от кривой разделения – χ_{ϕ} , определяемой по формуле:

$$\chi_{\phi} = \frac{\delta_{75}}{\delta_{25}}, \quad (7)$$

где δ_{75} и δ_{25} – размеры тонких фракций, выносимые в готовый продукт, соответственно на 75 и 25%.

Для примера приведено исследование влияния количества роторных лопаток на эффективность сепарации. В качестве граничных условий, были приняты следующие величины:

1. Расход сушильного агента на входе в мельницу 59 т/час.
2. Расход воздуха на уплотнениях мельницы 3 т/час.
3. Влажность сырого топлива 11...17%, влажность пыли 2...4% соответственно.
4. Температура отработанного сушильного агента на входе в сепаратор 85°C.

5. Расход топлива на входе в мельницу 36,5 т/час.

6. Тонина продуктов размола угля задавалась следующей: остаток на сите 90 мкм, $R_{90}=66\%$, а остаток на сите 1000 мкм, $R_{1000}=13\%$ (что соответствует коэффициенту полидисперсности, n , равному 0,6). Эта величина была выбрана исходя из многолетнего опыта испытаний среднеходных мельниц сотрудниками ОАО «НПО ЦКТИ», она также хорошо согласуется с данными, опубликованными в открытых источниках.

Полный массовый расход транспортирующего агента через сепаратор составил 18,4 кг/с (при плотности сушильного агента $\rho=1$ кг/м³, объёмный расход составил 18,4 м³/с).

Зависимость, полученная при исследовании влияния количества роторных лопаток на эффективность сепарации представлена на рисунке 10.

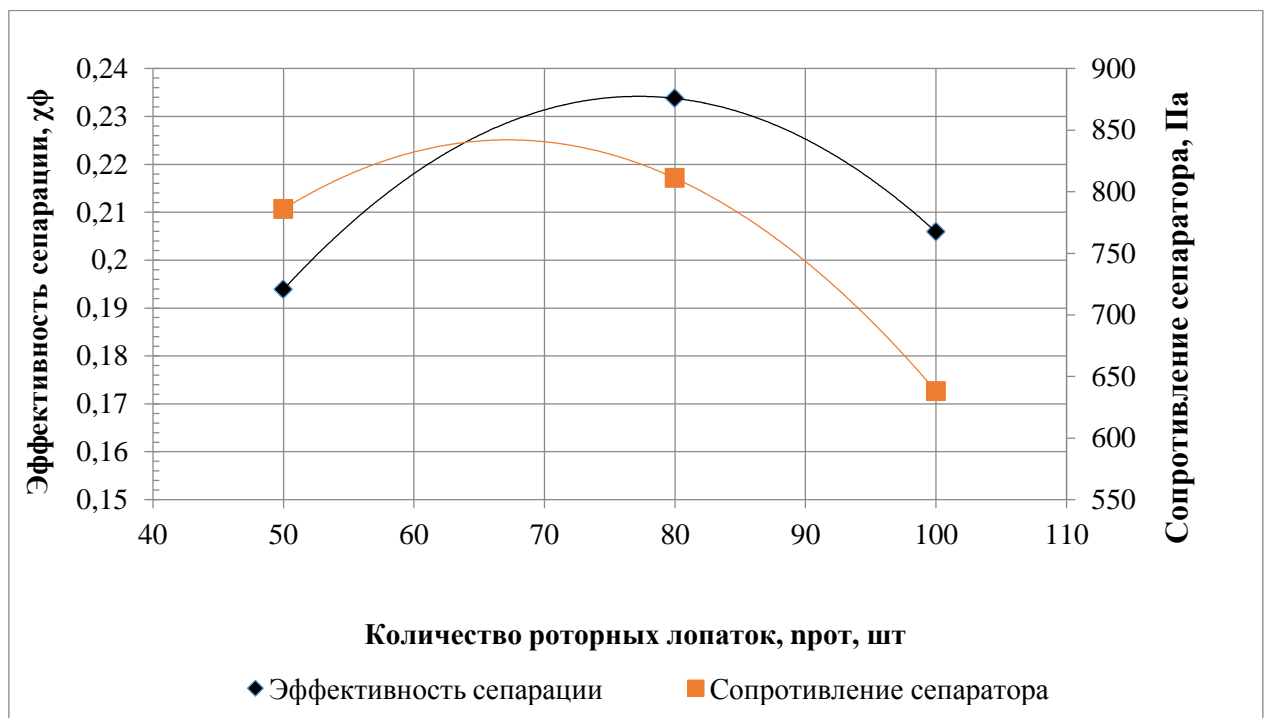


Рисунок 10 – Зависимость показателя эффективности сепарации от количества роторных лопаток

В результате математического моделирования, было определено, что при увеличении количества рабочих лопаток с 50 до 80, эффективность сепарации повышается с 0,194 до 0,233. Однако, при дальнейшем увеличении количества роторных лопаток до 100 штук, эффективность снижается до значения 0,206. Зависимость сопротивление сепаратора от количества роторных лопаток ведёт себя похожим образом: несколько повышается, при увеличении количества роторных лопаток с 50 до 80, а затем опять снижается, при увеличении количества лопаток до 100 штук.

