

На правах рукописи



МИРСАЛИХОВ КИРИЛЛ МАРАТОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА НА
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЫМОВЫХ ТРУБ ТЭС**

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Казань - 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции»

Научный
руководитель: доктор химических наук, профессор
Чичирова Наталия Дмитриевна

Официальные
оппоненты: **Кудинов Анатолий Александрович**, доктор
технических наук, профессор кафедры «Тепловые
электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»

Прохоров Вадим Борисович, кандидат технических
наук, профессор кафедры «Тепловые электрические
станции» ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

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

Защита состоится 3 декабря 2024 года в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел./факс 8(843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В феврале 2019 г. вступило в силу Постановление Правительства РФ от 25.01.19 №43 «О проведении отборов проектов модернизации генерирующих объектов тепловых электростанций», которое утвердило правила определения предельных капитальных затрат на реализацию проектов модернизации тепловых электростанций, индексации этих затрат и отбора проектов модернизации. В число мероприятий, которые могут быть предусмотрены проектом модернизации ТЭС, входит в том числе замена (строительство) дымовых труб на электростанциях.

Дымовые трубы являются самым дорогостоящим элементом вспомогательного оборудования на ТЭС. Для станций, работающих на твердом топливе, средняя стоимость строительства дымовой трубы составляет более 70% средней стоимости комплексной замены основных элементов энергетического котла, а максимальная стоимость может превышать 500 млн. руб.

К проектированию и строительству дымовых труб должны предъявляться повышенные требования, так как ошибки или неточности могут привести к серьезному финансовому и экологическому ущербу, поэтому важно правильно определить основные параметры дымовых труб. В современных российских и зарубежных методиках и нормативных документах, касающихся строительства и проектирования дымовых труб, учитываются не все необходимые характеристики и параметры, например, отсутствует технико-экономический расчет скорости выхода дымовых газов. Поэтому появилась необходимость модернизации существующих методик определения основных параметров дымовых труб с учетом последних достижений технико-экономических разработок, а также разработки и применения новых, наиболее надежных и экономичных конструкций дымовых труб с более строгим обоснованием выполнения их выходной части.

Научное исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: «Изучение процессов в гибридной энергетической установке «топливный элемент – газовая турбина», шифр проекта FZSW-2022-0001.

Степень разработанности темы

Разработкой и исследованиями в области методик расчета оптимальных параметров и конструкций дымовых труб занимался достаточно широкий круг ученых. Ключевыми российскими авторами по данной тематике являются Л.А. Рихтер, Э.П. Волков, М.Е. Берлянд, А.Г. Тумановский, Г.Г. Ольховский, Ф.В. Сапожников, Л.И. Кропп, В.И. Кормилицын, Н.Л. Бызова, Н.А. Зройчиков, Г.Н. Абрамович, Е.И. Гаврилов, А.К. Внуков, А.П. Скворцов, С.М. Горлин, А.В. Мошкарин, Ю.В. Салов, А.А. Кудинов, Б.Г. Тувальбаев, Л.А. Мамрукова, В.Г. Лебедев, В.Б. Прохоров, Ф.П. Дужих, И.Б. Заседателей, И.А. Шишков, С.Л. Чернов, Ю.В. Иванов, С.Г. Андрианов, В.П. Осоловский, М.Г. Ладыгичев, Б.К. Пергаменщик, И.А. Лесников, А.М. Грибков, М.И. Сапаров, В.В. Варнашов и др. За рубежом подобные исследования зачастую проводились в составе научных или инженерных объединений входящих в правительственные комиссии или в структуре частных компаний. К основным специалистам можно отнести Ronald L. Petersen, D. Bruce Turner, Richard H. Schulze, William H. Snyder, Albert De Kreij.

Объект исследования – промышленные дымовые трубы ТЭС и крупных котельных.

Предмет исследования – аэродинамические и экономические факторы и условия формирования дымового факела, оказывающие влияние на основные параметры дымовых труб ТЭС, а также выходную часть дымовой трубы.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является определение оптимальных геометрических параметров всей системы дымовых труб с несущей железобетонной оболочкой, в том числе конструкции их выходной части, на основании исследования экономических и аэродинамических факторов и условий формирования дымового факела. Для достижения цели работы поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать универсальную методику для определения скорости газов в стволах и в устье дымовой трубы, с учетом рыночной экономической модели при обеспечении полной сопоставимости вариантов.

2. Определить зависимость основных параметров дымовой трубы от аэродинамических и экономических факторов и условий формирования дымового факела.

3. Разработать конструктивные схемы многоствольных дымовых труб со стволами разных диаметров и рассмотреть возможность их применения.

4. Определить влияние неравномерного распределения расходов и температур дымовых газов по стволам на технико-экономический расчет скорости дымовых газов в каждом стволе.

5. Разработать рекомендации по выполнению выходной части многоствольных дымовых труб с учетом аэродинамических характеристик.

Научная новизна исследования

Найдено аналитическое решение для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для трехствольной и четырехствольной дымовых труб со стволами произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами и между стволами и оболочкой.

Разработана методика определения скорости газов в газоотводящих стволах дымовых труб ТЭС, позволяющая связать экономические условия и технические решения, отличающаяся учетом конструкционных и гидродинамических особенностей.

Установлена взаимосвязь между индивидуальными условиями течения газов в стволах многоствольных дымовых труб и их размерами.

Разработана методика определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка, позволяющая оценить параметры дымового факела в статичном состоянии.

Разработана методика исследования с помощью верифицированной CFD модели гидродинамических характеристик дымового факела, позволяющая оценить влияние параметров выходной части многоствольной дымовой трубы на формирование начального участка дымового факела.

