

Восточно-Казахстанский государственный технический университет  
им. Д. Серикбаева

УДК 681.5

На правах рукописи

**АЗАМАТОВ БАГДАТ НУРЛАНОВИЧ**

**Автоматизированная система очистки газов с использованием  
пористых проницаемых СВС материалов**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:

д.т.н., профессор, академик  
КазНАЕН Квасов А.И.

д.т.н., профессор  
Маркин В.Б.

Республика Казахстан  
Усть-Каменогорск, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТИПИЧНЫХ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТЭС КАЗАХСТАНА	11
1.1 Характеристика загрязнения окружающей среды ТЭС Казахстана	11
1.2 Критический анализ существующих схем гидрозолоудаления пылеугольных ТЭС	13
1.3 Решение проблем золоулавливания на пылеугольных ТЭС	19
1.4 Общая характеристика систем удаления золошлаковых отходов типичных ТЭС Казахстана	22
1.5 Использование композитных материалов для очистки газов.	28
1.6 Выводы по разделу, постановка задачи	34
2 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ПЫЛЕГАЗОУЛАВЛИВАНИЯ И ГЗУ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ТЭС РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	35
2.1 Математическое моделирование движения дымовых газов в ТКВ с изменяемой внутренней геометрией	35
2.2 Математическая модель движения газов в СВС-блоке	43
2.3 Методология и алгоритм оценки и выбора каталитических материалов для СВС - фильтров	55
2.4 Выводы по разделу	62
3 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗООЧИСТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВС МАТЕРИАЛОВ	63
3.1 Описание технологического процесса ГЗУ с использованием гидроциклонов	64
3.2 Моделирование пыле-газоулавливания для ТЭС в конструкциях с изменяемой геометрией	74
3.3 Рекомендуемое устройство для очистки газов с использованием СВС- фильтров	85
3.4 Выводы по разделу	88
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПЫЛЕГАЗОУЛАВЛИВАНИЯ	89
4.1 Система мониторинга и дистанционного управления пылегазоулавливанием	89
4.2 Описание алгоритма работы программы управления автоматизированным процессом пылегазоулавливания	93
4.3 Практические результаты работы автоматизированной системы пылегазоулавливания	99
4.4 Выводы по разделу	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Факел распыла воды на орошение при различных давлениях в форсунке	115

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Патенты	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Удостоверение автора на изобретение	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Авторские свидетельства	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Свидетельства о государственной регистрации объекта на интеллектуальную собственность	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Акты внедрения	124

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы следующие стандарты:

– ГОСТ 7.32-2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. «Отчет и научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». – Астана, 2001. –21с.

– Инструкция по оформлению диссертации и автореферата. Министерство образования и науки Республики Казахстан, Высший аттестационный комитет. – Алматы, 2004.

– ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 166с.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АСУ – автоматизированная система управления  
АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом  
АРМ – автоматизированное рабочее место  
БАП - бенз- $\alpha$ -пирен  
БД – база данных  
ГЗУ – гидрозолоудаление  
ДВС – двигатель внутреннего сгорания  
ЗШУ – золошлакоудаления  
ЗШХ – золошлакохранилище  
ЗШС – золошлакостанция  
ИКТ – информационно-коммуникационные технологии  
ИОМС - ингибитора отложений минеральных солей  
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство  
ПАА – поли акриламид  
ПАУ– полициклические ароматические углеводороды  
ПЗУ – пневмозолоудаления  
ПО – программное обеспечение  
СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез  
СНГ – содружество независимых государств  
СОО – система охлажденной очистки  
СУБД – система управления базами данных  
ТКВ – труба коагулятора Вентури  
ТЭС – теплоэлектростанция  
ТЧ – твердые частицы  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль  
УОО – установка обратного осмоса  
УОСЗ – установок по отгрузке сухой золы  
ХВО - химическая водообработка  
ЭВМ – электронная вычислительная машина  
ЭГДА - электрогидродинамическая аналогия  
ЕЭК– европейская экономическая комиссия  
ADO.NET –ActiveX Data Objects. NET  
HDD – жесткий диск (Hard Disc Drive)  
HMI - панель - панель оператора (human machine interface)  
ВНИИГ - Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Суммарная установленная мощность всех электростанций Казахстана составляет 20 тыс. МВт, а фактическая – 15 тыс. МВт. Казахстан вырабатывает 91,9 млрд. кВт\*час электроэнергии в год (данные 2013 г против 1045 млрд. кВт\*час Россией, 4058 млрд. кВт\*час – США, 5320 млрд. кВт\*час - Китаем) то есть электровооруженность Республики Казахстан 4,0 МВт \*час/чел. в год против 6,7 в России, 14- США, 3,5 в КНР. В структуре мощностей 88% приходится на ТЭС, а 72% электроэнергии в РК вырабатывают 37 ТЭС, работающих на углях Экибастузского, Майкубинского, Тургайского и Карагандинского бассейнов. Угольная энергетика дает и основные загрязнения окружающей среды. Этому способствуют и заниженные нормативы по выбросам вредных веществ в атмосферу. Так требования технического регламента от 14 декабря 2007 года № 1232 к эмиссиям в природную среду значительно превышают аналогичные нормы Евросоюза. Так по твердым частицам мг/м<sup>3</sup> при  $\alpha = 1,4$  нормы ЕС 20-100, РК 670 - 870; по SO<sub>2</sub> мг/м<sup>3</sup> при  $\alpha = 1,4$  ЕС 200-400; РК – 2000. Подписание Казахстаном Парижских климатических соглашений, предусматривающих введение «углеродного» налога за загрязнение атмосферы значительно усугубляет ситуацию. По оценкам российских экспертов для пылеугольной энергетики РФ «углеродный» налог достигает 100 млрд. рублей ежегодно. Такие огромные суммы неподъемны как для энергетики РФ, так и для РК. Президент США Д.Трамп вышел из Парижского соглашения, которое по его мнению негативно скажется на американской экономике.

Между тем развитие казахстанской энергетики неразрывно связано с пылеугольной генерацией. Об этом говорил Президент РК Н.А. Назарбаев в Послании 2014 и министр энергетики РК К. Бозумбаев на ЭКСПО-2017.

В этих условиях разработка новых природоохранных технологий снижающих вредное воздействие ТЭС на окружающую среду становится особенно актуальным. Имеющие проработки показали, что радикально решить эту проблему имеющимися технологиями экономически не выгодно, необходимы новые инновационные идеи, связанные с применением новых материалов и полной автоматизацией всего технологического процесса.

Особенность газоулавливания с СВС-фильтрами заключается в том, что загрязненные летучей золой дымовые газы, попадая в СВ-фильтры быстро забивают их и эффективность работы резко снижается. Поэтому была принята двух стадийная схема очистки. Вначале в аппаратах с изменяемой геометрией и применением ИРО (интенсивный режим орошения) избавляемся от летучей золы (твердых частиц), а затем после дополнительного подогрева газы поступают в газоуловитель. Такая схема эффективна и обеспечивает требуемую степень очистки от летучей золы и затем – от вредных газов.

**Идея работы** – увязать работу золоулавливающего и газоочистного оборудования с режимом работы каждого котла и характеристиками сжигаемых

углей за счёт применения новых конструкций с регулируемой геометрией и автоматизацией процесса.

Применение конструкций гидроциклонов и ТКВ с регулируемой геометрией позволяет изменить и оптимизировать гидродинамику потока, увязать результаты работы оборудования – процент золоулавливания с режимом работы котла, постоянного отслеживания (контроля), концентрации золы на выходе из установок и добиваясь путём автоматизированного изменения геометрии результатов, соответствующих нормативным требованиям. То же самое относится и к системам газоочистки, когда за счёт применения газоуловителей на современных СВС-композитных материалов и автоматизированного регулирования процесса обтекания фильтров, контролируя процент золоулавливания на выходе, удается добиться нормативных требований. Предлагаемые новые конструкции, обладают патентной чистотой.

Рассматриваемые вопросы очень сложны в теоритическом плане, но имеют большое практическое значение, обеспечивая существенную энергоэффективность. Вопросам энергоэффективности уделяется значительное внимание в выступлении президента Назарбаева и в правительственных документах:

- Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.09.2014г.);

- Постановление Правительства Республики Казахстан от 29.08.2013г. №904 «Об утверждении программы «Энергосбережение – 2020»;

- Указ Президента Республики Казахстан от 06.04.2007г. №310 «О дальнейших мерах по реализации стратегии развития Казахстана до 2030 года»;

- Постановление Правительства №1002 и 1003 от 29.06.2009г. «О внесении дополнений в некоторые законодательные акты Республики Казахстан по вопросам энергосбережения»;

- Послание президента РК народу Казахстана 02.02.2010г. «Новое десятилетие – новый экономический подъем – новые возможности Казахстана»;

- Указ президента Республики Казахстан от 19.03.2010г. №958 «Об утверждении программы по форсированному индустриально - инновационному развитию Республики Казахстан на 2010 - 2014 годы»;

- Указ президента Республики Казахстан от 30.05.2013г. №577 «Концепция по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике»;

- Постановление Правительства Республики Казахстан от 28.06.2014г. №724 «Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года».

Особенно важна экономическая эффективность предлагаемых в диссертации природоохранных мероприятий обусловленная модернизацией существующего чрезвычайно дорогостоящего оборудования обеспечивающая существенную эффективность (до 700%). Таким образом предлагаемая работы является актуальной и востребованной.

**Цель работы** – обеспечить нормативные показатели по выбросам летучей золы и газов путем полной автоматизации технологического процесса и применения новых конструкций аппаратов с регулируемой внутренней геометрией и СВС фильтрами.

**Объект исследования** – системы пылегазоулавливания пылеугольных ТЭС и котельных.

**Предмет исследования** – автоматизация технологических процессов пылегазоулавливания котельных и ТЭС.

**Методы исследования** – методология исследования базируется на системном подходе к обоснованию комплекса теоретических и экспериментальных результатов, полученных при помощи методов математического и статистического анализа, математического и физического моделирования. Экспериментальные исследования проводятся с использованием современных электроизмерительных и электронных приборов.

**Основные задачи работы.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработать систему очистки дымовых газов от твердых частиц путем автоматизации процесса и применения аппаратов с изменяемой геометрией;
- 2) Разработать устройство, обеспечивающее автоматизированную очистку дымовых газов с помощью СВС-фильтров;
- 3) Разработать АСУ технологией газоочистки с использованием СВС-фильтров, обеспечивающих нормативные показатели выбросов вредных веществ.

**Научная новизна:**

- 1) Разработаны математические модели течения потока в аппаратах с изменяемой геометрией (ТКВ, гидроциклоны) и в конструкциях с автоматически регулируемых СВС фильтрах для очистки газов;
- 2) Предложены новые конструкции аппаратов с изменяемой геометрией, обладающие патентной чистотой;
- 3) Предложен новый способ многоступенчатой очистки газов;
- 4) Разработана система автоматического регулирования параметров гидроциклона, ТКВ и СВС фильтров;
- 5) Разработано комплексное программное обеспечение, реализующее предложенные модели и алгоритмы оптимального управления системы пылегазоулавливания с применением СВС фильтров.

**На защиту выносятся:**

- 1) Новый способ золоулавливания на основе аппарата с регулируемой геометрией, интенсивным режимом орошения и автоматизацией процесса;
- 2) Устройство, реализующее новый способ золоулавливания;
- 3) Новый способ газоочистки дымовых газов ТЭС с использованием СВС-катализаторов, позволяющий довести степень газоочистки до нормативных требований;
- 4) АСУ и автоматизированное устройство, реализующее способ очистки газов с использованием СВС-катализаторов.

**Практическая ценность работы.** Применение аппаратов с регулируемой геометрией позволяет изменить и оптимизировать гидродинамику потока, увязать результаты работы оборудования – процент золоулавливания с режимом работы котла, постоянного отслеживания (контроля) концентрации золы на выходе из установок и добиваясь путем автоматизированного изменения геометрии результатов, соответствующих нормативам.

То же относится и к системам газоочистки, когда за счет применения газоуловителей на современных СВС - композитных материалах и автоматизированного регулирования процесса обтекания фильтров, контролируя процент золоулавливания на выходе, удается добиться нормативных требований. Предлагаемые способы и новые конструкции обладают патентной чистотой (приложение Б-Д).

**Реализация результатов работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы приняты для внедрения ТОО «Айрон-Техник», казахско-французским предприятием ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики», ТОО «ВОСТОК-ТЕХНО», Акты внедрения приведены в Приложении Е.

**Связь с государственными программами.** Тематика диссертационной работы основана на приоритетных направлениях, выделенных в Постановлении Правительства Республики Казахстан от 14.12.2007г. № 1232 Об утверждении Технического регламента «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций» «..все вновь вводимые и существующие котлы ТЭС с 01.01.2013г. должны иметь пониженные эмиссии выбросов загрязняющих веществ в атмосферу» [1] и приоритетному направлению: «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геология, переработка, новые материалы и технологии, безопасные изделия и конструкции», в рамках которого выполнялась работа по подпрограмме 0006/ПЦФ «Выпуск титановой продукции для дальнейшего использования в медицине» с программно-целевым финансированием по научно-технической программе: «Целевая научно-техническая программа Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева, ориентированная на разработку новых видов продукции для производства на ведущих промышленных предприятиях Восточно-Казахстанской области» на 2017-2019 годы. Разработанные в рамках выполнения подпрограммы 0006/ПЦФ алгоритмы управления токарным станком с ЧПУ были использованы в технологии изготовления трубы коагулятора Вентури.

Научные исследования, представленные в диссертации, проводились так же в рамках грантового финансирования МОН РК государственная регистрация №0113РК00819 по теме: «Разработка новой автоматизированной технологии гидрозолоудаления на типичных ТЭС и предприятиях горнодобывающей промышленности Казахстана с использованием гидроциклонов с регулируемой геометрией», где диссертант являлся исполнителем.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной конференции «Труды международного симпозиума. Надежность и качество». Россия, Пенза, 2015; Международной научно - технической конференции «Материалы II МНТК "Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана"; ВКГТУ, Усть-Каменогорск, 14-15 апреля 2016 г.»; Международной научно-практической конференции «13th international scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (apeie – 2016)»; «11-й Международный форум по стратегическим технологиям IFOST-2016. НГТУ, Россия, Новосибирск»; Международной конференции «Современные тенденции подготовки технических кадров и преподавания английского языка в условиях индустриально инновационного развития Республики Казахстан» и XIII Международной конференции KazTEA "25-летие независимого Казахстана: к новым свершениям вместе с английским языком". 16-18 июня 2016 года. Усть-Каменогорск.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, в том числе 1 статья в конференции индексируемом в базе данных Thomson Reuters, 1 статья в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, 1 статья в конференции индексируемом в базе данных Scopus, 5 работ в изданиях рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 монография, 2 патента, 5 работ в сборниках международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 73 наименований, изложенных на 126 страницах компьютерного текста, включает 60 рисунков, 6 таблиц и 6 приложений.

# 1 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТИПИЧНЫХ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТЭС КАЗАХСТАНА

## 1.1 Характеристика загрязнения окружающей среды ТЭС Казахстана

Установленная мощность электрических станций Казахстана составляет примерно  $15 \cdot 10^6$  кВт. Причем почти 90% выработки обеспечивается сжиганием органического топлива. Конденсационные тепловые электрические станции Республики Казахстан работают преимущественно на местных углях. Общая мощность пылеугольных станций превышает 12 млн. кВт и на них установлены котлы паропроизводительностью от 50 до 1650 т/ч. Эти агрегаты, используют уголь с зольностью до 50%. Теплотворная способность таких углей составляет 3500-4200 ккал/кг и поэтому зольность, отнесенная к 1000 ккал, может превышать 10 (в то время, как для углей, сжигаемых на западно-европейских ТЭС, этот показатель не превышает, как правило, 2). Содержание серы в сжигаемой массе составляет 0,5-0,7%, что при отнесении на 1000 кКал приближается по сернистости к мазуту с серосодержанием около 2%. Содержание азота в топливе колеблется от 0,5 до 1,5% [2].

В соответствии с мировыми нормативами по охране атмосферы выбросы пылеугольных ТЭС лимитируются в настоящее время по четырем ингредиентам: летучей золе, оксидам серы и азота, оксидам углерода.

В мировой практике наиболее жесткие нормативы выбросов теплоэлектростанций установлены в Германии: летучая зола –  $150 \text{ мг/нм}^3$ , оксид азота - 240 и 420  $\text{мг/нм}^3$ , сера -  $400 \text{ мг/нм}^3$ .

Для достижения этих показателей наиболее широко в Германии и Японии странах, достигших значительных успехов в снижении вредных пылегазовых выбросов с дымовыми газами ТЭС, применяется следующий комплекс способов и технологий [2]:

- по выбросам летучей золы: использование малозольных углей и улавливание в высокоэффективных электрофильтрах со степенью золоулавливания на уровне 99,5%;

- по выбросам оксидов азота: сочетание огнетехнических способов сжигания углей до примерно  $600 \text{ мг/нм}^3$  с последующей активной азотоочисткой путем разложения оксидов азота аммиаком на специальных катализаторах;

- по выбросам диоксида серы: мокроизвестковая (известняковая) абсорбция с получением в виде конечного продукта – товарного гипса.

Такой комплекс технологий позволяет надежно соблюдать указанные нормативы.

Применение этого комплекса экологических мероприятий на ТЭС Казахстана затруднено по экономическим соображениям. Поэтому реальная ситуация деятельности казахстанских ТЭС, по данным К.Д. Дукенбаева [3], существенно отличается от нормативных показателей (таблицы 1.1 и 1.2).

Таблица 1.1 – Нормативные показатели выбросов в атмосферу (тыс. тонн)

Год выбросов	Валовые выбросы	Сернистый ангидрид	Зола	Оксиды азота
2012	1524,7	647,40	661,7	208,10
2013	1478,8	641,70	617,0	210,90
2014	1220,4	556,96	521,2	162,06
2015	1213,1	489,90	523,6	161,52

Таблица 1.2 – Нормативные показатели сбросов в гидросферу (тыс.куб.м.)

Год	Сбросы		Воды в системах оборотного и последовательного водоснабжения
	всего	в т.ч. загрязненных	
2012	3028920	1790	6673688
2013	2889783,6	1758	5694645,6
2014	2549516	2342	4228954,9
2015	2515966,3	1750	4217563,6

Прогнозы базового сценария в отношении спроса на энергоресурсы показывают, что будет наблюдаться рост мировых объемов выбросов диоксида углерода на 1,8% ежегодно с 2000 по 2030 год. Они достигнут 38 млрд. тонн в 2030 году. Это на 16 млрд. тонн, или на 70%, выше нынешнего уровня. Две третьих роста дадут развивающиеся страны [3].

Лигуном О. и Смирновой М. подсчитано, что [4]: «..ежегодный ущерб, наносимый водным ресурсам страны от воздействия намывных отвалов в случае прямоточных систем водоснабжения составляет 15-25 у.е. на 1 тонну высокоопасных и 0,1 - 0,5 у.е. легкоопасных удаляемых отходов, а для оборотных систем эти издержки в 10-120 раз меньше. Расходы чистой воды на 1 тонну удаляемых гидравлическим способом отходов для прямоточных систем водоснабжения составляют от 15 до 30 тонн, а в случае водооборота в 15-20 раз меньше. В случае складирования этих отходов в насыпной отвал, потребление воды на 1 тонну отходов составляет 0,3 - 0,5 тонн.»

Таким образом, увеличение доли угольных теплоэлектростанций в системе энергообеспечения Казахстана с одновременным ухудшением качества используемого топлива увеличивает количество отходов, поступающих во все геосферы, и дестабилизирует состояние окружающей среды.

## 1.2 Критический анализ существующих схем гидрозолоудаления пылеугольных ТЭС

В системы технического водоснабжения входит комплекс сооружений, оборудования и трубопроводов, обеспечивающий забор природной воды из источника, ее очистку, охлаждение, специальную дополнительную очистку, транспортировку и подачу потребителям, а также сооружения, оборудование и установки, необходимые для приёма отработавшей воды и подготовки её для повторного использования.

По принципу организации различают прямоточные, с последовательным использованием воды, оборотные и каскадные бессточные схемы водоснабжения. Для технических нужд используется вода из поверхностных источников. Подземные воды обычно используют для обеспечения технологических процессов водой с температурой до 15°C и наличии запасов подземных вод, достаточных, как для хозяйственно-питьевых, так и для технических процессов.

От 70% до 85% воды используется на предприятиях энергетики как хладоноситель, в теплообменниках или же защищающих различные элементы установок и машин от нагрева. Эта вода в процессе нагревается, но не загрязняется.

От 5% до 12% технической воды используется в качестве среды, отмывающей продукцию или сырьё от примесей, или же в качестве транспортирующей среды. Эта вода в процессе использования загрязняется примесями материалов и сырья и нагревается, если материалы, с которыми она контактирует, имеют высокую температуру.

От 10% до 20% технической воды теряется за счёт испарения (при грануляции жидких шлаков и т. п.) или входит в состав произведённой продукции (пар, горячая вода и т.д.) [5, 6].

В зависимости от изменения качества воды в процессе её использования схемы оборотного водоснабжения подразделяются на "чистые" циклы для воды, которая при использовании только нагревается; "грязные" циклы для воды, которая при использовании только загрязняется.

Объединение локальных схем водоснабжения в единую систему с каскадным использованием воды открывает возможности для снижения потребления свежей воды и создания бессточных систем водоснабжения ТЭС. В этих системах продувочная вода "чистых" циклов используется для подпитки "грязных" циклов и сокращает потребление ими свежей воды. Если продувка "чистых" циклов превышает оборот "грязных" циклов в свежей воде, то её избыток может отправляться на ХВО для умягчения и использования её в котлах и аналогичных установках, безвозвратно потребляющих воду. Продувочную воду "грязных" циклов можно использовать для грануляции Шлаков, тушения кокса и аналогичных нужд безвозвратного водопотребления[6].

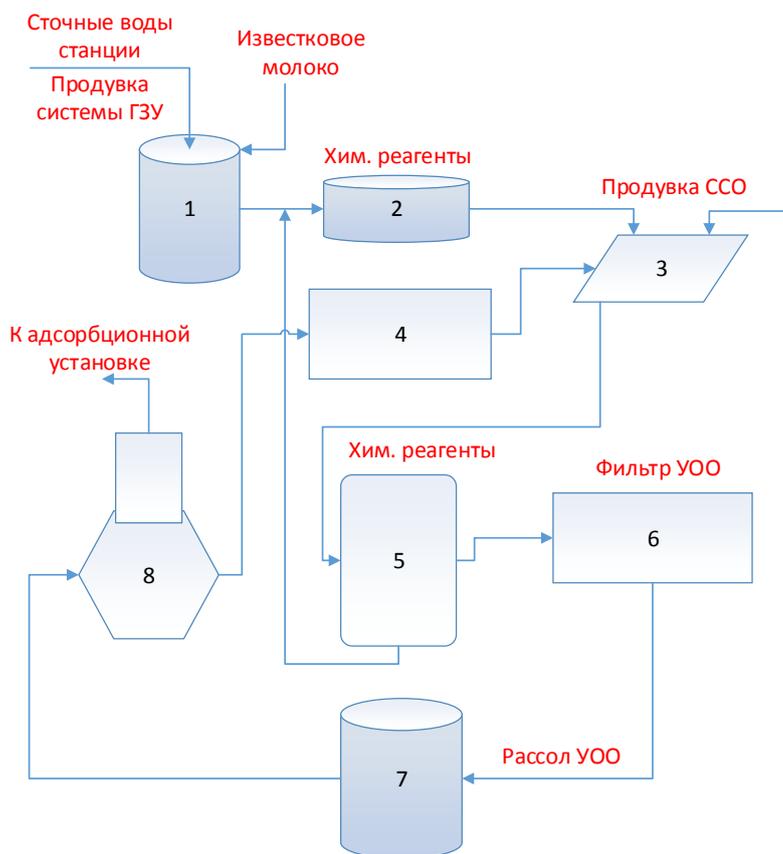
В последнее время много внимания уделяется разработке и созданию "бессточных" и даже "безотходных" ВПУ на ТЭС. В качестве рецептов предлагается многократное использование сточных вод в цикле, получение сточных вод йодоподготовки в виде растворов, пригодных для применения в сельском хозяйстве (в виде удобрений), применение мембранных установок для концентрирования сточных вод и для регенерации сточных вод с целью получения исходных растворов, сброс стоков в топки паровых котлов, сброс стоков в дымоходы котлов перед электрофильтрами, вывоз продуктов упаривания стоков в моря и океаны и др.

В ряде других работ отмечается необходимость комплексного решения проблемы стоков в масштабе всей электростанции, подтверждается важность оборотного водоснабжения и многократного применения природной воды для максимально возможного сокращения ее потребления и объема сточных вод, отпиваются пути решения проблемы, в том числе с использованием мембранных методов.

Так в работе [7] описан опыт проектирования ТЭС в США. Обязательное условие "нулевого" сброса здесь решается по-разному. Для уменьшения сброса сточных вод в районе ColoradoRiver используются испарительные пруды. Однако, как на Западе, так и в восточных областях США нет достаточного солнечного излучения, поэтому сточные воды рекомендуется в этих районах превращать в концентраты и использовать для этого вертикально-трубные испарители. В этих установках удаляется приблизительно 99% примесей, содержащихся в сточных водах. При этом образуется дистиллят высокого качества, который используется повторно [70].

На ТЭС SanJuan (США) компании «Public Service Co Of New-Mexico» была внедрена комбинированная технология переработки минерализованных сточных вод станции с использованием мембранной технологии в сочетании с выпаркой [70].

На рисунке 1.1 приведена принципиальная схема этой установки, согласно которой сточные воды станции поступают в бак-нейтрализатор (1), в который подается известковое молоко. Далее из бака-нейтрализатора стоки направляются в осветлитель (2), в который подаются химические реагенты. Осветленная вода собирается в сборном пруде (3), куда поступает также продувка СОО (система охлажденной очистки). Из пруда (3) стоки направляются на установку (5) предварительной обработки воды для УОО (установка обратного осмоса), а затем на УОО (6), фильтрат которой используется после «дообессоливания» для восполнения потерь пара и конденсата котлов ТЭС. Рассол УОО подвергается дополнительному концентрированию в испарителях (8). Дистиллят испарителей также подается на «дообессоливание» с последующей подачей его в один из технологических контуров [70].



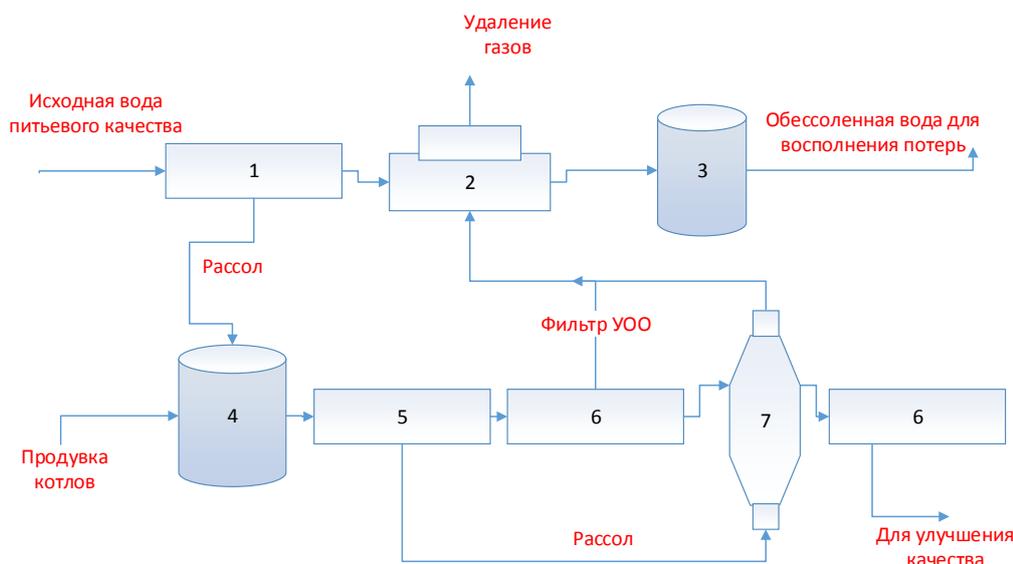
1 – бак-нейтрализатор; 2 – осветлитель; 3 – сборный пруд; 4 – шламоуплотнительная станция; 5 – предварительная обработка воды УОО; 6 – УОО; 7 – бак запаса; 8 – испаритель

Рисунок 1.1 – Комбинированная технология по переработке минерализованных сточных вод станции SanJuan (USA), внедренная компанией «Public Service Co of New-Mexico»

Еще более сложная мембранная технология была применена на установке компании «DowWell Limited Partnership», спроектированной компанией «Fluor Daniel Inc» (рисунок 1.2). На этой установке используется вода питьевого качества, которая фильтруется через 6 последовательно включенных ступеней УОО-1. Далее фильтрат УОО-1 подвергается дегазации 2 и «дообессоливанию» на обессоливающей установке 3, а затем используется в качестве добавочной воды энергетических котлов ТЭС.

По качеству обработанной воды ВПУ на Казахстанских ТЭС мало уступают зарубежным, однако их общий технический уровень во многом не соответствует нынешним требованиям.

Эксплуатация систем золошлакоудаления различных по мощности электростанций показала, что эффективными являются несколько рациональных схем удаления золошлаковых отходов ТЭС, применяемых в зависимости от типа сжигаемого топлива и используемых средств золоулавливания.



1 – У00-1; 2 – дегазатор; 3 – дообессоливающая установка; 4 – механический фильтр; 5 – ЭДУ; 6 – У00-2; 7 – испаритель-кристаллизатор; 8 – пресс-фильтр.

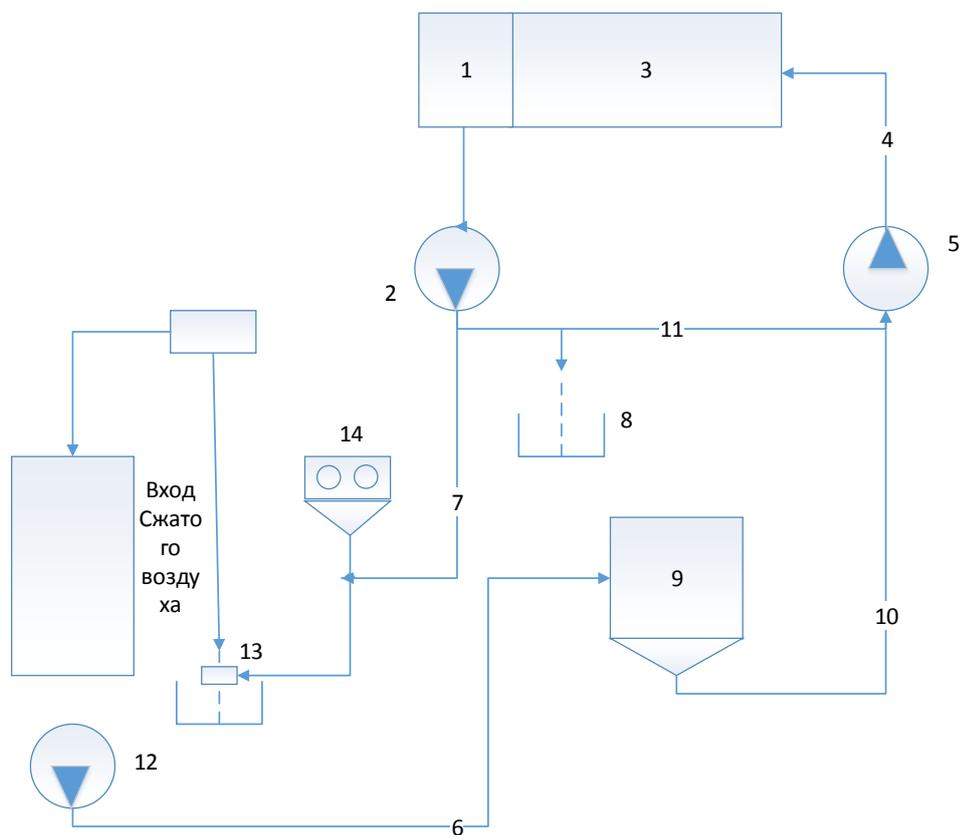
Рисунок 1.2 – Мембранная технология, запроектированная компанией «FluorDanielInc» «IrvineCalif» на установке компании «DowellLimitedPartnership»

Схема отдельного удаления золы и шлака, изображенная на рисунке 1.3, рекомендуется для электростанций с паровыми котлами, имеющими топку с жидким шлакоудалением. Расплавленный шлак при соприкосновении с водой в шлаковой ванне вследствие возникающих термических напряжений рассыпается (гранулируется) на частички размером 1-3 мм.

Гидротранспорт гранулированного шлака требует увеличения расхода смывной и побудительной воды и более высоких скоростей пульпы (1.9-2.0 м/с), чем гидротранспорт шлака из топок с твердым шлакоудалением. Кроме того, гидравлическое удаление гранулированного шлака сопровождается повышенным абразивным износом насосов и трубопроводов, что связано с увеличением скорости пульпы, а также с высокой твердостью и наличием острых граней у стекловидных частичек шлака.

На электростанциях, сжигающих топливо с содержанием щелочных компонентов в золе от 300 до 900 мг-экв/кг или имеющих не высокую сернистость, рекомендуется схема ГЗУ, приведенная на рисунке 1.4.

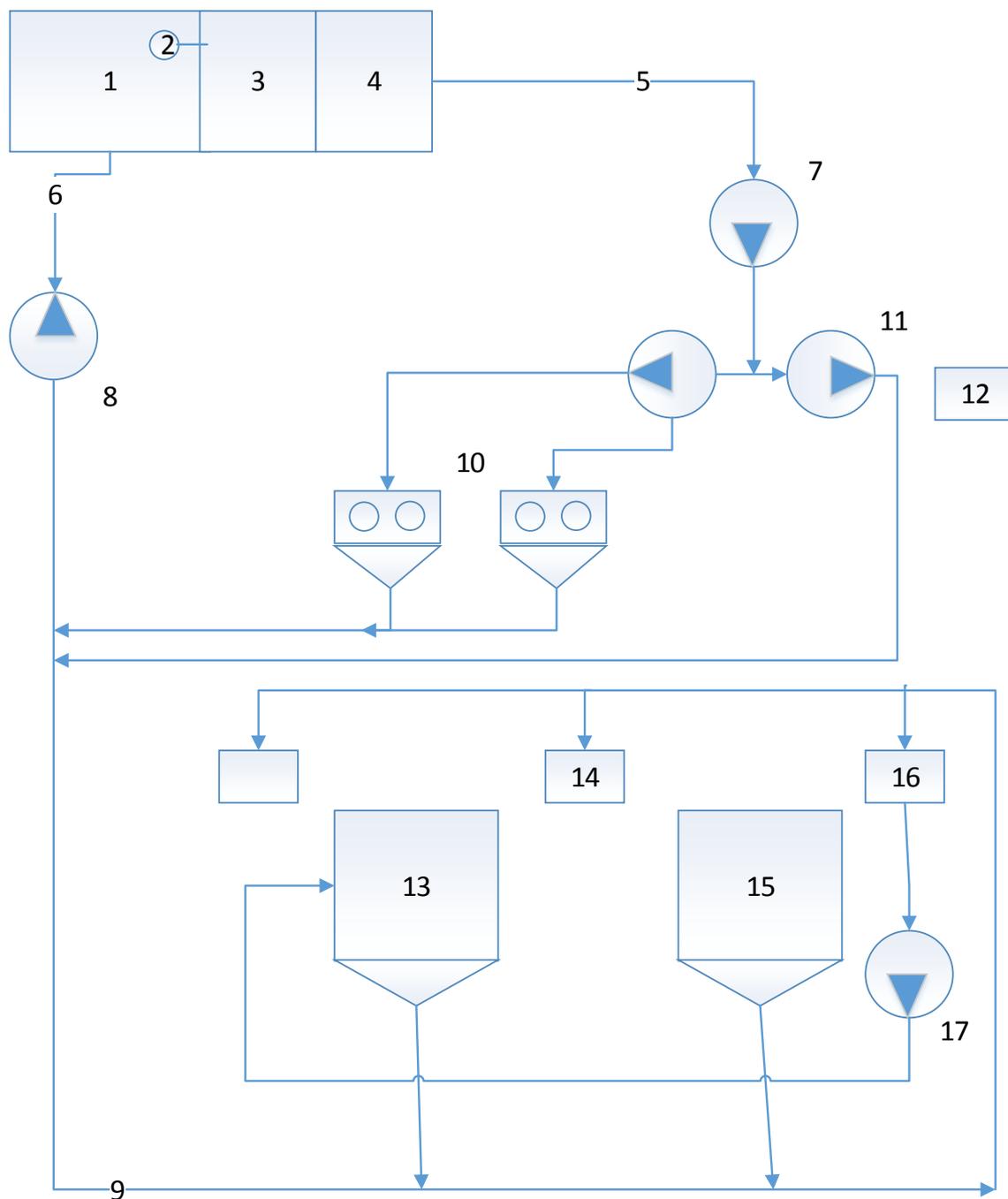
В этой схеме для орошения каплеуловителей используется щелочная осветленная вода без какой-либо предварительной подготовки. Для повышения надежности золоуловители оборудуются двумя поясами орошения каплеуловителей, рассчитанными на подачу четырехкратного количества воды по сравнению с рекомендуемым расходом, обычно равным 0,05 кг/м<sup>3</sup> газов (при нормальных условиях). Щелочная осветленная вода, используемая для питания форсунок входных патрубков, предварительно нейтрализуется кислотой или дымовыми газами в специальной установке.



1 – золоотвал; 2 – шахтные водосливы; 3 – бассейн осветленной воды; 4 – разделительная дамба бассейна; 5 – канал осветленной воды; 6 – пульпопровод; 7 – насосная осветленной воды; 8 – багерная насосная; 9 – золошлаковые каналы; 10 – паровые котлы; 11 – смывные насосы; 12 – установка для очистки трубопроводов от отложений; 13 – мокрый золоуловитель; 14 – напорный бак.

Рисунок 1.3 – Схема отдельного удаления золы и шлака для электростанций с паровыми котлами

Недостатком этой схемы является увеличение на 50 - 60% количества осветленной воды и пульпы, циркулирующей во внешней системе ГЗУ, то есть соответственно увеличение количества пульпопроводов и трубопроводов осветленной воды, а также энергетических затрат. Вместе с тем при использовании для орошения щелочной воды одновременно с золой в мокрых золоуловителях может быть уловлено до 20— 30% содержащихся в дымовых газах оксидов серы. В свою очередь поступление в замкнутую систему ГЗУ дополнительного количества кислоты, образующейся в результате поглощения оксидов серы, приведет к уменьшению гидратной щелочности осветленной воды, что сократит интенсивность образования карбонатных отложений и соответственно затрат на их очистку. Такая схема была впервые реализована на Кировской ГРЭС (г. Апатиты) [8].



1 – золоотвал; 2 – шахтные водосливы; 3 – бассейн осветлённой воды; 4 – разделительная дамба бассейна; 5 – канал осветлённой воды; 6 – пульпопровод; 7 – насосная осветлённой воды; 8 – багерная насосная; 9 – золошлаковые каналы; 10 – паровые котлы; 11 – смывные насосы; 12 – установка для очистки трубопровода от отложений; 13 – мокрый золоуловитель; 14 – напорный бак; 15 – входной патрубок золоуловителя; 16 – сборный бак; 17 – насос орошения входных патрубков золоуловителей

Рисунок 1.4 – Схема гидрозолоудаления ТЭС с мокрыми золоуловителями при щелочной реакции осветлённой воды

### 1.3 Решение проблем золоулавливания на пылеугольных ТЭС

В работе Дукенбаева К.Д. Движение к рынку [71] показано, что «..на энергетических предприятиях отрасли эксплуатируется 448 водогрейных энергетических котлов, из них 247 пылеугольных. Все пылеугольные котлы оборудованы золоулавливающими установками, более 90% которых имеют проектную степень золоочистки от 93 до 99,5%. В 1995 году выбросы вредных веществ в атмосферу составили 1213 тыс. тонн, что ниже уровня предыдущих лет». При этом следует отметить [9]:

- ухудшение качества поступающего топлива;
- уменьшение в топливном балансе доли природного газа;
- снижение выработки электроэнергии;
- уровень золоулавливания составил 97%;
- уровень азотоулавливания - 14%;
- уровень сероулавливания - 6%.

Улавливание летучей золы из дымовых газов, образующихся при сжигании энергетических углей, в общем виде имеет два аспекта:

- защита хвостового оборудования (дымососов, коробов, дымовых труб) от золотого износа;
- защита окружающей природной среды от вредных пылевых выбросов.

В этом отношении золоулавливание принципиально отличается от очистки от вредных газов (оксидов серы, азота и другие), поскольку газовые примеси незначительно влияют на работу котельного оборудования, хотя их удаление очень важно в экологическом плане.

Необходимо отметить одну особенность теплоэнергетики, характерную для всех ТЭС, во всех странах СНГ. Исторически, почти повсеместно, в связи с весьма незначительным объемом использования золошлаковых отходов, их складирование осуществляется в специализированных золоотвалах, куда попадает золошлаковая пульпа. Там она отстаивается, а осветленная вода поступает обратно на ТЭС.

В связи с этим, естественно, в первую очередь развивались мокрые способы золоулавливания поскольку почти на каждой ТЭС существует значительный водооборот осветленной воды. Только на крупных ТЭС с блоками 300 МВт и выше развивалось сухое золоулавливание в электрофильтрах [9].

Работы по золоулавливанию в Республике Казахстан ограничивались двумя направлениями:

- разработкой новых и совершенствованием действующих мокрых золоуловителей ТЭС;
- разработкой путей и способов повышения улавливания золы Экибастузских углей в электрофильтрах.

Принцип действия золоуловителя с ТКВ (труба коагулятора Вентури) состоит в следующем: газы из котлоагрегата направляются на вход в ТКВ со скоростью 14-15 м/с, где они в суживающейся части (конфузоре), разгоняются

(обычно до 60-65 м/с) в соответствии с изменением площади поперечного сечения. В цилиндрическом участке, устанавливаемом для стабилизации скорости газа, она остается неизменной, а в расширяющейся части (диффузоре) газы тормозятся и на входе в скруббер их скорость составляет примерно 20 м/с [10].

Частицы летучей золы также последовательно разгоняются и тормозятся, но вследствие их инерции, они отстают от потока в конфузоре, догоняют его в горловине и опережают газ в диффузоре. Однако это скольжение относительно газа для мелких частиц невелико.

Эти исследования способствовали широкому и успешному внедрению рассматриваемых золоуловителей с ТКВ в энергетику, в частности на ТЭС Казахстана.