Однако, средний диаметр частиц с увеличением количества лопаток снижается по линейной зависимости, что можно заметить из рисунка 11.

Кроме того, максимальный размер частиц в готовой пыли также снижается линейно (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Результаты исследования влияния количества роторных лопаток на эффективность сепарации

Наименование		Количество роторных лопаток, шт.:								
		50			80			100		
		Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.
Скорость потока, м/с	На входе в ротор	16,6	36,4	3,5	17,8	31,6	3,5	18,3	40,3	9,4
	В центре лопатки	19,9	40	4,5	20,4	31,9	10,5	19,73	33,17	5,4
Сопротивление сепаратора, Па		786			811			638		
Максимальный диаметр частиц в готовой пыли, мкм		330			243			191		
Эффективность сепарации, χ_{ϕ}		0,194			0,233			0,206		

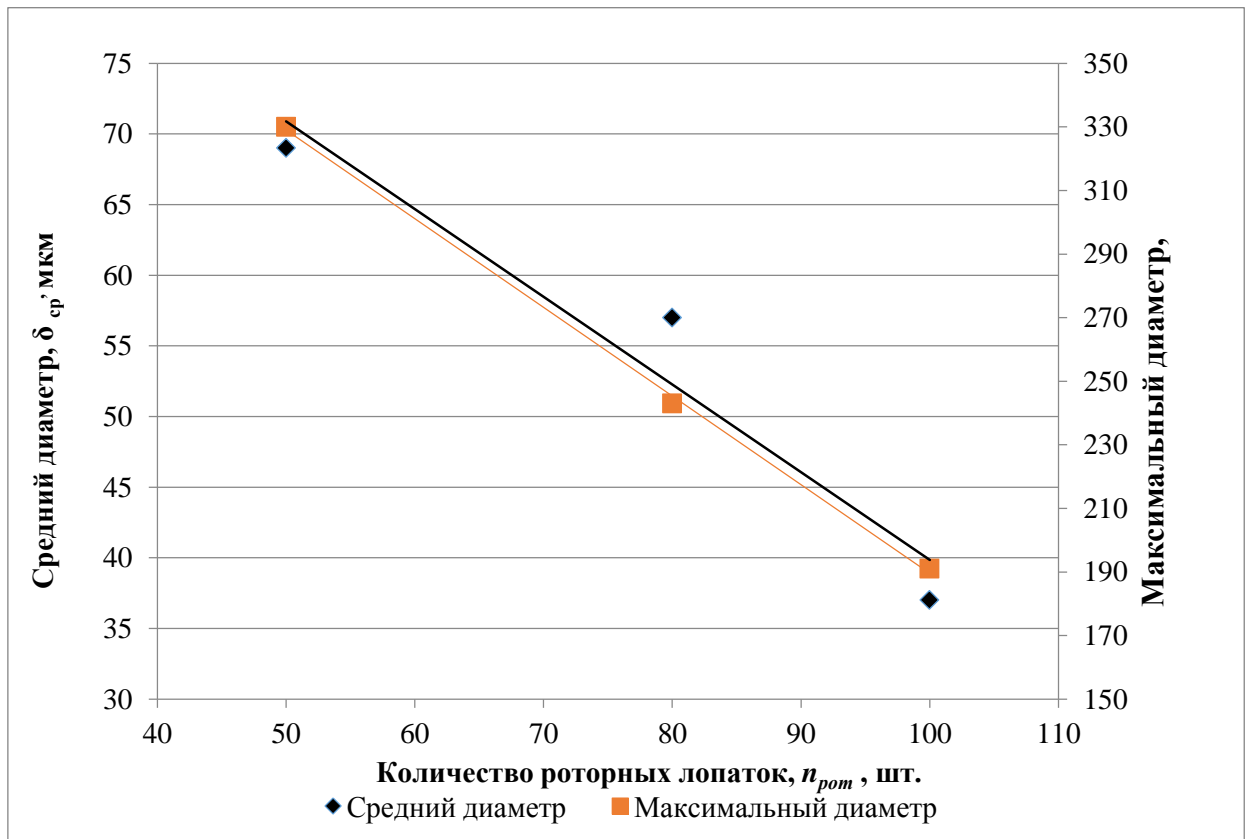


Рисунок 11 – Зависимость среднего и максимального диаметра готовой пыли от количества лопаток ротора

Снижение эффективности работы сепаратора при увеличении количества роторных лопаток свыше 80 штук можно объяснить переизмельчением готовой пыли. Переизмельчение достигается за счёт увеличения максимальной скорости на входе в ротор до 40 м/с. При этом, существуют области, в которых эта скорость составляет всего 10 м/с (см. рисунок 12). При этом часть тонких частиц, попадающих в зону с повышенными скоростями, выпадают из потока и уходят на домол, в то время как частицы, чей размер несколько превышает граничный, могут попадать в готовый продукт через зоны с пониженными скоростями. Таким образом, получается, что несмотря на то, что в целом граница разделения выше у сепаратора со 100 рабочими лопатками, эффективность разделения выше у сепаратора с 80 роторными лопатками.