Теоретическая значимость работы

Проведенные исследования позволили определить факторы, оказывающие наибольшее влияние на основные параметры дымовой трубы (скорость дымовых

газов в стволах, высота дымовой трубы, диаметры стволов и оболочки), и разработать методику определения основных параметров дымовых труб различной компоновки с учетом этого влияния. Результаты работы могут быть рекомендованы к включению в нормативные документы и методические указания по проектированию дымовых труб.

Практическая значимость

Разработана новая методика расчета основных параметров дымовых труб с несущей железобетонной оболочкой различных применяемых конструкций с учетом технико-экономических показателей.

Показано, что уменьшение суммарного периметра стволов, при сохранении суммарного расхода дымовых газов, позволяет трехствольным дымовым трубам иметь технико-экономическое преимущество перед дымовыми трубами с большим количеством стволов.

Разработанная методика выбора диаметров стволов в зависимости от расходов и температур газов в этих стволах позволяет сократить затраты на тягодутьевые машины и, как следствие, иметь за счет этого более низкие суммарные дисконтированные затраты по сравнению с традиционными вариантами.

Разработаны рекомендации по исследованию аэродинамики дымового факела в атмосфере. Результаты исследования влияют на выполнение выходной части многоствольных дымовых труб. Даны также рекомендации по конструкции диффузоров, или, при необходимости, конфузоров с целью выравнивания скоростей газов по стволам на выходе из трубы.

На защиту выносятся

Методика определения основных параметров дымовой трубы с несущей железобетонной оболочкой различных типов и конструкций, применяемых в ТЭС, учитывающая основные технико-экономические показатели.

Результаты аналитического решения по определению минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для трехствольной и четырехствольной дымовых труб со стволами произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами, и стволами и оболочкой.

Методика определения начального участка дымового факела в CFD модели, а также результаты моделирования траектории движения дымового факела, которые позволили показать, что предлагаемые конструктивные решения не изменяют экологические характеристики дымовой трубы.

Методология и методы исследования.

В процессе исследования проводились натурные эксперименты с использованием аэрологического шаропилотного теодолита и фотосъемки, применялось компьютерное моделирование с помощью программной системы анализа методом конечных элементов (Ansys Fluent), также применялись системы автоматизированного проектирования двухмерных и трехмерных ассоциативных моделей (Компас-3D, AutoCAD Inventor) и системы компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования (Mathcad, Maxima, Maple). Кроме того, применялись общенаучные методы исследования в рамках

сравнительного, логического, статистического и технико–экономического анализа в их последних версиях.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых методов исследований, применением современных прикладных программных продуктов, а также удовлетворительным согласованием результатов расчетных исследований с экспериментальными данными, оценкой погрешностей измерений.

Личное участие автора

Автором проведен анализ имеющейся литературы по вопросам исследования, принято участие в разработке универсальной методики по определению оптимальной скорости в устье дымовой трубы. Автор лично принимал участие во всех натурных экспериментах по определению траектории дымового факела с последующей обработкой результатов. Автор принял участие в нахождении аналитического решения для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для трехствольной и четырехствольной дымовых труб со стволами произвольного диаметра, и решил эту задачу геометрически с помощью системы автоматизированного проектирования двухмерных и трехмерных ассоциативных моделей. Автором разработана расчетная CFD модель начального участка дымового факела одноствольных и многоствольной дымовых труб.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

По тематике и методам исследования диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» в части пункта 2 - математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии, пункта 3 - Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок. 4 - разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок. 7 - исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем, комплексов и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования

Внедрение результатов.

Получен акт об использовании результатов диссертационной работы в

филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 для объектов модернизации, реконструкции и строительства вновь возводимых дымовых труб.

Апробация работы.

Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований обсуждались на IX Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань, 2018 г.); XXII Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном Дню энергетика (г. Казань, 2018 г.); XXIII Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном Дню энергетика (г. Казань 2019 г.); XXVI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2020 г.); XV Всероссийской (VII Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2021» (г. Иваново, 2021 г.); XVII Всероссийской (IX Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2022» (г. Иваново, 2022 г.).

Публикации.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных цитирования Scopus.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 188 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа содержит 55 рисунков и 27 таблиц, список использованных источников включает 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе представлен анализ отечественных и зарубежных методик по определению оптимальных параметров дымовых труб и моделей дисперсии, на которых они базируются, проведена оценка пригодности различных подходов к моделированию рассеивания в различных средах с точки зрения масштаба, сложности среды и параметров концентрации. Дается обзор нескольких основных коммерческих и некоммерческих пакетов для моделирования рассеивания вредных веществ.

Отмечено что, несмотря на большое количество разработанных расчетных моделей, наиболее точными являются модели рассеивания вредных примесей в воздухе, основанные на метеорологических данных, характерных для конкретного региона. Однако ни одна из рассмотренных иностранных методик выбора основных параметров дымовой трубы не основана на определении скорости выхода газов, исходя из технико-экономического анализа. В то же время иностранные исследователи в своих статьях и комментариях к нормативным

документам сходятся во мнении что скорость газа на выходе из дымовой трубы является определяющей характеристикой для выбора оптимальных параметров дымовой трубы. Разработанная в СССР профессором Л.А. Рихтером методика определения оптимальной скорости газов в устье дымовой трубы имеет ряд существенных достоинств, однако ее применение в современных экономических условиях, без существенной модернизации и дополнения, невозможно.

Анализ конструкционных решений, используемых в России и за рубежом, показал отсутствие значимых различий в подходах к выбору конструкций и проектированию дымовых труб. Отмечены преимущества использования многоствольных дымовых труб.