Одновременно продолжались разработки по дальнейшему совершенствованию конструкции аппаратов с ТКВ, а также более углубленное изучение процессов как в собственно ТКВ, так и в скруббере – каплеуловителе. Что касается процессов в ТКВ, то здесь главное внимание уделялось весьма важному процессу, существенно влияющему на все показатели рабочего процесса, - вторичному дроблению капель в конфузоре. Требования к точности предвычислений интегральных параметров процесса золоулавливания потребовал и более детального знания поведения капель в ТКВ [10].

Были получены и обобщены экспериментальные данные во всем необходимом для энергетики интервале параметров. С получением этих данных удалось построить замкнутую единую математическую модель расчета золоуловителей с ТКВ, способную полностью предвычислить как дифференциальные по спектрам частиц и капель, так и интегральные параметры аппаратов ТКВ без привлечения каких-либо эмпирических данных заимствованных из измерений на аппарате.

Указанная модель послужила основой для оптимизации золоуловителей с ТКВ, так как удалось найти оптимальные параметры ТКВ при заданных условиях эксплуатации ТЭС сопротивлении аппарата и охлаждении дымовых газов.

Оказалось, что на основе оптимального выбора параметров можно практически без дополнительных затрат повысить степень золоулавливания с 96 до примерно 98%, то есть снизить выброс летучей золы в 2 раза.

В связи с этим усилились разработки в частности золоулавливания, развернувшиеся по двум направлениям [10]:

- интенсификация золоулавливания в аппаратах с ТКВ;
- разработка принципиально новых аппаратов, основанных на принципе эмульгирования воды потоком газа в аппарате.

В принципе существуют три пути интенсификации коагуляции золы в ТКВ:

- увеличение скорости газа в горловине;
- утонение распыла воды в ТКВ, например, распылом под высоким давлением;

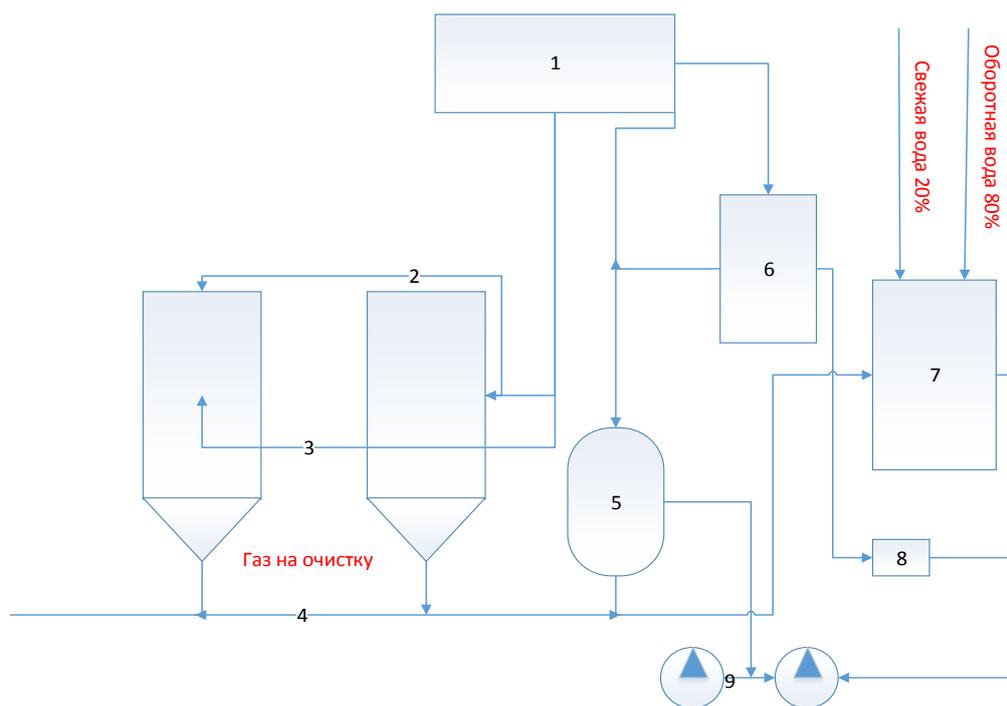
– увеличение расхода воды.

Первый путь связан с резким, практически квадратичным, ростом сопротивления, что неприемлемо для теплоэнергетики.

Второй путь - повышения давления распыла показал достаточно высокую эффективность (степень золоулавливания повышалась до 98-98,5%). Однако не удалось обеспечить достаточную эксплуатационную надежность, поскольку отсутствовали средства повышения давления осветленной воды, а традиционные насосы при работе на осветленной воде быстро выходили из строя.

Таким образом, наиболее приемлемым оказался третий путь – повышение расхода воды в ТКВ. Проведенный на основе модели расчета анализ показал, при увеличении удельного расхода воды в ТКВ с традиционных значений 0,12 - 0,14 л/м<sup>3</sup> до 0,30 - 0,35 л/м<sup>3</sup> можно повысить степень золоулавливания свыше 99% при приемлемом сопротивлении аппарата.

Для реализации этого наиболее выгодного экономически подхода увеличения расхода воды в ТКВ - предложена схема питания мокрого золоуловителя с использованием оборотной воды (рисунок 1.5).



1 – бак; 2 – вода на сопла орошения корпуса золоуловителя; 3 – вода на форсунки орошения водных патрубков золоуловителя; 4 – канал ГЗУ; 5 – градийный фильтр; 6 – КИП; 7 – бак-смеситель; 8 – датчик pH; 9 – насос

Рисунок 1.5 – Рекомендуемая схема питания мокрого золоуловителя с использованием оборотной воды

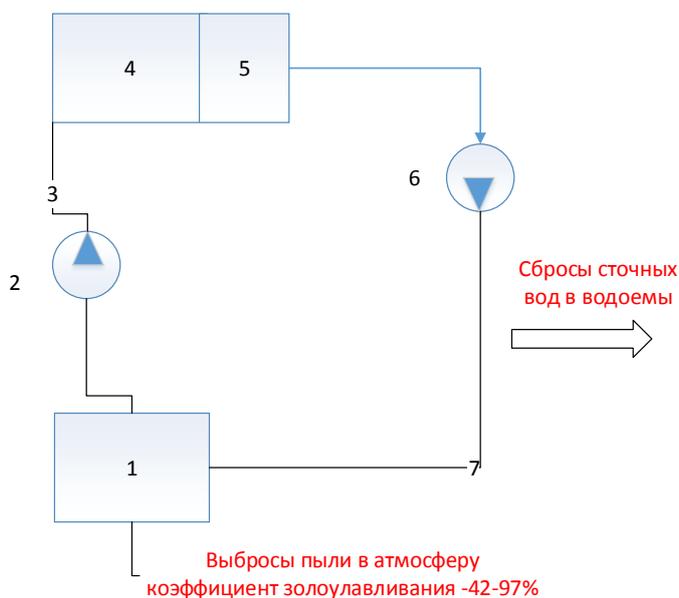
Усложнение системы орошения мокрых золоуловителей при использовании оборотной воды компенсируется рядом факторов, положительно влияющих на работу бессточной системы ГЗУ.

#### 1.4 Общая характеристика систем удаления золошлаковых отходов типичных ТЭС Казахстана

Основными задачами, для решения которых предназначены системы золошлакоудаления ТЭС, являются надежная и своевременная эвакуация шлака из шлаковых шахт паровых котлов, золы из бункеров сухих золоуловителей из мокрых золоуловителей, а также транспорт и складирование золошлаковых отходов на золоотвале.

Для обеспечения надежной работы паровых котлов необходимо непрерывно или через сравнительно короткие отрезки времени удалять осевший в топочных камерах шлак и задержанную в золоуловителях летучую золу. Для удаления шлака на крупных электростанциях используется преимущественно гидротранспорт. В паровых котлах с твердым шлакоудалением нижняя часть топочной камеры выполняется в виде шлаковой уминаемой водой. При жидком шлакоудалении под подом топочной камеры устанавливается заполненная водой шлаковая ванна. При соприкосновении шлака с водой происходит его гашение, грануляция и охлаждение. Шлаковая пульпа проходит через шлакодробилку, затем по самотечным каналам подается к насосам и перекачивается на золоотвал или в специальные шлакоотстойники.

На рисунке 1.6 показана схема типичной ТЭС Казахстана.



1 – электростанция; 2 – багерная насосная; 3 – пульповоды; 4 – золоотвал; 5 – бассейн осветленной воды; 6 – насос осветленной воды; 7 – трубопровод осветленной воды

Рисунок 1.6 –Схема ГЗУ типичной ТЭС Казахстана

На золоотвале бессточной системы ГЗУ имеется отдельный бассейн осветленной воды вместимостью, обеспечивающей пребывание воды не менее 100-150 час., чтобы компенсировать сезонные изменения общего объема воды в системе.

Органическим недостатком таких систем гидрозолоудаления является образование минеральных отложений в трубопроводах, насосах, соплах и в других элементах систем. В оборотных системах гидрозолоудаления зарастанию отложениями подвержены трубопроводы и насосы осветленной воды, что зачастую является причиной нехватки осветленной воды на смыв золы и шлака. Вынужденное восполнение недостатка осветленной воды приводит к нарушению баланса воды в оборотной системе ГЗУ, переполнению отстойных бассейнов золоотвалов и как следствие этого к сбросам высокоминерализованной осветленной воды, загрязняющей близлежащие природные водоемы. Во всех случаях образование отложений приводит к ухудшению экономичности систем золоудаления, требует привлечения дополнительных средств и трудозатрат на восстановление их работоспособности.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: традиционная схема оборотного ГЗУ с размещением насосной станции осветленной воды у золоотвала не является оптимальной.

Для ТЭС Казахстана предлагаются две новые схемы [11] удаления золошлаков, в которых обработка осветленной воды ведется внутри станции. Для подпитки замкнутого ГЗУ, вследствие потерь осветленной воды в мокрых золоуловителях и со сгущенной золошлаковой пульпой, используются нефтесодержащие и засоленные стоки ХВО. Технология подготовки сгущенной пульпы предусматривает отдельный отбор шлака и зольного осадка для их использования в строительстве[12].

Общий вид предлагаемых схем показан на рисунке 1.7.

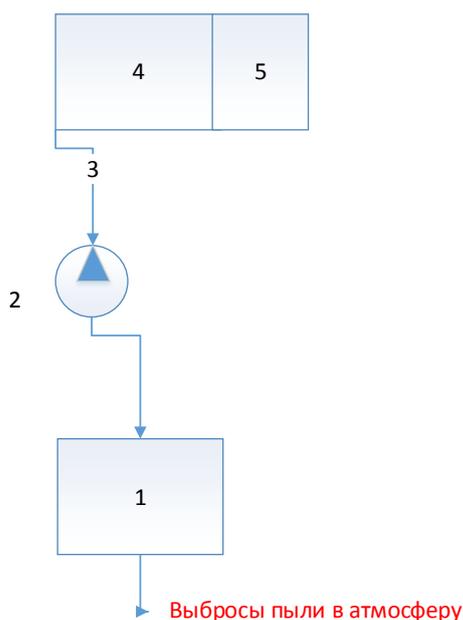
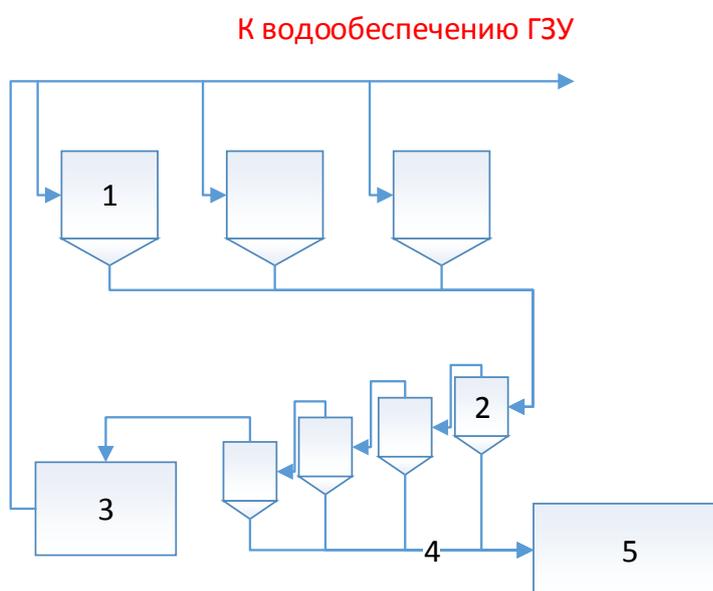


Рисунок 1.7 – Общий вид предлагаемых схем

Предлагаемые как типовые для ТЭС Казахстана схемы ГЗУ позволяют наряду с оптимизацией работы гидротранспортной установки решить в комплексе вопросы повторного использования загрязненных сточных вод и утилизации золошлаковых материалов на предприятиях стройиндустрии, получить существенный экономический эффект [4].

#### 1.4.1 Схема ГЗУ со сгущением золошлаков в централизованном узле

Схема ГЗУ со сгущением золошлаковой пульпы в централизованном узле (рисунок 1.8) предусматривает сгущение золошлаковой пульпы в сгустителях, размещенных в пристанционном узле до содержания твердого 50-65% (по весу) в зольном осадке и последующую его перекачку в золоотвал.



1 – новые конструкции мокрых золоуловителей, работающие в интенсивном режиме орошения; 2 – гидроциклоны; 3 – бак-осветления; 4 – пульпопровод; 5 – золоотвал

Рисунок 1.8 – Схема системы бессточного гидрозолоудаления с централизованным блоком осветления

Консистенция зольного осадка принята из условия нулевого водного баланса золоотвала, а также технической возможности гидротранспорта сгущенной пульпы. Осветленная в сгустителях вода после стабилизационной обработки (для предотвращения образования минеральных отложений в коммуникациях) возвращается в цикл ГЗУ [13,16].

На схеме показана прямоточная система ГЗУ, которая предусматривает резервную часть при аварийных ситуациях. Кроме этого на локальных очистных установках осуществляется сток для подпитки замкнутой системы

гидрозолоудаления. Это связано с потерями воды в мокрых золоуловителях при ее испарениях.

В существующих багерных станциях золошлаковая пульпа поступает через делитель в шлокотделители с устройством обезвоживания. Гидравлические гидрогрохоты в этом случае используются в качестве шлакоотделителей.

Для отгрузки обезвоженного шлака к потребителям имеется наклонный трубопровод через который шлак накапливается в бункере. Для поступления на дробилки мелкого дробления также используется наклонный трубопровод при этом получают материал дробленного класса 3 мм, который можно перемешивать в накопителе сгущенной пульпы.

В данной схеме все узлы имеют апробация на ведущих энергетических предприятиях, как угольной, так и добывающей промышленности. Однако в сочетании с имеющим замкнутый цикл ГЗУ такая схема не построена.

Еще одна, которая может быть рекомендована имеет одностадийное сгущение. Она основана на использовании гидроциклонов для сгущения золы пульпы. Центральный узел сгущения показан на рисунке 1.9. В качестве примере рассмотреть котел Алматинской ТЭЦ-2. Здесь сгустителем золы пульпы является обычный гидроциклон, который установлен на линии (всасывающей) центробежного насоса.

На рисунке 1.9 имеются следующие обозначения: делитель пульпы (1), конусный гидрогрохот (2), односитовый грохот (3), бункер для шлака (4), транспортер ленточный (5), дробилки мелкого дробления (6), гидроциклон (7), шламовый насос (8), плотномер радиометрический (9), накопитель-перемешиватель пульпы (10), багерный насос (11), резервуар осветленной воды (12), насос осветленной воды (13) [12].

Однако стандартные конструкции гидроциклонов, решая в принципе задачу осветления воды и сгущения золы пульпы, обладают недостатками: значительная энергоемкость, быстрый износ стенок корпуса, нерегулярность разделительного процесса и значительный вес. Некоторые из этих недостатков устраняются, если заменить жесткие конструкции на упругие и пластичные. Упругие материалы меньше подвергаются износу, легко изменяют конфигурацию, способствуют уменьшению гидравлического сопротивления и, в конечном счете, резко повышают эффективность гидроциклонов.

Рекомендуется использовать принципиально новые конструкции гидроциклонов с упругими элементами [14]:

– гидроциклон с конической частью, выполненной из эластичного материала. Он закрыт жестким кожухом и имеет регулировочный и сливной патрубки. Путем изменения давления в полости между кожухом и эластичной поверхностью осуществляется управление гидроциклонным процессом;

– гидроциклон с боковыми цилиндрическими поверхностями, выполненными из полого эластичного материала. Регулирование осуществляется изменением формы эластичной поверхности;

- гидроциклон с конической частью, выполненной из полого эластичного материала с регулирующими патрубками;
- гидроциклоны с конической частью, выполненной из эластичного, охваченного гибкой спиралью. Регулирование гидроциклона с конической эластичной частью и гибкой спиралью, осуществляется регулировочным штоком;
- регулирование процесса разделения (сгущения) осуществляется штоком, прикрепленным к эластичной донной вставке.

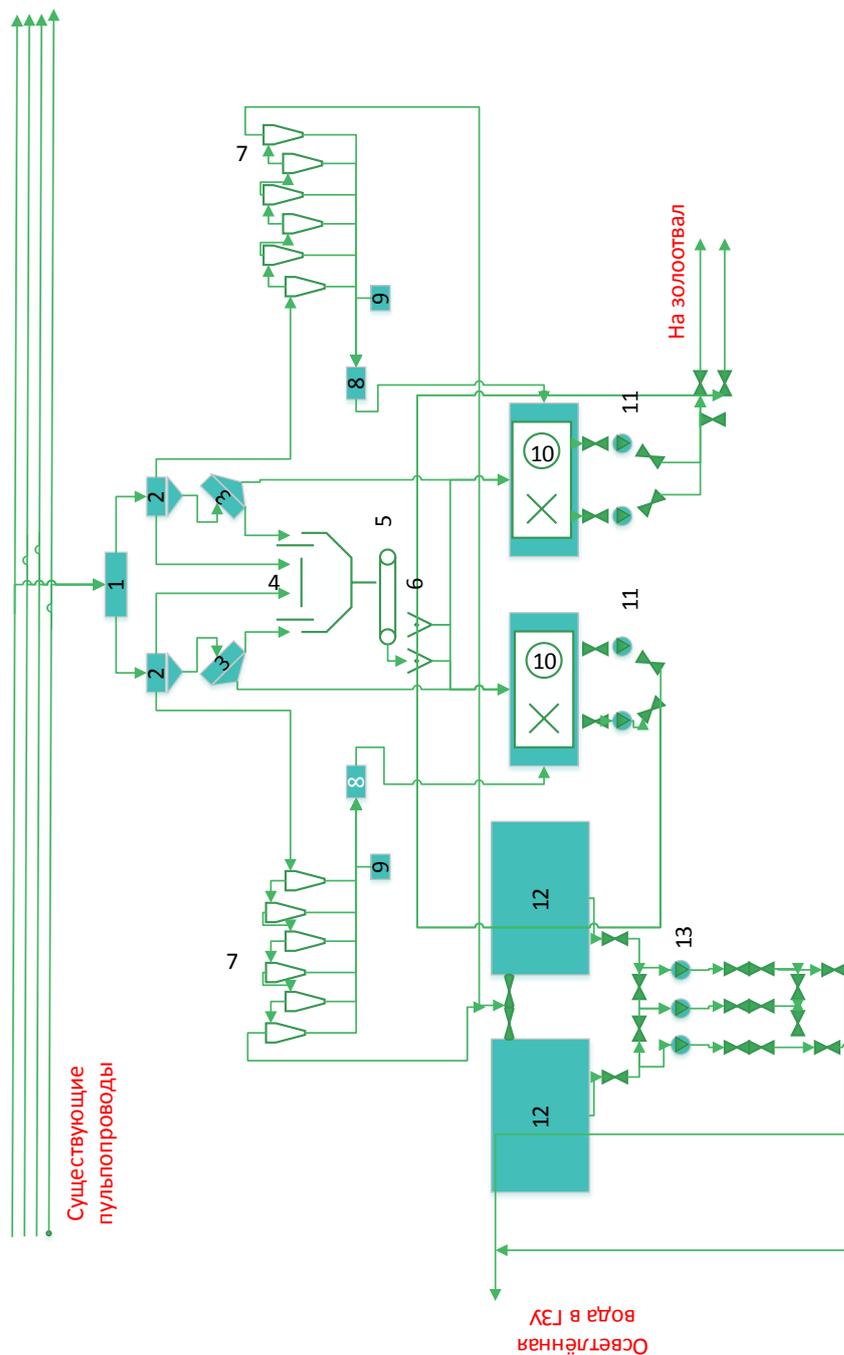


Рисунок 1.9 – Центральный узел сгущения Алматинской ТЭЦ-2

Гидроциклоны с эластичными и гибкими элементами, могут использоваться для эффективного сгущения золошлаковой пульпы и позволяют быстро регулировать процесс сгущения при изменении топлива на ТЭЦ.

В целях повышения надежности системы ГЗУ и для ускорения образования осадка следует предусмотреть обработку пульпы флокулянтам (полиакриламидом). В расчетах производительности гидроциклонов коагулянты не учитывались, что идет в запас расчетов.

#### 1.4.2 Схема ГЗУ с индивидуальными осветлительными установками

При использовании на ТЭС мокрых золоуловителей, одной из наиболее перспективных является система ГЗУ, в которой золовая пульпа из мокрых золоуловителей проходит через группу гидроциклонов, где частично осветляется и возвращается для орошения каплеуловителей (рисунок 1.10) [15, 72]. На представленной схеме имеются следующие обозначения: конструкции мокрых золоуловителей, работающие в интенсивном режиме орошения (1); гидроциклоны (2); трубопровод осветленной воды (3); пульпопровод (4); золоотвал (5).

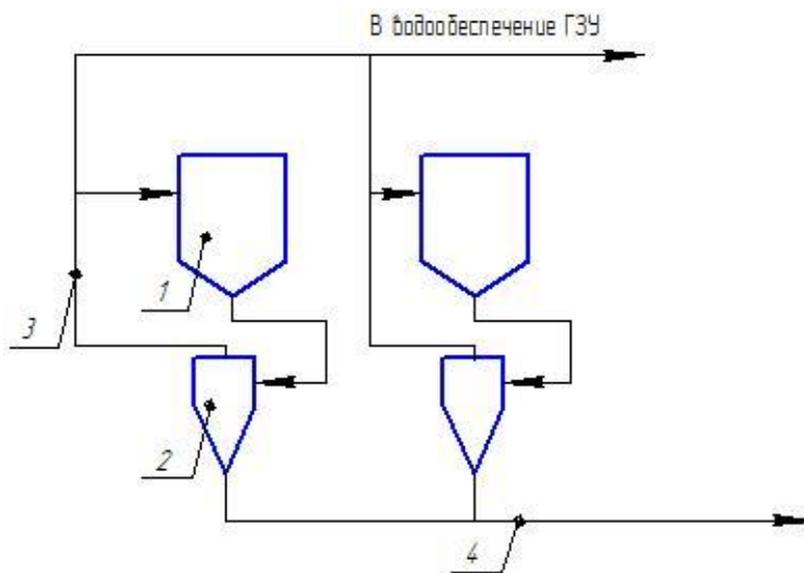


Рисунок 1.10 – Схема системы бессточного гидрозолоудаления с индивидуальным контуром орошения

Преимуществом такой схемы является возможность увеличить объем орошающей золоуловителем воды, что способствует повышению степени очистки отзола, надежности работы этих аппаратов и поглощению дополнительного количества диоксида серы из дымовых газов. Последнее обстоятельство, в свою очередь, приводит к уменьшению щелочности воды, циркулирующей в системе ГЗУ, и соответствующему сокращению образования карбонатных отложений [16,72].

Первый вариант пригоден в случае, когда модернизация системы золоудаления не связана с увеличением объема пульпы, т.е. не требуется расширения существующих багерных насосных, или имеется возможность сооружения дополнительной багерной насосной.

Для некоторых ТЭС предполагается существенное увеличение расхода орошающей воды и, соответственно, объема образующейся пульпы. Поэтому для реконструкции системы ГЗУ на этой ТЭЦ рекомендуется вариант с сооружением индивидуальных замкнутых систем орошения каждого котла.

Установленные на ТЭЦ мокрые золоуловители типа МС-ВТИ с коагуляторами Вентури щелевого типа, обеспечивают степень золоулавливания 95-96%. Для увеличения эффективности очистки газов не менее чем до 99,2% золоуловители должны быть переведены на интенсивный режим орошения (ИРО), что потребует увеличения расхода воды на орошение коагуляторов Вентури до 2560 м<sup>3</sup>/ч (0,4 л/нм<sup>3</sup>) очищаемых газов, и, соответственно, почти двукратного увеличения расхода пульпы.

Вторая схема ГЗУ, основанная на индивидуальном контуре золоулавливания каждого котла, представляется исключительно перспективной, и поэтому рекомендуется для опытно-промышленных испытаний. Успешное опробование этой схемы позволит рекомендовать ее для внедрения на существующих и проектируемых ТЭС Казахстана[16].

### 1.5 Использование композитных материалов для очистки газов.

В настоящее время имеется большой опыт очистки газов с использованием новых композитных материалов, полученных с помощью технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Существует много работ по каталитической очистке отработавших газов дизелей. Их изучение показало, что при оптимальном выборе катализаторов и установки нейтрализаторов, а также использование саржевых фильтров и соблюдение температурных режимов дает возможность получения высокой эффективности.

Трудности создания эффективных и надежных конструкций каталитических нейтрализаторов отработавших газов поршневых ДВС выделены в работе Медведев Г.В. [17,73] и заключаются в следующем: «Отработавшие газы ДВС представляют собой многокомпонентные смеси, в состав которых входят вещества, требующие окисления, восстановления и фильтрации; температуры отработавших газов на выпуске из коллекторов, в зависимости от режимов эксплуатации поршневых ДВС, изменяются от 16<sup>0</sup> до 70<sup>0</sup>С, на входе в реакторы нейтрализаторов и в зависимости от места их установки, от 12<sup>0</sup> до 36<sup>0</sup>С, в то время как эффективность отдельных катализаторов обеспечивается в узких диапазонах температур, а при пусках необходим прогрев катализаторов; использование дизельных топлив с высоким содержанием серы в двигателях с воспламенением от сжатия приводит к «отравлению» катализаторов соединениями серы в течение 400... 450 часов

эксплуатации, а использование тяжелых сернистых топлив для дизелей, например мазутов, приводит к отравлению катализаторов соединениями серы в течение 600... 650 часов эксплуатации, но существуют и методы регенерации; существуют спектры колебаний давлений в системах выпуска, приводящие к разрушению особенно насыпных шариковых катализаторов; существуют спектры колебаний самих двигателей внутреннего сгорания, систем выпуска, нейтрализатора вместе с транспортными средствами, приводящие к разрушению каталитических блоков и катализаторах на носителях; существует селективность воздействия катализаторов на процессы окисления или восстановления отдельных компонентов отработавших газов; существует необходимость фильтрации твердых частиц размерами 1...200 мкм; каталитические нейтрализаторы должны обеспечивать противодавления на выпуске не выше 600...650 мм вод.ст.» [73].

Структура и физико-механические свойства металлокерамики формируются на стадии ее изготовления. Это достигается путем подбора состава исходных продуктов, выбора технологических режимов при изготовлении, воздействием на процессы изготовления, управлением формированием и получением структуры, обеспечивающей целый ряд требований обусловленных условиями очистки газов.

При работе двигателя внутреннего сгорания температура отработанных газов обычно достигает 870К. Эффективность очистки аэрозолей при такой температуре газов от твердых частиц, а также экономическая эффективность систем фильтрации намного выше, чем пылеуловители в других системах.

Преимущества данного подхода следующие:

- степень очистки газов (от пыли) высокая;
- способность фильтрации частиц при различных давлениях потоков газов;
- при разных концентрациях взвешенных частиц в очищаемом газе имеется высокая степень очистки;
- В перспективе имеется возможность автоматизации всего процесса газов;
- по сравнению с использованием обычных способов очистки имеется высокая стабильность системы очистки, а также изменение физико-химических свойств улавливаемых частиц сводится к минимуму.

Поэтому одним из перспективных путей снижения техногенного воздействия дизелей на окружающую среду является развитие нового пути в каталитической очистке - использование новых перспективных пористых проницаемых материалов из интерметаллидов [17], полученных из отходов производств с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, позволяющего заместить или исключить частично использование благородных и редкоземельных металлов [17].

Получение новых композиционных материалов с каталитическими свойствами связано с развитием технологических процессов нового уровня, важной чертой которых является ограниченное количество операций,

обеспечивающих полный переход исходных материалов в целевой продукт с их глубоким переделом, при котором происходят радикальные изменения структуры и свойств материалов [18, 19].

На основе метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза разработана новая энергосберегающая технология изготовления пористых проницаемых каталитических материалов для очистки отработавших газов промышленных предприятий и транспорта. Таким образом, решена одна из главных задач исследования процессов СВ-синтеза – получение композиционных интерметаллидных соединений заданного состава и свойств [20, 21, 22].

Для каждой СВС - композиции существует определенный интервал концентрационного состава компонентов, при котором возможно проведение реакции в режиме горения [23].

В результате применения на машиностроительных предприятиях технологий травления металлов растворами кислот и щелочей образуется значительное количество порошкообразных материалов: меди, хрома, железа и других [20, 24].

Твердые отходы в машиностроении образуются в процессе производства продукции в виде стружки, опилок, окалины, облоя, высечки и других и составляют до 26 % на точку металла. Основными источниками образования отходов легированных сталей является металлообработка – 84%. Безвозвратные потери металла в машиностроении на 1 млн. тонн потребляемых черных металлов составляет: при обдирке, шлифовке, распиловке и других видах обработки - 5,4 тыс. тонн; горячей штамповке и термической обработке (потери от окалины) – 2,1 тыс. тонн. По данным А.В. Михайлова [25] количество отходов промышленного производства по Алтайскому краю представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Количество отходов промышленного производства по ВКО

Класс опасности	Отходы промышленного производства, тыс. тонн/год
1 класс	0,2
2 класс	9,8
3 класс	395,5
4 класс	3499,6
5 класс	555,1
Итого	4460,2

Возможности СВС-технологии позволяют перерабатывать твердые отходы промышленности в изделия для решения многих экологических задач. На предприятиях машиностроения образуется большое количество

порошкообразных отходов различных металлов: меди, хрома, железа и их оксидов. Количество порошковых отходов, например, на предприятии станкостроения, может достигать 12-15 тонн в год. Качество очистки отработавших газов дизелей от вредных веществ в зависимости от содержания в составе каталитических блоков нейтрализаторов отдельных компонентов рассмотрено в работах целого ряда отечественных и зарубежных ученых, в том числе: В.Э. Борзых, В.И. Верещагина, В.В. Евстигнеева, Н.П. Тубалова, О.А. Лебедева, А.А. Жуйковой. Влиянию же оксида железа ( $Fe_2O_3$ ) в составе пористых проницаемых каталитических СВС-блоков нейтрализаторов на качество очистки отработавших газов дизелей практически не уделено должного внимания [26].

Полученные результаты показывают, что с увеличением содержания в шихте оксида железа очистка газов от твердых частиц (ТЧ) ухудшается, но незначительно, по видимому, за счет сокращения среднего диаметра пор с 155 до 130 мкм. Содержание оксида углерода и углеводородов не зависит от содержания оксида железа в шихте, а эффективность очистки газов от оксидов азота падает на 15 % при изменении содержания оксида железа с 45 до 50 %. Сделан вывод о том, что изменение содержания окалина легированной стали в каталитических блоках практически не влияет на изменение качества очистки газов в нейтрализаторе, а наблюдаемый эффект объясняется присутствием в каталитических блоках нейтрализатора хрома, никеля, иридия и родия [27].

Исследуемые на эффективность очистки отработавших газов дизеля каталитические СВС-блоки готовились заранее из исходных смесей, с различной дозировкой оксида хрома ( $Cr_2O_3$ ), регулируемой за счет содержания алюминия (Al). Содержание оксида хрома варьировало от 16 до 19 объемных процентов. В гетерогенных реакциях окисления и восстановления в порах СВС-материалов  $Cr_2O_3$  как оксид переходного металла выступает в роли катализатора. В присутствии катализатора происходит снижение энергии активации. Определена граница, в пределах которой в пористых СВС-материалах нет раковин и «свищей». Качество очистки газов от (ТЧ) при изменении содержания оксида хрома с 16 до 19 % увеличивается с 88 до 92%. Однако ограничения по качеству каталитического материала позволяют при дозировке оксида хрома в 17,5% иметь качество очистки по ТЧ 90%; по оксиду углерода - 85%; по углеводородам - 70%; по оксидам азота - 40% [28].

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что оксид хрома как оксид переходного d-металла в составе СВС-материалов проявляет каталитические свойства в реакциях окисления продуктов неполного сгорания: твердых частиц (сажи), оксида углерода и углеводородов, а также в реакциях восстановления оксидов азота. Однако достижение показателей норм выбросов по всем нормируемым компонентам, за исключением углекислого газа, для данного типа дизелей по ЕВРО-4, ЕВРО-5 в случае применения каталитического нейтрализатора с содержанием в блоках оксида хрома не достигается.

Технологическая схема производства интерметаллических каталитических фильтров методом СВС показана на рисунке 1.11.

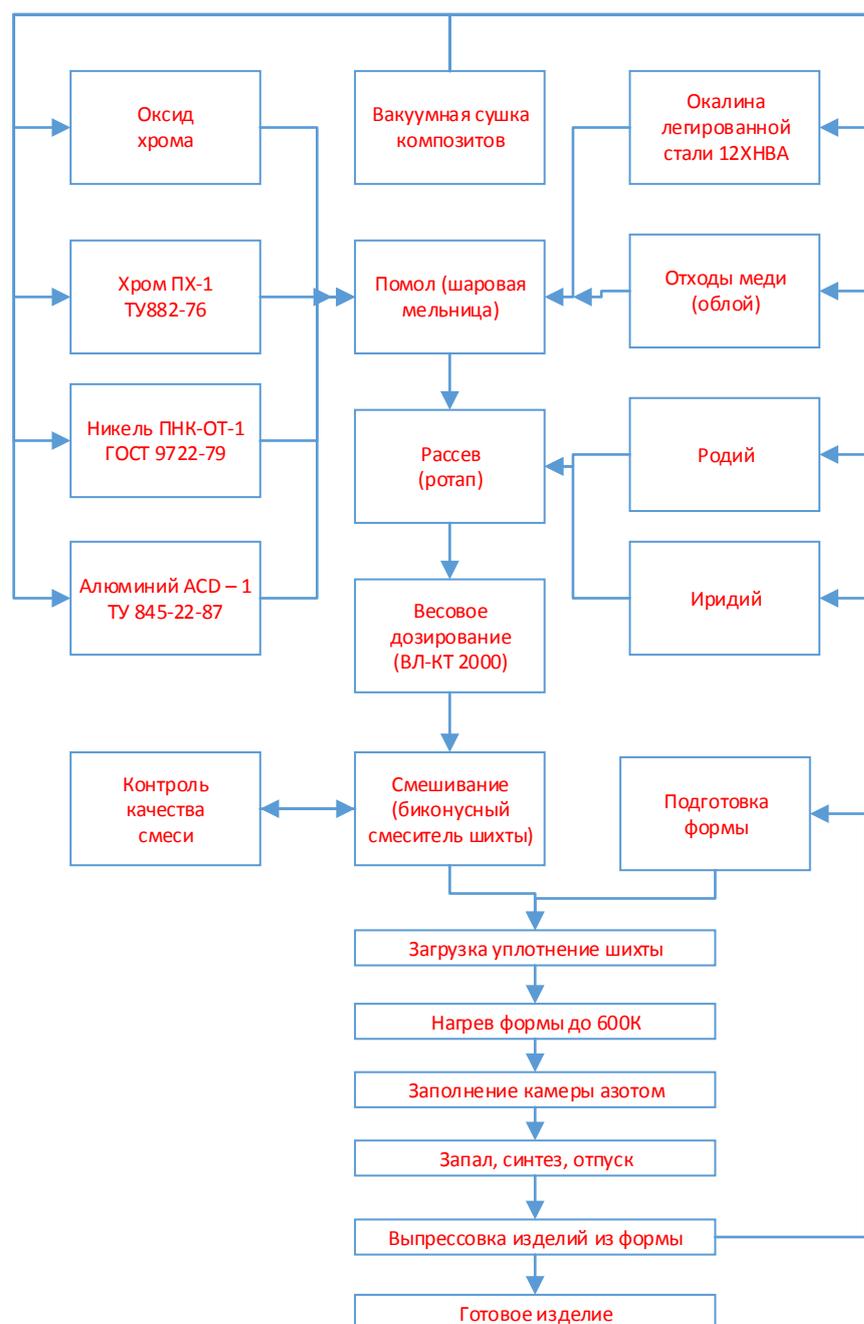


Рисунок 1.11 - Технологическая схема производства интерметаллических каталитических фильтров методом СВС

Использование хрома в каталитических нейтрализаторах в качестве катализатора известно давно по работам О.М. Султанова и его школы. Хром (Cr) выступает катализатором в процессах окисления углеводородов, и от его содержания в шихте во многом зависят каталитические свойства пористых проницаемых СВС-материалов. Хром вводится в шихту, с одной стороны, для стабилизации растекания расплава реактивов в процессе взаимодействия, с другой - для повышения коррозионной стойкости материала к парам серной и

азотной кислот, присутствующих в отработавших газах, и так же, как катализатор, способствующий снижению энергии активации в окислительных и восстановительных процессах очистки газов в нейтрализаторах. При содержании в шихте хрома менее 5% по массе происходит снижение механической прочности за счет ухудшения условий растекания расплавов реагентов в процессе изготовления СВС-материалов [29].

Оксид хрома и хром являются катализаторами. В данной работе не рассматривались варианты составов шихты с концентрацией ниже 5% из условия сохранения механических свойств СВС-материалов. В результате проведенных испытаний обнаружено, что при увеличении содержания хрома в шихте с 5,0 до 7,2% качество очистки газов от твердых частиц увеличивается с 89 до 95%, что нельзя считать значительным. Качество очистки газов от оксида углерода СО увеличивается с 70 до 87%, что является уже существенным. Качество очистки от углеводородов увеличивается всего на 6%, а качество очистки от оксидов азота увеличивается с 32 до 50%, что очень значимо. В случае применения дополнительных мероприятий, направленных на увеличение полноты сгорания или увеличение содержания хрома в составе каталитических блоков от 5% по массе, наблюдается выполнение норм ЕВРО-4 и ЕВРО-5 по выбросам оксида углерода (СО), а при дозировке хрома от 5,6% - по выбросам углеводородов. При дозировке хрома до 7,2 % наблюдается выполнение норм выбросов по ЕВРО-4 и ЕВРО-5 по твердым частицам [30].

Никель хорошо зарекомендовал себя в качестве катализатора в химической промышленности. Качество очистки отработавших газов дизелей от вредных веществ в зависимости от содержания в составе каталитических блоков нейтрализаторов никеля рассмотрено в работах целого ряда отечественных и зарубежных ученых, в том числе: Б.А. Адамовича, И.Л. Варшавского, Р.В. Малова, В.В. Горбунова, Н.Н. Патрахальцева, О.И. Жегалина, П.Д. Лупачева.

Никель выступает в роли катализатора в процессах доокисления продуктов неполного сгорания и восстановления оксидов азота. Присутствие никеля в составе СВС-каталитического материала значительно влияет на состав отработавших газов. При увеличении собственной поверхности катализатора увеличивается площадь растекания расплавов и тогда увеличивается содержание никеля в шихте. Исследовались блоки с вариациями состава никеля в шихте от 5 до 12,5%. При увеличении содержания никеля в шихте качество очистки выхлопных газов от ТЧ возрастает с 90,5 до 96,5%, от оксида углерода СО - с 72 до 93%, от углеводородов СхНу - с 62 до 78%, от оксидов азота - с 27 до 60%. Выполнение норм ЕВРО-4, ЕВРО-5 по оксиду углерода, углеводородам и твердым частицам может быть достигнуто. При использовании каталитических блоков, содержащих никель даже 12,5%, выполнение норм ЕВРО-5 по выбросам оксидов азота проблематично [31].

## 1.6 Выводы по разделу, постановка задачи

В первом разделе были проведены следующие исследования

1 Проведено исследование систем автоматизации использующихся в теплоэнергетике Республики Казахстан. Изучены технологии гидравлической фильтрации золошлаковых отходов. Рассмотрены данные вопросы для ТЭС и котельных;

2 Критический анализ существующих схем гидрозолоудаления пылеугольных ТЭС;

3 Проанализированы пути решения проблем золоулавливания на пылеугольных ТЭС;

4 Изучены системы удаления золошлаковых отходов типичных ТЭС Казахстана, а именно схемы ГЗУ со сгущением золошлаков в централизованном узле и схема ГЗУ с индивидуальными осветлительными установками;

5 Изучен вопрос использования композитных материалов для очистки газов.

На основе анализа, проведённого в данной главе, были поставлены следующие задачи:

1 Разработать технологию очистки дымовых газов от твердых частиц (летучей золы) путем автоматизации процесса и применения аппаратов с изменяемой геометрией;

2 Разработать устройство, обеспечивающее автоматизированную очистку дымовых газов с помощью СВС-фильтров;

3 Разработать АСУ технологией газоочистки с использованием СВС-фильтров, обеспечивающих нормативные показатели выбросов вредных веществ.

## 2 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ПЫЛЕГАЗОУЛАВЛИВАНИЯ И ГЗУ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ТЭС РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

### 2.1 Математическое моделирование движения дымовых газов в ТКВ с изменяемой внутренней геометрией

Для изучения установившихся течений жидкости используется численное моделирование с криволинейными границами в модели вязкой несжимаемой жидкости. Основные методы получения зависимости течения жидкости основаны на решении уравнений Навье-Стокса.

Для численного решения краевых задач имеется два наиболее эффективных метода решения – это метод криволинейных сеток и метод фиктивных областей.

Метод криволинейных сеток имеет достаточно сложный алгоритм решения, так как требует преобразования уравнения в криволинейные координаты. Уравнения с криволинейными координатами гораздо сложнее, чем начальные уравнения. Кроме этого сточки зрения математики, требования, накладываемые на разностные сетки, усложняют процесс вычисления, поэтому был использован метод фиктивных областей.

При решении системы дифференциальных уравнений данный метод легко реализуется на ЭВМ. Потеря точности, которая возникает при реализации данного метода, не приводит к ошибкам в построении течения жидкости.

В диссертации приводится решение уравнений Навье-Стокса, полученное путем численного моделирования методом дополнительных областей. Граничные условия установлены для конкретного ТКВ и в качестве среды выбраны дымовые газы орошенные водой. Рассматривается решение для трубы-коагулятора Вентури с изменяемой внутренней геометрией, показанной на рисунке 2.1.