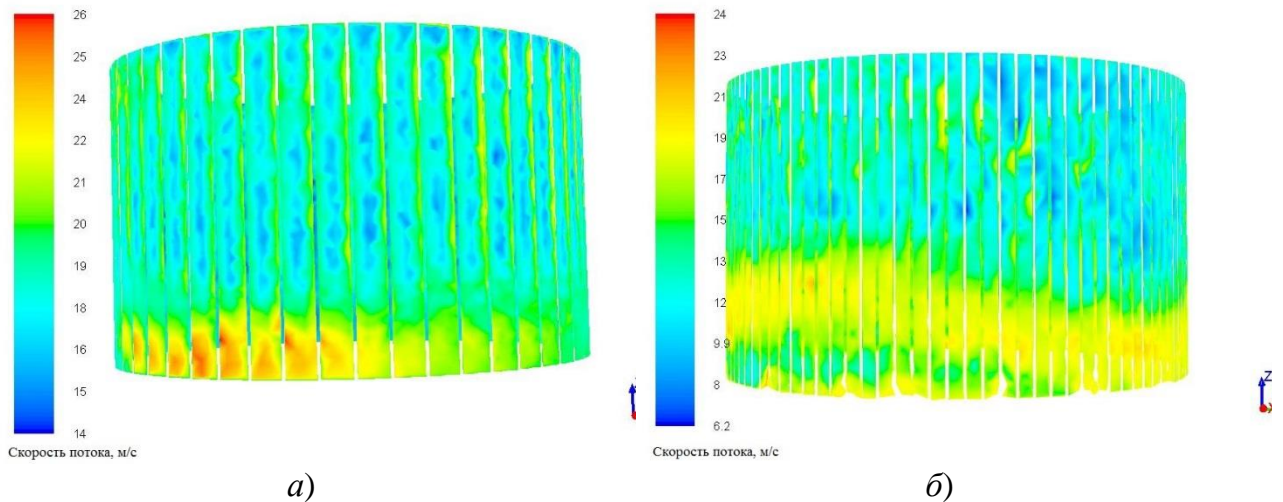


Рисунок 12 – Поля скоростей сепараторов с различным количеством роторных лопаток: *а* – 50 лопаток, *б* – 100 лопаток

Методика расчёта динамических сепараторов. На основе исследований, автором была предложена методика расчёта динамического сепаратора. Предложенная методика позволяет на основе технического задания выбрать основные технические узлы динамического сепаратора, такие как количество роторных и статорных лопаток, их геометрическая форма, а также габаритные размеры сепаратора.

Пусть коэффициент стеснения ротора, $k_{ст}^p$, определяется как отношение разницы площади бокового сечения ротора и площади занимаемой лопатками ротора в боковом сечении к площади бокового сечения. Тогда живое сечение площади боковой поверхности для цилиндрической формы ротора определяется формулой:

$$S_{бок}^p = k_{ст}^p \cdot \pi \cdot D_p \cdot h_p \quad (8)$$

Исходя из условия жесткости, для роторов динамических сепараторов $h_p/D_p = 0,5 \dots 0,6$, тогда живое сечение ротора составляет:

$$S_{бок}^p = k_{ст}^p \cdot \pi \cdot D_p \cdot h_p = k_{ст}^p \cdot \pi \cdot D_p \cdot 0,55 \cdot D_p = 1,727 \cdot k_{ст}^p \cdot D_p^2 \quad (9)$$

С другой стороны:

$$S_{бок}^p = \frac{V}{W_r}, \quad (10)$$

где V – объёмный расход сушильного агента, м³/с W_r – радиальная скорость сушильного агента на входе в ротор, м/с.

Из выражений (9) и (10) следует:

$$D_p = \sqrt{\frac{V}{W_r \cdot 1,727 \cdot k_{ст}^p}} \quad (11)$$

Экономически целесообразно изготавливать лопатки ротора из стали толщиной 8 – 12 мм. При этом, в среднем коэффициент стеснения ротора можно принять равным 0,96 ($k_{ст}^p = 0,96$), тогда

$$D_p = \sqrt{\frac{V}{W_r \cdot 1,66}} \quad (12)$$

Шаг лопаток определяется по формуле:

$$t = \frac{\pi D_p}{z} \quad (13)$$

где z – число лопаток, шт.

Безразмерный шаг определяется как отношение шага лопаток t к длине лопаток l_r .

$$\bar{t} = \frac{t}{l_r} \quad (14)$$

Длину роторных лопаток следует выбирать из рисунка 13, на котором представлена зависимость длины лопатки ротора от его диаметра, точки на графике соответствуют трём исследованным в данной работе сепараторам: сепаратору *SLS250*, сепаратору *RAR-LVT* фирмы *FLSmidth* и сепаратору, исследованному в параграфе 4.2 диссертации [59, 61, 62, 63].