Во второй главе представлена разработанная универсальная методика расчета основных параметров дымовых труб, применимая для любой модели развития экономики, в том числе независимо от тренда цен и затрат на производство товаров и услуг. При выборе лучшего варианта инвестиционного проекта используется критерий наименьших суммарных дисконтированных затрат. Предложенная методика определения основных параметров дымовой трубы основана на расчете скорости дымовых газов, при которой, в результате расчета, будут минимальные суммарные дисконтированные затраты на сооружение и эксплуатацию дымовой трубы Z_d , рассчитываемые по формуле:

$$Z_d = \sum_{\tau=0}^{\tau} (K_{и} + И + И_{ф})(1 + E)^{-\tau}, \quad (1)$$

где $K_{и}$ – инвестиции; $И$ – издержки без учета амортизации; $И_{ф}$ – финансовые издержки; τ – расчетный срок работы дымовой трубы; E – норма дисконтирования.

Норма дисконтирования E определяется по выражению:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \cdot a_i, \quad (2)$$

где E_i – цена i -го капитала; a_i - доля i -го капитала в общей сумме инвестиций; n – количество видов капитала в общей сумме инвестиций.

Для обеспечения допустимых концентраций, создаваемых дымовой трубой, в соответствии с Приказом Минприроды России от 06.06.2017 №273, высота дымовой трубы определяется по выражению:

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{c_{тр} \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}}}, \quad (3)$$

где A – безразмерный коэффициент, зависящий от метеорологических условий в рассматриваемом районе; M – массовый выброс вредных веществ, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредного вещества в атмосферном воздухе; m и n - безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса; η - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; $c_{тр}$ - концентрация, которая может быть создана данной дымовой трубой, мг/м³; V – объемный расход дымовых газов, м³/с; ΔT – разность температур дымовых газов и окружающего воздуха, °К.

Стоимость многоствольной дымовой трубы вычислялась по выражению:

$$K_{тр} = K_{ф} + K_{об} + K_{с}, \quad (4)$$

где: K_{ϕ} – стоимость фундамента, руб.; $K_{об}$ – стоимость оболочки, руб.; K_c – стоимость стволов, руб. При расчете каждого компонента учитываются трудозатраты на их возведение.

Выбор размеров дымовых труб производился исходя их технико-экономического анализа скорости выхода газов из устья. В ходе расчета производится выбор конструкции элементов дымовой трубы, определяются ее геометрические параметры, стоимость трубы согласно актуальным ценам на стройматериалы и трудозатраты, затраты, необходимые для транспорта газа, учитывается уровень прогнозируемой инфляции, доля заемных средств и процент по кредиту. На основании этих данных вычисляются издержки и суммарные дисконтированные затраты для каждой скорости. Далее определяется наличие избыточных статических давлений по высоте ствола дымовой трубы. Для всех рассматриваемых скоростей концентрация $c_{тр}$, создаваемая трубой, будет одинаковой и будет удовлетворять необходимым условиям рассеивания вредных веществ, согласно формулы (3). По результатам расчета определяется зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода газов, как показано на рисунке 1.

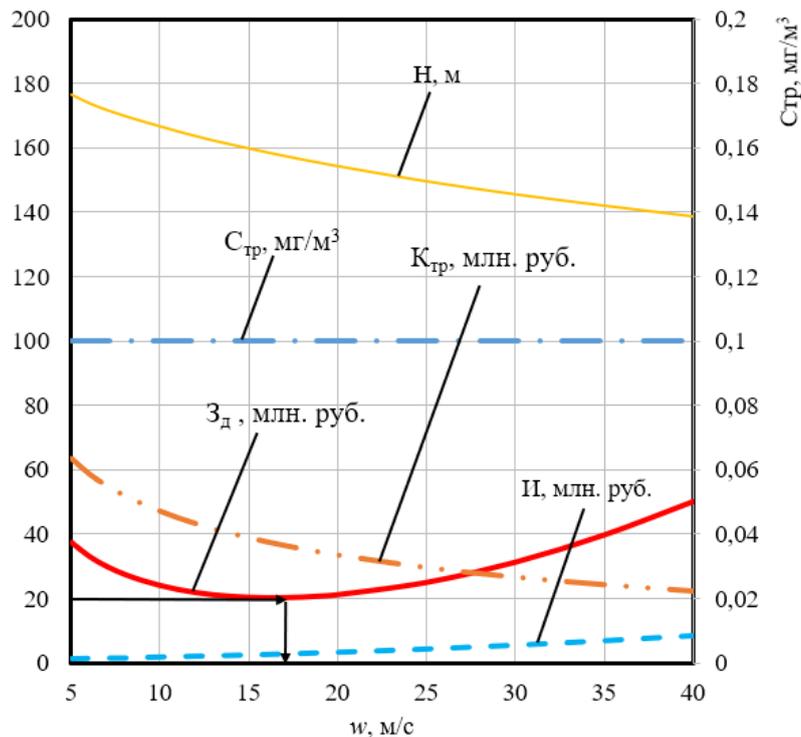


Рисунок 1. Определение скорости газов из условия минимальных суммарных дисконтированных затрат

Для верификации разработанной методики представлены результаты расчета Л.А. Рихтера, проведенного по предложенной им методике для одноствольной дымовой трубы в ценах на 1975 г. (условия плановой экономики) (рисунок 2, сплошные линии), и по разработанной универсальной методике при тех же условиях, без учета инфляции, трудозатрат и кредитных средств (рисунок 2, пунктирные линии). Из сравнения данных рисунков видно, что результаты практически совпадают, особенно для трубы высотой 180 м, где они фактически совпали.