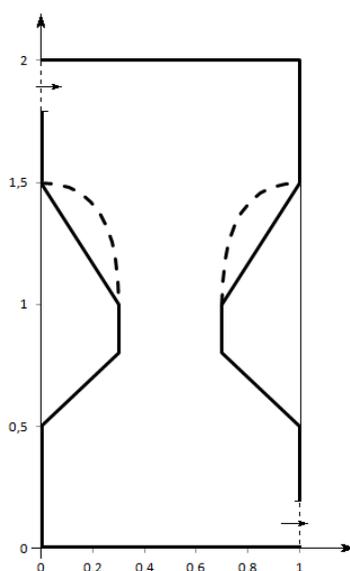


Рисунок 2.1 – Рассматриваемая ТКВ на сечениях

Предполагается, что дымовые газы входят через входную границу в верхней части (показано стрелкой), движутся в направлении  $x$  и выходят через границу в нижней части (показано стрелкой). Для упрощения изложения рассматривается вертикальное сечение трубы через ось симметрии, а пунктирной линией обозначены границы после изменений. Рассматриваемую область дополним до прямоугольника, чтобы наложить структурированные прямоугольные сетки.

В основу модели положены уравнения, описывающие движение вязкой несжимаемой жидкости в переменных «скорость  $\vec{u}$  – функция тока  $\psi$ ». Выбор неизвестных обоснован необходимостью исключения поля давления из системы разностных уравнений, для которого, как известно, отсутствует постановка граничных условий. Учет изменяемой внутренней границы ТКВ при численной реализации модели достигается посредством использования модификации метода фиктивных областей – метода дополненных областей [32], отличительным преимуществом которого является отсутствие малого параметра в уравнениях, приводящего к потере точности приближенного решения.

Пусть  $\Omega$  - двумерная область с границей  $\partial\Omega$ . Тогда двумерное течение дымовых газов в области  $\Omega$  описывается уравнением движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \vec{f}_u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \vec{f}_v$$

и уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где  $\vec{u} = (u, v)$  - поле скоростей,  $p$  - отклонение давления,  $\mu$  - коэффициент вязкости,  $(x, y) \in \Omega$  и  $t$  - время. Дополним систему (1), (2) начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \vec{u}_0(x, z) \text{ при } (x, z) \in \bar{\Omega}, t = 0 \\ \vec{u} &= \vec{\varphi}(x, z, t) \text{ при } (x, z) \in \partial\Omega, t \in (0, T]. \end{aligned} \quad (3)$$

Введем функцию тока – скалярную функцию  $\psi$ , определяемую из соотношений

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Для численной реализации модели (1)-(3) применим метод конечных разностей. В области  $\Omega$  введем конечно-разностную сетку

$$\Omega_h = \left\{ h_1 = \frac{l_1}{n_1}, h_2 = \frac{l_2}{n_2}, x_i = (i-1)h_1, z_j = (j-1)h_2 \right\}; \quad (4)$$

$$i = \overline{1, n_1}, j = \overline{1, n_2}.$$

Во избежание появления нефизических осцилляций решения будем использовать «разнесенный» сеточный шаблон, при котором давление определяется в узлах разностной сетки:

$$p: \{x_i = ih_1, y_j = jh_2\},$$

функция тока – в центре разностной ячейки:

$$\psi: \{x_i = (i - 1/2)h_1, y_j = (j - 1/2)h_2\},$$

а компоненты скорости – в центрах ее граней:

$$u: \{x_i = (i - 1/2)h_1, y_j = jh_2\}$$

$$v: \{x_i = ih_1, y_j = (j - 1/2)h_2\}$$

В сеточной области  $\Omega_h$  уравнения (1), (2) аппроксимируем следующими разностными уравнениями:

$$\frac{u_{i-1/2,j}^{n+1/2} - u_{i-1/2,j}^n}{\tau} + L_h u_{i-1/2,j}^n + \frac{p_{i,j}^n - p_{i-1,j}^n}{h_1} = \mu \Lambda_h u_{i-1/2,j}^n + f_{u,i-1/2,j}^n \quad (5)$$

$$\frac{w_{i,j-1/2}^{n+1/2} - w_{i,j-1/2}^n}{\tau} + L_h w_{i,j-1/2}^n + \frac{p_{i,j}^n - p_{i,j-1}^n}{h_2} = \mu \Lambda_h w_{i,j-1/2}^n + f_{w,i,j-1/2,j}^n \quad (6)$$

$$\frac{u_{i+1/2,j}^{n+1} - u_{i-1/2,j}^{n+1}}{h_1} + \frac{w_{i,j+1/2}^{n+1} - w_{i,j-1/2}^{n+1}}{h_2} = 0, \quad (7)$$

где разностные операторы  $L_h$  и  $\Lambda_h$ , соответствующие конвективным и диффузионным слагаемым, определены в следующем виде:

$$L_h u_{i-1/2,j}^n = \frac{1}{2} \left[ \left( u_{i-1,j}^n + |u_{i-1,j}^n| \right) \frac{u_{i-1/2,j}^n - u_{i-3/2,j}^n}{h_1} + \left( u_{i,j}^n - |u_{i,j}^n| \right) \frac{u_{i+1/2,j}^n - u_{i-1/2,j}^n}{h_1} \right] + \\ + \frac{1}{2} \left[ \left( w_{i-1/2,j-1/2}^n + |w_{i-1/2,j-1/2}^n| \right) \frac{u_{i-1/2,j}^n - u_{i-2,j-1}^n}{h_2} + \left( w_{i-1/2,j+1/2}^n - |w_{i-1/2,j+1/2}^n| \right) \frac{u_{i-1/2,j+1}^n - u_{i-1/2,j}^n}{h_2} \right]$$

$$L_h w_{i,j-1/2}^n = \frac{1}{2} \left[ \left( u_{i-1/2,j-1/2}^n + |u_{i-1/2,j-1/2}^n| \right) \frac{w_{i,j-1/2}^n - w_{i-1,j-1/2}^n}{h_1} + \right. \\ \left. + \left( u_{i+1/2,j-1/2}^n - |u_{i+1/2,j-1/2}^n| \right) \frac{w_{i+1,j-1/2}^n - w_{i,j-1/2}^n}{h_1} \right] +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[ \left( w_{i,j-1}^n + |w_{i,j-1}^n| \right) \frac{w_{i,j-1/2}^n - w_{i,j-3/2}^n}{h_2} + \left( w_{i,j}^n - |w_{i,j}^n| \right) \frac{w_{i,j+1/2}^n - w_{i,j-1/2}^n}{h_2} \right]$$

$$\mu \Lambda_h u_{i-1/2,j}^n = \frac{1}{h_1} \left[ \mu_{i,j} \frac{u_{i+1/2,j}^n - u_{i-1/2,j}^n}{h_1} - \mu_{i-1,j} \frac{u_{i-1/2,j}^n - u_{i-3/2,j}^n}{h_1} \right] + \\ + \frac{1}{h_2} \left[ \mu_{i-1/2,j+1/2} \frac{u_{i-1/2,j+1}^n - u_{i-1/2,j}^n}{h_2} - \mu_{i-1/2,j-1/2} \frac{u_{i-1/2,j}^n - u_{i-1/2,j-1}^n}{h_2} \right]$$

$$\mu \Lambda_h w_{i,j-1/2}^n = \frac{1}{h_1} \left[ \mu_{i+1/2,j-1/2} \frac{w_{i+1,j-1/2}^n - w_{i,j-1/2}^n}{h_1} - \mu_{i-1/2,j-1/2} \frac{w_{i,j-1/2}^n - w_{i-1,j-1/2}^n}{h_1} \right] + \\ + \frac{1}{h_2} \left[ \mu_{i,j} \frac{w_{i,j+1/2}^n - w_{i,j-1/2}^n}{h_2} - \mu_{i,j-1} \frac{w_{i,j-1/2}^n - w_{i,j-3/2}^n}{h_2} \right]$$

При аппроксимации дифференциальных операторов, соответствующих конвекциям, используется разностная схема с учетом направления потока, а значения компонентов скорости в не определяющих узлах сетки определяется осреднением. Например, для  $u_{i,j}^n$  имеем:

$$u_{i,j}^n = \frac{u_{i,j+1/2}^n + u_{i,j-1/2}^n}{2}.$$

Приведем алгоритм численного решения задачи (1)-(3), основанный на методе расщепления по физическим процессам.

В первую очередь, определим промежуточное поле скорости  $\bar{\mathbf{u}}^{n+1/2} = (\mathbf{u}^{n+1/2}, \mathbf{v}^{n+1/2})$  без учета градиента давления из уравнения

$$\frac{\bar{\mathbf{u}}^{n+1/2} - \bar{\mathbf{u}}^n}{\tau} = -L_h \bar{\mathbf{u}}^n + \mu_q \Lambda_h \bar{\mathbf{u}}^n + \mathbf{f}_q; \quad (8)$$

В классическом методе расщепления на втором этапе определяется давление из решения уравнения Пуассона

$$\frac{p_{i+1,j}^{n+1} - 2p_{i,j}^{n+1} + p_{i-1,j}^{n+1}}{h_1^2} + \frac{p_{i,j+1}^{n+1} - 2p_{i,j}^{n+1} + p_{i,j-1}^{n+1}}{h_2^2} = \frac{u_{i+1/2,j}^{n+1/2} - u_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{h_1} + \frac{w_{i,j+1/2}^{n+1/2} - w_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{h_2} \quad (9)$$

которое получается в результате подстановки в (7) выражений

$$u_{i-1/2,j}^{n+1} = u_{i-1/2,j}^{n+1/2} - \tau \frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i-1,j}^{n+1}}{h_1} \quad (10)$$

$$w_{i,j-1/2}^{n+1} = w_{i,j-1/2}^{n+1/2} - \tau \frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j-1}^{n+1}}{h_2} \quad (11)$$

Однако, в этом случае возникает трудность постановки граничных условий для давления. Модифицируем алгоритм и на данном этапе определим значения функции тока, связанные с компонентами скорости выражениями [33]

$$u_{i-1/2,j}^{n+1} = \frac{\psi_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} - \psi_{i-1/2,j-1/2}^{n+1}}{h_2}, \quad (12)$$

$$v_{i,j-1/2}^{n+1} = -\frac{\psi_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} - \psi_{i-1/2,j-1/2}^{n+1}}{h_1}. \quad (13)$$

Из (12) и (13) следует, что значения функции тока удовлетворяют уравнению

$$\Lambda_h \psi^{n+1} = \text{rot}_h \bar{\mathbf{u}}^{n+1/2}; \quad (14)$$

где

$$\Lambda_h \psi^{n+1} = \frac{\psi_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} - 2\psi_{i-1/2,j-1/2}^{n+1} + \psi_{i-3/2,j-1/2}^{n+1}}{h_1^2} + \frac{\psi_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} - 2\psi_{i-1/2,j-1/2}^{n+1} + \psi_{i-1/2,j-3/2}^{n+1}}{h_2^2},$$

$$\text{rot}_h \bar{\mathbf{u}}^{n+1/2} = \frac{u_{i-1/2,j}^{n+1/2} - u_{i-1/2,j-1}^{n+1/2}}{h_2} - \frac{v_{i,j-1/2}^{n+1/2} - v_{i-1,j-1/2}^{n+1/2}}{h_1}.$$

Для учета изменяющихся внутренних границ, модифицируем уравнение (14), используя метод дополненных областей. С этой целью введем вспомогательный параметр

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} 0, & \psi_{i-1/2,j-1/2} \in \Omega_0 \\ 1, & \psi_{i-1/2,j-1/2} \in \Omega_1, \Omega_2 \end{cases},$$

учитывающий дополненную область. Тогда уравнения (14) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi_{i-1/2,j-1/2}^{n+1} = & (1-\theta_{i,j}) \left[ \frac{\psi_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + \psi_{i-3/2,j-1/2}^{n+1}}{h_1^2} + \frac{\psi_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + \psi_{i-1/2,j-3/2}^{n+1}}{h_2^2} - \text{rot}_h \bar{u}^{n+1/2} \right] + \\ & + \theta_{i,j} \psi^0 \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\psi^0$  - значение функции тока на границах дополненной области и фиктивной области.

На заключительном третьем этапе находим поле скорости  $\bar{u}^{n+1}$  с помощью выражений (12), (13).

Задачи (8), (9), (10), (11) и (8), (14), (12), (13) являются эквивалентными.

Перейдем к описанию граничных условий для разностной задачи. Предположим, что течение газа осуществляется в направлении оси  $X$  (рисунок 2.1). Тогда граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \psi_{1/2,1/2}^{n+1} = 0, \quad u_{1/2,j}^{n+1} = \varphi_j, \quad v_{1,j-1/2}^{n+1} = 0, \quad \psi_{1/2,j+1/2}^{n+1} = \psi_{1/2,j-1/2}^{n+1} + h_2 u_{1/2,j}^{n+1} \\ \text{при } i = 1, 1 \leq j \leq n_2 - 1 \\ u_{n_1-1/2,j}^{n+1} = u_{n_1-3/2,j}^{n+1}, \quad v_{n_1,j-1/2}^{n+1} = 0, \quad \psi_{n_1-1/2,j-1/2}^{n+1} = \psi_{n_1-3/2,j-1/2}^{n+1} \\ \text{при } i = n_1, 1 \leq j \leq n_2 - 1 \\ u_{i-1/2,1}^{n+1} = 0, \quad v_{i,1/2}^{n+1} = 0, \quad \psi_{i-1/2,1/2}^{n+1} = 0 \\ \text{при } j = 1, 1 \leq i \leq n_1 - 1 \\ u_{i-1/2,n_2}^{n+1} = 0, \quad v_{i,n_2-1/2}^{n+1} = 0, \quad \psi_{i+1/2,n_2-1/2}^{n+1} = \psi_{i-1/2,n_2-1/2}^{n+1} + h_1 v_{i,n_2-1}^{n+1} \\ \text{при } j = n_2, 1 \leq i \leq n_1 - 1 \end{aligned} \quad (16)$$

По предложенному методу проведены расчеты движения дымовых газов в ТКВ с изменяемой внутренней геометрией. Рассмотрим форму ТКВ на сечениях (рисунок 2.1). Для изменения формы ТКВ использовался

квадратичная кривая Бэзе.

С помощью описанного метода получены результаты численных расчетов на  $50 \times 100$  количествах узлов сетки. В расчетах использовались безразмерные параметры ТКВ, значения скорости и функции тока.

При численном расчете использовались следующие граничные значения скорости:

$$u^{n+1} = 0, v^{n+1} = 0, \psi^{n+1} = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad 0 \leq y \leq 1.8;$$

$$u^{n+1} = 1, v^{n+1} = 0, \psi^{n+1}(0, y + \Delta y) = \psi^{n+1}(0, y) + \Delta y u^{n+1}$$

$$\text{при } x = 0, \quad 1.8 \leq y \leq 2;$$

$$u^{n+1} = 0, v^{n+1} = 0, \psi^{n+1} = 0 \quad \text{при } 0 \leq x \leq 1, \quad y = 0;$$

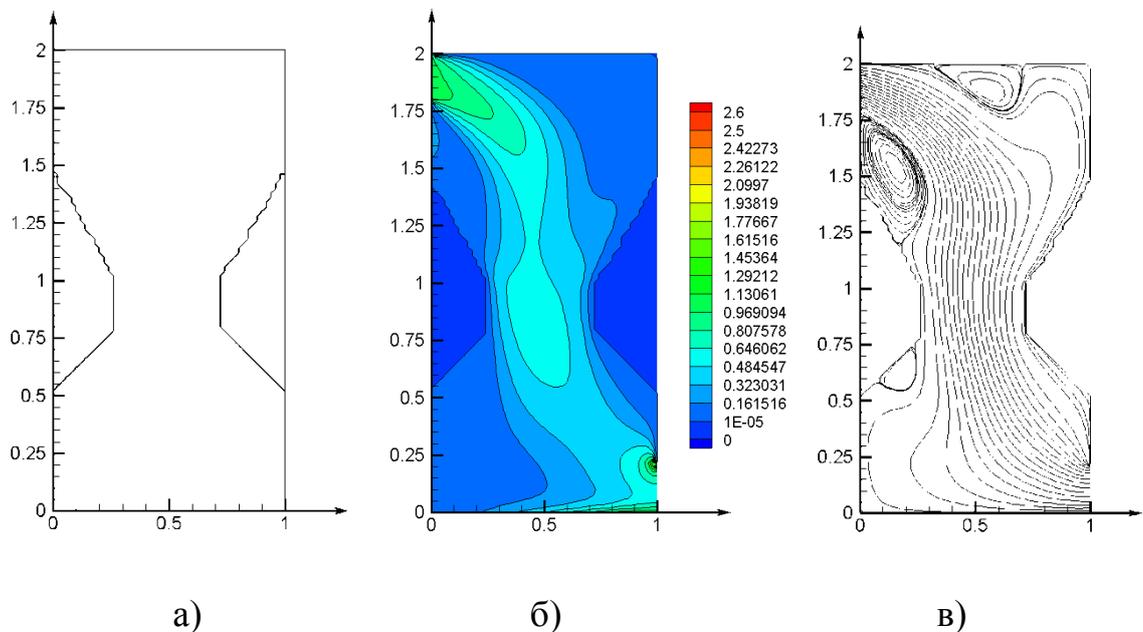
$$u^{n+1}(1, y) = u^{n+1}(1 - \Delta x, y), v^{n+1} = 0, \psi^{n+1}(1, y) = \psi^{n+1}(1 - \Delta x, y)$$

$$\text{при } x = 1, \quad 0 \leq y \leq 0.2;$$

$$u^{n+1} = 0, v_{i,1/2}^{n+1} = 0, \psi^{n+1} = \psi^{n+1}(0, 2) \quad \text{при } x = 1, \quad 0.2 \leq y \leq 2;$$

$$u^{n+1} = 0, v_{i,1/2}^{n+1} = 0, \psi^{n+1} = \psi^{n+1}(0, 2) \quad \text{при } 0 \leq x \leq 1, \quad y = 2.$$

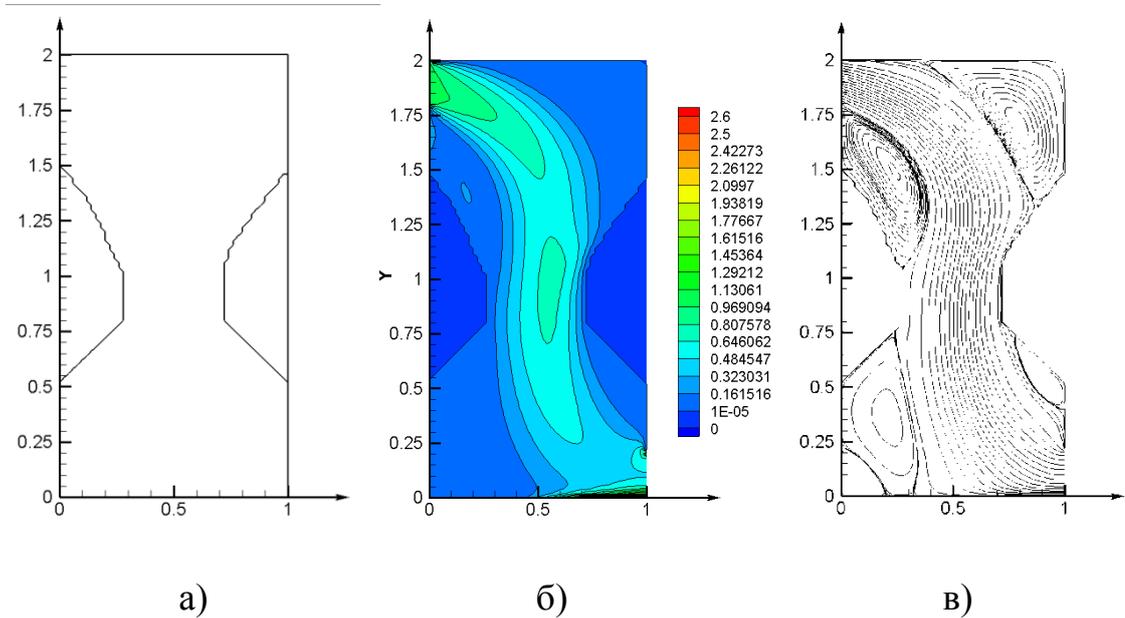
На рисунках 2.2-2.5 представлены формы расчетной области, модули скорости и изолинии функции тока. На рисунке 2.2 представлены результаты установившихся течения дымовых газов при исходной форме ТКВ, где хорошо видны модуль скорости и вихревые движения.



а) исходная форма ТКВ; б) модуль скорости газа; в) изолинии функции тока

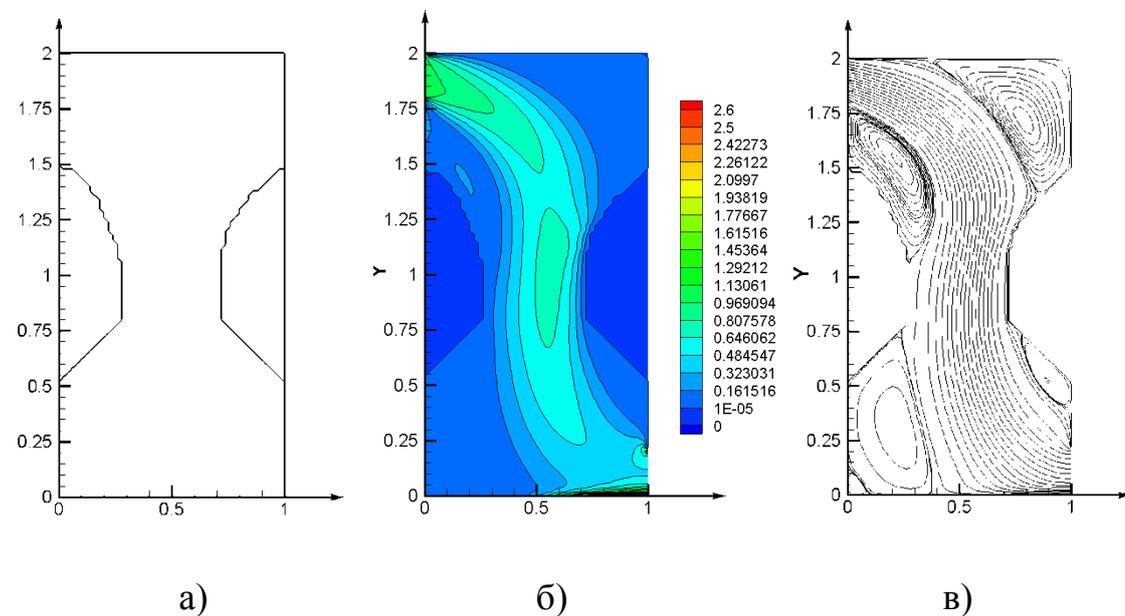
Рисунок 2.2 – Результаты расчетов на исходной форме

На рисунках 2.3 -2.5 так же представлены установившиеся течения скорости при сужениях горловины ТКВ. Из рисунков видно, что при сужении горловины ТКВ возрастает модуль скорости, а также вихревые движения.



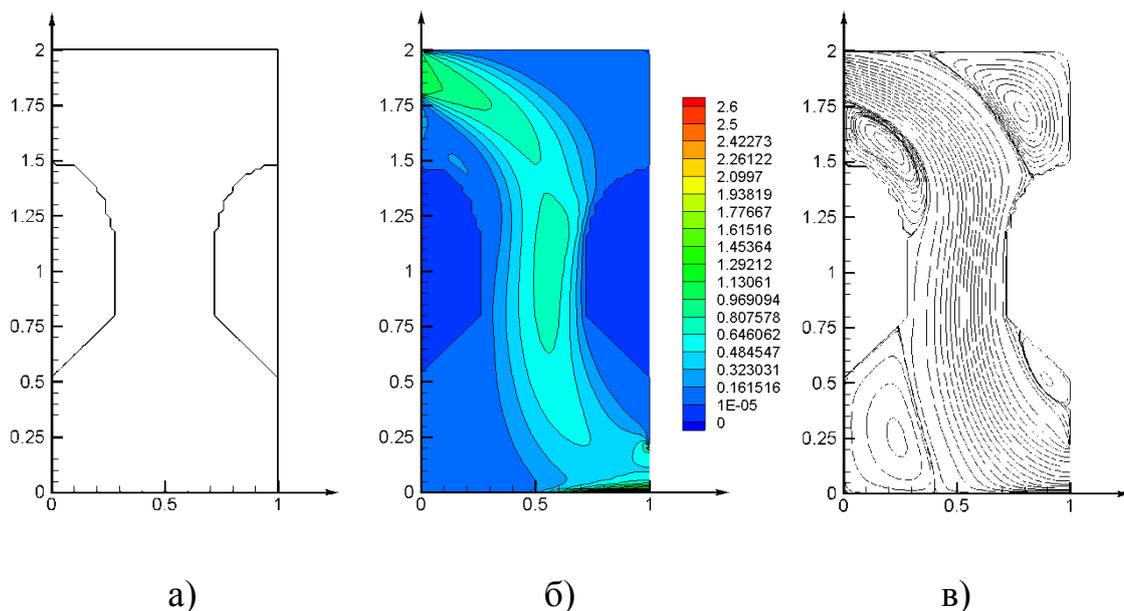
а) исходная форма ТКВ; б) модуль скорости газа; в) изолинии функции тока

Рисунок 2.3 – Результаты расчетов на первом этапе сужения горловины



а) исходная форма ТКВ; б) модуль скорости газа; в) изолинии функции тока

Рисунок 2.4 – Результаты расчетов на втором этапе сужения горловины



а) исходная форма ТКВ; б) модуль скорости газа; в) изолинии функции тока

Рисунок 2.5 – Результаты расчетов на конечном этапе сужения горловины

Эффективность улавливания пыли в скруббере Вентури зависит от большого количества факторов, к числу которых относятся скорость газа в горловине трубы Вентури, удельный расход орошающей жидкости, концентрация и дисперсный состав пыли в газовом потоке, физико-химические свойства пыли и др. Наибольшее влияние на эффективность улавливания оказывают скорость газа в горловине трубы Вентури и величина удельного орошения, увеличение которых повышает эффективность скруббера Вентури. Чем больше скорость газов, тем больше поверхность капель и тем выше степень улавливания.

При скорости дымовых газов в горловине трубы Вентури 60 - 80 м/с и орошении  $0,13 \text{ м}^3$  воды на  $1000 \text{ м}^3$  газа степень очистки газа в аппарате достигает 95-96%, что значительно выше, чем у остальных мокрых золоуловителей.

## 2.2 Математическая модель движения газов в СВС-блоке

В данном подразделе приводится описание математической модели движения вредного вещества в золоулавливателе, содержащем три пористые вставки с различными значениями пористости. Для простоты изложения рассматривается вертикальное сечение области золоулавливателя, показанное на рисунке 2.6.

Предполагается, что вредное вещество подается через входную границу  $A_1B_1$ , движется в направлении оси  $x_1$  и выводится через границу  $C_1D_1$ .

Пусть прямоугольная область  $\Omega = \{(x_1, x_2): 0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2\}$  включает в себя три прямоугольные подобласти:



В теории фильтрации многофазных жидкостей уравнение неразрывности имеет вид [32]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_{\alpha} s_{\alpha}) + \nabla \cdot (\rho_{\alpha} \vec{u}_{\alpha}) = 0, \alpha = \{H, A\},$$

где  $s_{\alpha} = s_{\alpha}(x, t)$  – концентрация фазы  $\alpha$  в смеси. С учетом предположения о несжимаемости фаз и вида функции  $\phi$ , данное уравнение, очевидно, принимает вид

$$\phi(x) \frac{\partial s_{\alpha}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}_{\alpha} = 0, \alpha = \{H, A\}. \quad (18)$$

В силу того, что вредное вещество и воздух полностью заполняют область  $\Omega$ , концентрации  $s_H$  и  $s_A$  удовлетворяют уравнению баланса

$$s_H + s_A = 1. \quad (19)$$

Отсюда, в частности, следует, что в качестве неизвестной концентрации можно принять  $s \equiv s_H$ . Концентрация второй фазы будет определяться из уравнения баланса (19). Далее, при обозначении скорости вредного вещества нижний индекс  $H$  будем также опускать.

Перейдем к описанию начальных и граничных условий. В момент времени  $t = 0$  задается начальное распределение скорости, удовлетворяющее уравнению неразрывности. Концентрация вредных веществ в смеси принимается равной нулю во всей области  $\Omega$ . На входной границе  $A_1B_1$  для первой компоненты скорости  $\vec{u}$  задается значение  $u = U$ , для второй компоненты  $v = 0$ . На выходной границе  $\frac{\partial u}{\partial x_1} = v = 0$ . На частях  $AA_1$  и  $BB_1$  левой границы области, а также на частях  $CC_1$  и  $DD_1$  правой границы принимается  $u = v = 0$ . На верхней  $BC$  и нижней  $AD$  границах области ставятся условия  $u = v = 0$ .

Таким образом, имеем замкнутую систему из шести уравнений для определения скоростей  $\vec{u}_H, \vec{u}_A$ , давлений  $p_H, p_A$  и концентраций  $s_H, s_A$ .

Для численного решения используется метод конечных разностей. В области  $\Omega$  введем прямоугольную разностную сетку  $\Omega_h$  с шагами по пространственным переменным, равным соответственно  $h_1$  и  $h_2$ , а на временном отрезке  $T = [0, t_1]$  введем разбиение  $t^n = n \cdot \tau$ . Для простоты предположим, что границы пористых вставок  $\xi_i$  совпадают с определенными узлами  $\xi_{h,i}$  сеточной области  $\Omega_h$ .

Для расчета неизвестных будем использовать разнесенную сетку, при которой давление и концентрации определяются в центре ячейки, а компоненты скоростей – на ее границах (Рисунок 2.7).

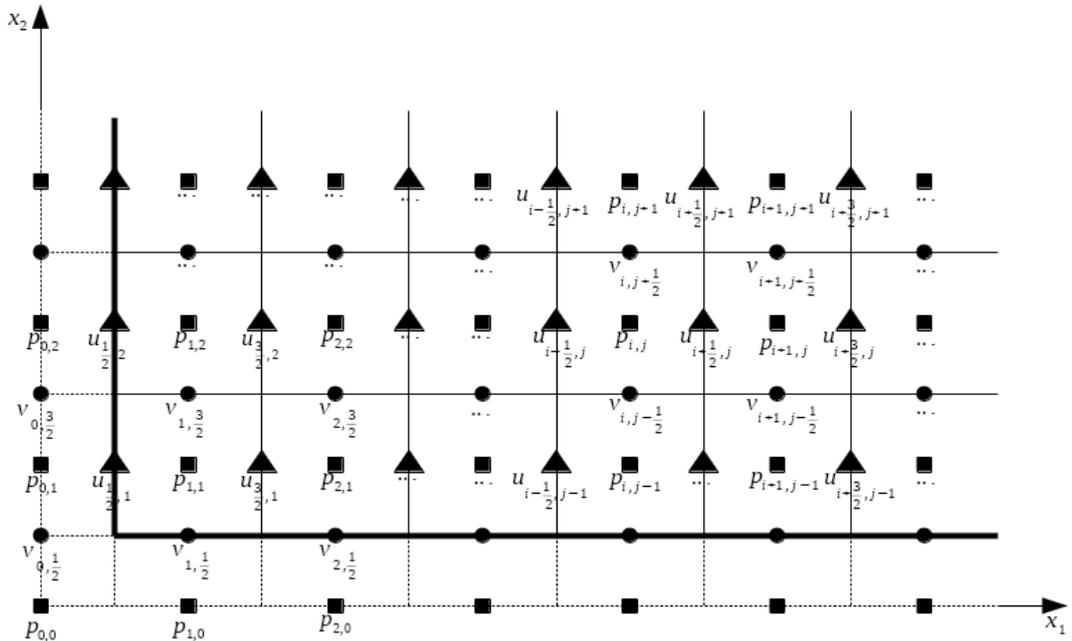


Рисунок 2.7 - Разнесенная сетка

Пусть на  $n$ -м временном слое известны значения скорости  $\vec{u}$ , давления  $p$  и концентрации  $s$ . Тогда для расчета неизвестных функций на  $(n+1)$ -м временном слое используется следующий алгоритм, состоящий из четырех этапов.

На первом этапе предполагая, что движение вредного вещества осуществляется только за счет конвекции и диффузии, находится промежуточное поле скорости  $\vec{u}^{n+\frac{1}{2}}$ :

$$\frac{\vec{u}^{n+\frac{1}{2}} - \vec{u}^n}{\tau} = -(\vec{u}^n \cdot \nabla)\vec{u}^n + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u}^n - k(x)\vec{u}^n. \quad (20)$$

На втором этапе рассчитывается поле давления с использованием поля скорости  $\vec{u}^{n+\frac{1}{2}}$ :

$$\nabla^2 p^{n+1} = f^{n+\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

$$\text{где } f^{n+\frac{1}{2}} = \tau^{-1} \left( \nabla \cdot \vec{u}^{n+\frac{1}{2}} + \phi(x) \frac{\partial s}{\partial t} \right).$$

На третьем этапе предполагается, что движение осуществляется только за счет градиента давления:

$$\frac{\bar{\mathbf{u}}^{n+1} - \bar{\mathbf{u}}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = -\nabla p^{n+1}. \quad (22)$$

На четвертом этапе по известным значениям скорости на  $(n+1)$ -м временном слое рассчитывается концентрация вредного вещества:

$$\frac{s^{n+1} - s^n}{\tau} = -\frac{1}{\phi_{i,j}} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^{n+1}.$$

Приведем более подробно разностные уравнения, соответствующие каждому из четырех этапов. На первом этапе первая компонента вспомогательного поля скорости  $\mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}$  рассчитывается согласно следующей формуле:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = & \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n - \frac{\tau}{2h_1} \left[ \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n - \left| \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right) \left( \mathbf{u}_{i+\frac{3}{2},j}^n - \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) + \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n + \left| \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right) \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n - \mathbf{u}_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) \right] - \\ & - \frac{\tau}{2h_2} \left[ \left( \mathbf{v}_{i+\frac{1}{2},j}^n - \left| \mathbf{v}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right) \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) + \left( \mathbf{v}_{i+\frac{1}{2},j}^n + \left| \mathbf{v}_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right) \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n - \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right) \right] + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re} \cdot h_1^2} \left( \mathbf{u}_{i+\frac{3}{2},j}^n - 2\mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n + \mathbf{u}_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) + \frac{\tau}{\text{Re} \cdot h_2^2} \left( \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - 2\mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n + \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right) - \mathbf{k}_{i+\frac{1}{2},j} \tau \mathbf{u}_{i+\frac{1}{2},j}^n. \end{aligned}$$

Аналогично, для второй компоненты вспомогательного поля скорости  $\mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$  имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = & \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \frac{\tau}{2h_1} \left[ \left( \mathbf{u}_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \left| \mathbf{u}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right| \right) \left( \mathbf{v}_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) + \left( \mathbf{u}_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \left| \mathbf{u}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right| \right) \left( \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \mathbf{v}_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right] - \\ & - \frac{\tau}{2h_2} \left[ \left( \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \left| \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right| \right) \left( \mathbf{v}_{i,j+\frac{3}{2}}^n - \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) + \left( \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \left| \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right| \right) \left( \mathbf{v}_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \mathbf{v}_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) \right] + \end{aligned}$$

$$+ \frac{\tau}{\text{Re} \cdot h_1^2} \left( v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - 2v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n \right) + \frac{\tau}{\text{Re} \cdot h_2^2} \left( v_{i,j+\frac{3}{2}}^n - 2v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) - k_{i,j+\frac{1}{2}} \tau v_{i,j+\frac{1}{2}}^n.$$

Вывод граничных условий для величин  $u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}$  и  $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$  подробно рассмотрен в работе [34]. Значения  $u_{i,j+\frac{1}{2}}^n$  и  $v_{i+\frac{1}{2},j}^n$  определяются как средние значения соответствующих компонент скорости в четырех соседних узлах по формулам

$$u_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{4} \left( u_{i-\frac{1}{2},j}^n + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^n + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n + u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right),$$

$$v_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{4} \left( v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n \right).$$

На втором этапе поле давления определяется согласно методу верхней релаксации:

$$p_{i,j}^{k+1} = \frac{\omega h_1 h_2}{2(h_1 + h_2)} \left[ \frac{1}{h_1^2} \left( p_{i-1,j}^{k+1} + p_{i+1,j}^k \right) + \frac{1}{h_2^2} \left( p_{i,j-1}^{k+1} + p_{i,j+1}^k \right) - \frac{f_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} \right] + (1-\omega) p_{i,j}^k,$$

где верхним индексом  $k$  обозначен номер итерации,  $\omega$  – параметр релаксации.

На третьем этапе находится поле скорости на  $(n+1)$ -м временном слое по формулам

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\tau}{h_1} \left( p_{i+1,j}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1} \right),$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\tau}{h_1} \left( p_{i,j+1}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1} \right).$$

На четвертом этапе определяются значения концентрации  $s$  по найденным значениям скорости:

$$s_{i,j}^{n+1} = s_{i,j}^n - \frac{\tau}{\phi_{i,j} h_1} \left( u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1} \right) - \frac{\tau}{\phi_{i,j} h_2} \left( v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \right).$$

Данный процесс выполняется до достижения неравенства  $|s_{i,j}^{n+1} - s_{i,j}^n| < \varepsilon$  для заданного числа  $\varepsilon > 0$ .

Приведем результаты вычислительных экспериментов для ряда модельных параметров. Размеры области, уравнения модели и входные параметры приведены к безразмерному виду, результаты вычислений также приводятся в безразмерных переменных. Определим функцию  $k(x)$  в виде

$$k(x) = \begin{cases} \frac{150(1-\phi(x))^2 \left(\frac{D}{d_p}\right)^2}{\phi^3(x)}, & x \in \Omega_i, i = \overline{1,3}, \\ 0, & x \in \Omega_0, \end{cases}$$

где  $D$  – диаметр аппарата,  $d_p$  – диаметр пор. Предполагается, что на расстоянии  $x_1 = 0.25$ ,  $x_2 = 0.50$  и  $x_3 = 0.75$  от входной границы расположены пористые вставки с длиной  $l = 0.1$ . Через входную границу подается вредное вещество с безразмерной скоростью  $U = 1$ .

Первый вычислительный эксперимент проведен со следующими значениями пористости:  $\phi_1 = 0.75$ ,  $\phi_2 = 0.60$ ,  $\phi_3 = 0.55$ . Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  приведено на рисунке 2.8.

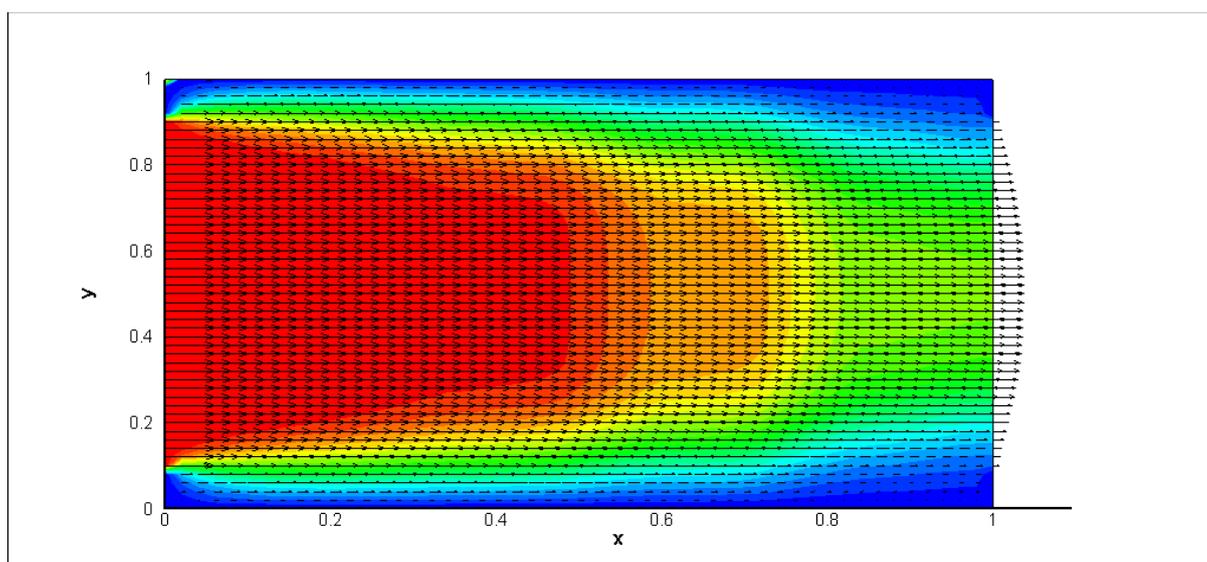


Рисунок 2.8 - Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  для первого вычислительного эксперимента

Результаты вычислений показывают, что внедрение первой пористой вставки со значением пористости  $\phi_1 = 0.75$  влияет на движение вещества незначительно. При прохождении через вторую и третью пористые вставки значения продольной скорости уменьшились на 2.38% и 4.67% соответственно (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Значения продольной составляющей скорости в осевом сечении

$$x_2 = \frac{l_2}{2}$$

Координата	Эксперимент				
	№1	№2	№3	№4	№5
0.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.020000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.040000	1.000000	1.000000	0.999999	0.999999	0.999999
0.060000	1.000000	0.999999	0.999995	0.999998	0.999995
0.080000	0.999999	0.999998	0.999986	0.999995	0.999986
0.100000	0.999997	0.999994	0.999958	0.999984	0.999958
0.120000	0.999991	0.999983	0.999873	0.999954	0.999873
0.140000	0.999972	0.999951	0.999619	0.999861	0.999619
0.160000	0.999917	0.999853	0.998858	0.999584	0.998858
0.180000	0.999751	0.999560	0.996576	0.998753	0.996576
0.200000	0.999256	0.998683	0.989748	0.996263	0.989748
0.220000	0.997774	0.996055	0.969406	0.988813	0.969406
0.240000	0.993334	0.988193	0.909628	0.966632	0.909626
0.260000	0.988906	0.980355	0.850256	0.944533	0.850250
0.280000	0.984516	0.972587	0.791960	0.922674	0.791941
0.300000	0.980239	0.965027	0.736371	0.901491	0.736322
0.320000	0.976297	0.958076	0.687293	0.882190	0.687169
0.340000	0.973348	0.952902	0.653248	0.868058	0.652943
0.360000	0.973326	0.952882	0.653143	0.867988	0.652405
0.380000	0.973278	0.952845	0.652940	0.867819	0.651206
0.400000	0.973159	0.952762	0.652526	0.867388	0.648502
0.420000	0.972840	0.952550	0.651641	0.866247	0.642364
0.440000	0.971937	0.951974	0.649693	0.863179	0.628441
0.460000	0.969324	0.950347	0.645327	0.854873	0.597145
0.480000	0.961700	0.945687	0.635469	0.832445	0.528641
0.500000	0.939478	0.932282	0.613260	0.772771	0.387911
0.520000	0.917337	0.918917	0.591282	0.713721	0.269133
0.540000	0.895441	0.905682	0.569855	0.656170	0.177460
0.560000	0.874242	0.892831	0.549654	0.602010	0.113331
0.580000	0.854965	0.881061	0.532063	0.555100	0.073074
0.600000	0.840876	0.872289	0.519873	0.522983	0.051736
0.620000	0.840643	0.871738	0.518703	0.520349	0.045791
0.640000	0.840222	0.870433	0.517063	0.515370	0.039467
0.660000	0.839327	0.867092	0.514683	0.505751	0.032824
0.680000	0.837194	0.858228	0.511099	0.487015	0.025922
0.700000	0.831790	0.834464	0.505503	0.450780	0.018824
0.720000	0.817738	0.771407	0.496471	0.382779	0.011588
0.740000	0.781095	0.611499	0.481482	0.263722	0.004268
0.760000	0.744690	0.462888	0.463736	0.171797	0.001566
0.780000	0.708944	0.333448	0.442400	0.107049	0.000574
0.800000	0.674855	0.230789	0.416659	0.065186	0.000211
0.820000	0.644699	0.159252	0.385989	0.040351	0.000080
0.840000	0.623514	0.119386	0.350581	0.027537	0.000036
0.860000	0.622370	0.111209	0.311894	0.023720	0.000031

Координата	Эксперимент				
	№1	№2	№3	№4	№5
0.880000	0.620951	0.102568	0.268189	0.020228	0.000027
0.900000	0.619212	0.093949	0.222502	0.017174	0.000024
0.920000	0.617144	0.085921	0.179003	0.014645	0.000021
0.940000	0.614825	0.079087	0.142040	0.012701	0.000019
0.960000	0.612509	0.074029	0.115144	0.011382	0.000017
0.980000	0.610777	0.071274	0.100725	0.010714	0.000016
1.000000	0.610777	0.071274	0.100725	0.010714	0.000016

На рисунке 2.9 приведены сравнительные значения концентрации вредного вещества в вертикальном сечении через ось симметрии через равные промежутки времени  $t = 500\tau$ ,  $t = 1000\tau$ ,  $t = 1500\tau$ ,  $t = 2000\tau$ ,  $t = 2500\tau$ ,  $t = 3000\tau$ . Из графика следует, что пористые вставки препятствуют продвижению вредного вещества вдоль золоулавливателя, причем на вставку со значением пористости  $\phi_3 = 0.55$  приходится наибольшее значение концентрации.