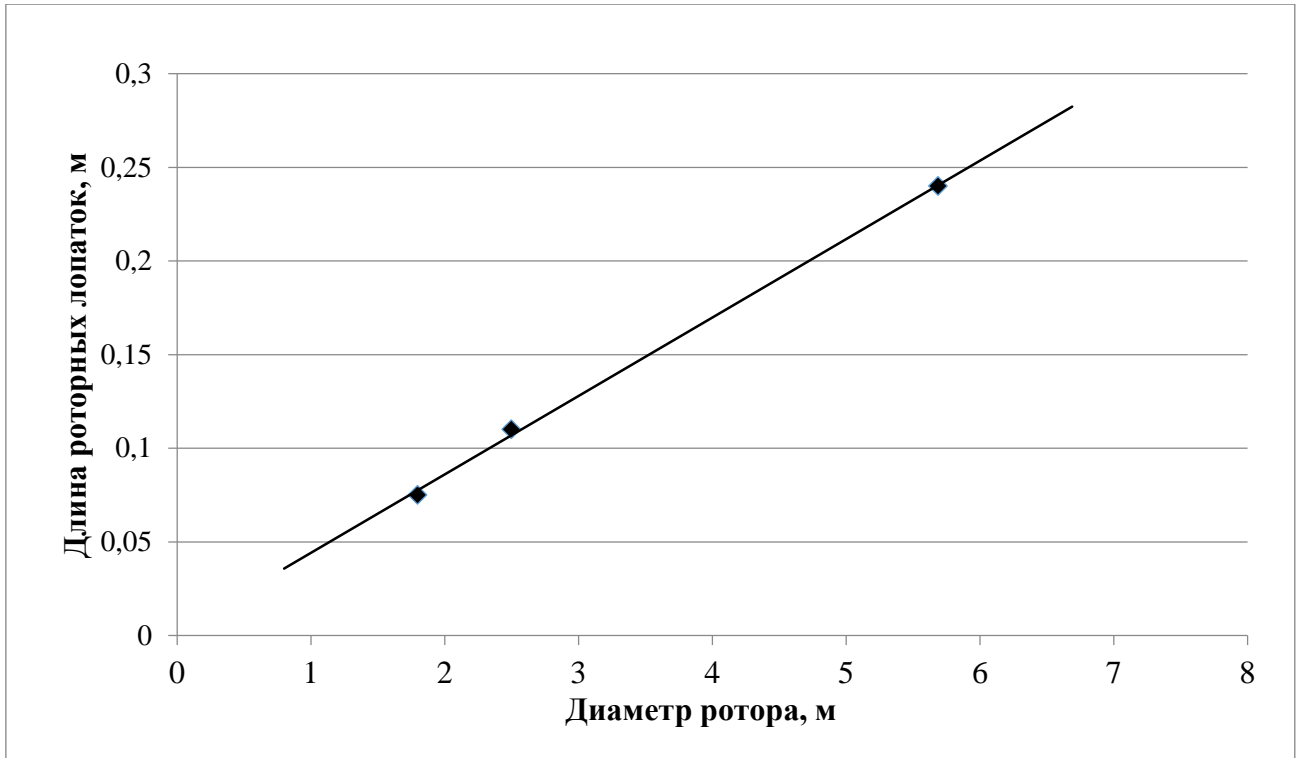


Рисунок 13 – Зависимость длины роторных лопаток от диаметра ротора

Безразмерный шаг лопаток ротора следует принимать из интервала $[0,7-1,3]$, так как в этом интервале, согласно результатам математического моделирования, эффективность сепарации оказалась максимальной.

Зная длину и относительный шаг, из формулы (14) можно найти шаг лопаток ротора:

$$t = \bar{t} \cdot l \quad (15)$$

Количество лопаток ротора определяется из шага лопаток ротора и длины окружности на входе:

$$Z_p = \frac{\pi D_p}{t} \quad (16)$$

Максимальные обороты ротора для угольных сепараторов выбираются из расчёта, чтобы окружная скорость равнялась 20 м/с, такая верхняя граница обусловлена интенсивностью эрозионного износа, пропорционального скорости потока, возведённого в степень 3,3. С другой стороны, нижний предел окружной скорости ограничен габаритами сепаратора, так как, при неизменной центробежной силе, габариты ротора динамического сепаратора обратно пропорциональны квадрату окружной скорости.

$$u = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n}{60} \quad (17)$$

где n – число оборотов ротора, об/мин.

Как показало исследование, лопатка может быть выполнена как полностью прямой, так и в виде уголка, ближняя к центру ротора часть которого стоит радиально, а наружная наклонена под углом от 30 до 45 градусов против хода вращения ротора. Отношение радиальной части лопатки к её полной длине равняется 0,4, а изогнутой 0,6. Изогнутая лопатка предпочтительней сточки зрения обеспечения жесткости конструкции ротора. Однако, в данной работе влияние формы роторной лопатки не до конца изучено. Исследование и оптимизация конструкции роторной лопатки являются перспективными.

Длина лопаток статора l_c принимается из интервала от 60 до 300 мм, причём для ротора $\varnothing=2,8$ м, $l_c=0,175$ м, а для ротора $\varnothing=5,3$ м $l_c=0,24$ м.

Зазор δ , между ротором и статором принимается исходя из диаметра ротора по рисунку 14.