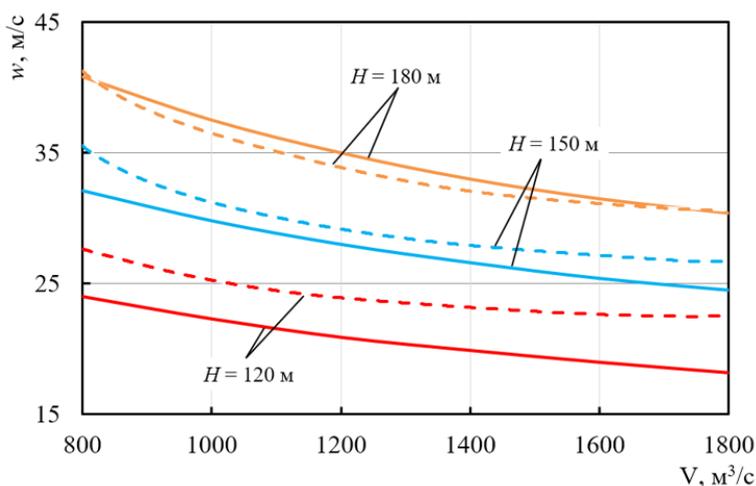


Рисунок 2. Верификация разработанной методики определения основных параметров дымовой трубы

Результаты расчетов при сооружении дымовой трубы, по разработанной универсальной методике, за счет собственных средств в ценах 2018 г., без учета инфляции и кредитных средств, показаны на рисунке 3, (сплошные линии). Результаты расчетов, приведенные на рисунке 3 (пунктирные линии), отображают скорости дымовых газов в железобетонных дымовых трубах в условиях рыночной экономики и стоимости строительных материалов по состоянию на 2018 г., с учетом заемных средств, взятых под 10%, инфляции 5% и трудозатрат 2000 руб./день. Как видно из рисунка, инфляция и стоимость кредита существенно влияют на скорость газов, рассчитанную из условий минимальных суммарных дисконтированных затрат. Она увеличивается примерно на 4 м/с для труб высотой 120 м, на 5 м/с для труб высотой 150 и 180 м, на 7 м/с для труб высотой 250 м. Условия 2023 г. (заемные средства, взятые под 15%, инфляция 10% и трудозатраты 3000 руб./день.) (рисунок 3, штрихпунктирные линии) привели к увеличению скорости газов: для труб высотой 120 м это увеличение составило примерно 2,5 м/с, для труб высотой 150 и 180 м – 3,5 м/с, для труб высотой 250 м – 4,5 м/с.

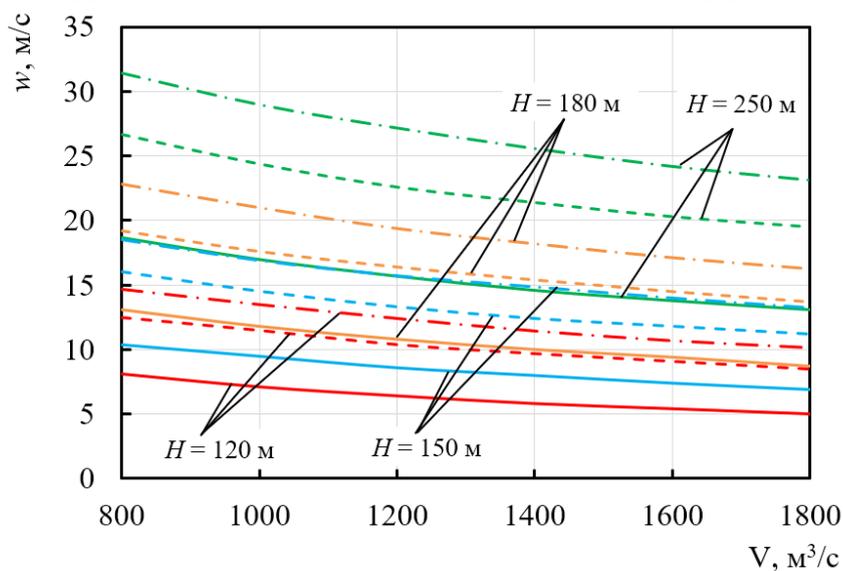


Рисунок 3. Зависимость скорости дымовых газов при условии минимальных дисконтированных затрат от их объемного расхода при различных экономических условиях.

Сравнение данных, приведенных на рисунках 3, и 4, показывает, что скорости дымовых газов, рассчитанные из условий минимальных дисконтированных затрат, в многоствольной дымовой трубе выше, чем в одноствольной. Эта разница больше для относительно низких дымовых труб. Влияние объемного расхода и высоты

дымовой трубы для четырехствольных труб менее выражено, чем для одноствольных, это связано с тем, что стоимость многоствольных труб заметно больше, чем одноствольных.

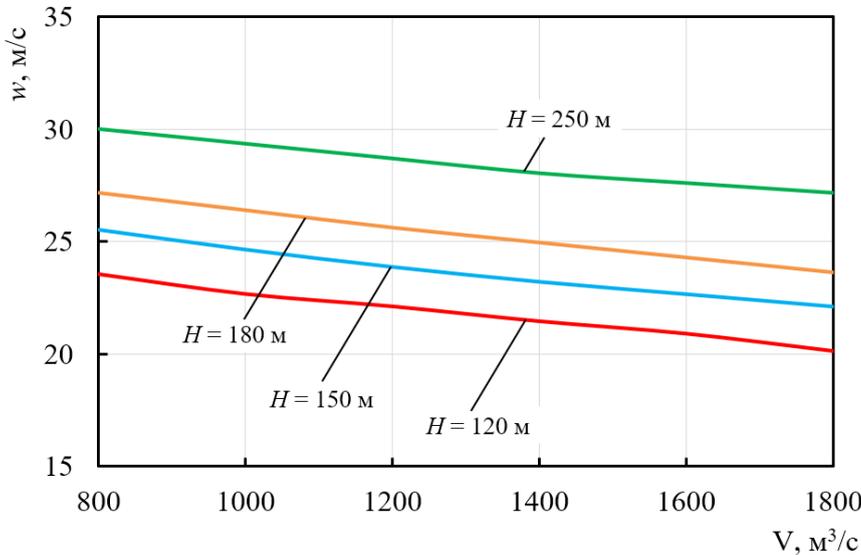


Рисунок 4. Результаты расчета четырехствольной дымовой трубы в условиях 2023 г.