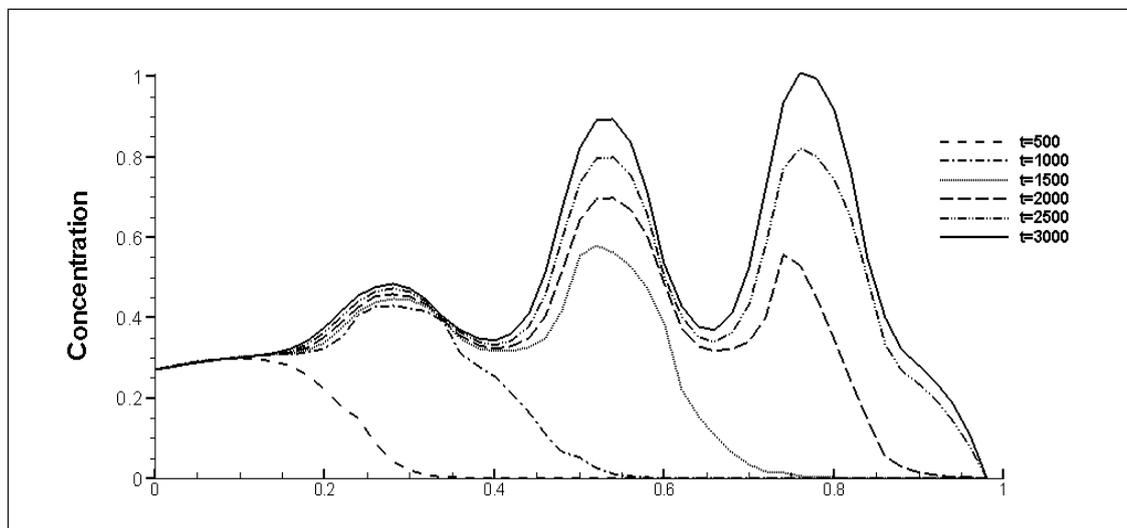


Рисунок 2.9 - Распределение концентрации вредного вещества при  $t = 3000\tau$  для первого вычислительного эксперимента

Второй вычислительный эксперимент проведен со следующими значениями пористости:  $\phi_1 = 0.7$ ,  $\phi_2 = 0.65$ ,  $\phi_3 = 0.4$ . Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  приведено на рисунке 2.10. На рисунке 2.11 приведены значения концентрации вредного вещества через равные промежутки времени в вертикальном сечении через ось симметрии. Из графика следует, что в конечный момент времени в третьей вставке со значением пористости  $\phi_3 = 0.4$  содержится наибольшая концентрация вредного вещества.

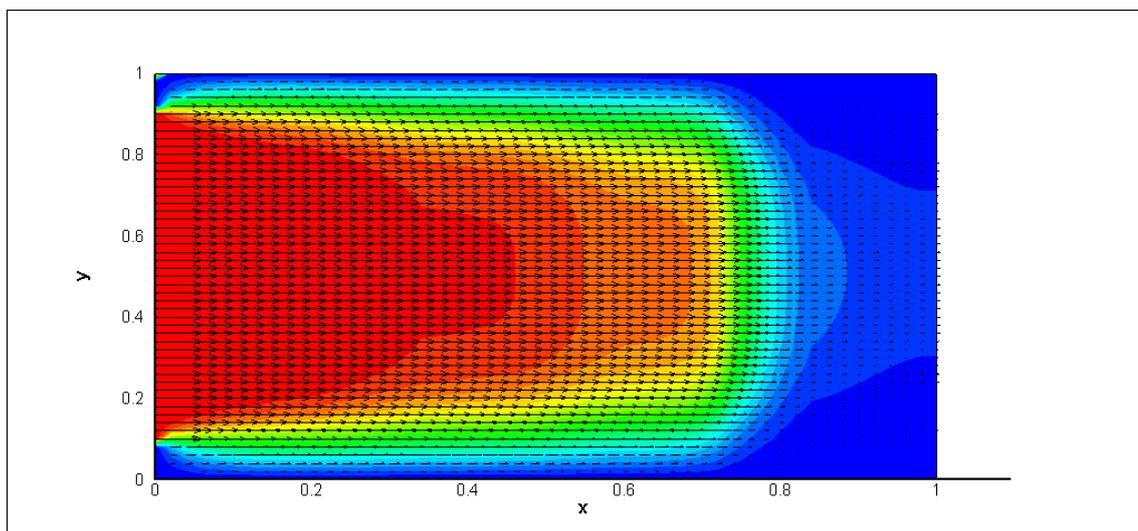


Рисунок 2.10 - Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  для второго вычислительного эксперимента

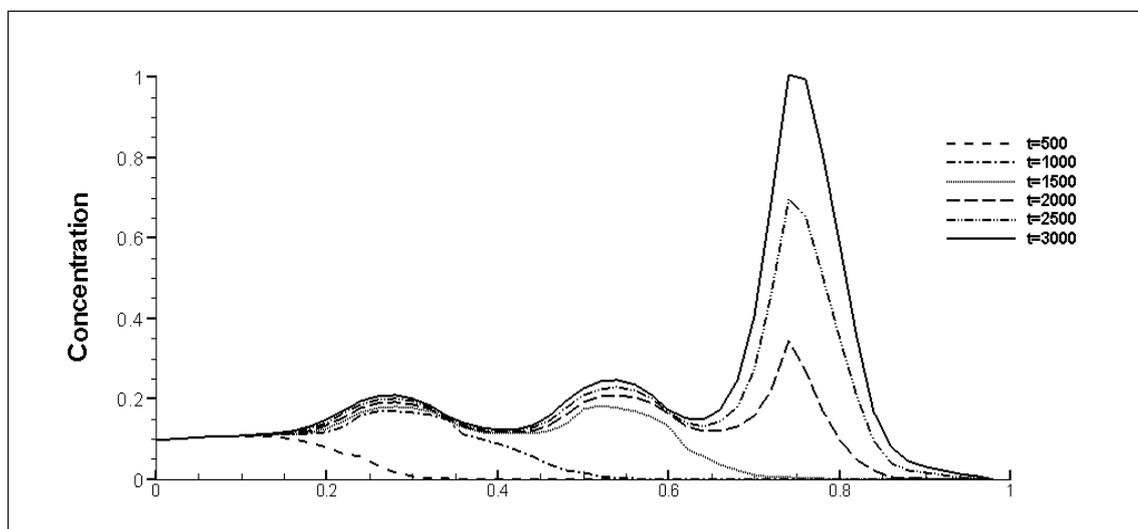


Рисунок 2.11 - Распределение концентрации вредного вещества при  $t = 3000\tau$  для второго вычислительного эксперимента

Третий вычислительный эксперимент проведен со следующими значениями пористости:  $\phi_1 = 0.5$ ,  $\phi_2 = 0.6$ ,  $\phi_3 = 0.7$ . Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  приведено на рисунке 2.12.

На рисунке 2.13 приведены значения концентрации вредного вещества через равные промежутки времени в вертикальном сечении через ось симметрии. Из графика следует, что в конечный момент времени в первой вставке со значением пористости  $\phi_3 = 0.5$  содержится наибольшая концентрация вредного вещества.

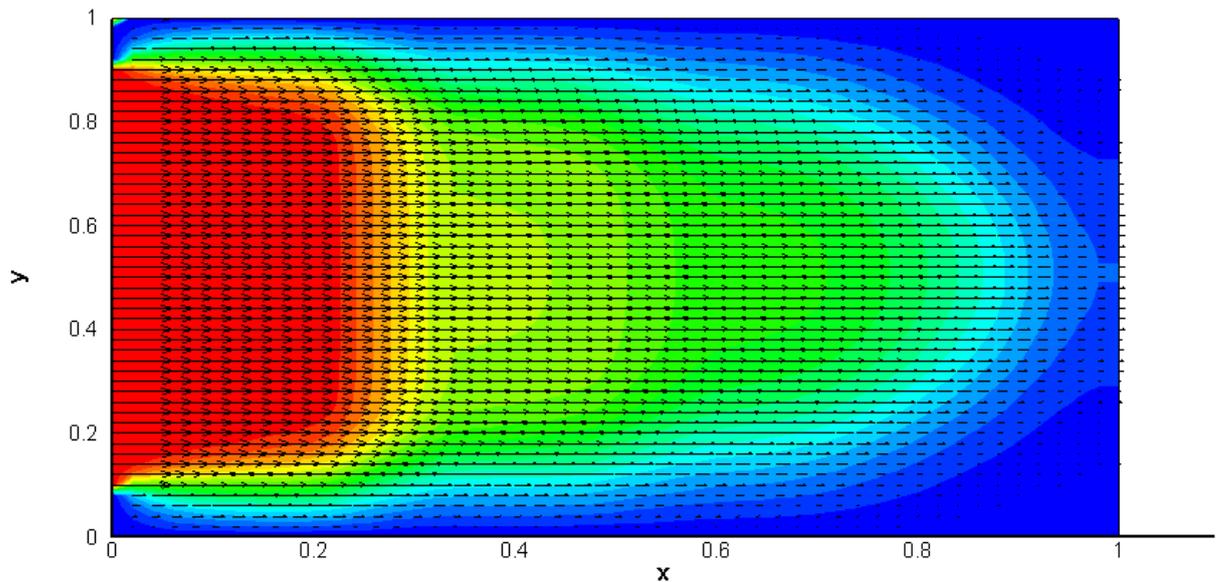


Рисунок 2.12 - Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  для третьего вычислительного эксперимента

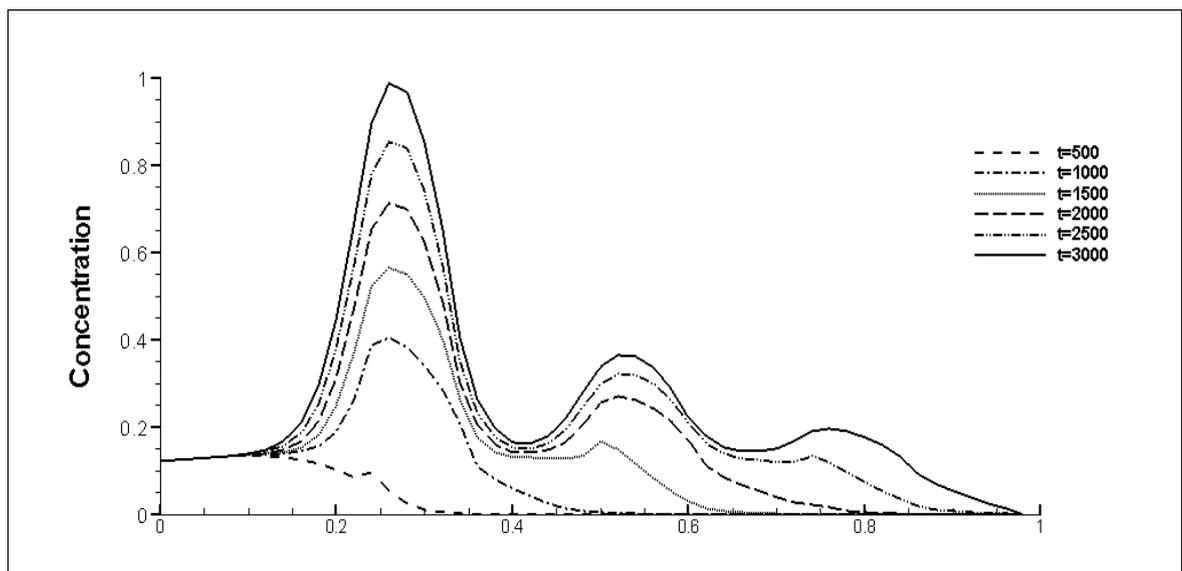


Рисунок 2.13 - Распределение концентрации вредного вещества при  $t = 3000\tau$  для третьего вычислительного эксперимента

Проследим динамику изменения концентрации при уменьшении значений пористости. На рисунках 2.14 и 2.15 приведены распределения концентрации при значениях пористости, соответственно,  $\phi_1 = 0.6$ ,  $\phi_2 = 0.5$ ,  $\phi_3 = 0.4$  и  $\phi_1 = 0.5$ ,  $\phi_2 = 0.4$ ,  $\phi_3 = 0.3$ .

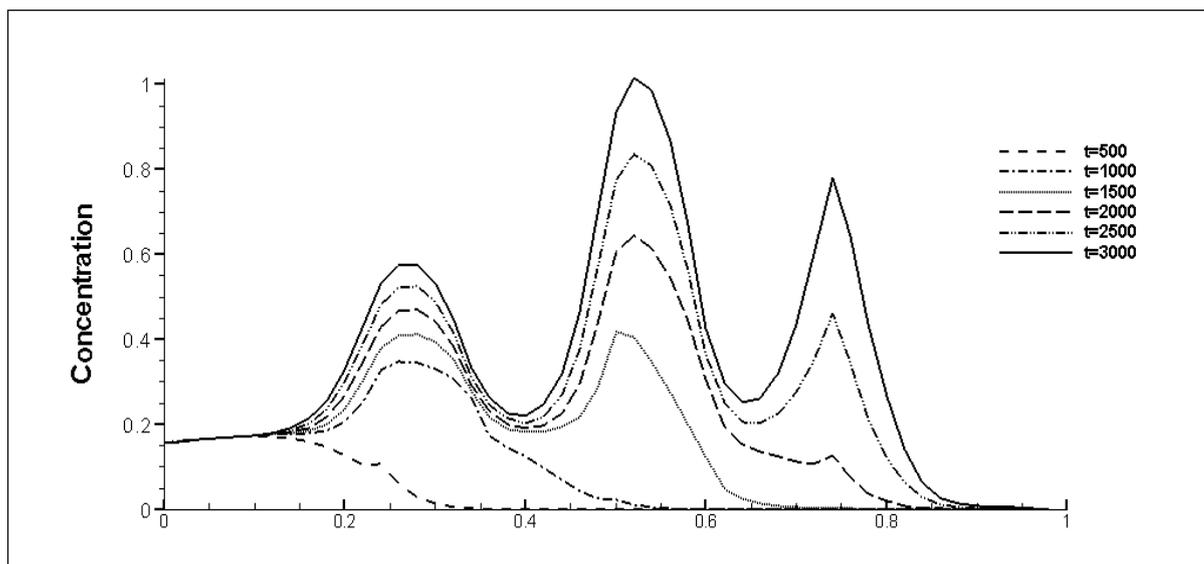


Рисунок 2.14 - Распределение концентрации вредного вещества при  $t = 3000\tau$  для четвертого вычислительного эксперимента

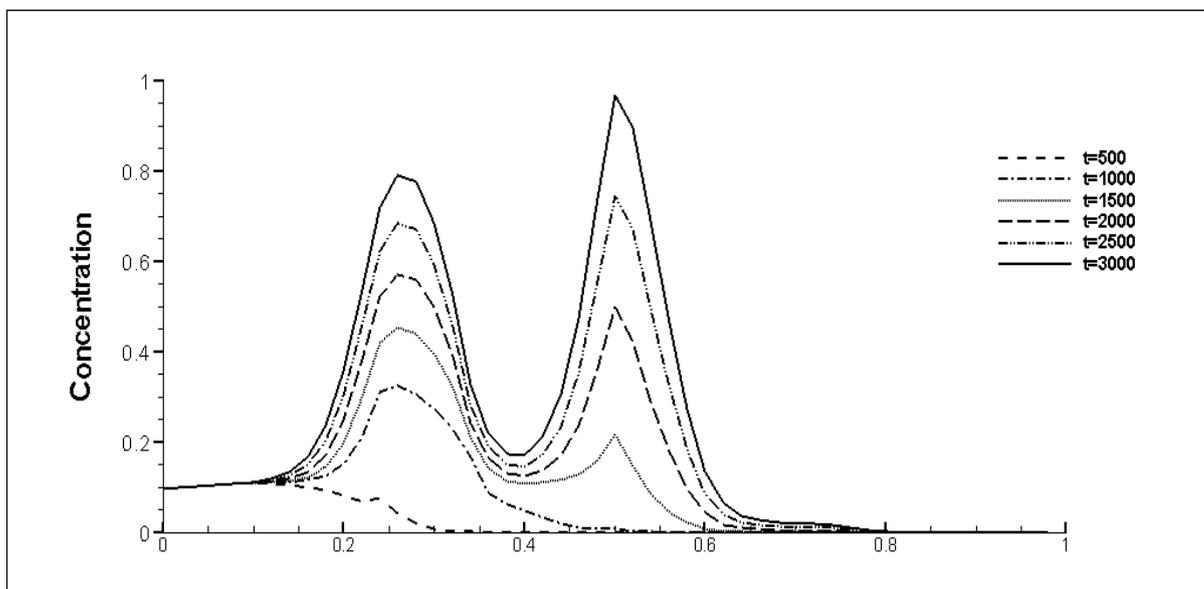


Рисунок 2.15 - Распределение концентрации вредного вещества при  $t = 3000\tau$  для пятого вычислительного эксперимента

Однако, при выборе последнего поперечная скорость движения существенно снижается в области второй пористой вставки (рисунок 2.16).

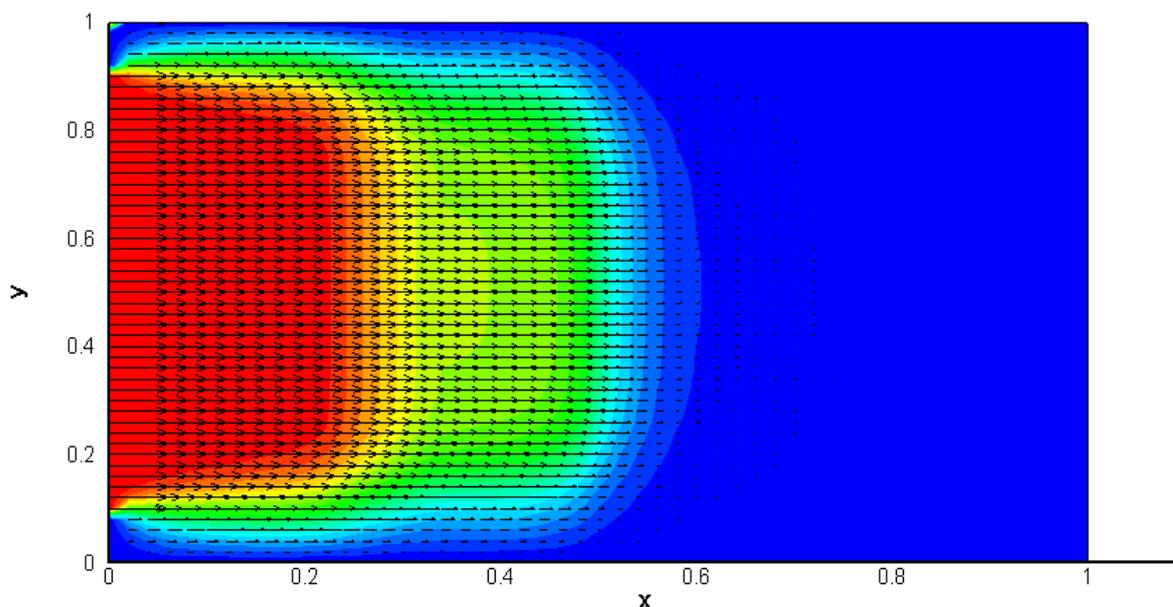


Рисунок 2.16 - Распределение скорости при  $t = 3000\tau$  для пятого вычислительного эксперимента

Таким образом, в данном подразделе приведена математическая модель движения вредного вещества через золоулавливатель, состоящая из уравнения движения, уравнения неразрывности, уравнения состояния и уравнения баланса. Для численного решения задачи разработан вычислительный алгоритм, состоящий из четырех этапов. Приведены конечно-разностные уравнения, соответствующие каждому вычислительному этапу. Приведены результаты вычислительные эксперименты для ряда модельных значений пористости. Из результатов вычислительных экспериментов следует, что при уменьшении значения пористости пористая вставка задерживает движение вредного вещества. При этом, при выборе пористости равной 0.3 движение вредного вещества в золоулавливателе практически полностью останавливается.

### 2.3 Методология и алгоритм оценки и выбора каталитических материалов для СВС - фильтров

Вопрос об оценке и выборе каталитических материалов для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания появился в 60-е годы XX века в связи с началом разработки средств снижения загрязнения окружающей среды токсичными веществами. Был проведен ряд исследований при осуществлении выбора противотоксичных мероприятий для двигателей, в качестве критериев использовали: изменение выбросов  $C_xH_y$ , CO,  $NO_x$ , изменение суммарной токсичности, дополнительной массы автомобиля, затрат на производство, эксплуатационных затрат.

При сравнении различных двигателей внутреннего сгорания американскими специалистами устанавливалась система балльной оценки, а в число параметров оценки включались: удовлетворение нормам токсичности; расхода топлива; шумность; безопасность; пусковые качества; технологичность и другие.

Рассматривая задачу выбора материала с позиций материаловедения, необходимо учитывать, в зависимости от назначения материала, его функциональные свойства. Если он не обеспечивает функциональных свойств, его не следует рассматривать далее, как конкурентоспособный. Поэтому методология должна выводить в число сравниваемых только функционально-конкурентные материалы, а далее сужать перечень сравниваемых.

Исходя из положений системного анализа, был разработан метод оценки и выбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов, базирующийся на теории логики оценок и исследования операций, сформированы требования к оценке, соблюдение которых дает возможность использовать в различных отраслях знаний квалиметрический метод [48]. Требования представляют собой следующие:

«1. Всесторонность, т.е. возможность учета всех характеристик материалов, как тех, которые поддаются физическим измерениям, так и тех, которые считаются неизмеримыми.

2. Критичность и чувствительность общей оценки к изменению любого единичного критерия оценки и выбора материала.

3. Монотонность, т.е. плавное изменение значения любого из критериев должно приводить к монотонному изменению значения общей оценки.

4. Объективность, т.е. обеспечение решающего значения оценок, характеризующих снижение вредных выбросов при очистке газов в нейтрализаторах.

5. Безошибочность, т.е. максимальное уменьшение вероятности того, что может быть выбран не лучший вариант или выделены не лучшие варианты из рассматриваемых.

6. Доказательность, т.е. методология и результаты оценок на всех этапах их получения должны базироваться на данных об испытаниях, должна существовать система доказательств и обоснование процедур получения оценок.»

Данные требования были использованы при решении задач оценки и выбора каталитических материалов.

Оценка и выбор каталитических материалов для использования в нейтрализаторах отработавших газов предусматривает сбор сведений по важнейшим показателям, определяющим круг критериев оценки в зависимости от требований, предъявляемых к системам очистки Правилом 49(05) ЕЭК ООН, которые сводятся к следующим:

– каталитические материалы должны иметь высокую пористость, проницаемость, извилистость пор и не создавать противодавлений свыше 0,1 МПа;

- должны иметь развитую удельную поверхность свыше  $1 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;
- должны иметь диапазоны рабочих температур в пределах 380...950 К;
- должны иметь стойкость к агрессивным средам;
- должны обладать фильтрующими свойствами и удерживать не менее 90 % твердых частиц с размерами не менее 3 мкм;
- должны обладать вибростойкостью и выдерживать колебания до 150 Гц с частотами;
- должны выдерживать удары;
- должны обеспечивать отсутствие износа катализаторов и частиц носителей;
- должны обладать основными функциональными свойствами по очистке отработавших газов: от оксидов азота – не менее чем на 65-75% , оксида углерода – на 80%, углеводородов – на 80%, твердых частиц – на 90%.

На основании требований были сформулированы группы критериев оценки. Основной группой критериев определена вызывающая ингредиентные загрязнения, вызванные воздействием совокупности химических веществ, количественно и качественно чуждых естественным биоценозам. Ввиду того, что законодательствами ведущих промышленных стран и ЕЭК ООН установлены уровни допустимых выбросов, то было определено в качестве критериев использовать уровни превышения норм выбросов оксида углерода (СО), оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), углеводородов ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ), твердых частиц (ТЧ). Дополнительно в число критериев возможно включение уровня выбросов 3,4 бенз- $\alpha$ -пирена (БАП) или (ПАУ).

Практически во всех описаниях систем каталитической очистки отработавших газов отсутствуют сведения о воздействии на шум и вибрацию. Это обстоятельство не дает возможности проведения сравнений по шумовым и вибрационным критериям.

Влияние каталитической очистки отработавших газов на тепловые выбросы дизелей практически отсутствуют. Поэтому в состав экологических критериев параметры теплового излучения и тепловых выбросов включать нецелесообразно.

В результате отбора критериев по оценке способов повышения эффективности каталитической очистки отработавших газов дизелей сложилась система, представленная на рисунке 2.17.

Разработаны группы критериев, в том числе функциональных, структурно-физических, эксплуатационных, технологических, ресурсно-технологических.

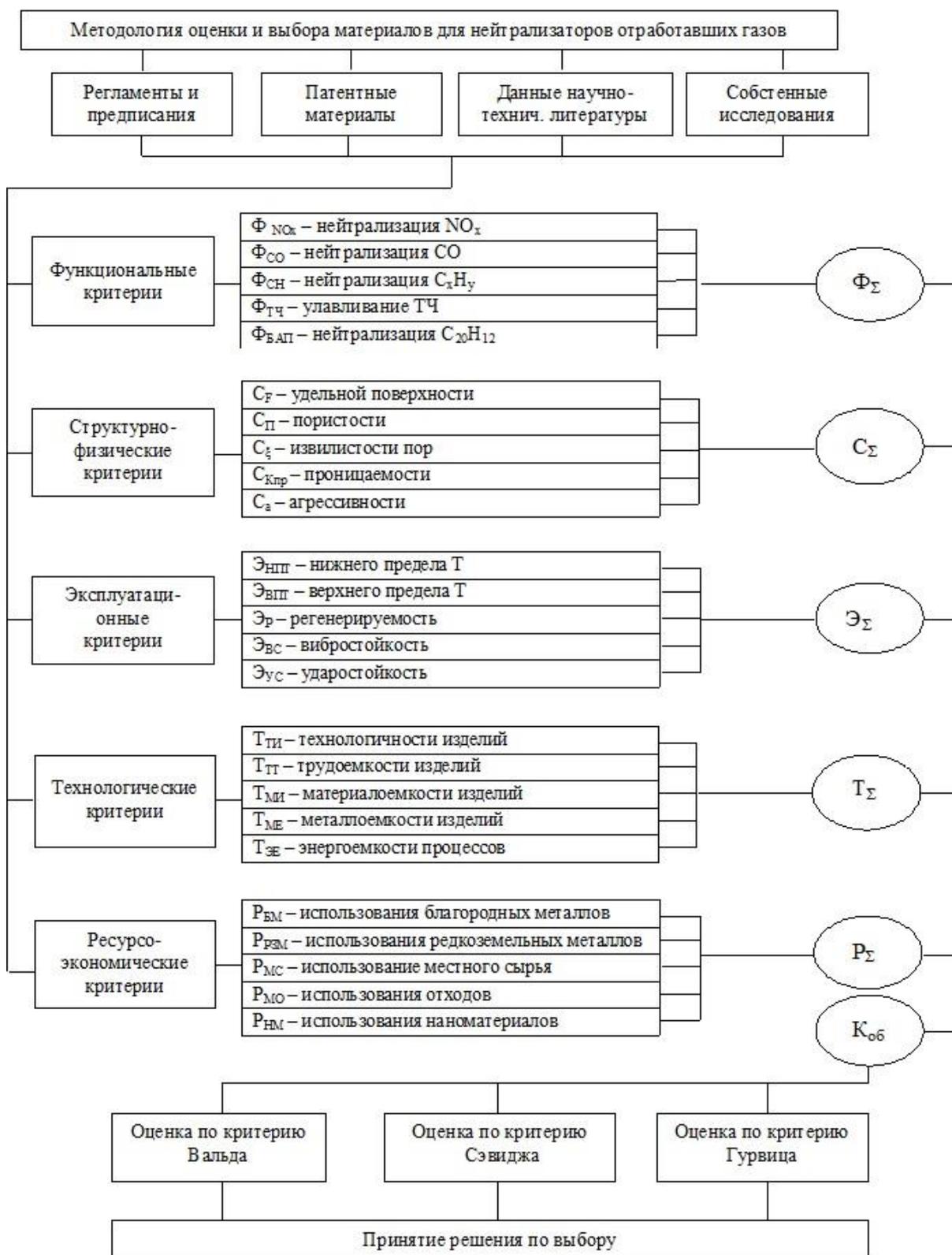


Рисунок 2.17 – Методология оценки и выбора материалов

Группы критериев были представлены в следующем виде:

1. Функциональные: обеспечения нейтрализации оксидов азота –  $\Phi_{NO_x}$ ; обеспечения нейтрализации оксида углерода –  $\Phi_{CO}$ ; обеспечения нейтрализации

углеводородов (суммарно) –  $\Phi_{CH}$ ; обеспечения улавливания твердых частиц –  $\Phi_{ТЧ}$ .

2. Структурно-физические: развитости удельной поверхности материала –  $C_{УП}$ ; пористости материала –  $C_{ПМ}$ ; проницаемости материала –  $C_{П}$ ; извилистости пор в материале –  $C_{ИП}$ ; температуростойкости материала –  $C_{ТС}$ .

3. Эксплуатационные: нижнего предела рабочих температур –  $\mathcal{E}_{НП}$ ; верхнего предела рабочих температур –  $\mathcal{E}_{ВП}$ ; стойкости к агрессивной среде –  $\mathcal{E}_{АС}$ ; вибростойкости –  $\mathcal{E}_{ВС}$ ; ударостойкости –  $\mathcal{E}_{УС}$ .

4. Технологические: технологичности изделий –  $T_{ТИ}$ ; трудоемкости изделий –  $T_{ТТ}$ ; материалоемкости изделий –  $T_{МС}$ ; металлоемкости изделий –  $T_{МЕ}$ ; энергоемкости процессов –  $T_{ЭЕ}$ .

5. Ресурсно-технологические: использования благородных металлов –  $P_{БМ}$ ; использования редкоземельных металлов –  $P_{РЗМ}$ ; использования местного сырья –  $P_{МС}$ ; использования отходов металлообработки –  $P_{МО}$ ; использования наноматериалов –  $P_{НМ}$ .

Используя результаты оценок по опубликованным данным собственных исследований, экспертных оценок, обобщенный критерий оценки и выбора материалов, а также метод теории операций и математической логики, разработан алгоритм расчета. Алгоритм решения задач оценки и выбора каталитических материалов для очистки газов представляет собой последовательность и содержание действий, которые выглядят следующим образом[48]:

1. Отбираются характеристики известных материалов, используемых в устройствах для очистки газов.

2. Определяются критерии оценки материалов и отбираются наиболее значимые и определяющие.

3. Критерии разбиваются на группы.

4. Путем экспертных оценок определяются веса критериев в зависимости от выбранной системы оценки.

5. На основании характеристик по пункту 1 все отобранные виды материалов ранжируются по каждому из выбранных критериев.

6. Производится приведение критериев путем умножения их на значения весомости.

7. Для каждого из сравниваемых материалов находятся произведения приведенных критериев.

8. Вычисляются значения среднего геометрического из произведений приведенных критериев и получают приведенные значения обобщенного критерия.

9. Производится оценка по максимальному критерию Вальда.

10. Производится оценка по минимальному критерию Сэвиджа.

11. Производится оценка по критерию пессимизма – оптимизма Гурвица.

12. Данные оценок по пунктам 8-11 сравниваются и принимаются решения, которые, в свою очередь, ранжируются.

Таким образом, определяются базовые решения для улучшения материалов и технологий. Значения обобщенного критерия рассчитываются по выражению

$$K_{об} = \left( \prod_{i=1}^{\xi} (a_i \cdot \Phi_i) \cdot \prod_{i=1}^k (b_i \cdot C_i) \cdot \prod_{i=1}^l (d_i \cdot \Theta_i) \cdot \prod_{i=1}^v (q_i \cdot T_i) \cdot \prod_{i=1}^w (z_i \cdot P_i) \right)^{1/x}, \quad (23)$$

где  $a_1, \dots, a_{\xi}$ ;  $b_1, \dots, b_k$ ;  $d_1, \dots, d_l$ ;  $q_1, \dots, q_v$ ;  $z_1, \dots, z_w$  - коэффициенты весомости критериев (рисунок 2.18);  $\xi, k, l, v, w$  - количество оценочных критериев,  $x$  - общее количество критериев.

Объективность результата связана с несколькими критериями. По Рассмотрим критерий Вальда оценка которого гарантирует выигрыш не меньше, чем низший порог:

$$\alpha_v = \max_i \min_j t_{ij}. \quad (24)$$

Расчёт по критерию Сэвиджа показывает выигрышные варианты решений:

$$S_i S = \max_i \min_j r_{ij} \quad (25)$$

Расчёт по критерию Гурвица осуществляется по выражению:

$$H_G = \max \left( \eta \cdot \min_i t_{ij} + (1-\eta) \cdot \max_j t_{ij} \right), \quad (26)$$

где  $\eta$  - коэффициент пессимизма;  $t$  – оценочный показатель.

Воспользоваться описанным методом можно лишь в случаях полноты необходимых данных в научно-технической информации или в случае повторения экспериментальных исследований в целях восполнения необходимых данных. Поэтому было принято решение об использовании метода до и после сравнительных испытаний, проведенных на основании отбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов на основе анализа данных научно-технической литературы и проведенных исследований.

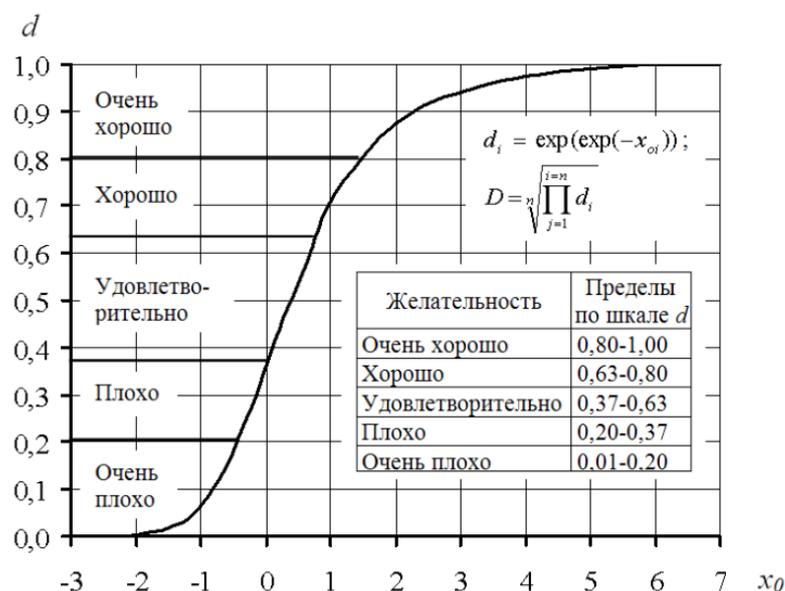


Рисунок 2.18 – Распределение оценок весомости отдельных критериев при оценке и выборе материалов для каталитической очистки газов в условиях неполной определенности

Результаты оценки каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов на основе предложенного метода приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Оценка качеств материалов, используемых для очистки газов от вредных веществ

№	Каталитические материалы	Предпочитаемые материалы
1	Ячеистый кордиеритный материал с пропиткой катализатором	
2	Пористый проницаемый материал (пенаметалл из монеля)	**
3	Спеченная смесь активированных оксидов из РМЗ	
4	Пористый микрокристаллический материал (порошковая металлургия)	****
5	Тугоплавкие неорганические оксиды (спеченные)	***
6	Пористый проницаемый материал на основе пентаоксида Ванадия	
7	Тугоплавкие пористые 3- мерные структуры на основе циркония	
8	Пористые проницаемые металлокерамики на основе столбчатых глин	
9	Композитный материал на основе кордиерита и карбида	*****
10	Пористая проницаемая алюминоникелевая система (спеченная)	
11	Композиты на основе оксидов металлов и Pt	*****
12	Композиты на основе окалины стали(СВС технологии)	*
13	Кварцевое микроволокно с нанесенным катализатором	
14	Минеральное волокно из SiO <sub>2</sub> с покрытием РМЗ и Pt и Pd	
15	Слоистые спеченные минеральные волокна с катализатором	
16	Композиты муллита в термоактивной смоле	

## 2.4 Выводы по разделу

В разделе проведено исследование движение дымовых газов в ТКВ (труба коагулятора Вентури) с изменяемой внутренней геометрией с помощью математической модели вязкой несжимаемой жидкости. Приведено численное решение математической модели вязкой несжимаемой жидкости.

В модели вязкой несжимаемой жидкости уравнения Навье-Стокса, рассматривается в переменных  $(u, v, \psi)$ . Разработана монотонная конечно разностная схема и алгоритм численной реализации уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Получены численные результаты при различных формах ТКВ.

Разработана математическая модель движения вредного вещества в золоуловителе, содержащем три пористые вставки с различными значениями пористости. Для простоты изложения рассматривается вертикальное сечение области золоуловителя.

Приведены методология и алгоритм оценки и выбора каталитических материалов для СВС - фильтров

### 3 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗООЧИСТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВС МАТЕРИАЛОВ

Применение каталитических материалов полученных на основе СВС технологий для очистки выхлопных газов бензиновых и дизельных газов ДВС в последние годы получили широкое распространение. Дымовые газы пылеугольных ТЭЦ по своему составу, концентрации, негативному воздействию на окружающую среду во многом схожи с выхлопными газами ДВС. Поэтому естественно и логична попытка применения СВС фильтров для газоочистки отходящих дымовых газов ТЭЦ. Наши эксперименты на лабораторном стенде АлтГТУ им. И. Ползунова показали, что даже небольшая концентрация твердых частиц, резко ухудшает работу СВС фильтров, снижает их эффективность. В дымовых газах ТЭЦ, особенно пылеугольных, наличие летучей золы «мельчайших твердых частиц» весьма значительна. Избавление от них - дорогостоящая задача, поэтому нами разработан и внедрен целый комплекс мероприятий связанных с пылеулавливанием, недопущением летучей золы к СВС газоуловителям. Этот комплекс включает технологию использующую гибкую конструкцию гидроциклонов, ТКВ и других с изменяемой геометрией. В результате на входе в СВС газоуловитель, мы имеем дымовые газы очищенные от твердых частиц. Труба коагулятор Вентури применяется не только для очистки газов от пыли, но и может быть использован для улавливания наиболее загрязняющего газа, путем орошения в ТКВ пылеугольной смеси не водой, а смесью воды с реагентом в которой этот газ реагирует. Газоуловитель с СВС фильтром улавливает все оставшиеся газы и может дополнительно очищать и от этого наиболее вредного газа улавливаемого в ТКВ.

Сама методология, алгоритм оценки и выбор материалов для СВС фильтров подбор состава таких фильтров приведены ниже.

Алгоритм расчетов с СВС фильтрами включает:

1. В зависимости от состава дымовых газов и их концентрации подбирается состав фильтров предлагаемой нами методике;

2. Сформированные таким образом фильтры моделируются методом ЭГДА (электрогидродинамических аналогий) – определяется физическая составляющая процесса фильтрации (диффузии) газов в пористой среде, определяется время, размеры фильтров и т.д.

3. По методике, используемой в программе «COMSOL» определяется химическая составляющая (характеристики) процесса улавливания газов в зависимости от физических параметров и состава фильтров.

4. После установки фильтра в газоуловитель за счет:

а) контроль на входе и выходе концентрации газов

б) автоматизации процесса газоулавливания (патент на полезную модель №1975. Устройство для очистки газов, Приложение Б), изменения числа работающих фильтров добиваемся допустимой степени улавливания (концентрации) для соответствующего газа.

### 3.1 Описание технологического процесса ГЗУ с использованием гидроциклонов

В настоящее время на ТЭС применяются механическая, гидравлическая, пневматическая и комбинированная системы золошлакоудаления (ЗШУ). При этом в каждой системе, как правило, используются элементы другой. Выбор типа системы ЗШУ определяется при рассмотрении:

- технологических особенностей энергетического производства (вида шлака, выводимого из топки котла);
- способа очистки дымовых газов, расхода и свойств золы и шлака, необходимости использования и наличия достаточного количества воды);
- мест для размещения золошлакохранилища (ЗШХ), их удаленности от промплощадки ТЭС и рельефа местности для транспортирования золошлаков;
- требований по надежности и экономичности работы системы ЗШУ;
- требований природоохранного законодательства при обращении с побочными продуктами (отходами) производства;
- климатических условий, вопросов эксплуатации системы ЗШУ и отдельных ее узлов и др.