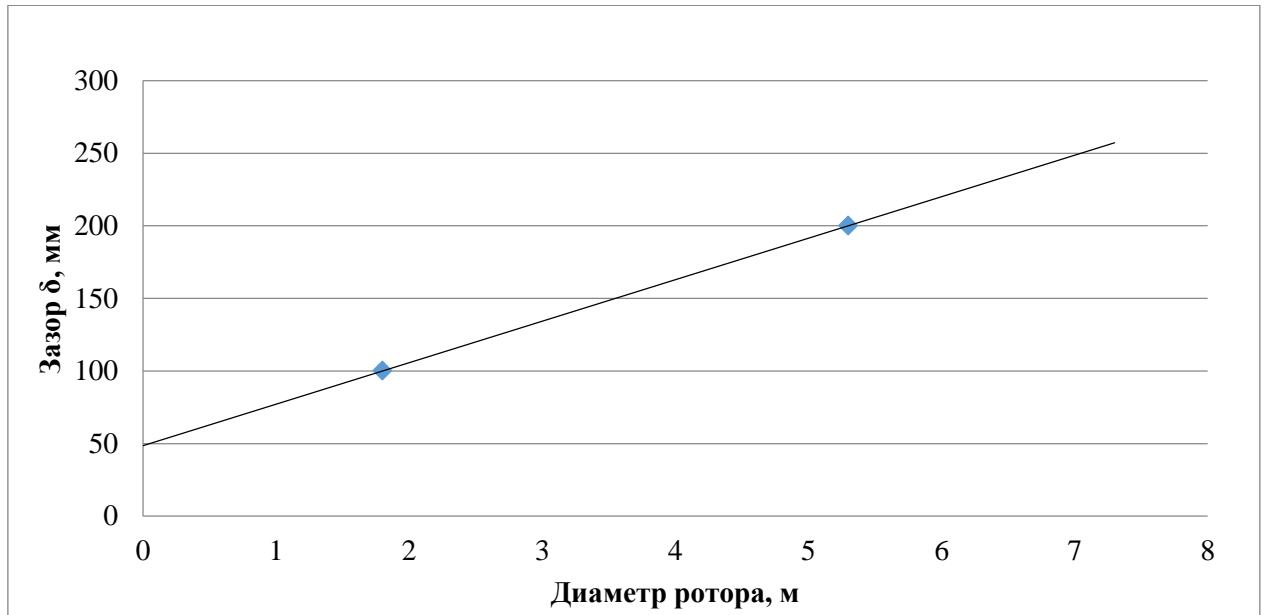


Рисунок 14 – Зависимость зазора между статором и ротором от диаметра ротора

Внутренний диаметр статора определяется как:

$$D_c^{BH} = D_p + 2 \cdot \delta \quad (18)$$

В результате численного исследования (см. параграф 4.2 диссертации), был определён рекомендуемый угол наклона статорных лопаток α_c , который должен лежать в диапазоне от 40 до 70° (на сепараторе *SLS250* мельницы *MPS200* Троицкой ГРЭС он равняется 70°).

Радиальная ширина статора Δ_c , м (расстояние между внутренним и наружным диаметром) определяется по формуле:

$$\Delta_c = L_c \cdot \cos(\alpha) - \frac{D_c^{BH}}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_c^{BH}}{2}\right)^2 - L^2 \cdot \sin^2(\alpha)} \quad (19)$$

Тогда наружный диаметр статора считается как:

$$D_c = D_c^{BH} + 2 \cdot \Delta_c \quad (20)$$

Количество лопаток статора, z_s , определяется из условия перекрытия боковой поверхности, то есть совокупная длина всех лопаток ротора должна быть равной длине окружности на наружном диаметре статора:

$$z_c = \frac{\pi D_c}{L} \quad (21)$$

В результате обобщения экспериментальных данных работы динамических сепараторов, была определена эмпирическая формула для определения потребляемой мощности двигателя сепаратора, N , кВт:

$$N = 0,0554 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^3 \cdot \frac{V}{\rho} \cdot D_p^2 + 27 \quad (22)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы было достигнуто следующее.

1. Мировой опыт развития пылеприготовительной техники на электростанциях показал, что применение динамических сепараторов на системах пылеприготовления прямого вдувания с валковыми среднеходными мельницами позволяет снизить затраты электроэнергии на размол топлива, изменять тонины помола готовой пыли в широких пределах, при этом обеспечивая однородный фракционный состав готовой пыли (коэффициент полидисперсности пыли, n , при использовании динамических сепараторов ≥ 1). Для исследования влияния отдельных конструктивных элементов на процессы, протекающие в динамических сепараторах, при создании их новых конструкций, целесообразно использовать вычислительный эксперимент.

2. На основе испытаний промышленных образцов динамических сепараторов, а также обобщения и анализа экспериментальных исследований, была создана база данных, пригодных для верификации и валидации программных продуктов.

3. На основе коммерческого *CFD* пакета *ANSYS Fluent* разработан и верифицирован на экспериментальных данных методический комплекс для расчётных исследований динамического сепаратора. Валидация расчётной модели с результатами испытаний промышленных образцов динамических сепараторов показала, что расчётные модели адекватно описывают физику процессов в сепараторе, расхождение в экспериментальных и расчётных данных не превысило 10% в части определения тонины готового продукта.