В третьей главе проведено сравнение конструкций трех- и четырехствольных дымовых труб с привлечением метода определения скорости дымовых газов по минимальным суммарным дисконтированным затратам. При одинаковых суммарных площадях поперечных сечений стволов отношение суммарного периметра стволов трехствольной трубы P_3 к суммарному периметру стволов четырехствольной трубы P_4 не зависит от размеров стволов и составляет:

$$\frac{P_3}{P_4} = \sqrt{\frac{3}{4}} = 0,866. \quad (5)$$

Доля стоимости стволов в общей стоимости дымовой трубы растет с увеличением суммарной площади поперечного сечения стволов f , так как увеличивается отношение периметров стволов $P_{ст}$ к периметру оболочки $P_{об}$ (рисунок 5).

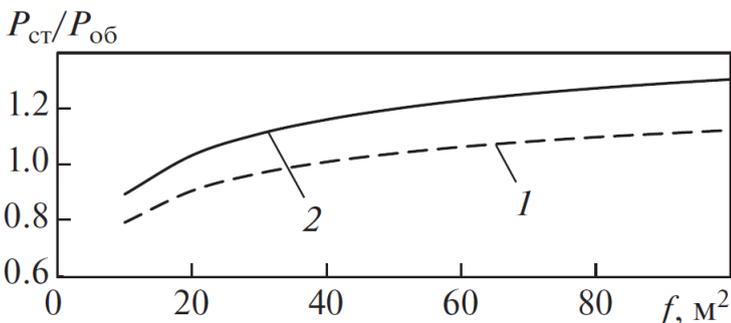


Рисунок 5. Зависимость отношения периметров стволов к периметру оболочки от суммарной площади поперечного сечения стволов для трехствольной (1) и четырехствольной трубы (2)

Периметр оболочки трехствольной дымовой трубы во всем рассматриваемом диапазоне f практически не превышает периметра оболочки четырехствольной трубы. Таким образом, вместо четырехствольной дымовой трубы следует применять трехствольную, так как стоимость трехствольной трубы примерно на

6% меньше стоимости четырехствольной за счет меньшего периметра стволов. Кроме этого, затраты на транспорт газов в трехствольной трубе будут меньше из-за увеличенных диаметров стволов. В случае, если на ТЭС установлено разнотипное оборудование, отмечены преимущества использования многоствольных дымовых труб со стволами разного диаметра.

Дальнейший анализ показал, что диаметр оболочки существующих многоствольных дымовых труб со стволами разных диаметров рассчитывается по диаметру наибольшего ствола, при заданных условиях минимального расстояния между стволами, стволами и оболочкой. Далее были разработаны методики по определению диаметров оболочек для трехствольной и четырехствольной дымовой трубы со стволами разного диаметра при условии, что между стволами и оболочкой сохраняются равные расстояния.

Таким образом, для трехствольной дымовой трубы с тремя стволами разного диаметра была разработана методика определения диаметра оболочки, по которой имеется три ствола с диаметрами d_1 , d_2 и d_3 , а минимальное расстояние между стволами принимаемое 1,2 м. Минимальное расстояние между стволами и оболочкой принимается 1,0 м. Расчетная схема представлена на рисунке 6.

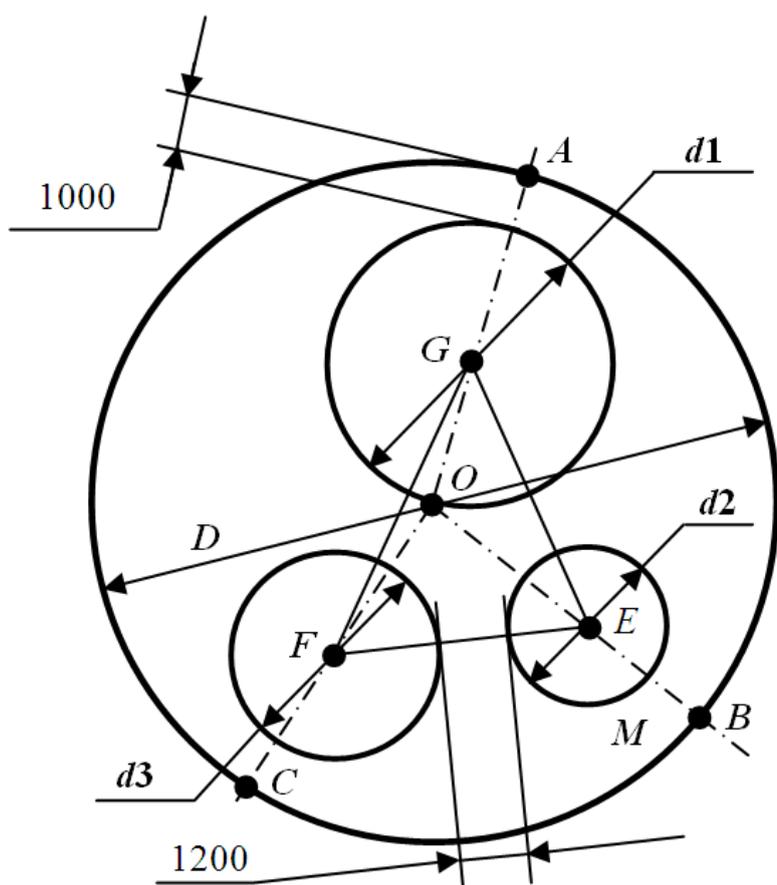


Рисунок 6. Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с тремя разными стволами