Механические системы ЗШУ в настоящее время на мощных ТЭС не применяются. Они используются только в малых котельных.

Гидравлические системы ЗШУ (ГЗУ) получили наиболее широкое распространение на ТЭС. В этих системах чаще всего зола и шлак совместно транспортируются в виде золошлаковой пульпы на ЗШХ. При недостаточности напора багерных насосов, расположенных внутри главного корпуса или на промплощадке ТЭС, сооружаются багерные насосные второго, а может быть, и третьего подъемов по трассе золошлакопроводов между промплощадкой и ЗШХ. В прямоточных схемах водоснабжения систем ГЗУ, характерных для относительно старых ТЭС малой мощности, вода после механического осветления в прудах-отстойниках сбрасывается в естественные водоемы. Повышенное содержание токсичных и радиоактивных веществ в сбросных водах приводит к образованию в водоемах локальных загрязненных зон с неблагоприятными условиями для существования биоты.

В оборотных схемах водоснабжения вода после пруда-осветлителя возвращается на ТЭС для повторного использования. В таких системах ГЗУ осветленная вода поступает в насосную оборотного водоснабжения, откуда по трубопроводам возврата осветленной воды подается к установкам удаления шлака из холодных воронок котлов и в цех золоулавливающих установок. Далее шлаковая и золовая пульпы поступают в багерную насосную станцию, из которой золошлаковая пульпа транспортируется по внешним трубопроводам ГЗУ в ЗШХ. Таким образом, в оборотных схемах водоснабжения вода системы ГЗУ используется в замкнутом цикле.

На некоторых ТЭС осуществляется отгрузка золошлаковой смеси (ЗШС) из отработанных карт ЗШХ в автомобильный и/или железнодорожный транспорт.

Блок-схема системы ЗШУ с обратным водоснабжением и отгрузкой ЗШС из отработанных карт ЗШХ в автомобильный и/или железнодорожный транспорт представлена на рисунке 3.1.

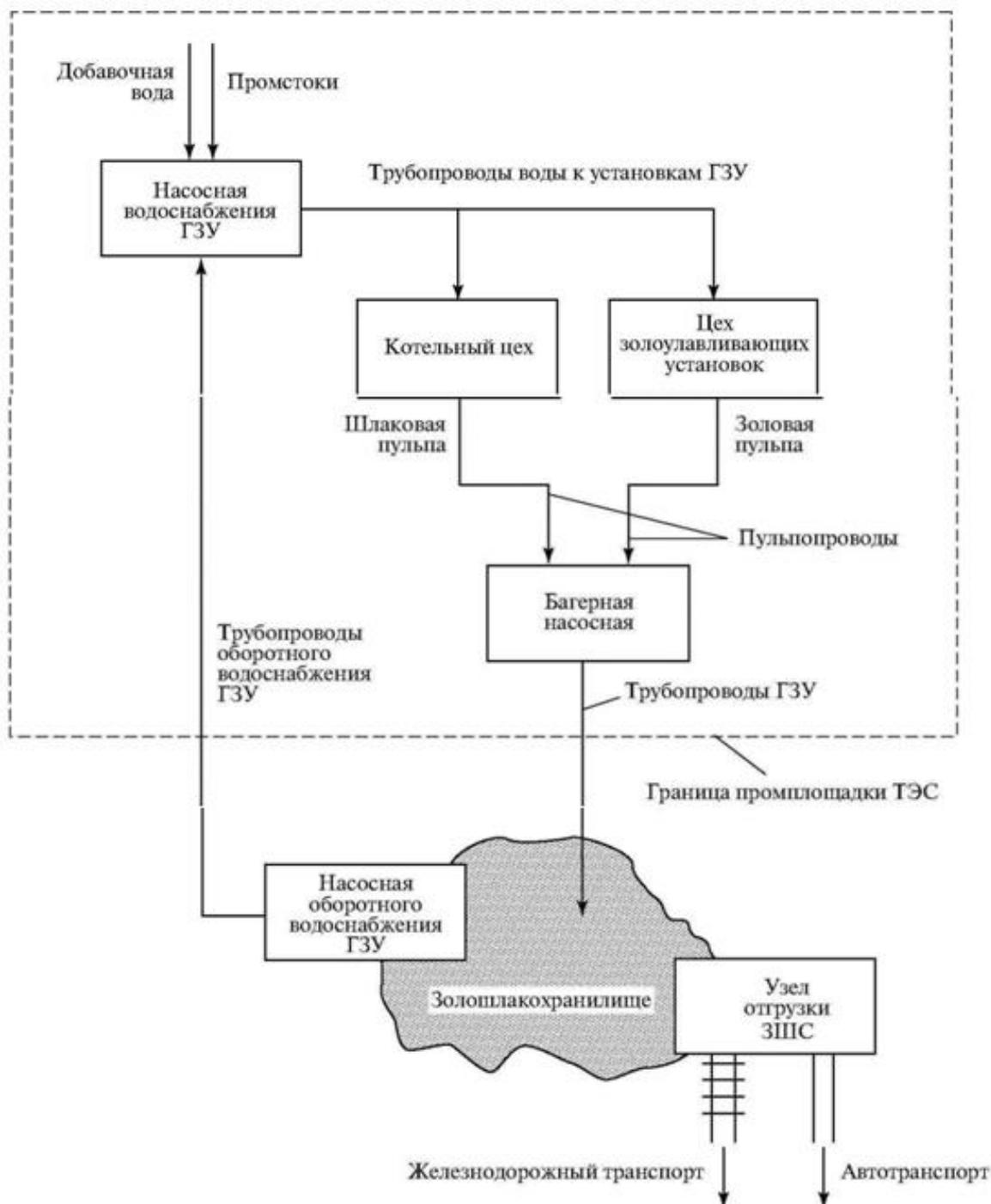


Рисунок 3.1 – Блок-схема традиционной системы гидрозолошлакоудаления ТЭС при совместном транспортировании золы и шлака в гидрозолошлакохранилище и отгрузке золошлаковой смеси из отработанных карт ЗШХ в автомобильный и железнодорожный транспорт

В этой схеме не показаны дополнительные багерные насосные станции, которые сооружаются при недостаточных расходно-напорных характеристиках багерных насосов, расположенных на промплощадке ТЭС. Системы ГЗУ на ТЭС России выполняются преимущественно по схеме совместного удаления золы и шлака. В таком случае организуются отдельные площадки для размещения и отгрузки шлака и золы. Блок-схема системы ГЗУ с отдельным удалением, складированием и отгрузкой золы и шлака представлена на рисунке 3.2.

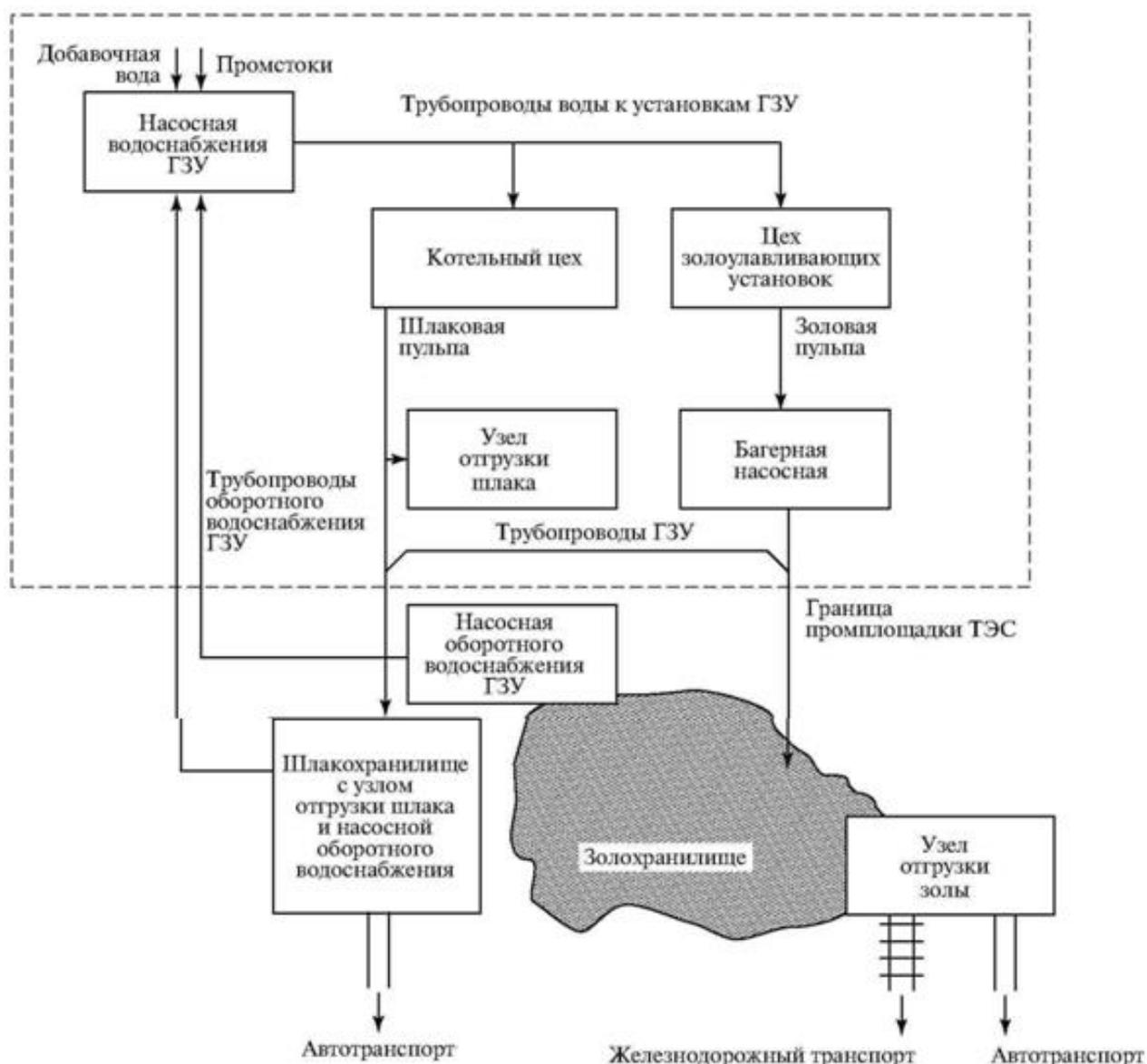


Рисунок 3.2 – Блок-схема системы ГЗУ с отдельным удалением, складированием и отгрузкой золы и шлака

Устройства ЗШУ в основном используются на крупных ТЭС, в которых зола улавливается в электрофильтрах. В 70-х годах XX в. преимущественно на блочных ТЭС Казахстана было начато сооружение установок по отгрузке сухой

зола (УОСЗ) потребителям. Нормами технологического проектирования на ТЭС с сухими золоуловителями предусматривается внутриванционное пневмогидравлическое золоудаление: зола из-под золоуловителей собирается пневмосистемами в промежуточный бункер, а из него транспортируется в УОСЗ по пневмозолопроводам (ПЗП) или при отсутствии потребителей сухой золы поступает вчерез ГЗУ в специальную станцию, откуда совместно со шлаком транспортируется на ЗШХ. Потребителям сухая зола может отгружаться из системы очистки. При этом на ЗШХ также могут сооружаться узлы отгрузки ЗШС потребителям. Блок-схема комбинированной системы ЗШУ с отгрузкой потребителям сухой золы из УОСЗ и ЗШС из ЗШХ представлена на рисунке 3.3.

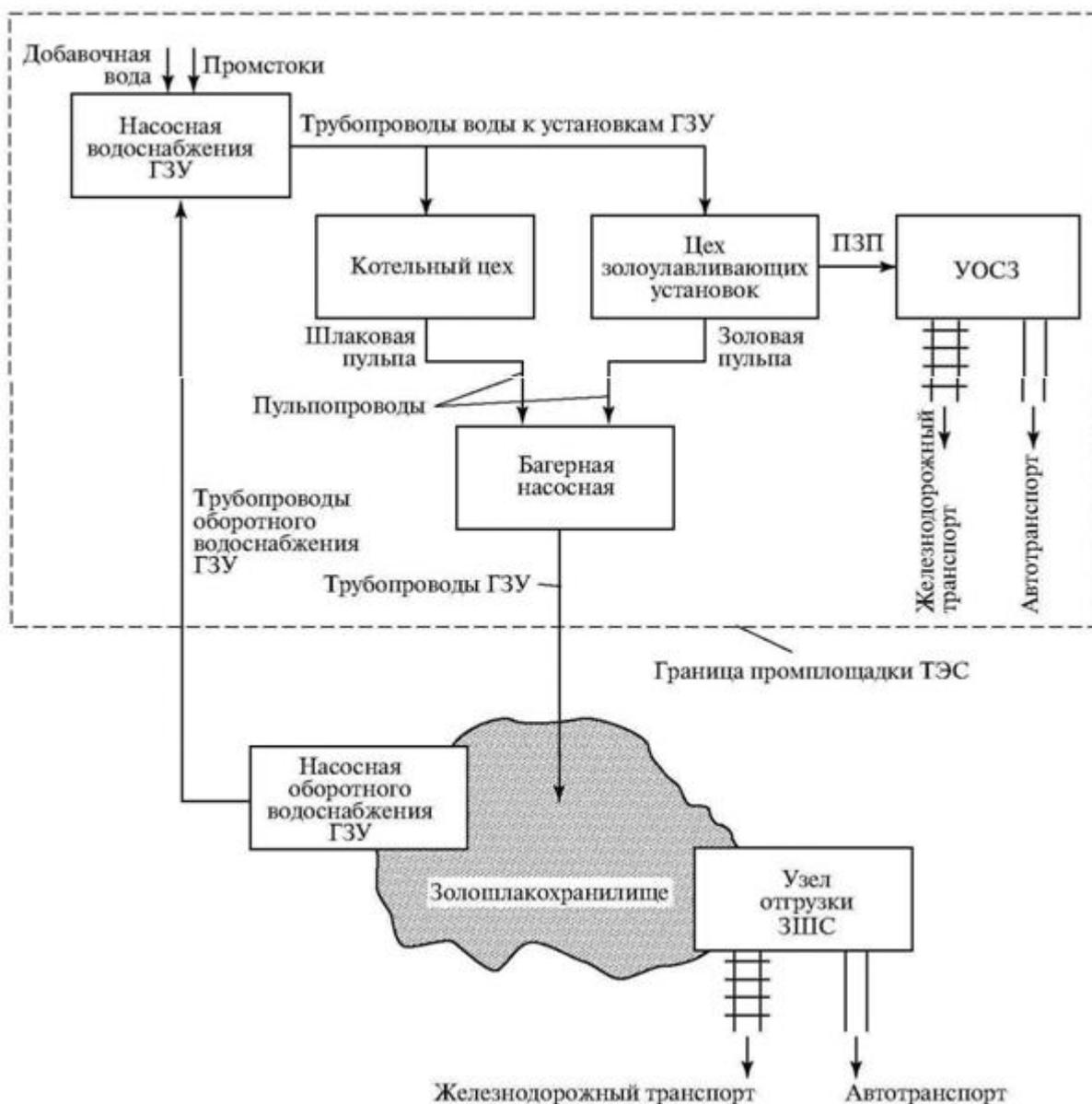


Рисунок 3.3 – Блок-схема комбинированной системы золошлакоудаления с отгрузкой потребителям сухой золы из УОСЗ и золошлаковой смеси из золошлакохранилищ

Характерной чертой любых систем ГЗУ является наличие гидрозолоотвалов и использование воды для внешнего транспорта золошлаков. Использование воды в системах ГЗУ определяет как их достоинства, так и их недостатки.

Широкое распространение систем ГЗУ различных конфигураций объясняется рядом присущих им достоинств:

- возможностью непрерывного удаления большого количества золошлаков на значительные расстояния (до нескольких десятков километров);
- совмещением процессов охлаждения, грануляции и транспортирования шлака;
- возможностью полной механизации всего процесса перемещения и укладки золошлаков в отвал;
- использованием в работе сравнительно простого и надежного оборудования;
- возможностью полной механизации всего процесса перемещения и укладки золошлаков в отвал;
- использованием в работе сравнительно простого и надежного оборудования.

Однако гидрозолошлакоотвалы существенно загрязняют окружающую среду (рисунок 3.4). Кроме того, сочетание рыночных условий экономической деятельности и постоянно ужесточающегося природоохранного законодательства вынуждает более тщательно подходить к эколого-экономической оценке систем ГЗУ.

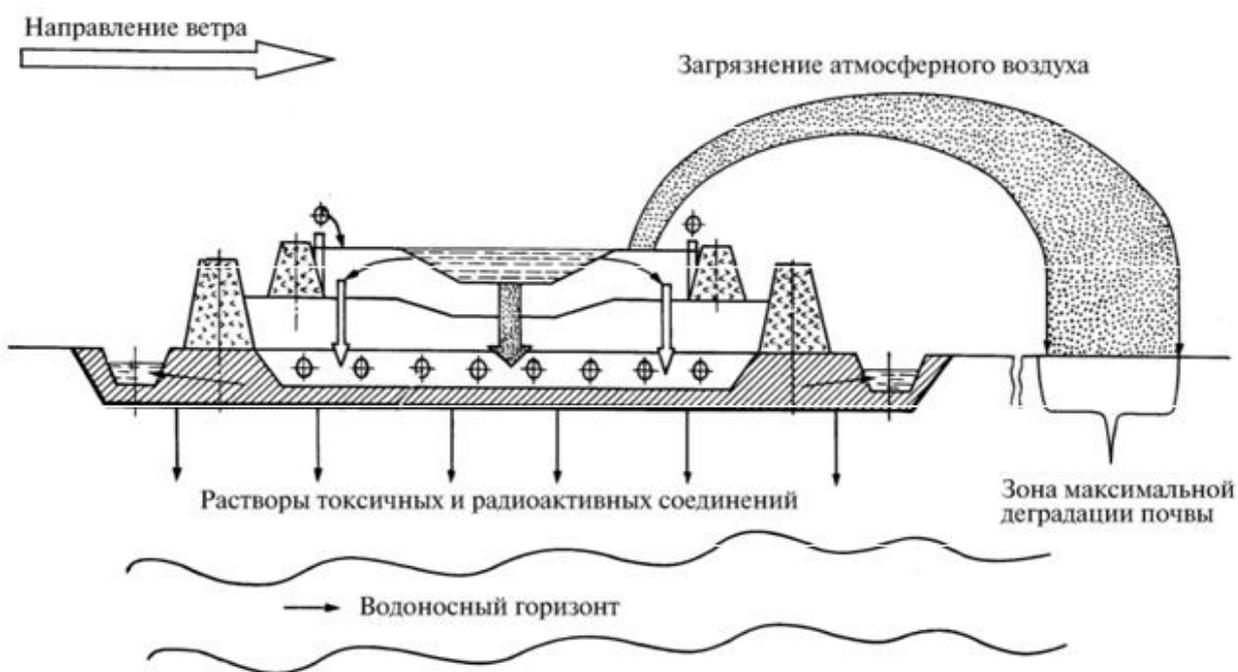


Рисунок 3.4 – Схема загрязнения окружающей среды гидрозолошлакоотвалами

По сравнению с ГЗУ системы пневмозолоудаления (ПЗУ) имеют ряд существенных преимуществ:

- достигнутый уровень надежности современных систем ПЗУ не ниже, а в случае транспортирования высококальциевых зол и выше надежности систем ГЗУ;

- возможность регулирования в широких пределах производительности установок внешнего пневмотранспорта золы;

- технологическая гибкость и адаптируемость в короткие сроки к изменяющимся техническим условиям на поставку золы потребителям без значительных инвестиций;

- неизменность потребительских свойств золы при ее сборе, транспортировании, временном хранении и отгрузке;

- возможность отгрузки сухой золы по группам фракций в зависимости от потребительского спроса.

Системам ПЗУ присущи следующие основные недостатки:

- невозможность транспортирования золы на расстояние более 3 км без промежуточных станций перекачки;

- абразивный износ пневмотранспортного оборудования.

Следует отметить, что технические вопросы по созданию установок внутреннего и внешнего транспорта, а также отгрузки сухой золы потребителям достаточно хорошо проработаны и имеется соответствующий нормативно-технический документ. По вопросам оценки технико-экономических показателей систем ЗШУ с учетом экологических требований тоже существует нормативно-технический документ.

Накоплен и опыт создания и эксплуатации сухих золошлакоотвалов ТЭС Казахстана. Одним из серьезных факторов, имеющих как технологическое, так и психологическое значение для энергетиков Казахстана, препятствующих широкому внедрению экологически и экономически более приемлемых систем ПЗУ взамен систем ГЗУ на ТЭС, являлась необходимость использования воды для эвакуации шлака из холодных воронок котлов. Получалось так, что поскольку использование воды неизбежно для удаления шлака от котлов, то и незачем заниматься созданием систем ПЗУ.

Тем не менее, мировой опыт свидетельствует о том, что с 80-х годов XXв. на ТЭС промышленно развитых стран шлак удаляется с применением технологий без использования воды для его охлаждения и транспортирования [35, 36, 37].

Контроль за получением пульпы заданной консистенции осуществляется с помощью радиометрических плотномеров. Расчет гидротранспортной системы (насос - пульпопровод) выполняется по методике института гидромеханики Академии наук Украины.

Схемой предусматривается две технологические цепочки, каждая из которых при применении коагулянтов и флокулянтов (полиакриламида) обеспечивает сгущение всего объема пульпы.

Это резко повышает надежность и маневренность работы системы ГЗУ по замкнутому циклу.

Для повышения надежной работы замкнутой системы ГЗУ, рассмотрено несколько методов стабилизационной обработки осветленной воды [38].

Для стабилизации может быть предложено известкование с дозой извести 1,5 мг/экв/л.

В случае использования такого метода рекомендуется осуществлять введение известкового молока в приемок багерной насосной станции. В этом случае, вследствие более интенсивного перемешивания и умягчения, стабилизация будет заканчиваться полностью еще до поступления воды в обратный тракт системы ГЗУ.

К тому же данная точка ввода позволит использовать для известкования уже имеющееся реагентное хозяйство.

Однако, как показывает прогноз, известкование практически мало влияет на произведение концентрации  $[Ca^{2+}]$  и  $[SO_4^{2-}]$ , а следовательно, и на скорость образования отложений. Поэтому известкование целесообразно применять при изменении качества золы или качества подпиточной воды.

Эффективно использование флокулянтов типа ПАА или ГПАА, которые обладают также и некоторым стабилизирующим действием (патент №4374733 СА, 1981г.). Однако из-за высокой сорбции на взвешях эффективность их действия резко снижается. Поэтому сфера использования коагулянтов и флокулянтов ограничивается очисткой от взвешенных частиц в радиальных отстойниках.

При использовании коагулянтов для осветления воды, рекомендуется применение  $FeCl_3$ . Ориентировочная рекомендуемая доза  $FeCl_3$ -50-85 мг/л [39].

Дальнейшая доочистка проводится другими методами. При имеющихся концентрациях этих ионов в рассматриваемой системе ГЗУ такой метод не эффективен.

В последнее время освоен выпуск новых высокоэффективных реагентов фосфоросодержащих комплексонов, которые используются для предотвращения образования отложений малорастворимых солей в оборотных системах.

По техническим и экономическим соображениям предпочтительно применение для этих целей ингибитора отложений минеральных солей (ИОМС), выпускаемого Павлодарским химическим заводом по ТУ 6-05-211-1153-83.

Обработка воды ИОМСом обеспечивает снижение скорости образования отложений не менее чем в 10 раз.

Реагент ИОМС выпускается в виде 30% раствора и представляет собой смесь компонентов, содержащую до 90% нитрилотриметилфосфоновой кислоты и около 10% фосфорилированных полиаминов. Имеет рН (6,8±0,2), плотность - 1,3 г/см<sup>3</sup>, температуру замерзания - 30°С, не разлагается до

температуры +160°C, ПДК в водоемах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования - 4 мг/л.

Стабилизирующие свойства ИОМСа проявляются практически при любом качестве воды при нейтральной или щелочной реакции, что соответствует условиям рассматриваемой системы ГЗУ.

Механизм стабилизирующего действия ИОМСа заключается в абсорбации комплексонов на микро зародышах кристаллизирующейся соли, что препятствует дальнейшему росту кристаллов и образованию отложений.

Стабилизирующее действие ограничено во времени: индустриальный период, который зависит от качества воды, концентрации комплексона, условий работы системы и может составлять от нескольких минут до нескольких суток. По окончании индустриального периода минеральные соли выделяются из раствора в виде кристаллов, имеющих пониженную адгезионную способность.

Эффект стабилизации воды достигается при обеспечении постоянной концентрации комплексона в оборотной воде в пределах 1-5 мг/л и карбонатной жесткости не более 7,9 мг/экв/л. До начала стабилизационной обработки воды необходимо, наладить режим подпитки оборотной системы, исключающий резкие изменения расхода воды, что упростит поддержание концентрации комплексона.

Раствор ИОМСа дозируется в резервуары осветленной воды для хранения реагента и приготовления его раствора. В помещении насосной предусматривается склад и дозаторная.

Обработка воды, осветляющейся в радиальных отстойниках, принята полиакриламидом (ПАА). Раствор агента дозируется в распределительную камеру перед отстойниками. Для хранения реагента и приготовления его раствора в помещении насосной станции предусматривается склад и дозаторная.

Для контроля за количеством отложений рекомендуется метод индикаторных пластин по методике УЛТИ.

Пластины устанавливаются: после радиальных отстойников в резервуарах осветленной воды, непосредственно перед скрубберами и после них.

Главный узел, определяющий продуктивность ГЗУ – это отстойник золы пульпы с встроенной ёмкостью флокуляции конструкции «ВНИПИЧерметэнергоочистка». Механическое оборудование радиального отстойника выпускается Иркутским заводом тяжелого машиностроения, т.е. необходимо приобретение в России механического оборудования и специальных устройств для улавливания нефтепродуктов и плавающей пены.

Эта схема обладает патентной чистотой.

Другая рекомендуемая схема предусматривает одностадийное сгущение

Для сгущения можно использовать стандартные гидроциклоны: ГЦ-710А: масса -1076 кг, производительность -120-400 т/час; ПД-500К: масса - 600 кг, производительность - 55-200 т/час.

Можно устанавливать гидроциклон на всасывающей линии центробежного насоса: типа 8К-12 - производительность 61-91,6 л/с; типа 6К-8 - производительность 34-55 л/с.

Однако стандартные конструкции гидроциклонов, решая в принципе задачу осветления воды и сгущения золы и золовой пульпы, обладают недостатками: значительная энергоемкость, быстрый износ стенок корпуса, нерегулярность разделительного процесса и значительный вес. Некоторые из этих недостатков устраняются, если заменить жесткие конструкции на упругие и пластичные. Упругие материалы меньше подвергаются износу, легко изменяют конфигурацию, способствуют уменьшению гидравлического сопротивления и, в конечном счете, резко повышают эффективность гидроциклонов.

Рекомендуется использовать принципиально новые конструкции гидроциклонов с упругими элементами [40]:

- гидроциклон с конической частью, выполненной из эластичного материала. Он закрыт жестким кожухом и имеет регулировочный и сливной патрубки. Путем изменения давления в полости между кожухом и эластичной поверхностью осуществляется управление гидроциклонным процессом;

- гидроциклон с боковыми цилиндрическими поверхностями, выполненными из полого эластичного материала. Регулирование осуществляется изменением формы эластичной поверхности;

- гидроциклон с конической частью, выполненной из полого эластичного материала с регулирующими патрубками;

- гидроциклоны с конической частью, выполненной из эластичного материала, охваченного гибкой спиралью. Регулирование гидроциклона с конической эластичной частью и гибкой спиралью, осуществляется регулировочным штоком;

- регулирование процесса разделения (сгущения) осуществляется штоком, прикрепленным к эластичной донной вставке.

Гидроциклоны с эластичными и гибкими элементами, могут использоваться для эффективного сгущения золошлаковой пульпы и позволяют быстро регулировать процесс сгущения при изменении топлива на ТЭЦ. После багетных станций пульпа через делитель уходит в конусные гидрогрохоты (КГТ-2600, ГТ-2000), в которых происходит выделение и обезвоживание шлака крупностью более 3-5мм из общего потока пульпы. Обезвоженный шлак поступает в бункер, откуда может осуществляться его отгрузка потребителям, либо подача на дробилки с получением дробленого материала класса - 3-5 мм с последующим сбросом в накопитель-перемешиватель сгущенной пульпы. Для дробления рекомендуется дробилки мелкого дробления типа КИД-600, СМС-165. Получение шлака указанного типа необходимо по условиям надежной работы гидротранспортной системы в связи с отсутствием опытных данных по транспортировке сгущенных пульп с крупными включениями шлакового материала. В процессе наладки системы ГЗУ предусматривается проведение таких экспериментов, и при положительном результате (возможности перекачки золовой пульпы с крупными включениями шлака), схемой

предусматривается исключение процесса непрерывного дробления. В этом случае обезвоженный шлак из конических гидрогрохотов через односитовые грохоты, выделяющие наиболее крупные куски шлака, по наклонному трубопроводу напрямую поступает в перемешиватель пульпы. Золовая пульпа, содержащая шлак мелких фракций, поступает в гидроциклоны, где осуществляется ее сгущение до отношения твердого к жидкому  $t:j=1:1/0,8$  (по весу). Зольный осадок перекачивается шлаковым насосом в наполнитель-перемешиватель пульпы, откуда багерными насосами перекачивается в золоотвал. Контроль за получением пульпы заданной консистенции осуществляется непрерывно с помощью радиометрического плотномера 9 марки ПР-1025М.

В натуральных экспериментах сгущение шлака после гидроциклонов обеспечивалось за счет применения автопульсирующего шламового патрубка из эластичной резины. При этом, достигается эффект сгущения  $Z^{\wedge}=70-80\%$ .

Если в процессе наладки системы ГЗУ возникает необходимость дополнительного сгущения (после гидроциклонов) шламового продукта, то возможна установка вертикального цилиндрического сгустителя с осадкоуплотнителем конструкции УкрНИИУглеобогащение. Его размеры определяются расчетом.

Резервуары являются регулирующими емкостями в системе и обеспечивают работу насосов осветленной воды, промывку пульпопроводов, сооружений и оборудования узла сгущения.

Предварительные расчеты показали, что гидрогрохоты и две ступени осветления пульпы гидроциклонами позволяют получить эффект осветления 87%, т.е. слив гидроциклона второй ступени будет содержать 13 г/л мелкодисперсных зольных частиц.

Предлагаемый вариант предусматривает, что отстоявшаяся и умягченная известкованием в резервуарах (регулирующих емкостях) вода обрабатывается также ингибитором минеральных отложений ИОМС-1 с целью ее стабилизации.

Установленные на ТЭЦ мокрые золоуловители типа МС-ВТИ с коагуляторами Вентури щелевого типа, обеспечивают степень золоулавливания 95-96%. Для увеличения эффективности очистки газов не менее чем до 99,2% золоуловители должны быть переведены на интенсивный режим орошения (ИРО), что потребует увеличения расхода воды на орошение коагуляторов Вентури до 2560 м<sup>3</sup>/ч (0,4 л/м) очищаемых газов, и, соответственно, почти двукратного увеличения расхода пульпы.

Золовая пульпа из багерных насосов поступает в гидроциклоны, расположенные между золоуловителями на отметке нижнего фланца не менее +0,3м. В гидроциклонах происходит разделение пульпы - 50% воды и основная часть золы (сгущенная пульпа) по трубопроводам направляются в бункеры имеющих багерных насосных. Остальная часть воды с наиболее мелкими частичками золы (осветленная пульпа) направляются непосредственно в коллекторы верхнего пояса орошения каплеуловителей. Верхний пояс

орошения каплеуловителей должен быть реконструирован для возможности работы осветленной пульпы. Эта реконструкция заключается в увеличении в 1,5-2,0 раза количества смывных сопел и увеличении их внутреннего диаметра до 6 мм. Кроме того, необходима установка на каждом каплеуловителе второго кольцевого коллектора и поворот существующего таким образом, чтобы штуцера для подсоединения сопел были направлены вниз. Сопла подключаются к этим штуцерам резиновыми шлангами через один к каждому из этих коллекторов. Напорные баки аннулируются.

Осветленная пульпа используется также для подачи в шлаковые шахты котлов. Коагуляторы Вентури орошаются осветленной на золоотвале водой. Эта же вода используется на уплотнение подшипников багерных насосов и на побудительные сопла в самотечных каналах шлаковой пульпы.

### 3.2 Моделирование пыле-газоулавливания для ТЭС в конструкциях с изменяемой геометрией

По расчетам КазНИИЭнергетики затраты на золоулавливание и газоочистку в соответствии с действующими нормативами при применении имеющихся технологий энергетики Казахстана может составить примерно 4,5 млрд. евро на сероочистку и порядка 2,5 млрд. евро на газоочистку. Это является нереальными затратами. Применение новых запатентованных конструкций гидроциклонов, трубы-коагулятора Вентури с изменяемыми геометриями и устройств газоулавливания с использованием композитных позволяют создать автоматизированную систему пыле-газоулавливания с достижением экологических нормативов. За счёт конструктивных изменений, автоматизации и контроля процесса пыле-газоулавливания подбирается оптимальный гидродинамический режим гидроциклонов и трубы-коагулятора Вентури с изменяемой геометрией, за счёт этого обеспечивается нормативный уровень пылеулавливания. Установка специфических газоуловителей с использованием композитных материалов, автоматизация процесса и контроль за изменением концентрации загрязняющих веществ, в исключительных случаях многоярусное размещение газоуловителей, позволяют добиться нормативного уровня пыле и газоулавливания.

Большинство пылеугольных котельных и ТЭЦ Республики Казахстан оборудованы мокрыми системами золоулавливания в состав которых входит как наиболее эффективные пылеуловители – ТКВ работающие совместно с каплеуловителем – скруббером. Процесс пылеулавливания в ТКВ и скруббере решена теоретически и подтверждена многочисленными натурными и лабораторными экспериментами в КазНИИЭнергетики под руководством И.Б. Палатника.

Особенностью золоулавливания «скруббер с трубой Вентури» является очистка дымовых газов не только от твердых частиц, но и частично от диоксида

серы. Достигается это за счет орошения труб Вентури щелочной водой, при этом снижение выбросов сернистого ангидрида достигает 80%.

Одним из наиболее существенных недостатков этого подхода, который ярко проявляется при использовании режима ИРО (интенсивный режим орошения) является большие расходы воды на орошение и соответственно адсорбентов.

Экспериментами в КазНИИЭнергетики было установлено, что интенсивность мокрого газоулавливания резко возрастает с увеличением плотности орошения. Эта идея и была реализована нами при модификации ТКВ. Предлагается новая комбинированная конструкция трехступенчатого ТКВ с внутренней вставкой измененного по размерам ТКВ. За счет этого обеспечивается 3-х фазный режим работы установки. Последовательно, по мере увеличения объемов дымовых газов, поступающих на пыле-газоочистку в работу включается: 1 фаза – сечение  $\omega_1$ , затем – 2 фаза – сечение  $\omega_2$  и, наконец, 3 фаза – с суммарным живым сечением комбинированного ТКВ –  $\omega_1 + \omega_2$ ; При этом плотность орошения дымовых газов может быть увеличена (изменена) за счет регулирования давления в форсунках орошения, либо включением дополнительной, второй форсунки.

Принципиальная схема работы комбинированной конструкции ТКВ приведена на рисунке 3.5, а конструкция комбинированной ТКВ – на рисунке 3.6.

Фотографии факела распыленной жидкости приведены в Приложении А.

На конструкцию ТКВ с изменяемой геометрией подана заявка на изобретение.

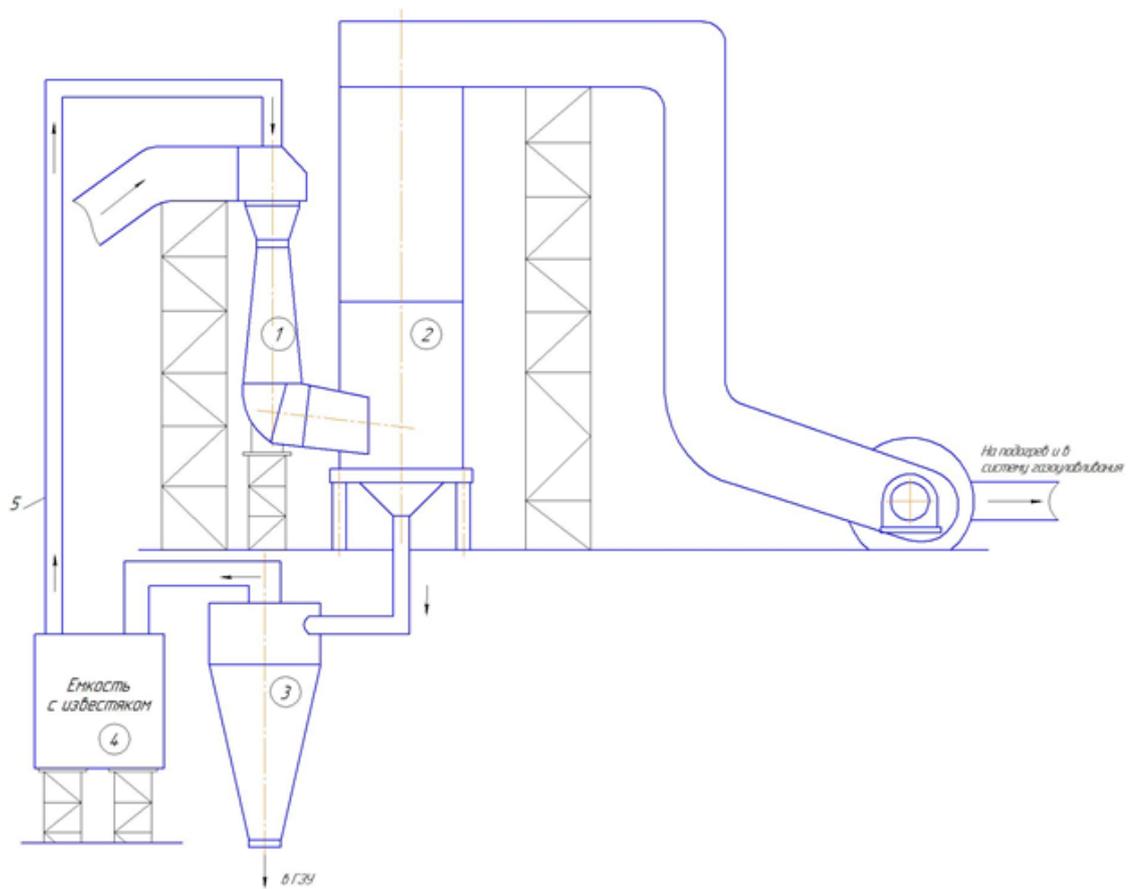
Методология исследования, основанная на «гибридном» моделировании, сочетающем глубокие теоретические проработки с экспериментами, позволяет не только обосновать выявленные теоретически основные факторы, но и оценить количественно их влияние на процесс пыле-газоочистки, разработать методику расчёта и оптимизации золоуловителей с применением ТКВ и газоуловителей с использованием композитных материалов.

Научная новизна заключается:

- в разработке оригинального автоматизированного комплекса, включающего золоуловители с ТКВ и регулируемый по составу газа газоуловителя, приборное оснащение и пилотную установку для оценки эффективности очистки газов в устройствах с пористыми проницаемыми СВС-каталитическими фильтрами;

- в получении новых результатов экспериментальных исследований, позволяющих производить сравнительные испытания ТКВ и различных катализаторов и каталитических систем;

- в экспериментальной проверке автоматизированной технологии, позволяющей найти оптимальные параметры золоуловителя с ТКВ при заданных условиях эксплуатации ТЭЦ сопротивлении аппарата, охлаждении дымовых газов и устройств каталитических газоуловителей.



1- ТКВ; 2- Скруббер; 3- Гидроциклон; 4- Емкость с известняком; 5 – система обратного водоснабжения

Рисунок 3.5 – Схема пылегазоулавливания

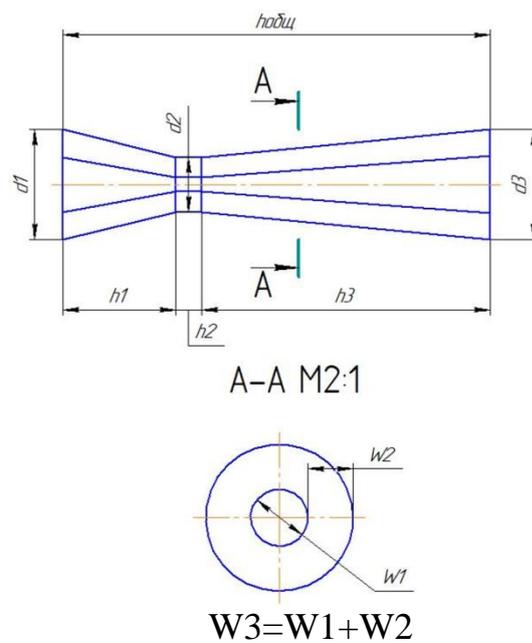
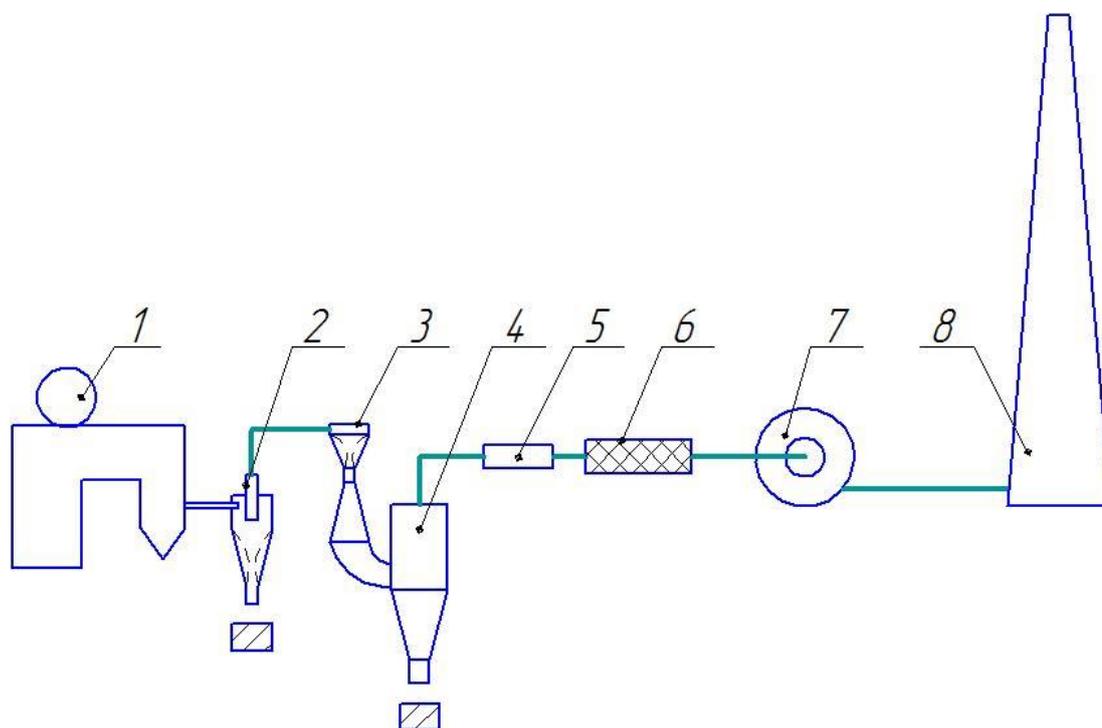


Рисунок 3.6 - Комбинированная конструкция ТКВ

Практическая значимость заключается в достижении нормативных уровней пыле-газоочистки для типичных пылеугольных ТЭС и котельных РК путём автоматизации и модернизации существующих систем золоулавливания, применения усовершенствованных и новых запатентованных конструкций энергетического оборудования с использованием композитных материалов позволит Казахстану в конечном счёте достичь требуемых Посткиотским соглашением экологических нормативов и приобрести квоты на выбросы парниковых газов.