4. Вычислительный эксперимент на натурном образце динамического сепаратора мельницы *XRP803* позволил определить влияние таких конструктивных элементов как форма ротора динамического сепаратора (а именно, влияние угла конусности ротора на эффективность сепарации); количества и геометрических характеристик роторных лопаток; зазора между статорными и роторными лопатками; количества и геометрических характеристик статорных лопаток на эффективность разделения порошкообразного вещества в сепараторе.

5. На основе данных полученных в вычислительном эксперименте, а также обобщения данных исследования работы промышленных образцов динамических сепараторов была создана методика расчёта динамических сепараторов, позволяющая выбрать основные конструктивные элементы для вновь создаваемых сепараторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ромадин В.П. Пылеприготовление. М. Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 519 с.
2. Лебедев А.Н. Подготовка и размол топлива на электростанциях, М., изд-во «Энергия». – 1969.
3. Ушаков С.Г., Зверев Н. И. Инерционная сепарация пыли. М., «Энергия», 1974. – 168 с. с ил.
4. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. – 160 с.
5. Барский М.Д. Фракционирование порошков. – М., Недра, 1980. – 327 с.
6. Зах Р. Г. Пылевидное топливо в котельных установках, Ленинград., «Красный Печатник», 1938. – 237 с.
7. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочных устройств. Под ред. Д.М. Хзмаляна. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. Заведений. М., «Энергия», 1976. – 488 с. с ил.
8. Нормы расчета и проектирования пылеприготовительных установок. М-Л.: Госэнергоиздат, 1958, 159 с.
9. Волков П.М. Моделирование запыленных потоков и его практическое применение. Теория подобия и моделирования. М.: Изд. АН СССР, 1987. – 256 с.
10. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) Под ред. В.В. Бушуева (ИЭС), В.А. Каламанова (МЦУЭР). – М.: ИД «Энергия», 2011. – 360 с.
11. Е.М. Казарновский, В.П. Меньщиков. Работа среднеходной фрикционно-шаровой мельницы Е-47 на т кварчельском угле// Котлотурбостроение, 1948, №6, с. 17-23.
12. Андреев А.А. Разделение угольной пыли в динамическом сепараторе с предвключенным направляющим аппаратом : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 Иваново, 2006. – 124 с.
13. Шаратов Р.Р. Совершенствование процесса разделения в воздушном центробежном сепараторе: дис. ... канд. техн. наук : 05.04.2017/ Белгородский Государственный Технологический университет Им. В.Г. Шухова Белгород, 2016. – 158 с.
14. Тугов А.Н. Проведение работ по режимной наладке блоков №8 и 9 Черепетской ГРЭС. Технический отчёт – Москва; ВТИ, 2015.
15. Шэфер, Х.-У. Перевод двух мельниц из открытого в замкнутый цикл на ОАО «Мордовцемент» [Текст] / Х.-У. Шэфер // Цемент и его применение. 2009. № 5. – С. 68–71.
16. Карзунке, У. Замена устаревшего сепаратора [Текст] / У. Карзунке, Н. Щетинин // Цемент и его применение. – 2012. – № 2. – С.48–50.
17. Арутюнян, К.Л. Модернизация цементных мельниц и их оснащение высокоэффективными сепараторами фирмы Pfeiffer [Текст] / К. Л. Арутюнян, Э. Пильмайер // Цемент и его применение. –2004. – № 2. – С.18–20.