Точка O – центр окружности оболочки. Расстояния $OA = OB = OC = R$, равны радиусу оболочки. Рассмотрим треугольник GEF , образованный центрами окружностей стволов. Сторону GE обозначим как:

$$f = \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} + 1,2. \quad (6)$$

Сторону EF обозначим как:

$$g = \frac{d_2}{2} + \frac{d_3}{2} + 1, 2. \quad (7)$$

Сторону FG обозначим как:

$$e = \frac{d_3}{2} + \frac{d_1}{2} + 1, 2. \quad (8)$$

Найдем полупериметр этого треугольника как:

$$p = \frac{(f + g + e)}{2}, \quad (9)$$

тогда площадь треугольника GEF можно найти по формуле Герона:

$$S = \sqrt{p(p-f)(p-g)(p-e)}, \quad (10)$$

где S – площадь треугольника GEF , m^2 .

Из рисунка 5 имеем:

$$OG = R - \frac{d_1}{2} - 1, \quad (11)$$

$$OE = R - \frac{d_2}{2} - 1, \quad (12)$$

$$OF = R - \frac{d_3}{2} - 1. \quad (13)$$

Обозначим

$$\frac{d_1}{2} - 1 = c_1, \quad (14)$$

$$\frac{d_2}{2} - 1 = c_2, \quad (15)$$

$$\frac{d_3}{2} - 1 = c_3, \quad (16)$$

тогда

$$OG = R - c_1, \quad (17)$$

$$OE = R - c_2, \quad (18)$$

$$OF = R - c_3. \quad (19)$$

Рассмотрим треугольник OGE . Его полупериметр:

$$p_1 = \frac{(OG + f + OE)}{2}, \quad (20)$$

а площадь S_1 , m^2 :

$$S_1 = \sqrt{p_1 \cdot (p_1 - f) \cdot (p_1 - OE) \cdot (p_1 - OG)}. \quad (21)$$

Аналогичным образом определяются полупериметры и площади треугольников OEF и OFG .

Сумма площадей треугольников OGE , OEF и OFG равна площади треугольника GEF , то есть:

$$S_S = S_1 + S_2 + S_3. \quad (22)$$

Задача решается методом последовательных приближений. Сначала задается

радиус оболочки, заведомо больший, чем нужно:

$$R = d_1 + d_2 + d_3, \quad (23)$$

и рассчитывается площадь S по уравнению (10) и S_S по уравнению (22), а затем производится их сравнение. Если в первых приближениях эта разница ΔS велика, тогда необходимо уменьшить значение R по формуле:

$$R = R - 0,04 \cdot (S_S - S). \quad (24)$$

Величина ΔS уменьшится. Итерации выполняются до тех пор, пока эта разница не снизится до приемлемой величины 0,0005 м. После этого радиус считаем найденным. Затем определяется диаметр оболочки:

$$D = 2 \cdot R. \quad (25)$$

Результат получается верным, если каждое из значений S_1 , S_2 и S_3 больше или равно нулю.

Расчетная схема для определения диаметра оболочки четырехствольной дымовой трубы со всеми стволами разного диаметра представлена на рисунке 7. Стволы необходимо расположить таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$U_8 + U_{14} + U_{11} + U_{12} = U_9 + U_{10} + U_{13} + U_{15} = 180. \quad (26)$$

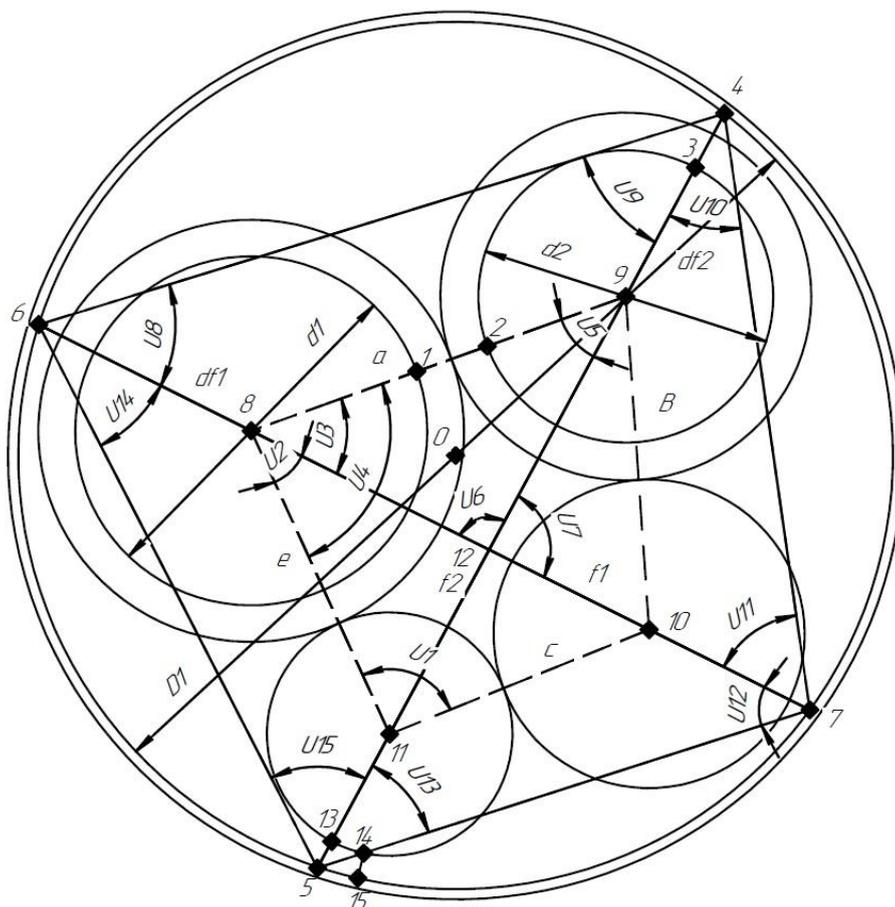


Рисунок 7. Диаметр наружной оболочки найден по заданным расстояниям между стволами и между стволами и оболочкой