Общая схема процесса пыле-газоулавливания показана на рисунке 3.7.



1 – котел; 2 – гидроциклон; 3 – ТКВ; 4 – отстойник; 5 – подогреватель; 6 – СВС-фильтр; 7 – центробежный вентилятор; 8 – труба.

Рисунок 3.7 – Общая схема технологического процесса пыле-газоулавливания на ТЭС

Для достижения поставленных задач был разработан алгоритм и программное обеспечение для расчета степени очистки в гидроциклонах с изменяемой геометрией. Для разработки программного продукта была выбрана среда разработки Delphi.

Расчетная программа по заданным геометрическим параметрам гидроциклона вычисляет диаметры граничных зерен, рисует схему гидроциклона и строит график зависимости между радиусом цилиндрической части гидроциклона и диаметром граничных зерен.

В рамках проведённых исследований была предложена схема автоматизации технологического процесса пыле-газоулавливания рисунок 3.8 [41, 42].

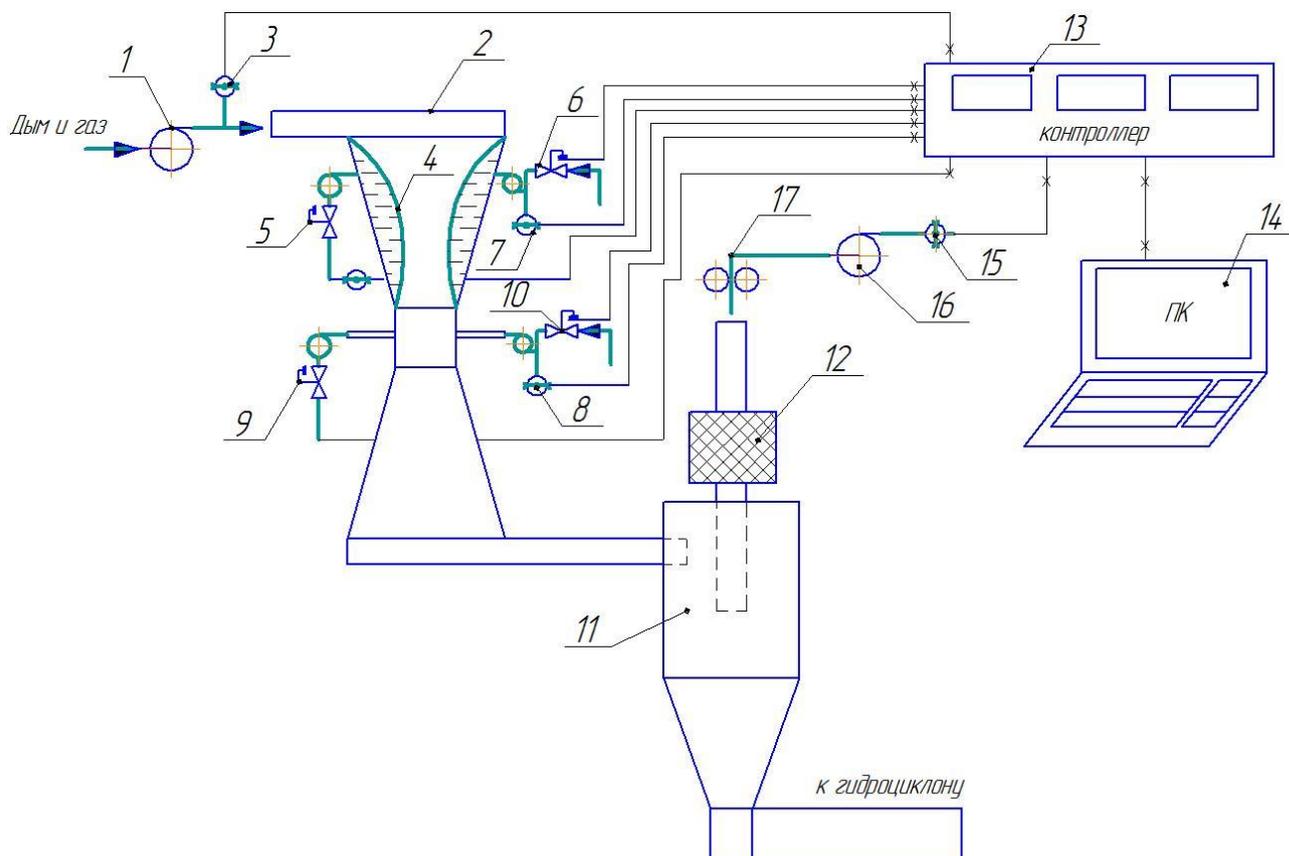


Рисунок 3.8– Структурная схема автоматизации

В схеме автоматизации технологического процесса пыле-газоулавливания имеется 3 контура регулирования (рисунок 3.8):

1. Контур регулирования давления подачи дымовых газов в трубу Вентури;
2. Контур регулирования давления между стенками корпуса ТКВ 2 и гибким эластичным элементом 4;
3. Контур регулирования газоулавливания в СВС-блоке 12.

В первом контуре в качестве датчика давления используется датчик САПФИР 408-ДА (рисунок 3.9). На рисунке 3.8 в общей схеме автоматизации технологического процесса пыле-газоулавливания датчик давления показан позицией 1. Данный датчик предназначен для измерения абсолютного давления. Датчик удовлетворяет условиям работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическим процессом и обеспечивает непрерывное преобразование измеряемого параметра в унифицированный токовый сигнал 0-5 или 4-20 мА для дистанционной передачи.



Рисунок 3.9 - Датчик давления САПФИР 408-ДА

Для преобразования механической энергии в электрическую в датчике используется пьезорезистивный тензопреобразователь.

В качестве основного элемента тензопреобразователя применяется пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, которая прочно соединяется с металлической мембраной тензопреобразователя.

Давление дымовых газов воздействует на мембрану измерительного устройства и преобразуется в деформацию чувствительный элемент, тем самым вызывая изменение электрического сопротивления тензорезисторов, размещенных в измерительном блоке.

Электронное блок обеспечивает питание тензорезисторов, преобразует изменение сопротивления тензорезисторов в изменение токового выходного сигнала, компенсирует нелинейность тензопреобразователя и дополнительные погрешности, обусловленные температурой и другими влияющими факторами.

В качестве датчика концентрации пыли в составе дымовых газов используется анализатор качества сжигания топлива КАКГ-1 КОРРЕКТОР (рисунок 3.10). На рисунке 3.8 в общей схеме автоматизации технологического процесса пыле-газоулавливания датчик показан позицией 3. Данный анализатор качества горения КАКГ-1 предназначен для непрерывного измерения твердоэлектродным датчиком концентрации свободного кислорода, температуры дымовых газов и дутьевого воздуха, тепловой нагрузки; расчёта КПД горения и автоматического корректирования соотношения "топливо-воздух" с целью экономии топлива и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Данный прибор позволяет производить измерение концентрации кислорода в пределах от 0,1 до 25 об. %. Диапазон измерения по аналоговому выходу от 0 до 25 об. %. Интерфейс связи с компьютером осуществляется через RS -485. Характеристика анализируемого газа по температуре до 600°C, по пылесодержанию до 10 мг/м<sup>3</sup>.



Рисунок 3.10 - Анализатор качества сжигания топлива КАКГ-1  
КОРРЕКТОР

Во втором контуре регулирования давления жидкости между корпусом ТКВ и гибким эластичным элементом используется датчик давления воды PTL-25 (рисунок 3.11). На рисунке 3.8 в общей схеме автоматизации технологического процесса пыле-газоулавливания датчик показан позицией 7. Измерительный элемент - нержавеющая сталь. Диафрагма - тонкопленочный полисиликоновый резистор.



Рисунок 3.11 - Датчик давления воды PTL-25

В качестве исполнительного механизма регулирования давления между корпусом ТКВ и гибким эластичным элементом использован редукционный клапан АСТА Серия P02/02 (рисунок 3.12). На рисунке 3.8 исполнительный механизм показан позициями 5 и 6.



Рисунок 3.12 - Редукционный клапан АСТА Серия P02/02

Регулирующий клапан АСТА серии P02/02 снижает и стабилизирует давление на выходе до предварительно настроенного значения, независимо от колебаний разбора и скачков давления на входе.

Третий контур «блок СВС» предназначен для очистки отработавших газов от вредных составляющих газов таких как содержание окислов азота, окиси углерода, углеводородов, дымности отработавших газов.

На рисунке 3.18 показано устройство для очистки газов. Температура дымовых газов на входе и выходе по каждой из секций контролировались термопарами 12 типа ХА и регистрировались потенциометром. Давление газов на входе и выходе от датчиков давления 11 контролировались через шестипозиционный переключатель по показаниям потенциометров. В впускную трубу 2 установлен зонд для отбора отработавших газов на анализ содержания твердых частиц и соединен с дымомером марки EFAW-65A (производство фирмы «Bosch», ФРГ). Газоотборники 13 и 14 посредством трубопроводов и шестипозиционного переключателя были соединены с двухкомпонентным газоанализатором с инфракрасным недисперсным детектором NDIR марки MEXA-321E (производства компании «Horiba», Япония) для определения концентраций оксида углерода (CO) в объемных процентах и углеводородов (к C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) в ppm (чнм), газоанализатором с хемилюминисцентным детектором HCLD марки RS-325L (производство фирмы «Riken Keiki», Япония) для определения концентраций оксидов азота NO и NO<sub>x</sub> в ppm в отработавших газах, газоанализатором «Hartridge-904» (Великобритания) для определения концентраций CO в ppm, оптическим дымомером марки «Hartridge». Газоанализаторы на рисунке 3.10 объединены в общий блок и условно показаны позицией 15.

В качестве исполнительных механизмов проворачивания фильтрующих элементов вокруг своей оси используются шаговые двигатели марки FL86STH (рисунок 3.13) с угловым шагом 1.8°.

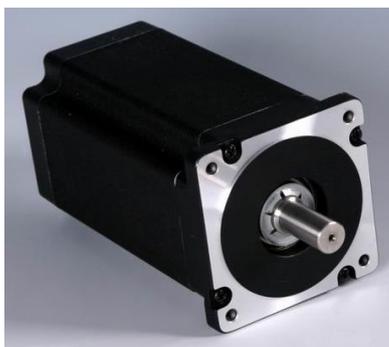


Рисунок 3.13 – Внешний вид шагового двигателя

Для работы всех трех контуров регулирования используется промышленный контроллер SIEMENS 1500 (рисунок 3.14). Общий модуль управления показан на рисунке 3.15.

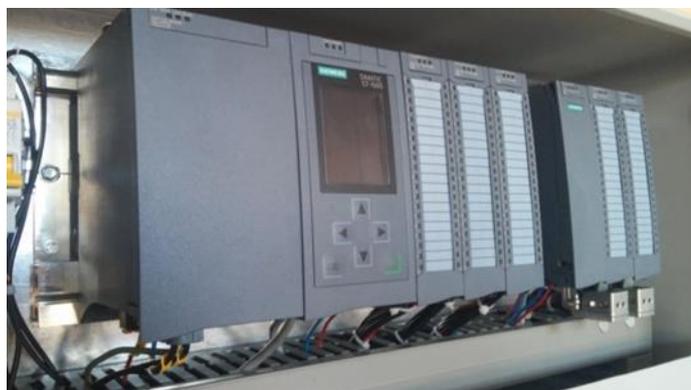


Рисунок 3.14- Контроллер SIEMENS 1500



Рисунок 3.15 - Общий вид модуля управления

Внешний вид разработанной системы очистки показан на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 - Общий вид устройства для очистки газов

Для управления системой автоматизации было разработано программное обеспечение, подробно описанное в главе 4 данной диссертации.

В данной схеме используется новая запатентованная конструкция трубы Вентури (рисунок 3.17) [43, 44].

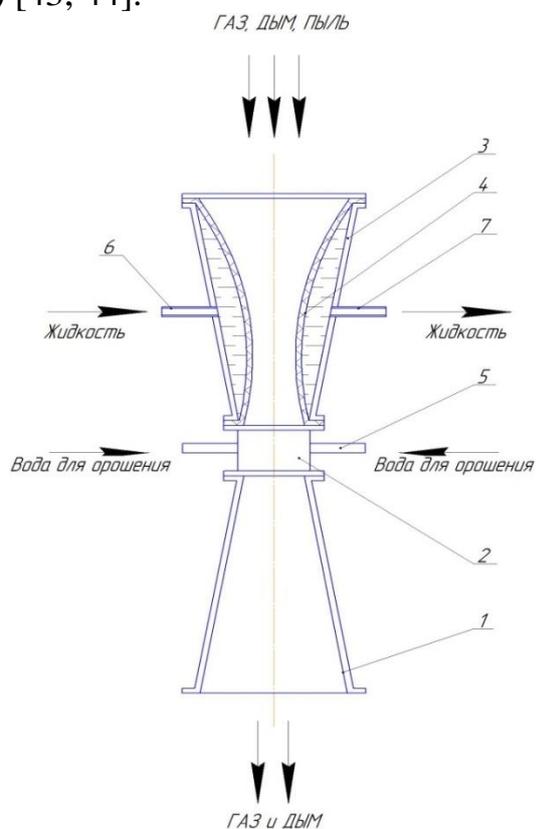


Рисунок 3.17 – Устройство для очистки газов типа трубы Вентури

Сущность конструкции заключается в следующем. Устройство для очистки газов типа трубы Вентури содержит конфузор 1, горловину 2, диффузор 3, регулирующую вставку 4, систему орошения выполненную в виде коллектора форсунками 5. Регулирующая вставка 4 выполнена из эластичного материала, стойкого к коррозии, механическому истиранию, обуславливающего герметичность в отношении жидкости, которая заполняет полость диффузора и позволяет поддерживать и изменять геометрию эластичной вставки. Система орошения 5 выполнена в виде коллектора с форсунками. В корпусе диффузора 3 установлены штуцеры для подачи жидкости 6 и штуцеры для отвода жидкости 7.

Устройство для очистки газов типа трубы Вентури работает следующим образом. Входящий поток газа поступает в диффузор 3, далее через горловину 2 - в конфузор 1 и если площадь сечения сокращается, скорость газа возрастает (по Уравнению Бернулли). Регулирующая вставка 4 позволяет изменять площадь поперечного сечения потока, способствуя увеличению или уменьшению скорости газа. В то же время, через форсунки 5 в горловину 2 поступает вода для орошения. Поскольку газ вынужден двигаться с очень большими скоростями в узкой части диффузора 3, появляется высокая турбулентность потока газа. Это разделяет поток жидкости на большое количество капель. Мелкие частицы и пыль, оседает на поверхности капель. Для увеличения турбулентности потока газа между регулирующей вставкой 4 и корпусом диффузора 3 подается жидкость под давлением через штуцеры 6, а слив жидкости осуществляется через штуцеры 7. Поток газа приобретает вращательное спиральное движение. При этом под действием центробежных сил тяжелые частицы пыли отбрасывается к стенкам регулирующей вставки 4. Покидая диффузор 3, газ, смешанный большим количеством капель жидкости, входит в конфузор 1. Далее уменьшается скорость газа, снижается турбулентность и мелкие капли объединяются в большие. После устройства капли жидкости в которых адсорбированы мелкие частицы отделяются от потока газа. Благодаря регулированию давления подачи жидкости через штуцеры 6, можно добиться изменения геометрии регулирующей вставки 4, что в свою очередь вызовет изменение концентрации взвешенного потока в конфузоре 1.

Данное устройство за счет изменения геометрии регулирующей вставки (мембраны) 4 позволяет добиться по сравнению с прототипом более высокой степени очистки газов от пыли и упрощает конструкцию.

Применение новых запатентованных конструкций на основе трубы-коагулятора Вентури с изменяемой геометрией и устройств газоплавливания с использованием композитных материалов на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяют создать автоматизированную систему пыле-газоулавливания с достижением экологических нормативов.

### 3.3 Рекомендуемое устройство для очистки газов с использованием СВС-фильтров

Устройство является средством для очистки дымовых газов от примесей и вредных веществ, и может быть использовано в теплоэнергетике, химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности [43, 45].

Известно устройство для очистки газов, включающее корпус, в котором осесимметрично установлен электрод, патрубки для подачи и отвода жидкости и газа. Корпус выполнен в виде трубы Вентури, а электрод выполнен в виде стержня переменного сечения, диаметр которого уменьшается в зоне сужения корпуса, а в зоне расширения увеличивается таким образом, что в любом сечении устройства отношение диаметров стержня и корпуса является постоянным. Это обеспечивает ионизацию молекул примесей, частиц и капель дисперсной фазы по всему объему газа. (см. пат. RU № 2286185, кл.В03С 3/41, оп. 10.09.2006г.).

Недостатком известного устройства является низкая эффективность очистки, невозможность очищать от вредных веществ в составе отработавших газов.

Наиболее близким к нашему устройству является аппарат для очистки газов, включающий корпус, патрубков для ввода и вывода реагирующих фаз, внутри которого размещен блок золоочистки с системой орошения, над которым через конфузор расположен каталитический блок. Каталитический блок состоит из съемных смещенных по вертикали корзин и каплеуловителя, боковая поверхность которых выполнена в виде жалюзи из каталитически активных пластин, которые выполняют в жидкофазном процессе очистки газов от азота и серосодержащих соединений роль катализатора. В корзины дополнительно размещается катализатор в форме гранул, колец «Рашига» или блока. Блок золоочистки выполнен из трубных элементов, нижняя часть которых изготовлена в виде цилиндра, переходящего в верхней части трубы в форму призмы, которые закреплены в коллекторе орошения. В трубные элементы орошающая жидкость подается через отверстия, расположенные тангенциально. (см. пат. RU № 2 103 053, кл.В01D 53/86, оп. 27.01.1998г.).

Недостатком указанного решения так же является низкая степень очистки, сложность устройства, а также очистка только двух компонентов (азот и серосодержащие соединения).

Задача, решаемая изобретением, заключается в повышении степени очистки газов от механических примесей и вредных веществ.

Технический результат заключается в упрощении конструкции, повышении степени улавливания вредных веществ в составе дымовых газов за счет автоматического регулирования положения фильтрующих элементов.

Сущность нашего подхода заключается в следующем. Предложено устройство для очистки газов, включающее корпус с патрубками для ввода и

вывода реагирующих фаз, внутри которого расположен каталитический блок, отличающееся тем, что каталитический блок выполнен в виде пористых проницаемых металлокерамических каталитических полусферических элементов, установленных в корпусе последовательно и соединенных с датчиками положения, при этом пористые проницаемые металлокерамические каталитические полусферические элементы установлены с возможностью изменения геометрии проходного сечения корпуса, на входном и выходном патрубках корпуса установлены датчики газоанализа, на вводимом и выводном патрубках, а также после каждого фильтрующего элемента установлены датчики температуры и датчики давления, кроме того, каждый из пористых проницаемых металлокерамических каталитических полусферических элементов соединен с электродвигателем и редуктором и управляется по сигналам датчиков газоанализа через контроллер.

На рисунках 3.18 и 3.19 представлена схема устройства для очистки газов и общий вид узла.

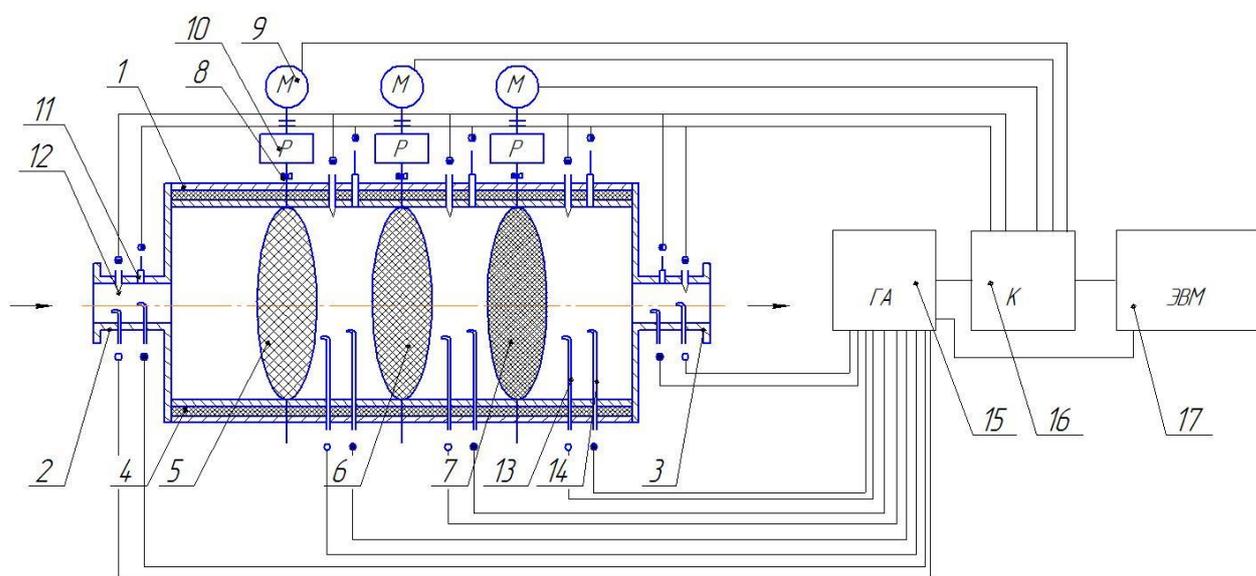


Рисунок 3.18 – Устройство для очистки газов

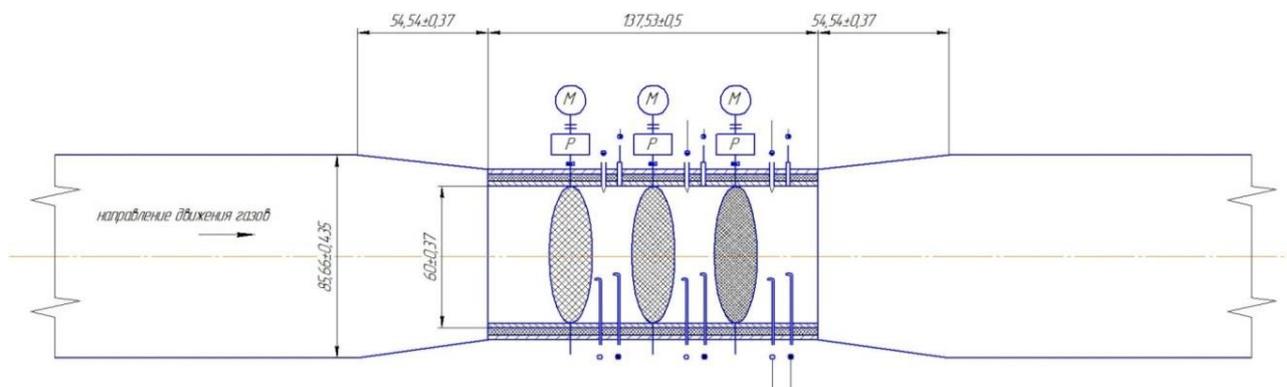


Рисунок 3.19 – Общий вид узла для очистки газов

Устройство для очистки газов содержит корпус 1 с патрубками для ввода 2 и вывода 3 реагирующих фаз. При необходимости теплоизоляции стенки корпуса 1 выполняют двойными и между ними располагают термоизоляторы 4. Внутри корпуса 1 последовательно установлены фильтрующие элементы 5 для очистки от твердых частиц, пористый проницаемый металлокерамический каталитический окислительный фильтрующий элемент 6, пористый проницаемый металлокерамический каталитический окислительно-восстановительный фильтрующий элемент 7. Все фильтрующие элементы 5,6,7 выполнены из пористых проницаемых металлокерамических каталитических материалов, полученных методом СВС-синтеза и имеют различную пористость в зависимости от реагирующих фаз (газов). Фильтрующие элементы 5,6,7 имеют возможность проворачиваться вокруг своей оси, тем самым изменять проходное сечение корпуса 1. Положение фильтрующих элементов фиксируются датчиками положения 8. Проворачивание фильтрующих элементов 5,6,7 вокруг оси осуществляется посредством электродвигателя 9 и редуктора 10. Между фильтрующими элементами 5,6,7, а также на вводном 2 и выводном 3 патрубках установлены датчики давления 11, термопары 12 и датчики газоанализа 13 и 14. Данные от датчиков газоанализа 13 и 14 поступают в газоанализатор 15. Данные от датчиков положения 8 фильтрующих элементов 5,6,7, а также сигналы с термопар 12 фиксируются контроллером 16. Работой всего устройства для очистки газов управляет ЭВМ 17.

Устройство работает следующим образом. Газы поступают через патрубок ввода 2 на фильтрующий элемент 5 для очистки от твердых частиц и проходят через пористый проницаемый металлокерамический каталитический окислительный фильтрующий элемент 6. Затем газы проходят через пористый проницаемый металлокерамический каталитический окислительно-восстановительный фильтрующий элемент 7 и отводятся в атмосферу через выводной патрубок 3. В зависимости от концентрации, состава и требуемой степени очистки дымовых газов от вредных веществ, устройство позволяет автоматически подбирать оптимальное положение фильтрующих элементов. Оптимальное управление работой устройства осуществляется с помощью АСУ (контроллера 16), работающего по программе, поступающего от ЭВМ 17.

Данное устройство за счет возможности изменения проходного сечения корпуса и применения пористых проницаемых металлокерамических фильтрующих элементов позволяет упростить конструкцию устройства, повысить степень очистки от вредных веществ в составе дымовых газов [46, 47].

### 3.4 Выводы по разделу

В главе приводится описание технологического процесса ГЗУ с использованием гидроциклонов.

Показано, что установленные на ТЭЦ мокрые золоуловители типа МС-ВТИ с коагуляторами Вентури щелевого типа, обеспечивают степень золоулавливания 95-96%. Для увеличения эффективности очистки газов не менее чем до 99,2% золоуловители должны быть переведены на интенсивный режим орошения (ИРО), что потребует увеличения расхода воды на орошение коагуляторов Вентури до 2560 м<sup>3</sup>/ч (0,4 л/Нм) очищаемых газов, и, соответственно, почти двукратного увеличения расхода пульпы.

Предложена разработка оригинального автоматизированного комплекса, включающего золоуловители с ТКВ и регулируемый по составу газа газоуловитель, приборное оснащение и пилотную установку для оценки эффективности очистки газов в устройствах с пористыми проницаемыми СВС-каталитическими фильтрами.

Показано, что применение новых запатентованных конструкций на основе трубы-коагулятора Вентури с изменяемой геометрией и устройств золоулавливания с использованием композитных материалов на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяют создать автоматизированную систему пыле-газоулавливания с достижением экологических нормативов.

## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПЫЛЕГАЗОУЛАВЛИВАНИЯ

### 4.1 Система мониторинга и дистанционного управления пылегазоулавливанием

Для управления работой описанной в главе 3 автоматизированной системы была разработана программа «ТехPro». Данная программа представляет собой систему мониторинга и дистанционного управления предназначенного для круглосуточного контроля параметров технологического процесса очистки и наблюдения за технологическим оборудованием в реальном времени.

Цели разработанной системы мониторинга:

- снижение производственных издержек;
- повышение эффективности и надежности работы технологического оборудования;
- получение достоверной и качественной информации, необходимой для оперативного контроля и управления технологическим процессом;
- обеспечение персонала не только актуальной, но и ретроспективной технологической информацией для анализа, оптимизации и планирования работ по ремонту и эксплуатации оборудования котельных.

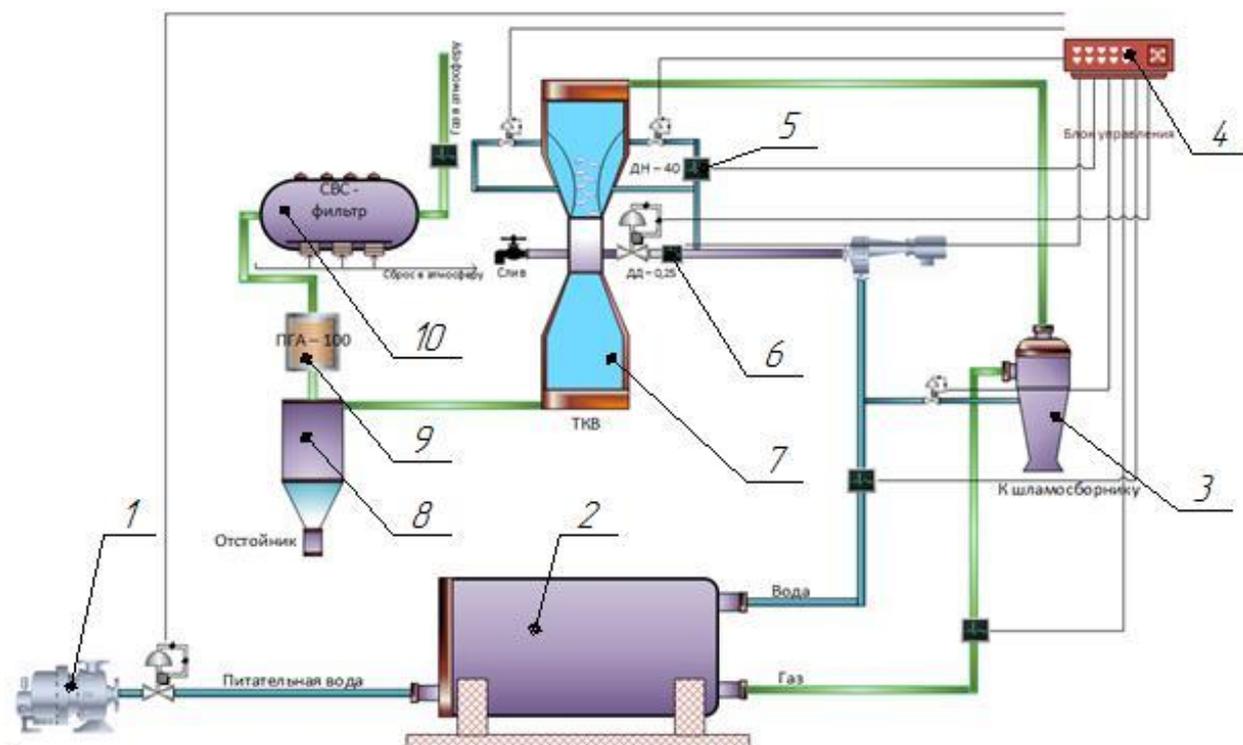
Разработанное программное средство позволяет решить следующие задачи:

- автоматический запуск и останов технологического оборудования;
- регулирование параметров оборудования согласно заданным первичным настройкам;
- сбор, предварительная обработка данных от датчиков технологического процесса;
- осуществление контроля значений параметров и состояния технологического оборудования.
- представление информации о текущем состоянии и об истории процесса на цветном видеомониторе АРМа оператора;
- автоматическое и дистанционное управление работой оборудования и технологическими группами оборудования (пуски, остановки, поддержание заданных параметров).

Система реализуется на совместном интегрировании технических средств автоматизации и программного обеспечения, позволяющего осуществлять эксплуатацию технологического оборудования без постоянного участия обслуживающего персонала. Все технологические параметры, сигналы о текущем состоянии оборудования котельной отображаются в режиме реального времени на мнемосхеме, которая может отображаться как на персональном компьютере, так и на НМІ-панели.

АСУ содержит систему регулирования, включающую устройства управления. Регулирование обеспечивает оптимальный режим поддержания необходимой температуры воды, давления, расхода, концентрации газов.

На рисунке 4.1 показаны мнемосхема оборудования технологического процесса пылегазоулавливания на ТЭС.



1 – насос питательный; 2 – котел; 3 – гидроциклон; 4 – блок управления; 5 – контроллер давления воды; 6 – контроллер давления ИРО; 7 – ТКВ (труба коагулятор Вентури); 8 – каплеуловитель; 9 – подогреватель газов ПГА-100; 10 – СВС-блок

Рисунок 4.1 – Оборудования технологического процесса работы ТЭС

Объекты автоматизации можно представить в таблице 4.1.

Система учитывает параметры угля: зольность, влагу, теплоту сгорания, - недожег в шлаке, недожег в уносе

Система реализуется на совместном интегрировании технических средств автоматизации и программного обеспечения, позволяющего осуществлять эксплуатацию технологического оборудования без постоянного участия обслуживающего персонала. Все технологические параметры, сигналы о текущем состоянии оборудования котельной отображаются в режиме реального времени на мнемосхеме, которая может отображаться как на персональном компьютере, так и на НМІ-панели.

Таблица 4.1 –Объекты автоматизации

Объект автоматизации	Контролируемый параметр	Управление
Котлоагрегат	Выход: - концентрация газа (NOx, CO, CxHy, тв.частицы) - температура теплоносителя - давление - расход	- температура - давление
Питательный насос	Выход: - давление Вход: - напряжение	
Шламосборник	-	-
ТКВ	давление	давление
Отстойник	уровень	
ПГА – 100	- температура	- температура
Контроллер регулирующей арматуры ДН – 0,25	- давление - уровень открытия	- давление - уровень открытия
Контроллер регулирующей арматуры ДН – 40	- давление - уровень открытия	- давление - уровень открытия
Насос для повышения давления	- давление - расход	
СВС-фильтр	Вход: - концентрация газа (NOx, CO, CxHy, тв.частицы) Выход: - концентрация газа (NOx, CO, CxHy, тв.частицы)	Уровень открытия: - фильтрующий элемент - каталитический окислительный фильтрующий элемент - окислительно-восстановительный фильтрующий элемент

АСУ содержит систему регулирования, включающую устройства управления. Регулирование обеспечивает оптимальный режим поддержания необходимой температуры воды, давления, расхода, концентрации газов.

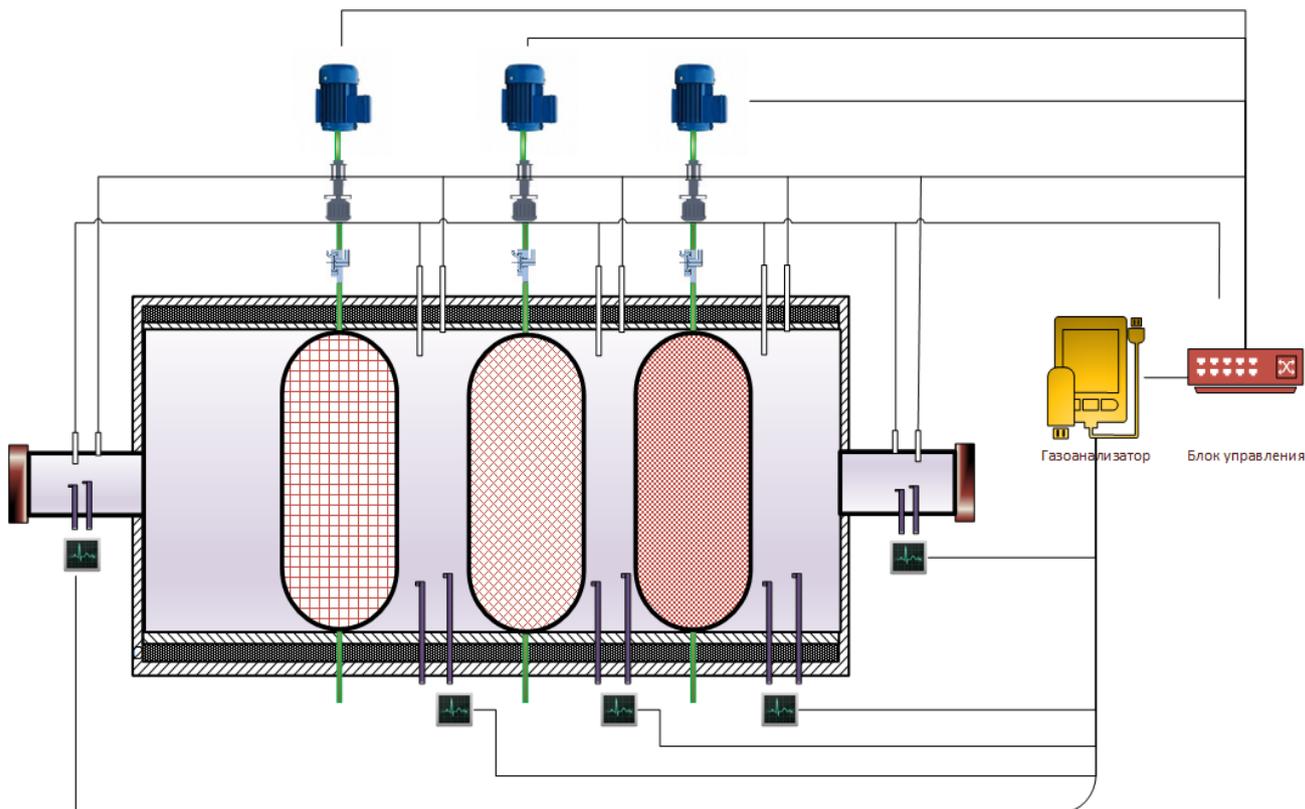


Рисунок 4.2- Мнемосхема СВС – фильтра

Описание логики алгоритма контроля параметров и управления технологическим оборудованием АСУ.

Система контроля и управления измерительной аппаратурой имеет непосредственную связь с оператором. Работа начинается с запроса изменения управления. Производится изменение параметров управления.

Система управления состоит из двух блоков - блока управления и блока индикации.

Блок управления обеспечивает всем оборудованием – осуществляет сбор данных с датчиков и управление исполнительными механизмами по алгоритму, зависящему от режимов работы. Дистанционное управление оборудованием осуществляется с помощью панели управления, отображаемой на экране в составе АРМ оператора. Элементы управления реализованы в виде объектов – регуляторы и переключатели.

Блок индикации включает в себя экран трендов значений параметров в режиме реального времени.

## 4.2 Описание алгоритма работы программы управления автоматизированным процессом пылегазоулавливания

Система управления процессом пылегазоулавливания имеет следующие этапы работы:

- 1) Производится опрос входных датчиков: давления на входе в трубу Вентури, давления между корпусом ТКВ и гибким эластичным элементом.
- 2) Осуществляется замер температуры дымовых газов на входе в ТКВ
- 3) Производится замер концентрации пыли в составе дымовых газов
- 4) Производится замер давление газов на входе и выходе в СВС-блоке
- 5) Производится определение концентраций оксида углерода, углеводородов, оксидов азота и дымности отработавших газов.
- 6) Выставляется рабочее напряжение (параметры) на всех исполнительных механизмах.
- 7) Осуществляется настройка контуров регулирования в зависимости от значения концентрации оксида углерода, углеводородов, оксидов азота и дымности отработавших газов на выходе из СВС-блока.
- 8) Определяется оптимальный режим работы АСУ процесса пылегазоулавливания, поддерживающий автоматический режим работы без участия оператора.

Алгоритм работы процесса пылеулавливания в ТКВ показан на рисунке 4.3.

По данному алгоритму осуществляется следующая последовательность действий.

1) В начальный момент эластичный элемент внутри ТКВ находится в исходном состоянии то есть повторяет форму ТКВ. Устанавливается требуемая частота опроса датчиков, заданные значения концентрации твердых частиц в дымовых газах.

2) Опрос датчиков. После опроса показаний датчиков данные загружаются в стек.

3) Данные из стека сравниваются с заданными. При допустимых значениях ПДК система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации ТЧ в составе дымовых газов – переходит к пункту 4.

4) В работу включается гибкий эластичный элемент ТКВ. Происходит изменение внутренней геометрии ТКВ.

5) Следующий опрос датчиков. Сравнение значений из стека с заданными. При допустимых значениях ПДК ТКВ поддерживает внутреннюю геометрию, система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации ТЧ в составе дымовых газов – переходит к пункту 7.

6) Выдача аварийного сигнала. Останов системы.

Контроллер должен обеспечивать управление параметрами дымовых газов, изменение которых должно происходить по заданному закону.