18. Шмельцер, Г. Увеличение объемов производства при сухом размоле материалов на баритовой шахте Вольфах [Текст] / Г. Шмельцер, Й. Райхард // Цемент и его применение. – 2004. – № 5. – С. 42–45.
19. Фрайхаммер, Д. Классификация в новых измерениях [Текст] / Д. Фрайхаммер // Цемент и его применение. – 2012. – № 5. – С. 64–65.
20. Потье, Л. Оптимизация помола с использованием сепаратора TSV [Текст]/ Л. Потье, Ф. Ньель // Цемент и его применение. – 2009. – № 3. – С. 46–48.
21. Усманова Р.Р. Моделирование закрученных турбулентных потоков при оптимизации процесса разделения дисперсных систем/ Р.Р. Усманова, Г.Е. Заиков, Р.Я. Дебердеев// Вестник Казанского технологического университета. –2014.– №4 Том 17. – С. 124–129.
22. Нехаев Е.В. Мировая электроэнергетика: что дальше? = *Global energy sector: what's next?*/ Е.В. Нехаев (Мировой Энергетический Совет, Московское представительство)// Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла [Текст]: сб. докл. III Международной науч-но-технической конференции / под общ. ред. канд. техн. наук Г.А. Рябова. – М.: ОАО «ВТИ», 2016. – 332 с.
23. Von F. Sgaslik. Neue Erkenntnisse zur Sichtergestaltung // Zement-Kalk-ips. – V.38. 1. (1985). – S. 22–27.
24. Walter, H. Duda. Cement – Data – Book. – 1985. Vol. 1. – 617 p.
25. Nagel R. Klassifizierung der Windsichter Staub - Reinhalt- Luft, 1968. -Bd.28, N 6.
26. Onuma, E. O-SEPA a new high-performance air-classifier / E. Onuma, T. Furukawa // World Cement. 10. (1982), pp. 13–24.
27. Bernard H. Schonbach Hight efficiency separators in roller mills/ Bernard H. Schonbach// World Cement. 1988
28. Duhamel, Ph. The current state of development of the TVS high-efficiency dynamic classifier / Duhamel, Ph, A. Cordonnier, D. Lemaire // Zement Kalk Gips International. 555.— Vol. 50. 10. (1997), – pp. 540
29. Канаев А.А. Пуск, наладка и испытание головного образца среднеходной мельницы ВСМ-1250/950 на ТЭЦ №17 Ленэнерго. Технический отчёт №3029/0-2854 – Ленинград: ЦКТИ 1959.
30. Канаев А.А. Тонкий размол угля в среднеходной роликовой мельнице системы ЦКТИ. Технический отчёт №3529/0-1499 – Ленинград: ЦКТИ 1952.
31. Тугов А.Н. Проведение работ по режимной наладке блоков № 8 и № 9 Черепетской ГРЭС: Технический отчёт. – М.: ВТИ, 2015. – 62 с.
32. Штегман А.В. Успешный опыт освоения технологии трехступенчатого сжигания с ребёрнинговой мельницей на примере котла ТПЕ-223 Черепетской ГРЭС / А.В. Штегман, Д.В. Сосин, С.С. Мелкумян, Е.А. Фоменко, И.А. Рыжий // Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла [Текст]: сб. докл. III Международной научно-технической конференции / под общ. ред. канд. техн. наук Г.А. Рябова. – М.: ОАО «ВТИ», 2016. – С. 132–141.
33. Штегман, А. В. Получение тонкой пыли с помощью мельницы с динамическим сепаратором [Текст] / А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Д. В. Сосин, Е. А. Фоменко // Электрические станции. –2017. – № 8. – С. 29 – 35.

34. Пуск, наладка и испытание головного образца среднеходной мельницы ВСМ-1250/950 на ТЭЦ № 17 Ленэнерго / Отчет ЦКТИ; Рук. Климов И.И., Зубова Н.Д.; Работа № 3029/0-2854. – Л.: ЦКТИ, 1959. – 49 с.
35. Создание воздушно-проходных сепараторов для среднеходных мельниц / Отчет ЦКТИ; Рук. Климов И.И., Лузин П.М.; Работа № 3221/0-3159. – Л.: ЦКТИ, 1961.
36. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
37. Левит Г.Т. Испытание пылеприготовительных установок. М.: Энергия, 1977. – 185 с.
38. Типовая методика натуральных испытаний по определению срока службы мелющих органов вентилируемых углеразмольных мельниц (шаровых барабанных, молотковых среднеходных мельниц и мельниц-вентиляторов): СО 34.24.303-98 (РД 153-34.1-24.303-98) / Утв. Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 20.05.98; Разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»; Срок действ. установлен с 01.05.00. – М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 36 с.
39. Типовая инструкция по эксплуатации индивидуальных систем пылеприготовления прямого вдувания со среднеходными мельницами типа МВС: СО 34.24.503-96 (РД 34.24.503-96) / Утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 02.10.96; Разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»; Срок действ. установлен с 01.03.98. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 77 с.
40. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник [Текст] / В. В. Богомоллов, Н. В. Артемьева, А. Н. Алехнович, Н. В. Новицкий, Н. А. Тимофеева. – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.
41. Ansys Fluent User's Guide.
42. Пономарев, В. С. Экспериментальные исследования параметров удара угольных частиц о стенку [Текст] / В. С. Пономарев, А. П. Парамонов // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 41 – 42.
43. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник [Текст] / В. В. Богомоллов, Н. В. Артемьева, А. Н. Алехнович, Н. В. Новицкий, Н. А. Тимофеева. – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.
44. Клепиков Н.С. Участие в разработке проекта стендовой среднеходной мельницы и типажного ряда среднеходных мельниц типа «МВС». Отчёт ЦКТИ. Санкт-Петербург 2010. Клепиков Н.С. и др.
45. Дорогокупец Алексей Сергеевич, Францкевич Виталий Станиславович Влияние технологических параметров динамического сепаратора среднеходной мельницы на энергозатраты // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2014. №3 (167).
46. Schaefer, H.-U., LOESCHE mills for grinding of clinker and slag and for the production of cements with interground additives. Cement-Lime-Gypsum 1, 2001.
47. Клепиков, Н.С. Разработка пылеприготовительного оборудования для отечественной и зарубежной энергетики / Н.С. Клепиков, Н.И. Григорьева, П.М. Лузин, Д.С. Каблучков, А.В. Куликов, А.Г. Недре, Д.А. Титов, И.А. Макаров, Л.В. Туманова, К.А. Шаромыгин // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 3. – С. 243–248. DOI: 10.24223/1999-5555-2017-3-10-243-248