Задаваясь углом U_1 , получаем промежуточные результаты для всех неизвестных величин и проверяем решение уравнения (26). В том случае, если уравнение (26) не выполняется, необходимо задаваться новым значением угла. За решение принимается результат, при котором сумма углов по уравнению

отличается от 180 не более, чем на 0,01 градуса.

Далее, получив условие существования описанной окружности вокруг четырехугольника со сторонами $L(4-6)$, $L(4-7)$, $L(5-6)$ и $L(5-7)$, по формуле Парамешвары находим ее диаметр. Для этого обозначим:

$$Z_1 = L(5-6) \cdot L(4-6) + L(4-7) \cdot L(5-7), \quad (27)$$

$$Z_2 = L(4-7) \cdot L(4-6) + L(5-6) \cdot L(5-7), \quad (28)$$

$$Z = L(5-7) \cdot L(4-6) + L(5-6) \cdot L(4-7), \quad (29)$$

$$p_0 = \frac{(L(5-7) + L(4-6) + L(5-6) + L(4-7))}{2}, \quad (30)$$

$$Z_4 = (p_0 - L(4-6)) \cdot (p_0 - L(4-7)) \cdot (p_0 - L(5-6)) \cdot (p_0 - L(5-7)). \quad (31)$$

Запишем

$$D_1 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}{Z_4}}. \quad (32)$$

Далее вводится поправка на смещение осей, для этого обозначим:

$$t_1 = \frac{L(8-12)}{L(12-10)}, \quad (33)$$

$$t_2 = \frac{L(9-12)}{L(11-12)}. \quad (34)$$

В результате получаем

$$D = D_1 + 0,8 (t^{0,8} - 1), \quad (35)$$

где

$$t = \frac{(t_1 + t_2)}{2}. \quad (36)$$

Далее показано, что учет влияния различия расходов и температуры дымовых газов по стволам, при расчете по разработанной универсальной методике, позволяет выбирать различную скорость для каждого ствола. Экономия, по отношению к варианту, где диаметр оболочки определяется по наибольшему стволу и скорости газов в стволах одинаковые, за счет использования предложенной методики определения диаметра оболочки для трехствольных и четырехствольных, составила от 2,4 до 9%, в зависимости от рассмотренных вариантов.

В четвертой главе для исследования влияния аэродинамических характеристик на формирование начального участка дымового факела многоствольной дымовой трубы была разработана CFD модель, верифицированная двумя экспериментальными методиками – визирование дымового факела с помощью аэрологического шаропилотного теодолита и определение траектории дымового факела с помощью фотоснимка.

Определение траектории движения дымового факела фиксацией угловых координат границ дымового факела с помощью аэрологического шаропилотного

теодолита (АШТ) позволяет получить максимальную длину траектории по сравнению с другими способами, основанными на отличии оптической плотности дымового факела от оптической плотности атмосферы. Схема замера траектории дымового факела с помощью теодолита показана на рисунке 8.