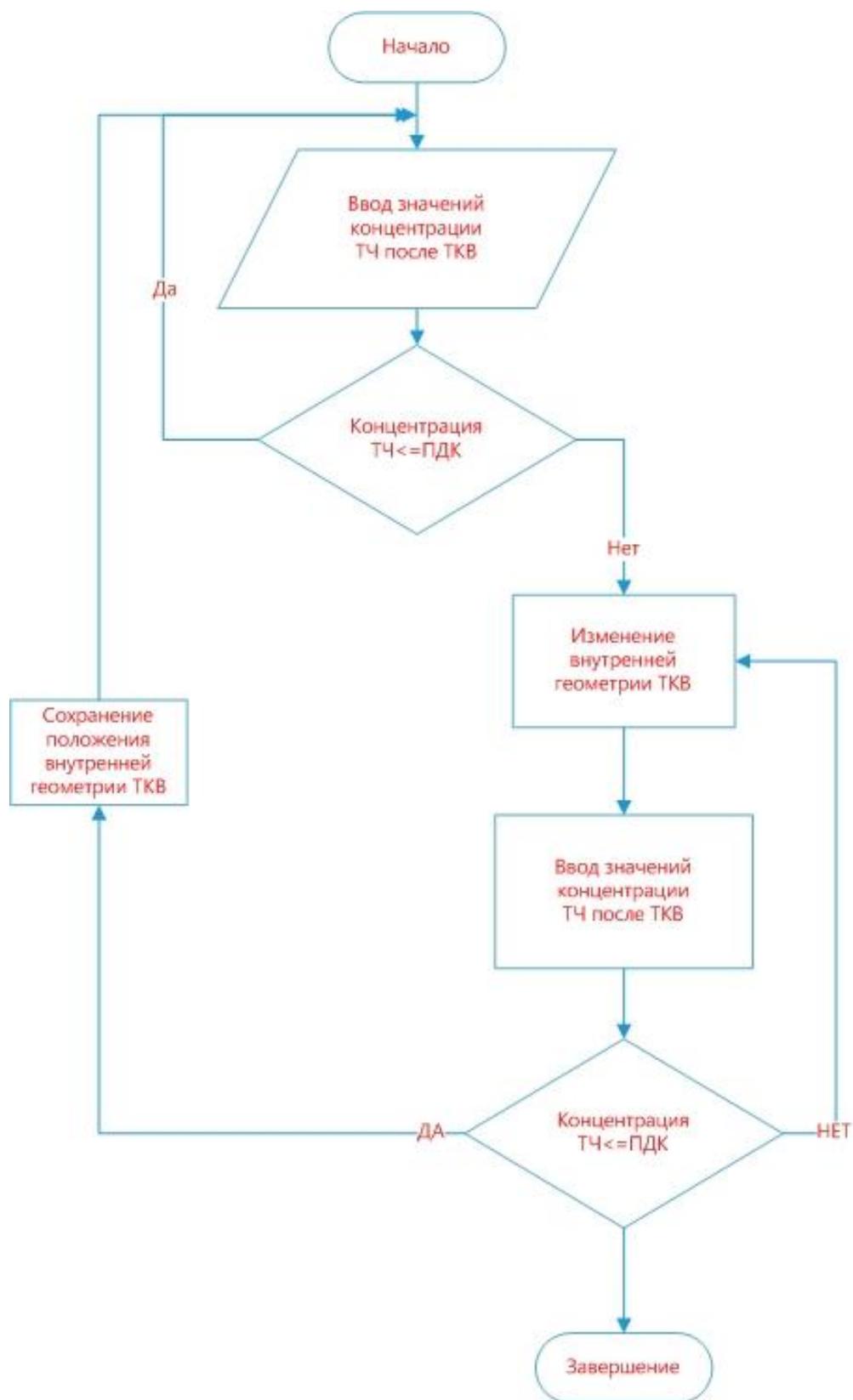


Рисунок 4.3 – Алгоритм функционирования процесса пылеочистки в ТКВ

Алгоритм работы процесса очистки газов от вредных составляющих дымовых газов в СВС-блоке показан на рисунке 4.4 и имеет следующую последовательность действий.

1) В начальный момент фильтрующие элементы в СВС-блоке находятся в исходном состоянии, то есть в открытом положении. Устанавливается требуемая частота опроса датчиков, заданные значения концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в дымовых газах.

2) Опрос датчиков. После опроса показаний датчиков данные загружаются в стек.

3) Данные из стека сравниваются с заданными. При допустимых значениях ПДК система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 4.

4) В работу включается 1 фильтрующий элемент СВС-блока. Происходит изменение положения фильтрующего элемента (происходит частичное перекрытие проходного сечения СВС-блока).

5) Следующий опрос датчиков. Сравнение значений из стека с заданными. При допустимых значениях ПДК СВС-блок поддерживает данное положение 1 фильтрующего элемента, система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 7.

6) Данные из стека сравниваются с заданными. При допустимых значениях ПДК система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 7.

7) В работу включается 2 фильтрующий элемент СВС-блока. Происходит изменение положения фильтрующего элемента (происходит частичное перекрытие проходного сечения СВС-блока).

8) Следующий опрос датчиков. Сравнение значений из стека с заданными. При допустимых значениях ПДК СВС-блок поддерживает данное положение 2 фильтрующего элемента, система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 9.

9) Данные из стека сравниваются с заданными. При допустимых значениях ПДК система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 10.

10) В работу включается 3 фильтрующий элемент СВС-блока. Происходит изменение положения фильтрующего элемента (происходит частичное перекрытие проходного сечения СВС-блока).

11) Следующий опрос датчиков. Сравнение значений из стека с заданными. При допустимых значениях ПДК СВС-блок поддерживает данное положение 3 фильтрующего элемента, система возвращается к пункту 2 и производит новый опрос датчиков. При превышении значений концентрации CO, SO<sub>2</sub>, NOx в составе дымовых газов – переходит к пункту 12.

12) Выдача аварийного сигнала. Остановка системы.

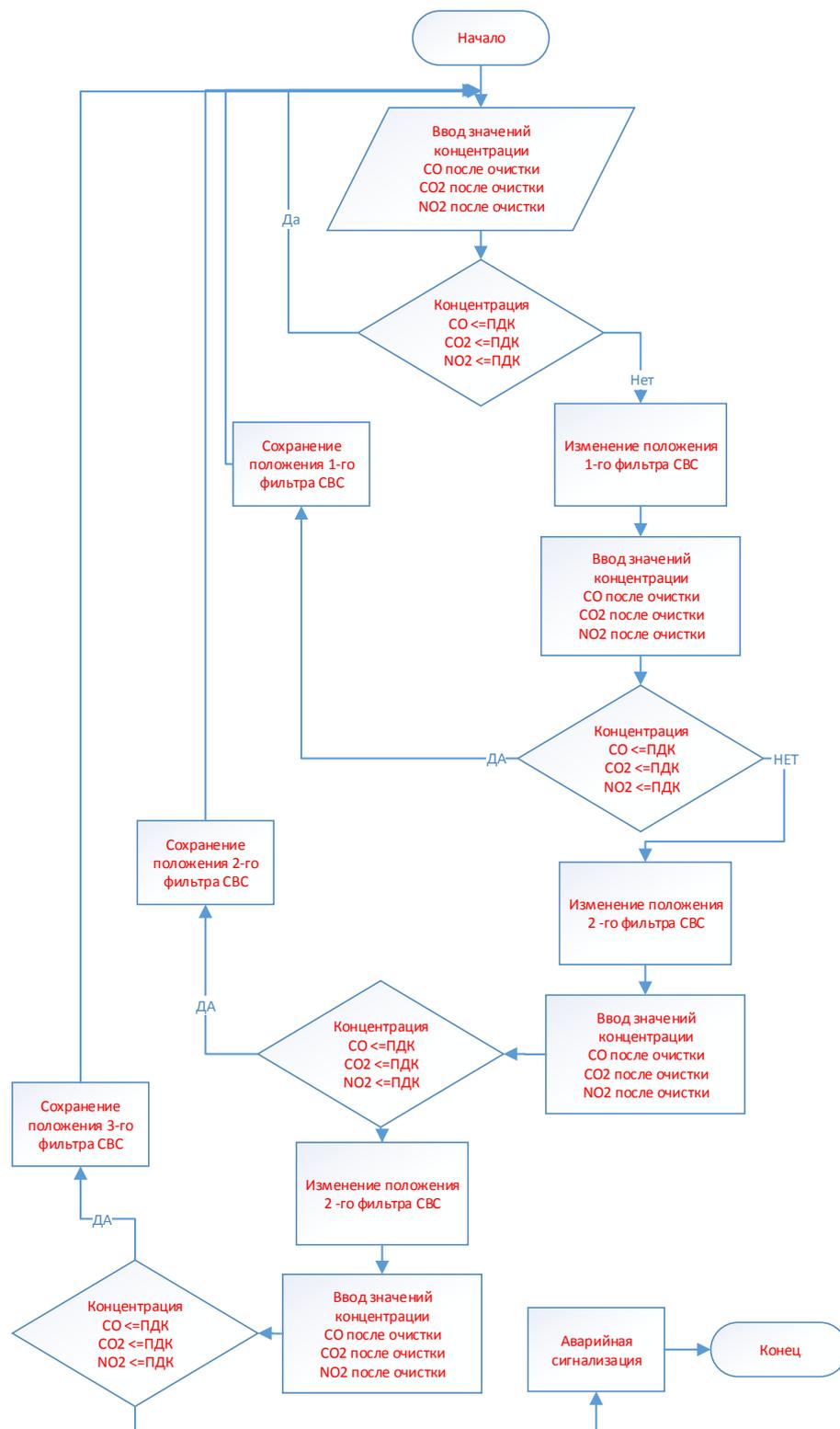


Рисунок 4.4 – Алгоритм функционирования СВС-блока

- Главный экран показан на рисунке 4.5. На экране отображается:
- мнемосхема оборудования технологического процесса;
  - цифровые табло для отображения значений контролируемых параметров;
  - элементы управления;
  - тренды.

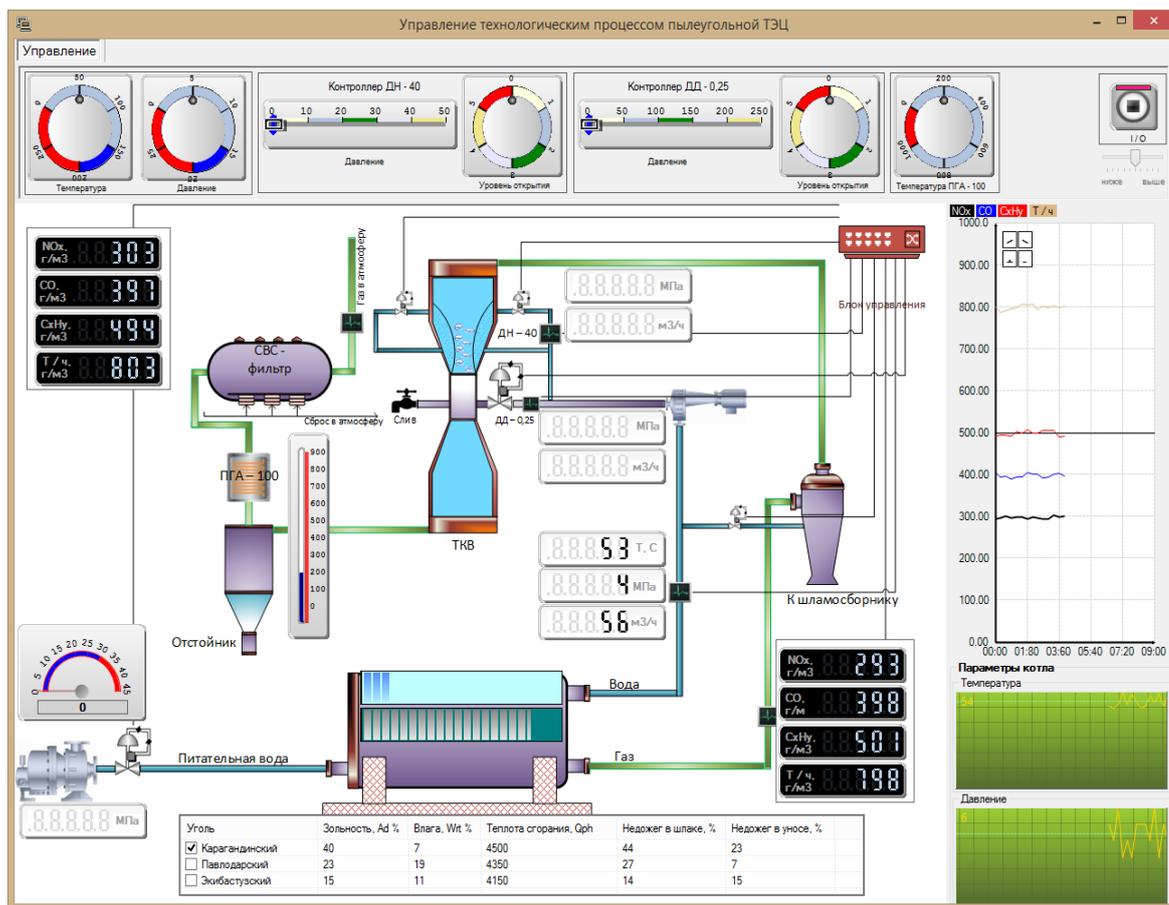


Рисунок 4.5 – Главный экран

Экран СВС – фильтра показан на рисунке 4.6. На экране отображается:

- мнемосхема компонентов СВС-фильтра;
- цифровые табло для отображения значений контролируемых параметров;
- элементы управления.

Экран трендов показан на рисунке 4.7. На экране отображается: значения параметра на входе и выходе.

Автоматическое управление фильтрующего элемента СВС – фильтра.

При установлении автоматического режима управления фильтрующего элемента для улавливания твердых частиц, происходит автоматическое регулирование положения заслонки, что отражается на уровне закрытия элемента. В зависимости от содержания недожога в шлаке (gsh), положение заслонки изменяется в пределах «полностью открыта» до «полностью закрыта» (%):

- gsh = {0, 10} – 0% - полностью открыта
- gsh = {11, 20} – 20%
- gsh = {21, 30} – 40%
- gsh = {31, 40} – 60%
- gsh = {41, 50} – 80%
- gsh > 50 – 100% - полностью закрыта

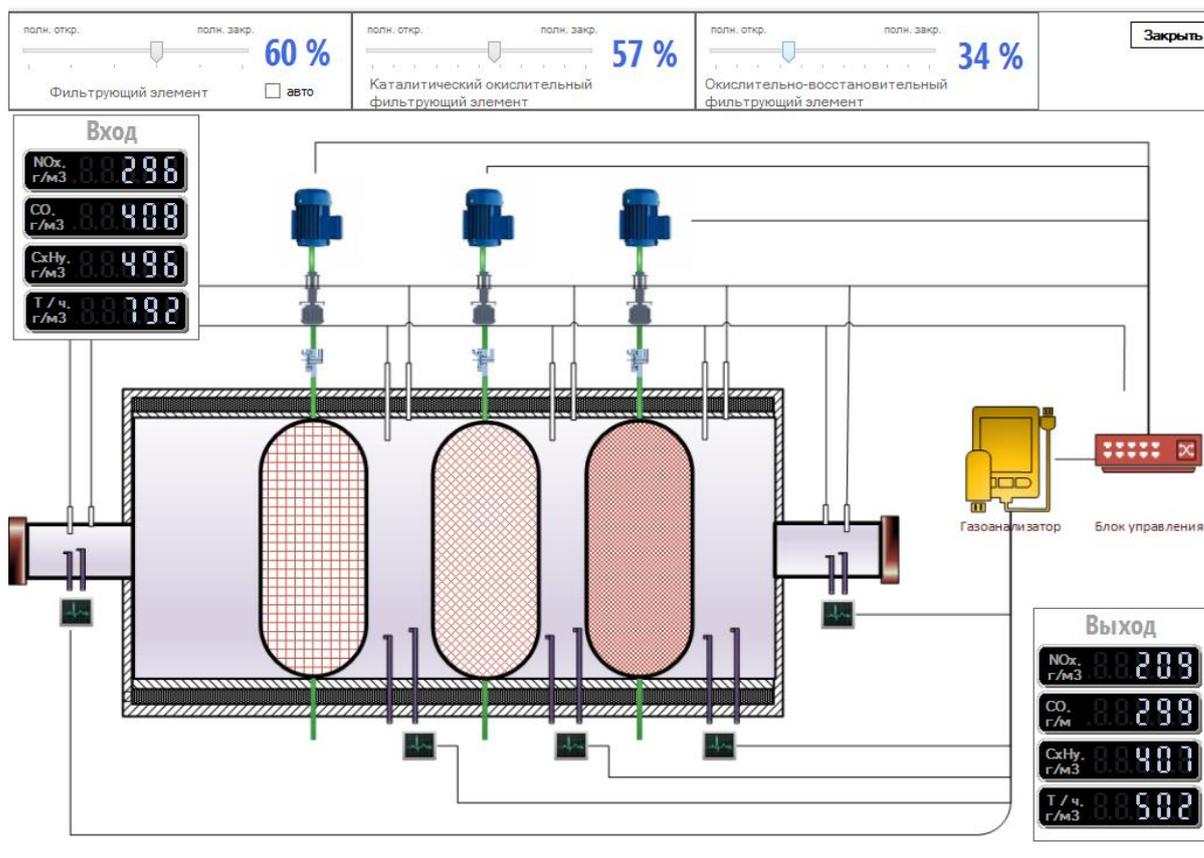


Рисунок 4.6 – Экран СВС – фильтра

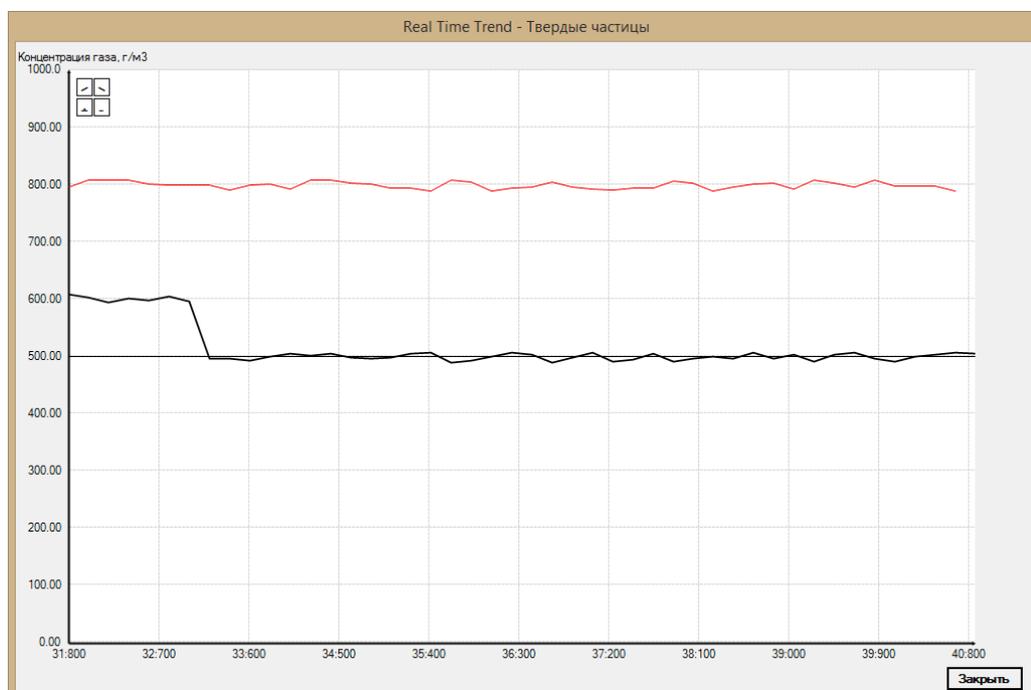
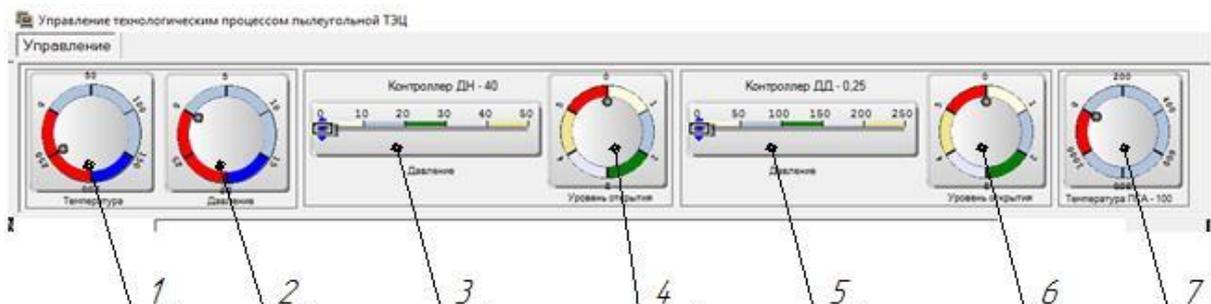


Рисунок 4.7 – Экран трендов

Устройство интерфейса программы TehPro. На рисунке 4.8 приведен интерфейс панели с элементами управления. Программа TehPro запускается

кнопкой в верхнем правом углу панели управления. В верхней части панели управления отображены регуляторы (слева направо) температуры котла, давления котла, контроллер ДН-40 давления воды между гибким эластичным элементом и корпусом ТКВ (труба коагулятор Вентури), клапан открытия заслонки ТКВ, контроллер ДД-0,25.



1 –регулятор температуры котла; 2 – регулятор давления котла; 3 и 4 – соответственно контроллер ДН-40 давления и регулятор открытия клапана подачи воды между гибким эластичным элементом и корпусом ТКВ; 5 и 6 – соответственно контроллер ДД - 0,25 давления и клапан открытия ИРО (интенсивного режима орошения); 7 - регулятор температуры подогревателя газов ПГА-100

Рисунок 4.8 – Панель управления

### 4.3 Практические результаты работы автоматизированной системы пылегазоулавливания

На начальном этапе устанавливаются следующие параметры (рисунки 4.9, 4.10): температура газов после котла 150<sup>0</sup>С; давление котла 15Мпа; температура подогревателя газов 600К.

Значения по концентрации газов, г/м <sup>3</sup>	
На входе	На выходе
NO <sub>x</sub> , г/м <sup>3</sup> 274	NO <sub>x</sub> , г/м <sup>3</sup> 292
CO, г/м <sup>3</sup> 370	CO, г/м <sup>3</sup> 401
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , г/м <sup>3</sup> 483	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , г/м <sup>3</sup> 495
T / ч, г/м <sup>3</sup> 790	T / ч, г/м <sup>3</sup> 797

Рисунок 4.9 – Панель значений по концентрации газов

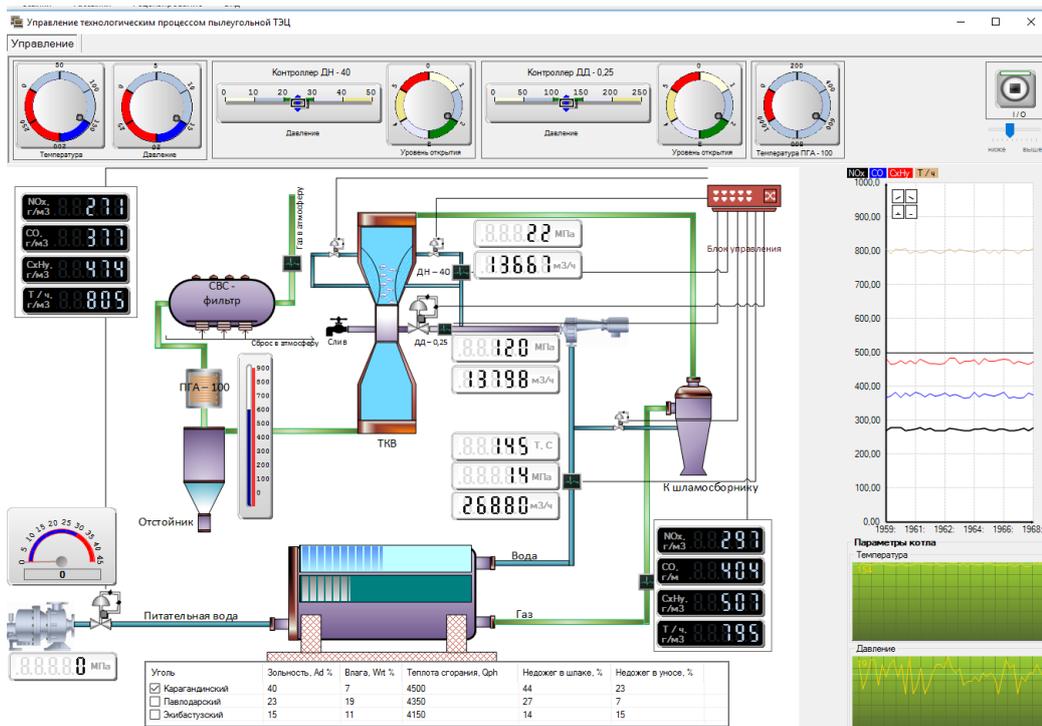
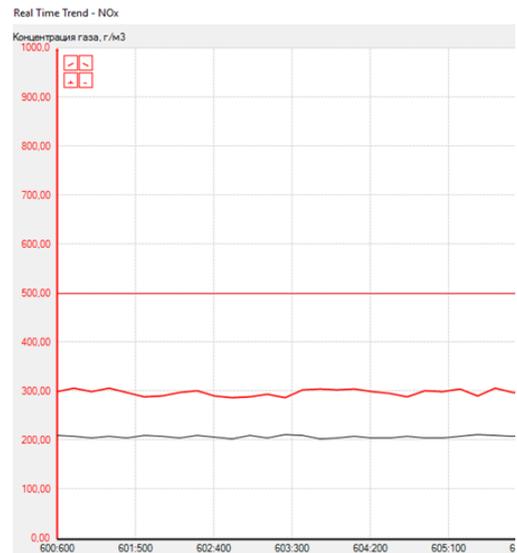


Рисунок 4.10 – Установка начальных параметров

Далее изменяя положения фильтрующих элементов СВС – блока получили следующие данные. При 20% перекрытом положении фильтрующих элементов наблюдается снижение концентрации ТЧ с 790 г/м<sup>3</sup> до 701 г/м<sup>3</sup>; NO<sub>x</sub> с 274г/м<sup>3</sup> до 213 г/м<sup>3</sup>; СО г/м<sup>3</sup> с 370 до 307 г/м<sup>3</sup>; С<sub>x</sub>Н<sub>y</sub> с 483г/м<sup>3</sup> до 401г/м<sup>3</sup> (рисунки 4.11, 4.12).

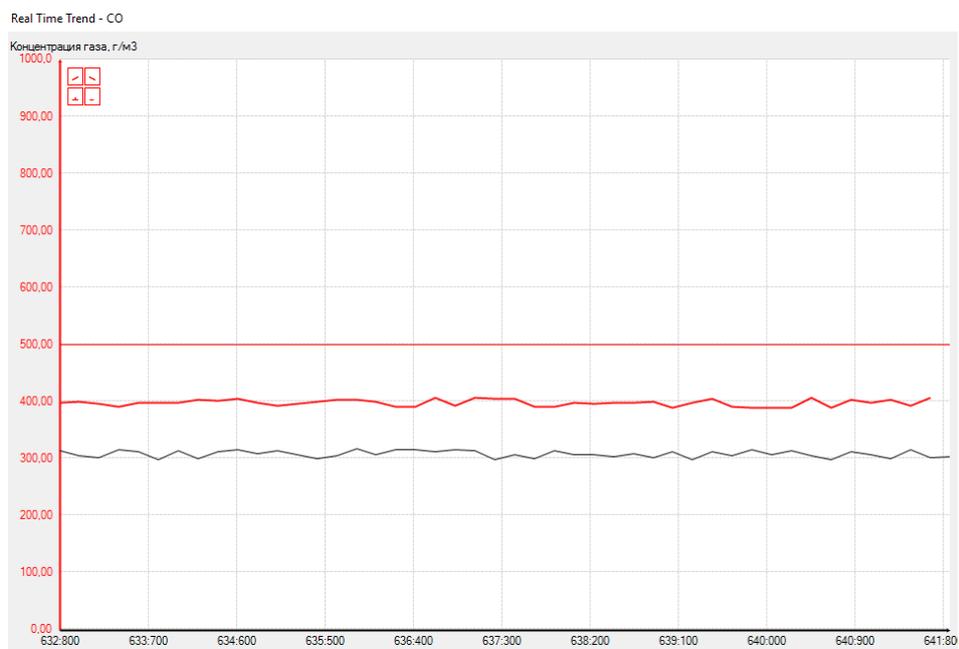


а) значения концентрации твердых частиц, г/м<sup>3</sup>

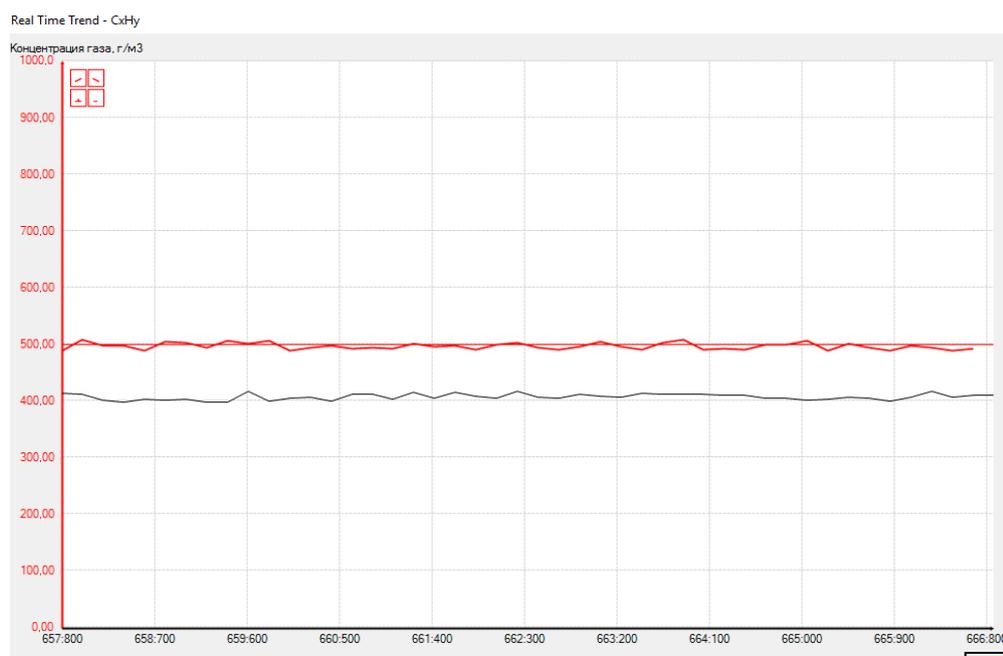


б) значения концентрации NO<sub>x</sub>, г/м<sup>3</sup>

Рисунок 4.11 – Графики зависимости концентрации при 20% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока



а) значения концентрации CO, г/м³

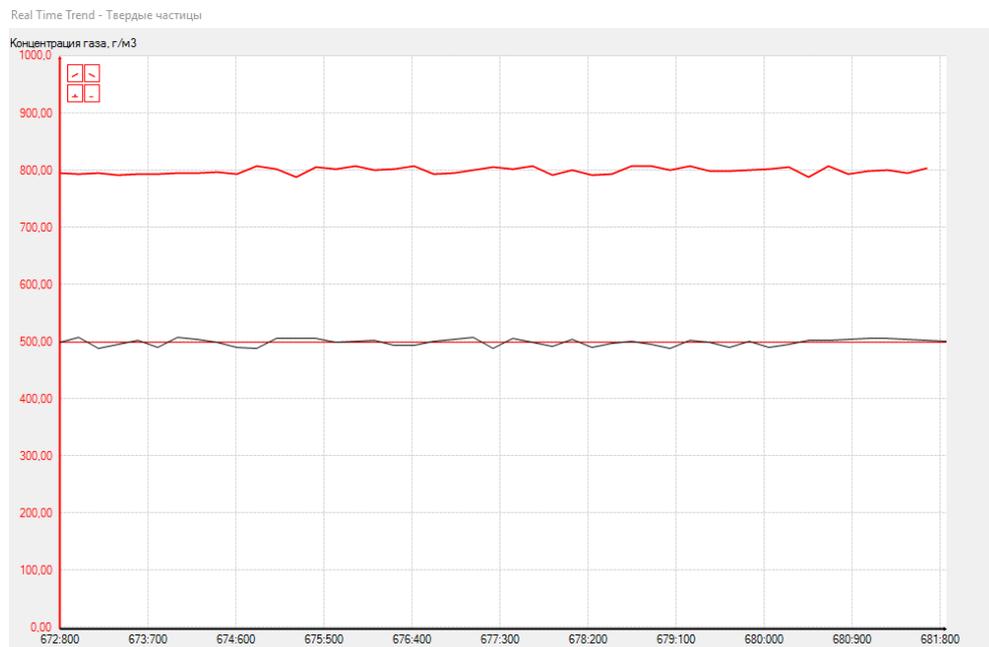


б) значения концентрации CxHy, г/м³

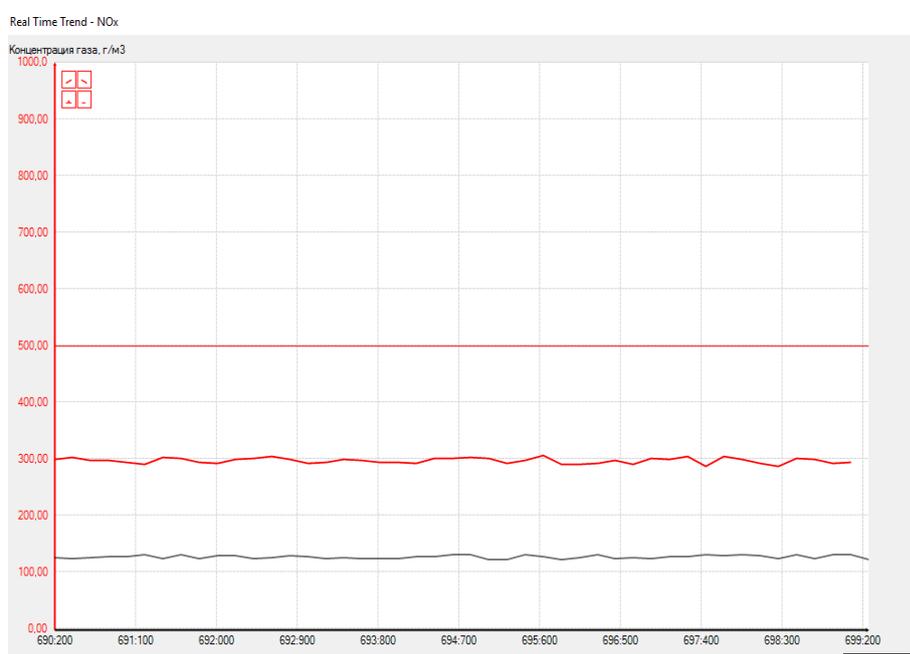
Рисунок 4.12 – Графики зависимости концентрации при 20% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока

При 40% перекрытом положении фильтрующих элементов наблюдается снижение концентрации ТЧ с 790 г/м³ до 597 г/м³; NO<sub>x</sub> с 274 г/м³ до 169 г/м³; СО г/м³ с 370 до 279 г/м³; C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> с 483 г/м³ до 370 г/м³

При 60% перекрытом положении фильтрующих элементов наблюдается снижение концентрации ТЧ с 790 г/м<sup>3</sup> до 501 г/м<sup>3</sup>; NO<sub>x</sub> с 274 г/м<sup>3</sup> до 128 г/м<sup>3</sup>; СО г/м<sup>3</sup> с 370 до 227 г/м<sup>3</sup>; C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> с 483 г/м<sup>3</sup> до 338 г/м<sup>3</sup> (рисунки 4.13, 4.14).

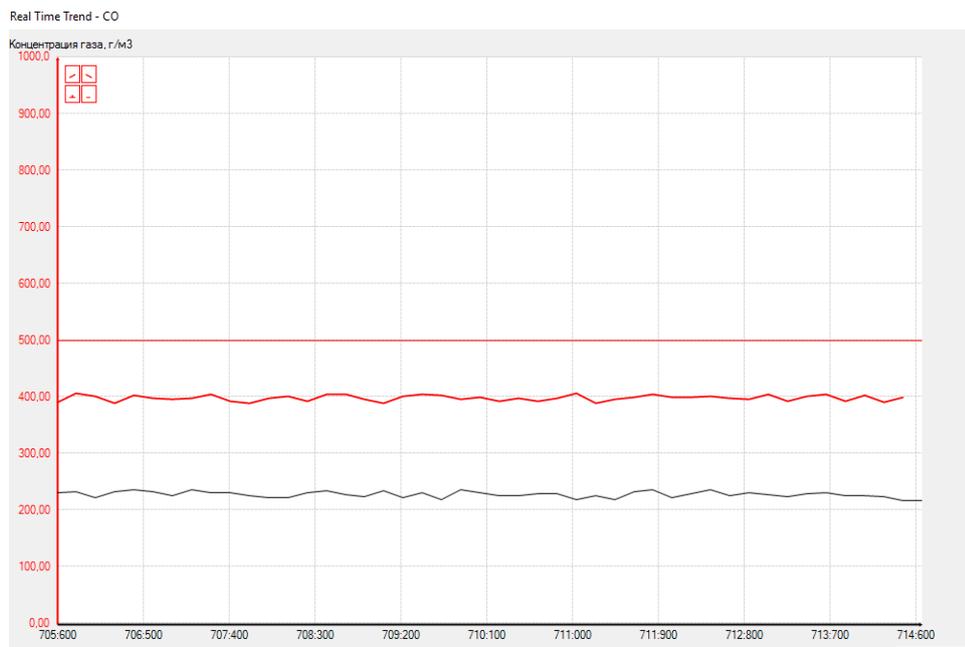


а) значения концентрации ТЧ, г/м<sup>3</sup>

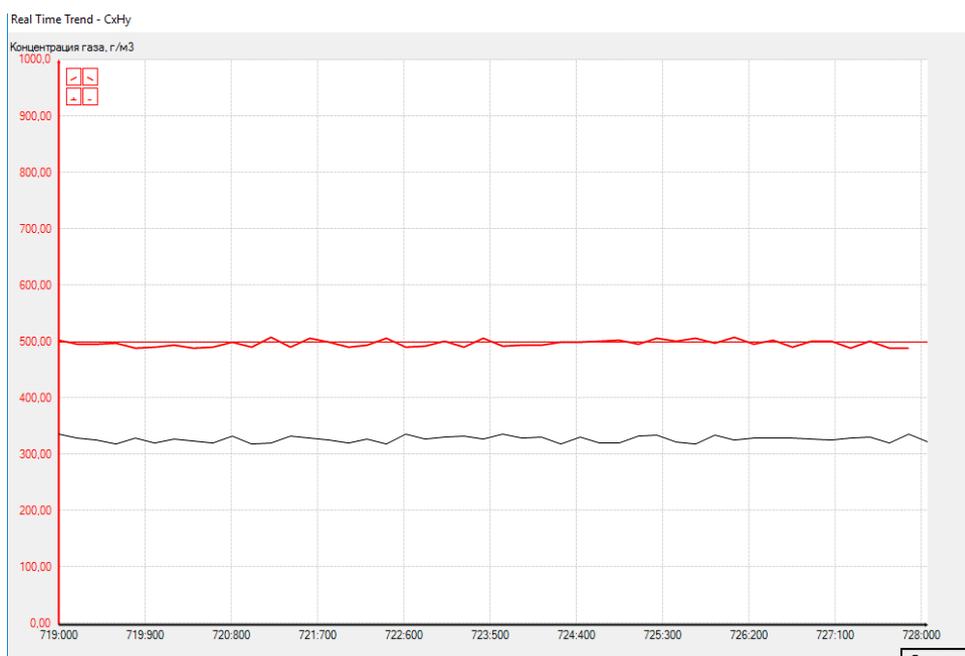


б) значения концентрации NO<sub>x</sub>, г/м<sup>3</sup>

Рисунок 4.13 – Графики зависимости концентрации при 60% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока



а) значения концентрации  $\text{CO}, \text{г/м}^3$



б) значения концентрации  $\text{C}_x\text{H}_y, \text{г/м}^3$

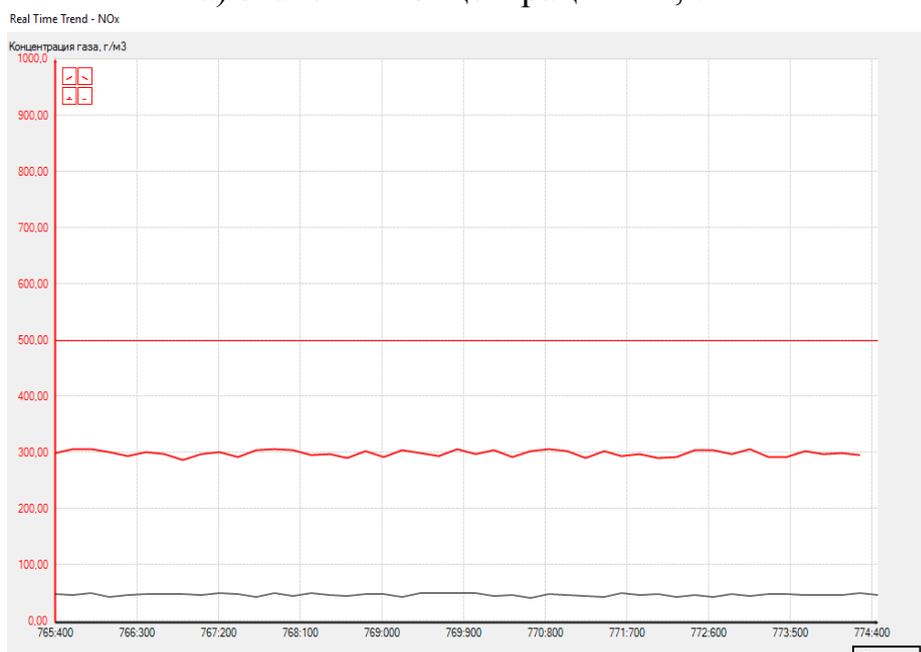
Рисунок 4.14 – Графики зависимости концентрации при 60% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока

При 80% перекрытом положении фильтрующих элементов наблюдается снижение концентрации ТЧ с  $790 \text{ г/м}^3$  до  $401 \text{ г/м}^3$ ;  $\text{NO}_x$  с  $274 \text{ г/м}^3$  до  $92 \text{ г/м}^3$ ;  $\text{CO}$  с  $370$  до  $190 \text{ г/м}^3$ ;  $\text{C}_x\text{H}_y$  с  $483 \text{ г/м}^3$  до  $288 \text{ г/м}^3$ .

При 100% перекрытом положении фильтрующих элементов наблюдается снижение концентрации ТЧ с 790 г/м<sup>3</sup> до 305 г/м<sup>3</sup>; NO<sub>x</sub> с 274 г/м<sup>3</sup> до 45 г/м<sup>3</sup>; СО г/м<sup>3</sup> с 370 до 154 г/м<sup>3</sup>; С<sub>х</sub>Н<sub>у</sub> с 483 г/м<sup>3</sup> до 255 г/м<sup>3</sup> (рисунки 4.15, 4.16).