48. Титов, Д.А. Исследование работы динамического сепаратора пыли на основе численного моделирования / Д.А. Титов, К.А. Григорьев, Н.С. Клепиков, А.П. Парамонов, А.В. Штегман // Электрические станции. 2018. № 3 (1040). – С. 17–21.– Пер. ст.: Titov, D. A., Numerical Modeling Study of the Operation of a Dynamic Dust Separator / D. A. Titov, K. A. Grigor'ev, N. S. Klepikov, A. P. Paramonov, and A. V. Shtegman // Power Technology and Engineering, Vol. 52, No. 3, September, 2018, pp. 314–318. DOI: 10.1007/s10749-018-0951-z.
49. Пат. на пол. модель 173063 Российская Федерация, МПК В 07 В 7/00 (2006.01). Инерционный сепаратор / Н.С. Клепиков, Д.А. Титов, В.В. Генкель. – № 2017119103; заявл. 31.05.2017; опубл. 08.08.2017, Бюл. № 22. – 6 с.
50. Пат. 2704923 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/00, F 23 K 1/00 (2006.01). Горелочное устройство (варианты) / Н.С. Клепиков, С.И. Коломенский, Н.С. Шестаков, Д.А. Титов, Г.Н. Хрусталёв. – № 2018143451; заявл. 07.12.2018; опубл. 31.10.2019, Бюл. № 31. – 11 с.
51. Пат. на пол. модель 193688 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/00 (2006.01). Горелочное устройство / Н.С. Клепиков, Н.С. Шестаков, Д.А. Титов, А.И. Корябкин. – № 2019117577; заявл. 10.05.2018; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 32. – 6 с.
52. Финкер, Ф.З. Опыт модернизации котлов ПТВП-100 ТС-1 в г. Сатпаев (РК) с переводом на ВИР-технологии сжигания каменных углей без подогрева воздуха / Ф.З. Финкер, В.М. Кацман, В.Е. Разумов, Д.А. Титов // Юбилейная Международная научно-техническая конференция «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (Москва, 27–28 октября 2016 г.) : Материалы конф. / под общ. ред. канд. техн. наук С.В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2016. – С. 127–133.
53. Титов, Д.А. Исследование работы динамического сепаратора пыли на основе численного моделирования / Д.А. Титов, Н.С. Клепиков, А.П. Парамонов, К.А. Григорьев // Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике» (Москва, 9–11 октября 2017 г.) : Т. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 131.
54. Григорьев, К.А. Исследование работы динамического сепаратора пыли на основе численного моделирования / К.А. Григорьев, Д.А. Титов, Н.С. Клепиков, А.П. Парамонов, А.В. Штегман // Перспективы развития новых технологий в энергетике России : материалы II Международной научно-технической конференции (Москва, 26–27 октября 2017 г.) / под общ. ред. С.В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – С. 104–110.
55. Титов, Д.А. Численное моделирование динамического сепаратора пыли на основе программного продукта ANSYS-FLUENT / Д.А. Титов, К.А. Григорьев, В.Г. Урванцев // Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 г.). Институт энергетике и транспортных систем. Ч. 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 66–69.
56. Титов, Д.А. Численное исследование динамического сепаратора пыли / Д.А. Титов, К.А. Григорьев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать четвертая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (15–16 марта 2018 г., Москва): Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2018. – С. 857.

57. Титов, Д.А. Компьютерное моделирование сепараторов пыли / Д.А. Титов, К.А. Григорьев // Современные тенденции котлостроения : материалы II международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых (г. Барнаул, 22 марта 2018 г.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. – С. 162–170.
58. Бреус, В.И. Разработка конструкции инерционного сепаратора к мельнице МВ 3850/1150/460 для ТЭЦ Костолац (Сербия) на основе численного моделирования / В.И. Бреус, Д.А. Титов, Н.С. Клепиков, А.Э. Лейкам, Н.С. Шестаков, Д.С. Каблучков, Н.И. Григорьева, А.Г. Недре // Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла : сб. докл. IV Международной научно-технической конференции (Москва, 2–3 октября 2018 г.) / под общ. ред. Г.А. Рябова. – М.: ОАО «ВТИ», 2018. – С. 130–135.
59. Титов, Д.А. Исследование работы динамического сепаратора пыли на основе численного моделирования / Д.А. Титов, К.А. Григорьев, П.М. Лузин // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов X Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 6–9 ноября 2018 г. – Новосибирск: Срочная полиграфия, 2018. – С. 121.
60. Титов, Д.А. Обоснование модернизации инерционного сепаратора на основе численного моделирования / Д.А. Титов, К.А. Григорьев // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 г.). Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 75–77.
61. Титов, Д.А. Численное моделирование сепараторов для систем пылеприготовления / Д.А. Титов, К.А. Григорьев, П.М. Лузин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2018. – С. 448–451.
62. Титов, Д.А. Обоснование конструкции динамического сепаратора на основе численного моделирования / Д.А. Титов, К.А. Григорьев // Теплоэнергетика. “Энергия-2019”. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 2–4 апреля 2019 г. : материалы конференции: В 6 т. Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – С. 11.
63. Титов, Д.А. Исследование динамического сепаратора на основе численного моделирования / Д.А. Титов, К.А. Григорьев // Теплоэнергетика. “Энергия-2020”. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 7–10 апреля 2020 г. : материалы конференции: В 6 т. Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2020. – С. 19.