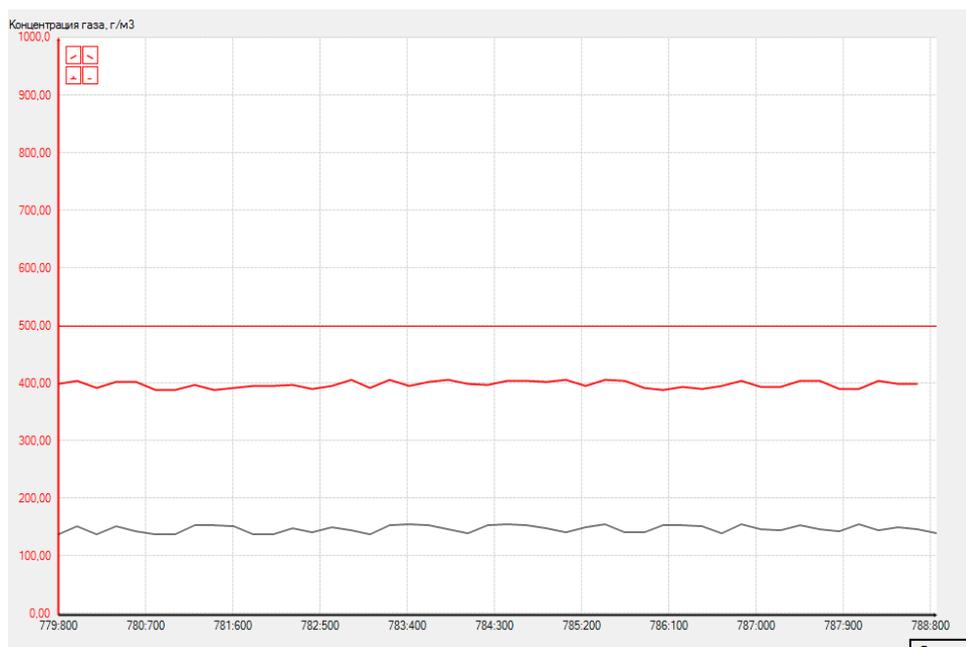


а) значения концентрации ТЧ, г/м<sup>3</sup>

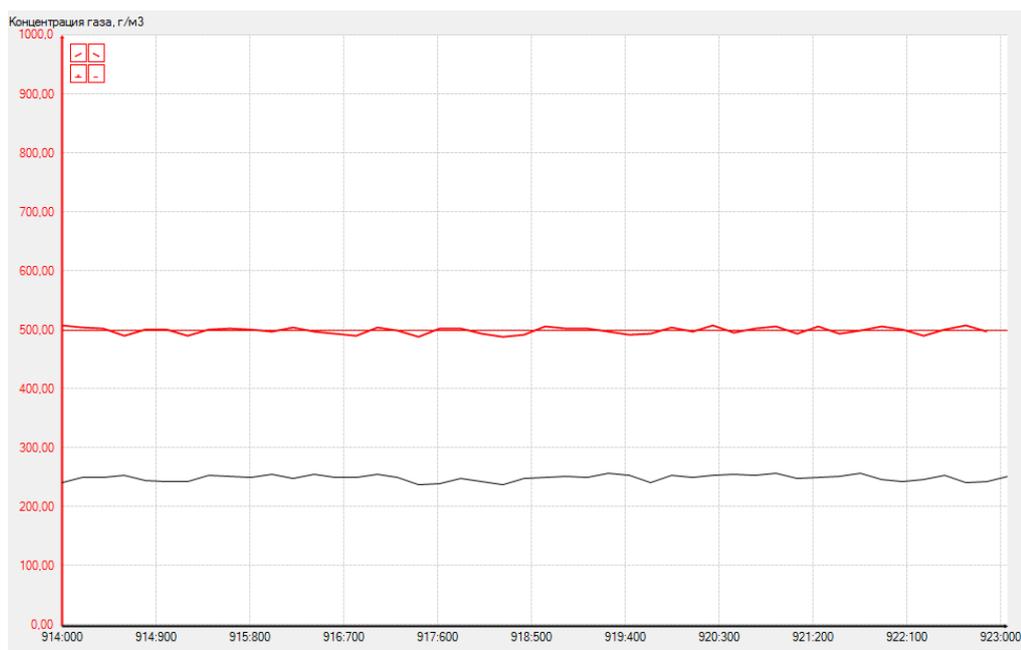


б) значения концентрации NO<sub>x</sub>, г/м<sup>3</sup>

Рисунок 4.15 – Графики зависимости концентрации при 100% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока



а) значения концентрации  $\text{CO}, \text{г/м}^3$



б) значения концентрации  $\text{CxHy}, \text{г/м}^3$

Рисунок 4.16 – Графики зависимости концентрации при 100% перекрытом положении фильтрующих элементов СВС-блока

Проведённые натурные эксперименты, результаты которых представлены на рисунках 4.11 - 4.16, показали эффективность предлагаемой методики и автоматизированной системы очистки. Помимо эффективного пылеулавливания использование в разработанной системе очистки пористых композиционных СВС материалов позволило получить ощутимое снижение

концентрации газов. Так концентрация  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  и  $\text{C}_x\text{H}_y$  были уменьшены до значений 200-300 г/м<sup>3</sup>, что приблизительно в 3 раза меньше, чем на реальных, действующих ТЭС. Развитие данной технологии позволит улучшить экологию в крупных городах, а так же создавать экологически чистые котельные для небольших районов.

#### 4.4 Выводы по разделу

Описывается, разработанная система мониторинга и дистанционного управления пылегазоулавливанием. Данная программа представляет собой систему мониторинга и дистанционного управления, предназначенного для круглосуточного контроля параметров технологического процесса очистки и наблюдения за технологическим оборудованием в реальном времени.

Система реализуется на совместном интегрировании технических средств автоматизации и программного обеспечения, позволяющего осуществлять эксплуатацию технологического оборудования без постоянного участия обслуживающего персонала. Все технологические параметры, сигналы о текущем состоянии оборудования котельной отображаются в режиме реального времени на мнемосхеме, которая может отображаться как на персональном компьютере, так и на НМИ-панели.

Показана эффективность предлагаемой методики и автоматизированной системы очистки. Помимо эффективного пылеулавливания использование в разработанной системе очистки пористых композиционных СВС материалов было достигнуто ощутимое снижение концентрации газов. Так концентрация  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  и  $\text{C}_x\text{H}_y$  были уменьшены до значений 200-300 г/м<sup>3</sup>, что приблизительно в 3 раза меньше, чем на реальных, действующих ТЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1 Проведено исследование систем автоматизации использующихся в теплоэнергетике Республики Казахстан. Изучены технологии гидравлической фильтрации золошлаковых отходов. Рассмотрены данные вопросы для ТЭС и котельных;

2 Сделан критический анализ существующих схем гидрозолоудаления пылеугольных ТЭС;

3 Проанализированы пути решения проблем золоулавливания на пылеугольных ТЭС;

4 Изучены системы удаления золошлаковых отходов типичных ТЭС Казахстана, а именно схемы ГЗУ со сгущением золошлаков в централизованном узле и схема ГЗУ с индивидуальными осветлительными установками;

5 Проведено исследование движения дымовых газов в ТКВ (труба коагулятора Вентури) с изменяемой внутренней геометрией с помощью математической модели вязкой несжимаемой жидкости;

6 Приведено численное решение математической модели вязкой несжимаемой жидкости. Получены численные результаты при различных формах ТКВ;

7 Разработана математическая модель движения вредного вещества в золоуловителе, содержащем три пористые вставки с различными значениями пористости. Для простоты изложения рассматривается вертикальное сечение области золоуловителя;

8 Приведены методология и алгоритм оценки и выбора каталитических материалов для СВС – фильтров;

9 Разработан оригинальный автоматизированный комплекс, включающий золоуловители с ТКВ и регулируемый по составу газа газоуловитель, приборное оснащение и пилотную установку для оценки эффективности очистки газов в устройствах с пористыми проницаемыми СВС-каталитическими фильтрами;

10 Показано, что применение новых запатентованных конструкций на основе трубы-коагулятора Вентури с изменяемой геометрией и устройств газоулавливания с использованием композитных материалов позволяют создать автоматизированную систему пыле-газоулавливания с достижением экологических нормативов;

11 Предложено устройство для очистки газов. Данное устройство за счет возможности изменения проходного сечения корпуса и применения пористых проницаемых металлокерамических фильтрующих элементов позволяет упростить конструкцию устройства, повысить степень очистки от вредных веществ в составе дымовых газов;

12 Разработана программа представляющая собой систему мониторинга и дистанционного управления параметров технологического процесса очистки и наблюдения за технологическим оборудованием в реальном времени;

13 Показана эффективность предлагаемой методики и автоматизированной системы очистки. Помимо эффективного пылеулавливания использование в разработанной системе очистки пористых композиционных СВС материалов было достигнуто ощутимое снижение концентрации газов. Так концентрация  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  и  $\text{C}_x\text{H}_y$  были уменьшены до значений 200-300 г/м<sup>3</sup>, что приблизительно в 3 раза меньше, чем на реальных, действующих ТЭС.

Основные научные и практические результаты работы опубликованы в работах [41-47, 49-69] и приняты для внедрения в Институте системных исследований и проектов, ТОО «ВОСТОК-ТЕХНО», ТОО «Айрон-Техник», ТОО «Лаборатория альтернативной энергетики» (совместная француско-казахстанская фирма, г.Алматы).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Постановление Правительства Республики Казахстан от 14 декабря 2007 года № 1232Об утверждении Технического регламента «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций».
2. Алияров Б.К., Дукенбаев К.Д., Нуржанов Б.Г., Палатник И.Б. Вариант пылеугольной ТЭС с обеспечением нормативных выбросов в атмосферу // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 1993. – №3. – С.36-40.
3. Дукенбаев К.Д. Энергетика Казахстана. Условия и механизмы ее устойчивого развития. – Алматы: Наука, 2002. – 452 с.
4. Сыздыкпаева А.Р., Квасов И.А. Оптимальная по экономическим критериям схема золоудаления для типичных ТЭЦ Казахстана //Материалы международной научно-практической конференции. - Усть-Каменогорск, 2002. – С. 338-342.
5. Покровский В.Н., Аракчеев Е.П. Очистка сточных вод тепловых электростанций //Энергия, 1980. – 252 с.
6. Сайт «Mylektsii.ru» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mylektsii.ru/12-64714.html>.
7. Scheldon D. Strauss Zero Discharge Firmly Entrenched as a Power Plant Design Strategy // Power. – 1994. – №10. – p.41-48.
8. Чеканов Г.С., Зорин В.А. Образование и устранение отложений в системах гидрозолоудаления. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.
9. Сыздыкпаева А.Р., Солтан Г.Ж., Квасов А.И. Новые схемы гидрозолошлакоудаления на действующих ТЭЦ //Вестник ВКГТУ. – 2000. –№1. – С. 90-94.
10. Палатник И.Б. Решение проблем золоулавливания на пылеугольных ТЭС //Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 1993. – №3. – С.30-37.
11. Сыздыкпаева А.Р., Квасов А.И., Солтан Г.Ж. Оптимизация систем гидрозолоудаления на ТЭЦ Казахстана. // Материалы международной научно-практической конференции. - Алматы, 2001. - С. 168-169.
12. Азаматова Ж.К. Автоматизированная система бессточной схемы гидрозолоудаления с использованием циклонов с изменяемой геометрией:автореф. дис. на соиск. учен.степ. канд. тех. наук (05.13.06) /Азаматова Ж. К.; ВКГТУ. – Усть-каменогорск, 2010. – 18с.
13. Солтан Г.Ж., Сыздыкпаева А.Р. Оптимизация бессточных систем водообеспечения пылеугольных ТЭС. //Материалы международной Казахстанско-Российской научно-практической конференции. – Усть-Каменогорск, 2004. – С. 295–297.
14. Семевский Ф.Н., Семенов С.М. Математическое моделирование экологических процессов. – Л.:Гидрометеиздат, 1982. – 280 с.
15. Богатырев М.Ф., Богатырев А.М. Выбор мероприятий по достижению нормативов при нормировании выброса загрязняющих веществ в атмосферу // Вестник ВКГТУ. – 2009. – № 1. – С. 18-22.

16. Квасов И.А. Оценка и разработка стратегии развития электроэнергетического комплекса Восточного Казахстана по эколого-экономическим критериям: диссертация кандидата технических наук: 25.00.36.- Барнаул, 2001.- 221 с.
17. Медведев Г.В. Повышение эффективности систем очистки отработавших газов судовых дизелей применением металлокерамических фильтров. диссертация д.т.н. : 05.08.05.- Барнаул, 2016.- 340 с.
18. Анциферов В.Н. Высокопористые алюмосиликатные материалы: получение, свойства, применение / В.Н. Анциферов, С.Е. Порозова. - Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 1995. - 120 с.
19. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учеб. / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 384 с.
20. Абдарахимов В.З. Использование отходов цветной металлургии в производстве керамических материалов / В.З. Абдарахимов, Е.С. Абдарахимова, Н.С. Агадюнов, В.П. Долгий // Огнеупоры и техническая керамика. - 2005. - № 12. - С. 35-39.
21. Итин В.И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений / В.И. Итин, О.С. Найбороденко. - Томск: Изд-во Том.ун-та, 1989. - 214 с.
22. Проблемы техносферной безопасности – 2015: сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции / Под ред. Мельберт А.А., Вишняк М.Н.; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – 206 с.
23. Лапшин О.В., Овчаренко В.Е., Боевгин Б.Н. Термокинетические и теплофизические параметры высокотемпературного синтеза интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al в режиме теплового взрыва порошковой смеси чистых элементов // Материалы Междунар. симп. по физике горения и взрыва. - Черногловка, 2000. - Т. 1. - С. 143-145.
24. Азаматов Б.Н., Бакланов А.Е., Титов Д.Н., Шахарова Г.Т., Титов Е.В., Новоселов А.Л. Решение проблем подбора составов шихты для получения композитных пористых проницаемых каталитических материалов. // Вестник ВКГТУ. – 2013г. - № 2. – С. 27 – 32.
25. Михайлов А.В. Пути снижения негативного воздействия отходов сельского хозяйства на окружающую природную среду // Актуальные проблемы производственной и экологической безопасности: Сб. тр. - Барнаул: 2011. - С. 106-109.
26. Мельберт А.А., Жуйкова А.А., Новоселов А.А. и др. Использование СВС-технологий для получения пористых каталитических материалов // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сб. статей. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. - С. 21-27.
27. Мельберт А.А., Новоселов А.Л. Перспективы применения СВС-каталитических фильтров отработавших газов автомобилей // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - 1999. - № 2. - С. 157-158.

28. Мельберт А.А., Новоселов А.А. Эффективность СВС-каталитических блоков в нейтрализаторах для дизелей // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - 1999. - № 2. - С. 157-158.
29. Евстигнеев В.В., Соломенцев С.Ю. Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в производстве пористых изделий // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии: Сб. научн. Тр. - Новосибирск: Наука, 2001. - С. 47-53.
30. Евстигнеев В.В., Лебедева О.А., Тубалов Н.П. Применение СВС-фильтров для создания пористых каталитических нейтрализаторов // Совершенствование быстроходных дизелей: мат. научной конф. / АлтГТУ.– Барнаул, 1999. - С. 136.
31. Адамович Б.А. Каталитические нейтрализаторы отработавших газов и экологическая безопасность АТС // Автомобильная промышленность. - 2005. - № 1. - С. 9-11.
32. Балдыбек Ж. Метод дополненных областей для нелинейной краевой задачи океана // Алматы. Математический журнал. – 2002. – том 2. №2. – С. 41-50.
33. Сироченко В.П. Численное моделирование конвективных течений вязкой жидкости в многосвязных областях // Труды Международной конференции R DAMM-2001, Т. 6, Ч. 2. Спец. выпуск. – С. 554-562.
34. Вабищевич П.Н. Методы фиктивных областей в краевых задачах математической физики. М.: МГУ, 1991.
35. Caiman D.A., Thew M.T., Carney D.R. Hydrocyclones for oil/water separation//Intern, conf. on hydrocyclones. Cambridge, 1980. – pp. 143-165.
36. Meldrum N. Hydrocyclones: A solution to produced-water treatment // SPE Prod. Eng.1988. – №4. – pp.669-676.
37. Smith I.C., Thew M.T. The use hydrocyclones in the treatment of oil contaminated water system // Proc. 1st Int. Symp. Oil and Gas Explor. and Prob. Waste Manag. Pract, NewOrleans, La, Sept. 10-13, 1990.
38. Бабекно Е.Д. Очистка воды коагулянтами. – М.: Наука, 1977.– С.31– 38.
39. Оптимизация систем золошлакоудаления ТЭЦ. Обзор. ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990. – 115с.
40. Семевский Ф.Н., Семенов С.М. Математическое моделирование экологических процессов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 280 с.
41. Азаматов Б.Н., Квасов И.А., Азаматова Ж.К. Экспериментальное изучение работы гидроциклонов с изменяемой геометрией // Вестник ВКГТУ. - 2017. - №2 (76). – С. 33-39.
42. Азаматов Б.Н., Квасов А.И., Азаматова Ж.К. Экспериментальная оценка износоустойчивости гидроциклонов с изменяемой геометрией // Вестник ВКГТУ. - 2017. - №2 (76). – С. 39-45.
43. Пат. 1975 РК. Устройство для очистки газов / Б.Н. Азаматов, И.А. Квасов, А.И. Квасов; опубл. 09.01.2017, Бюл. №2. - 4с.
44. Пат. 32180. РК. Устройство для очистки газов типа труба Вентури / Б.Н. Азаматов, И.А. Квасов,, А.И. Квасов; опубл. 30.06.2017, Бюл. №12.- 5с.

45. Квасов А.И., Азаматов Б.Н., Квасов И.А., Азаматова Ж.К. Новые автоматизированные технологии гидрозолоудаления и пыле-газоулавливания с использованием СВС материалов. Монография - Усть-Каменогорск, ТОО «ВКПК АРГО», 2017. - 221с.
46. Azamatov B.N., Ozhikenov K.A., Azamatova Zh.K. Assessment of the effectiveness of the use of palladium in catalytic SHS-units for diesel engines // News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2017. – №4 (424). – pp. 142 – 147.
47. Azamatov B.N., Ozhikenov K.A., Azamatova Zh.K. ACS of the set of hydrocyclones with a variable geometry in the system of har TPP // Reports of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. 2017. -№ 4 (314). – pp. 5 – 13.
48. Ударцева, О.В. Повышение экологической безопасности дизелей автобусов. Специальность 05.04.02, диссертация на соискание степени кандидата технических наук, 1995.
49. Титов Д.Н., Бакланов А.Е., Азаматова Б.Н.. Методология и алгоритм оценки и выбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // Вестник ВКГТУ. – 2015. - №3 (69). – С.79-85.
50. Азаматов Б.Н., Азаматова Ж.К., Ергалиев Д.С., Тулегулов А.Д. Каталитическая очистка газов с использованием СВС - технологий // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» [посвящ. 70-летию Великой Победы] : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 2 т. - 362 с.
51. Азаматов Б.Н., Ерболатулы Д., Темирбекова Б.Б., Кантай Н. Исследование свойств древесно-полимерного композита как перспективного // Вестник ВКГТУ. - 2016. - №2 (72). –С.106-110.
52. Б.Н. Азаматов, Д. Ерболатулы, Б.Б. Темирбекова, Н. Кантай. Древесно-полимерные композиты в получении строительных материалов // Творчество молодых инновационному развитию Казахстана: мат. науч. конф. / ВКГТУ. – Усть-Каменогорск, 2016г. – часть I.– С.324.
53. Б.Н. Азаматов, А.Е. Тусупжанов, Б.Д. Захитов. Получение и исследование покрытий Fe-Cr-Ni и Fe-Mn на подложке из АМГ-6 // Вестник ВКГТУ. – 2016. - №4 (74). – С.43-50.
54. Азаматов Б.Н, Квасов А.И., Азаматова Ж.К. Экспериментальная оценка износоустойчивости гидроциклонов с изменяемой геометрией // Вестник ВКГТУ. - 2017. - №2 (76). – С. 39-45.
55. Azamatov B.N., Kvassov A.I. Modeling the processes of dust-gas collection for thermal power plant in the design with variable geometry // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – Novosibirsk, Russia. 2016. – pp.382-385.
56. B.N. Azamatov, Kvassov A.I. Metodika prepodovaniya innovazionnykh tekhnologii zelenoi energetiki // Материалы Междунар. конф. «Современные тенденции подготовки технических кадров и преподавания английского языка в условиях индустриально-инновационного развития Республики Казахстан» и

XIII Нац. конф. KazTEA «25-летие независимого Казахстана: к новым свершениям вместе с английским языком», Оскемен, 2016. – С.11-14.

57. K.A. Ozhikenov, P.G. Mikhailov, B.N. Azamatov, R.S. Ismagulova, Zh.K. Azamatova. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components // 13th international scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia. 2016. – pp.84-90.

58. Азаматов Б., Азаматова Ж., Бакланов А. Автоматизированная система очистки продуктов сгорания на основе батареи циклонов с управляемой геометрией // Поиск – Издние. – 2010. - №4. – С. 229-232.

59. Азаматова Ж.К., Азаматов Б.Н. Автоматизированная система управления и компьютерное моделирование работы гидроциклонов за счет изменения параметров // Вестник ВКГТУ. – 2010г. - № 4. – С. 67 – 75.

60. Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н., Азаматова Ж.К. Разработка программы автоматизированной системы управления батареей гидроциклонов с изменяемой геометрией // Промышленный транспорт Казахстана. – 2010. – №4 (28).

61. Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н., Азаматова Ж.К. Исследование работы гидроциклона с изменяющейся геометрией // Промышленный транспорт Казахстана. – 2010. – №4 (28).

62. Пат. 23960 РК. Способ регулирования работы гидроциклона / Мутанов Г.М., Азаматова Ж.К., Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н. опубл. 16.05.2011, Бюл. №5. – 3с.

63. Пат. 23961 РК. Гидроциклон / Мутанов Г.М., Азаматова Ж.К., Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н. опубл. 16.05.2011, Бюл. №5. - 3с.

64. Мутанов Г.М., Азаматова Ж.К., Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н. Свидетельство о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности «Программа моделирования работы гидроциклона с изменяемой геометрией» № 1580 от 19.10.2010г.

65. Мутанов Г.М., Азаматова Ж.К., Квасов А.И., Бакланов А.Е., Азаматов Б.Н. Свидетельство о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности «Управление системой автоматизированного регулирования параметров гидроциклонов с изменяемой геометрией» № 1396 от 19.08.2010г.

66. Азаматов Б.Н., Бакланов А.Е., Титов Д.Н., Мельберт А.А. Возможности математического моделирования вредных выбросов дизелей // Вестник ВКГТУ. – 2010г. - № 4. – С. 64 – 68.

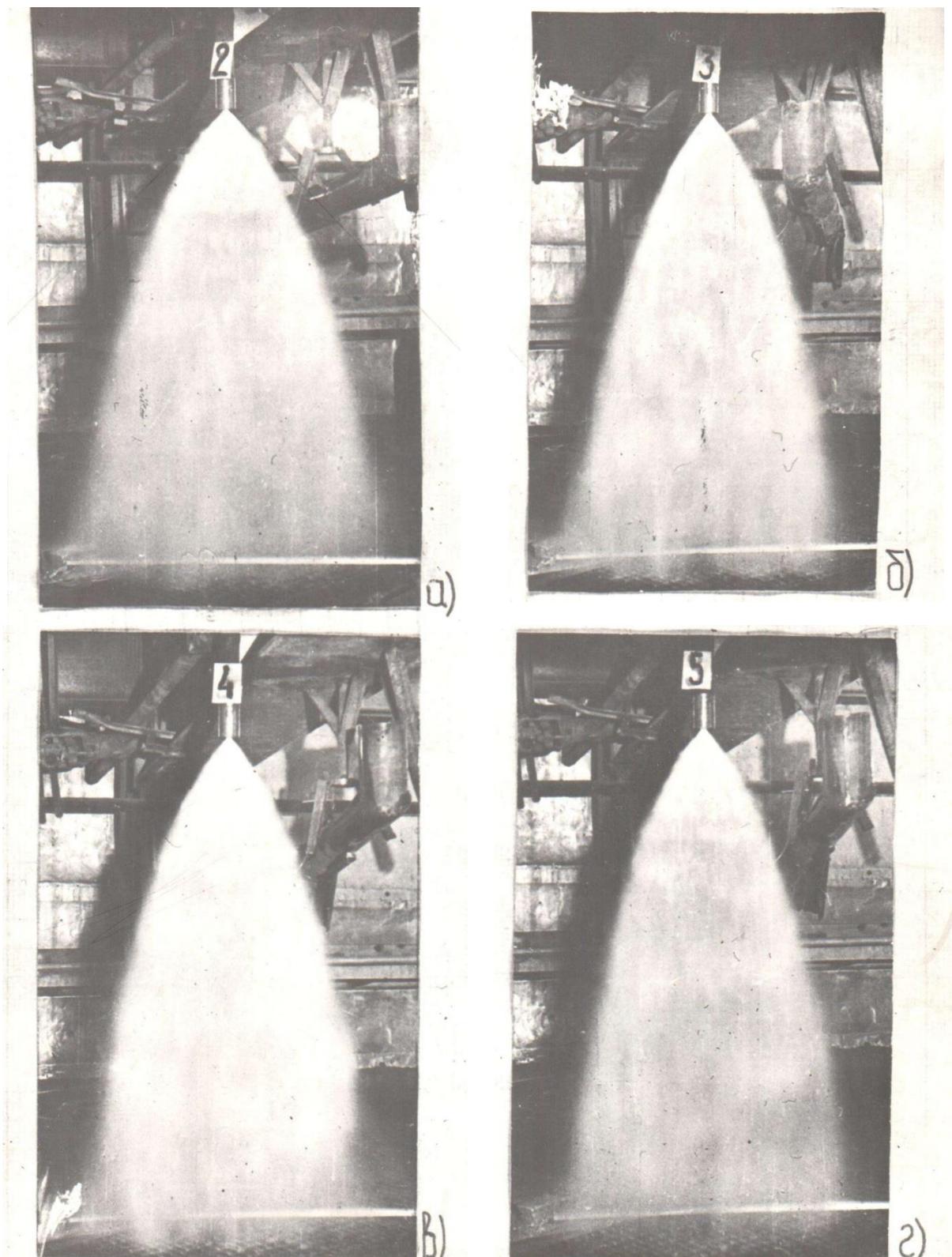
67. Бакланов А.Е., Титов Д.Н., Шахарова Г.Т., Титов Е.В., Новоселов А.Л. Решение проблем подбора составов шихты для получения композитных пористых проницаемых каталитических материалов // Вестник ВКГТУ. – 2013г. - № 2. – С. 27 – 32.

68. Квасов А.И., Азаматов Б.Н., Азаматова Ж.К. Бессточная система гидрозолаудаления с использованием циклонов с изменяемой геометрией / А.И. Квасов, Б.Н. Азаматов, Ж.К. Азаматова. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2013. – 161 с.

69. Азаматова Ж., Квасов А., Азаматов Б. Автоматизированная система гидрозолоудаления / Ж. Азаматова, А. Квасов, Б. Азаматов. – LAPLAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, 2015. – 188 с.
70. Абрамов А.И. Елизаров Д.П., Ремезов А.Н. и др. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций: Учеб.пособие. Под ред. А.С. Седлова. – М.: МЭИ, 2001. — 378 с.
71. Дукенбаев К.Д. Энергетика Казахстана. Движение к рынку. – Алматы: Гылым, 1998. – 584 с
72. Сыздыкпаева А.Р., Квасов А.И. Схема ГЗУ с индивидуальными осветительными установками // Вестник ВКГТУ. – 2009. – № 1.
73. Сборник трудов АлГТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/avt.zip#3>.

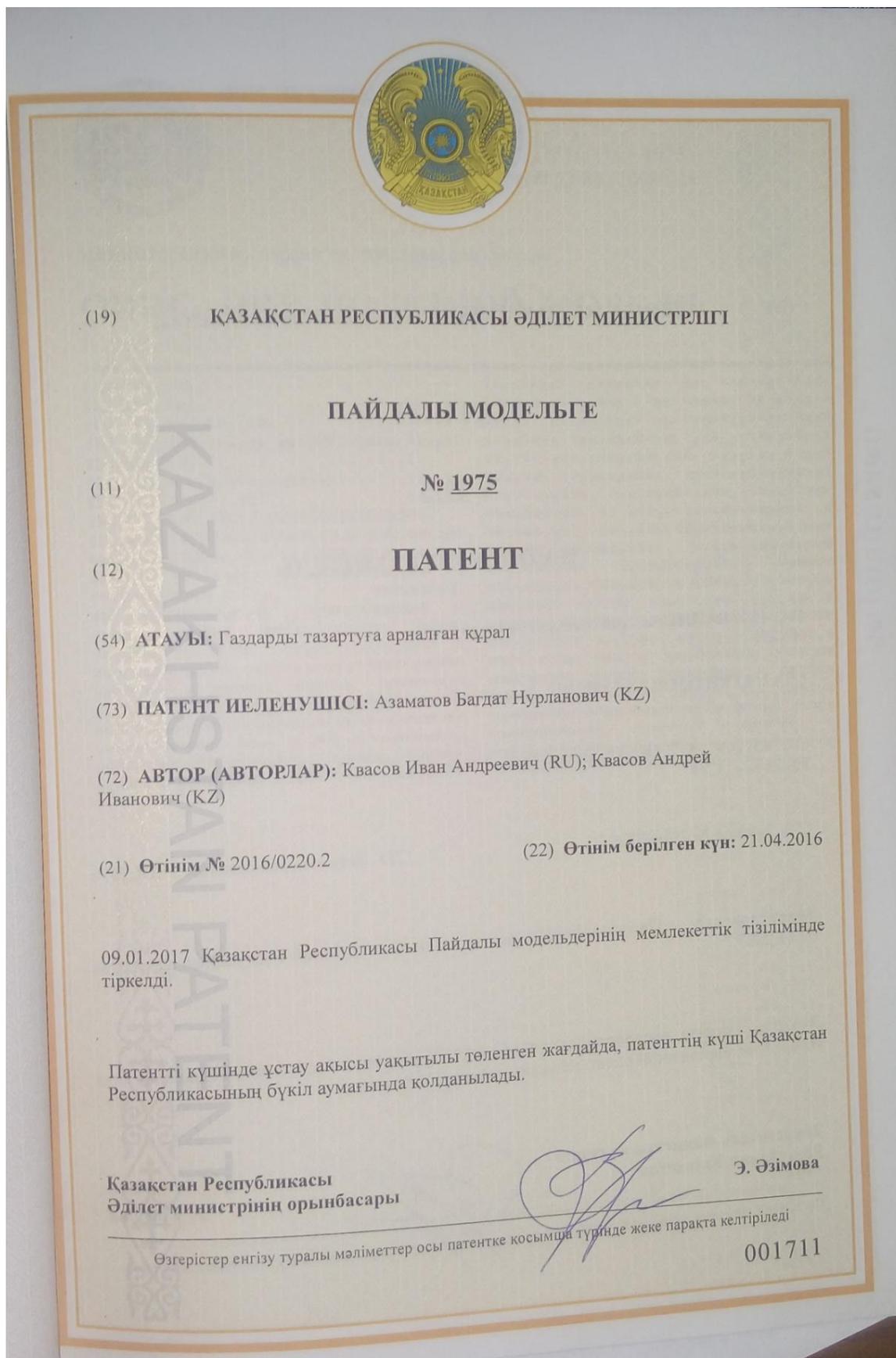
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Факел распыла воды на орошение при различных давлениях в форсунке



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на полезную модель № 1975



Патент №23960. Способ регулирования работы гидроциклона

Настоящим удостоверяется, что Азаматов Багдат Нурланович

и Мутанов Галимкаир Мутанович; Азаматова Жанерке Кыдырбековна; Квасов Андрей Иванович; Бакланов Александр Евгеньевич

является(ются) автором(ами) изобретения

(11) 23960

(54) Способ регулирования работы гидроциклона

(73) Патентообладатель: Республиканское государственное казенное предприятие «Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д.Серикбаева» Министерства образования и науки Республики Казахстан»

(21) 2010/0710.1

(22) 31.05.2010

Председатель Комитета  
по правам интеллектуальной собственности  
Министерства юстиции Республики Казахстан



Л. С. Стамбекова

Патент №23961. Гидроциклон

*Настоящим удостоверяется, что* Азаматов Багдат Нурланович  
и Мутанов Галимкаир Мутанович; Азаматова Жанерке Кыдырбековна; Квасов Андрей  
Иванович; Бакланов Александр Евгеньевич

*является(ются) автором(ами) изобретения*

(11) 23961

(54) Гидроциклон

(73) *Патентообладатель:* Республиканское государственное казенное предприятие  
«Восточно-Казахстанский государственный технический  
университет имени Д.Серикбаева» Министерства образования и  
науки Республики Казахстан»

(21) 2010/0708.1

(22) 31.05.2010

Председатель Комитета  
по правам интеллектуальной собственности  
Министерства юстиции Республики Казахстан



Л. С. Стамбекова

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Удостоверение автора на изобретение № 98418



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 98418

*Настоящим удостоверяется, что Азаматов Багдат Нурланович (KZ)  
и Квасов Иван Андреевич (RU); Квасов Андрей Иванович (KZ)  
является(ются) автором(ами) изобретения*

(11) 32180

(54) Устройство для очистки газов типа трубы Вентури

(73) *Патентообладатель:* Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)

(21) 2015/1296.1

(22) 06.11.2015

Заместитель министра юстиции  
Республики Казахстан

Э. Азимова

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Авторские свидетельства





## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Свидетельство о государственной регистрации объекта на интеллектуальную собственность

<b>СВИДЕТЕЛЬСТВО</b> о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности	№ 1396	19 августа 2010 г.
<p>Настоящим удостоверяется, что в Комитете по правам интеллектуальной собственности Министерства юстиции Республики Казахстан зарегистрирован объект интеллектуальной собственности под названием «Управление системой гидроциклонов с регулированием параметров» (программа для ЭВМ) изменяемой геометрией» (программа для ЭВМ) авторами которого по собственному заявлению являются Мутанов Галимжан, Квасов Андрей Иванович, Бакланов Александр Евгеньевич, Азаматов Жанерке Кыдырбековна, Азаматов Багдат Нурланович.</p>		
<p>По заявлению авторов исключительные (имущественные) права интеллектуальной собственности и объект, созданный 11 марта 2010 года, принадлежат Мутанову Г., Квасову А.И., Бакланову А.Е., Азаматовой Ж.К., Азаматову Б.Н. и авторы гарантируют, что при создании вышеуказанного объекта не были нарушены права интеллектуальной собственности других лиц.</p>		
<p>Запись в реестре Комитета по правам интеллектуальной собственности за №1396 от 19 августа 2010 года имется.</p>		
<p>И.о. председателя <i>Л. Стамбекова</i> Л. Стамбекова 0005469</p>		

<b>КУӘЛІГІ</b> Зияткерлік меншік объектісін мемлекеттік тіркеу	№ 1396	19 тамыз 2010 ж.
<p>Қазақстан Республикасы Әділет министрлігінің Зияткерлік меншік құқығы комитетінде өздерінің жазбаша өтініші бойынша авторлары Галимжан Мутанов, Андрей Иванович Квасов, Александр Евгеньевич Бакланов, Жанерке Кыдырбековна Азаматова, Багдат Нурланович Азаматов болып саналатын «Управление системой автоматизированного регулирования параметров гидроциклонов с изменяемой геометрией» деп аталған (ЭЕМ-ға арналған бағдарлама) зияткерлік меншік объектісі тіркелгенін осы куәлік растайды.</p> <p>Авторлардың өтініші бойынша 2010 жылғы 11 наурызда туындалған нысан мен зияткерлік меншіктің айрықша (мүддіктік) құқығы Г. Мутановтың, А.И. Квасовтың, А.Е. Баклановтың, Ж.К. Азаматованың, Б.Н. Азаматовтың иеліктеріне жағалы және авторлар жоғарыда көрсетілген объектіні жасаған кезде басқа адамдардың зияткерлік меншік құқығы бұзылмағандығына кепілдік береді.</p> <p>Зияткерлік меншік құқығы комитетінің тізбесінде 2010 жылғы 19 тамыздағы №1396 жазба бар.</p>		
<p>Торғанын м.а. <i>Л. Стамбекова</i> Л. Стамбекова</p>		

Авторлық құқық объектісіне құқықтарды  
мемлекеттік тіркеу туралы

## ҚУӘЛІК

№ 1580 \_\_\_\_\_ ж. 19 қазан 2010 \_\_\_\_\_ ж.

Қазақстан Республикасы Әділет министрлігінің Зияткерлік меншік құқығы комитетінде өздерінің жазбаша өтініші бойынша авторлары Галимжаир Мутанов, Андрей Иванович Квасов, Александр Евгеньевич Бақланов, Жанерке Кылдырбековна Азаматова, Бағдат Нурланович Азаматов болып саналатын «Программа моделирования работы гидроциклона с изменяемой геометрией» деп аталған (ЭЕМ-ға арналған бағдарлама) зияткерлік меншік объектісі тіркелгенін осы қуәлік растайды.

Авторлардың өтініші бойынша 2010 жылғы 13 қыркүйекте туындаған нысан мен зияткерлік меншіктің айрықша (мүлдістік) құқығы Г. Мутановтың, А.И. Квасовтың, А.Е. Бақлановтың, Ж.К. Азаматованың, Б.Н. Азаматовтың иеліктеріне жатады және авторлар жоғарыда көрсетілген объектіні жасаған кезде басқа адамдардың зияткерлік меншік құқығы бұзылмағандығына кепілдік береді.

Зияткерлік меншік құқығы комитетінің тізбесінде 2010 жылғы 19 қазандағы № 1580 жазба бар.

Төрайым \_\_\_\_\_ Л. Стамбекова



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации прав  
на объект авторского права

№ 1580 \_\_\_\_\_ г. 19 октября 2010 \_\_\_\_\_ г.

Настоящим удостоверяется, что в Комитете по правам интеллектуальной собственности Министерства юстиции Республики Казахстан зарегистрирован объект интеллектуальной собственности под названием «Программа моделирования работы гидроциклона с изменяемой геометрией» (программа для ЭВМ) авторами которого по собственному заявлению являются Мутанов Галимжаир, Квасов Андрей Иванович, Бақланов Александр Евгеньевич, Азаматова Жанерке Кылдырбековна, Азаматов Бағдат Нурланович.

По заявлению авторов исключительные (имущественные) права интеллектуальной собственности и объект, созданный 13 сентября 2010 года, принадлежат Мутанову Г., Квасову А.И., Бақланову А.Е., Азаматовой Ж.К., Азаматову Б.Н. и авторы гарантируют, что при создании вышеуказанного объекта не были нарушены права интеллектуальной собственности других лиц.

Запись в реестре Комитета по правам интеллектуальной собственности за № 1580 от 19 октября 2010 года имеется.

Председатель \_\_\_\_\_ Л. Стамбекова



ИС 0005716

# ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## Акты внедрения

"ВОСТОК-ТЕХНО" ЖШС  
070013, Қазақстан Республикасы  
Өскемен қ., Леваневский көшесі, 23/1  
тел/факс: 8 (7232) 20-78-08, 57-61-51  
+7 777 246 27 88  
e-mail: v\_tehno@mail.ru, www.pogruzchik.kz



ТОО "ВОСТОК-ТЕХНО"  
070013, Республика Казахстан  
г. Усть-Каменогорск, ул. Леваневского, 23/1  
тел/факс: 8 (7232) 20-78-08, 57-61-51  
+7 777 246 27 88  
e-mail: v\_tehno@mail.ru, www.pogruzchik.kz

### АКТ

внедрения результатов исследования Азаматова Б.Н. на тему  
«Автоматизированная система очистки газов с использованием  
пористых проницаемых СВС материалов»  
в ТОО «ВОСТОК-ТЕХНО» г. Усть-Каменогорск

Руководство ТОО «ВОСТОК-ТЕХНО» г. Усть-Каменогорск рассмотрело результаты диссертационного исследования Азаматова Б.Н., а именно объекты интеллектуальной собственности «Устройство для очистки газов» (Патент № 1975 от 09.01.2017г) и «Устройство для очистки газов типа труба Вентури» (авторское свидетельство 98418 от 06.11.2016г).

Проведенные испытания установки для очистки дымовых газов, созданной на основе выше указанных патентов, показали, что ее применение позволяет обеспечить очистку дымовых газов котельной от механических примесей и вредных веществ до 99% по твердым частицам и 98% по вредным газам.

На основании проведенных испытаний эффективности установки для очистки газов указанная установка принята к внедрению на производстве.

С уважением,

Директор ТОО «ВОСТОК-ТЕХНО»



Е.А. Джексенева



СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования  
Азаматова Б.Н на тему «Автоматизированная система очистки газов с  
использованием пористых проницаемых СВС материалов»  
представленного на соискание ученой степени доктора PhD по  
специальности 6D070200 «Автоматизация и управление»

Казахстанско - французское предприятие ТОО «Лаборатория  
альтернативной энергетики» при разработке концепции развития энергетики  
Казахстана до 2030г. в разделе «Угольная генерация» использовала  
материалы диссертационной работы (PhD) Б.Н. Азаматова  
«Автоматизированная система очистки газов с использованием пористых  
проницаемых СВС материалов». В частности в число рекомендации вошли  
предложенные Б.Н. Азаматовым автоматизация технологии мокрого  
пылеулавливания с применением аппаратов с изменяемой геометрией и АСУ  
комплекса газоулавливания с использованием СВС-фильтров.

Диссертант Б.Н. Азаматов поддерживает тесные контакты с нашими  
специалистами.

Директор ТОО «ЛАЭ»

д.т.н., профессор



*М.Б. Панфилов* М.Б. Панфилов

Қазақстан Республикасы  
ШҚО, Өскемен қаласы  
Протозанов к-сі 3, оф.11  
тел./факс (7232) 578-478



Республика Казахстан  
ВКО, г. Усть-Каменогорск  
ул. Протозанова 3, оф.11  
тел./факс (7232) 578-478

info@irontechnic.kz

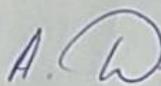
**ТОВАРИЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АЙРОН ТЕХНИК"**  
РНН 181600235622, БИН 050340013080, р/с KZ588560000000109723, в УФ АО "Банк ЦентрКредит", БИК КСЖВКЗКХ  
юр адрес: РК, ВКО, 070002, г. Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гвардейской Дивизии 48-20

**АКТ**  
**внедрения результатов исследования диссертационной работы**  
**Азаматова Багдата Нурлановича**  
**на тему «Автоматизированная система очистки газов с использованием**  
**пористых проницаемых СВС материалов» в ТОО «Айрон-Техник»»**

Мы нижеподписавшиеся, директор ТОО «Айрон-Техник» Дмитриев Александр Сергеевич с одной стороны и докторант группы 14=DAY-3 специальности «Автоматизация и управление» ВКГТУ им. Д.Серикбаева Азаматов Багдат Нурланович с другой стороны, составили настоящий Акт о том, что разработанные в диссертационной работе теоретические расчёты и программные средства используются при разработке проектов по автоматизации систем очистки ТЭС.

Методика расчетов принята для использования в ТОО «Айрон-Техник».

Директор ТОО «Айрон-Техник»



А.С. Дмитриев

Докторант группы 14=DAY-3



Б.Н. Азаматов