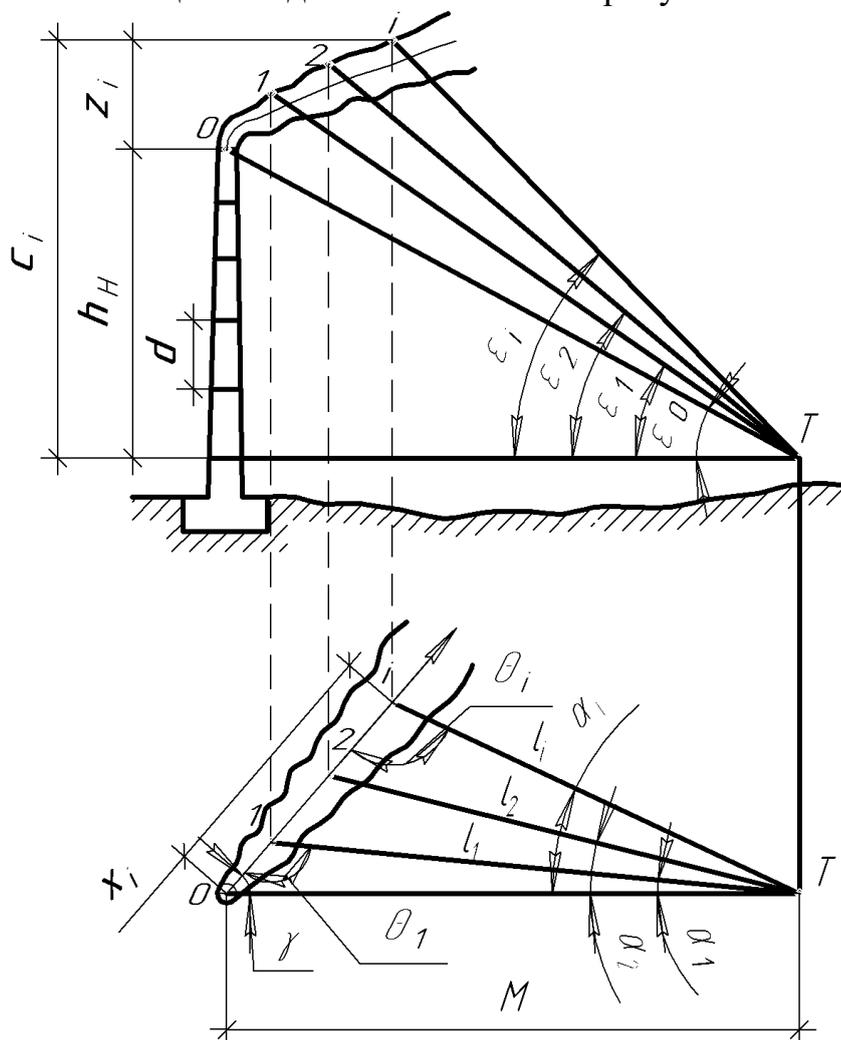


Рисунок 8. Схема замера траектории дымового факела теодолитом

При использовании теодолитного визирования для фиксации одной траектории может потребоваться несколько минут, то есть при использовании данного метода получаем осредненные результаты за данный отрезок времени. Для оценки исследования всей видимой части дымового факела одновременно, была разработана методика, основанная на определении траектории дымового факела при помощи фотоснимка.

Для определения траектории дымового факела по фотоснимку определялись изменения местного и среднего угловых масштабов, зависимость текущего вертикального и горизонтального угла от высоты дымовой трубы и длины горизонтальной составляющей факела, соответственно, использовались известные размеры элементов дымовой трубы и характерных точек. Для определения расстояния и направления от точки, где проводилась фотосъемка, до рассматриваемых объектов, использовались спутниковые фотоснимки. Расчетная схема данной методики приведена на рисунке 9.

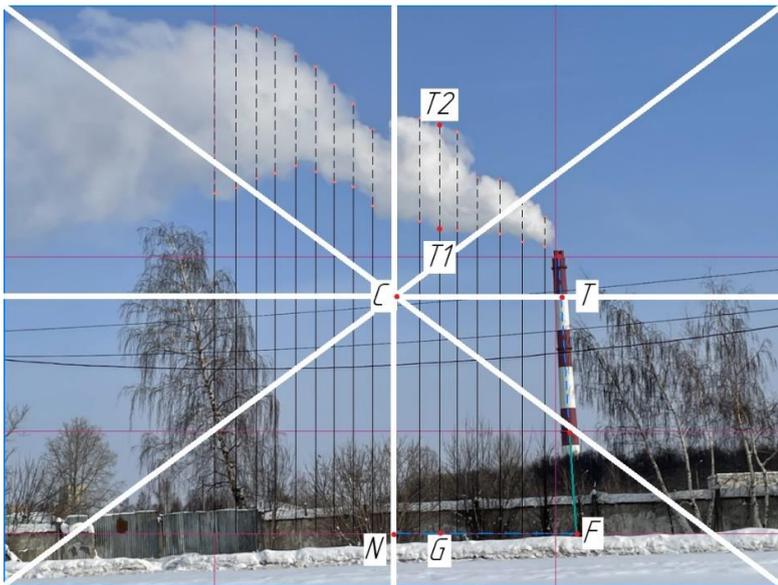


Рисунок 9. Схема определения траектории дымового факела по фотоснимку

Дымовой факел, основную часть которого представляет азот, выходя из устья дымовой трубы, быстро охлаждается за счет перемешивания с окружающим воздухом. Фактически видимый для человеческого глаза дымовой факел представляет собой присутствующие в составе уходящих газов пары воды, имеющие температуру, отличную от температуры окружающего воздуха. Программный комплекс Ansys Fluent, выбранный для CFD моделирования, позволяет отслеживать изменение температуры с высокой точностью и представлять рассчитанные данные температурной характеристики в каждой точке рассматриваемого пространства (рисунок 10). Учитывая это, для исследования аэродинамики начального участка дымового факела, отслеживая траектории температурных изолиний, отличные от температуры окружающего воздуха, можно определить нижние и верхние границы дымового факела с учетом турбулентности потока газов и атмосферы в однофазной постановке задачи.

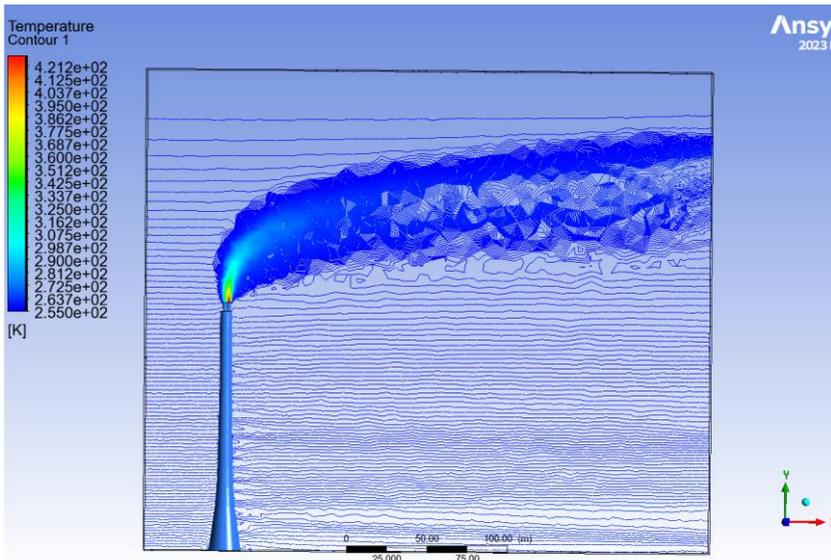


Рисунок 10. Расчетный контур CFD модели

Разработанная CFD модель была верифицирована двумя независимыми методиками (по теодолитному визированию и фотоснимку). Результаты представлены на рисунке 11.

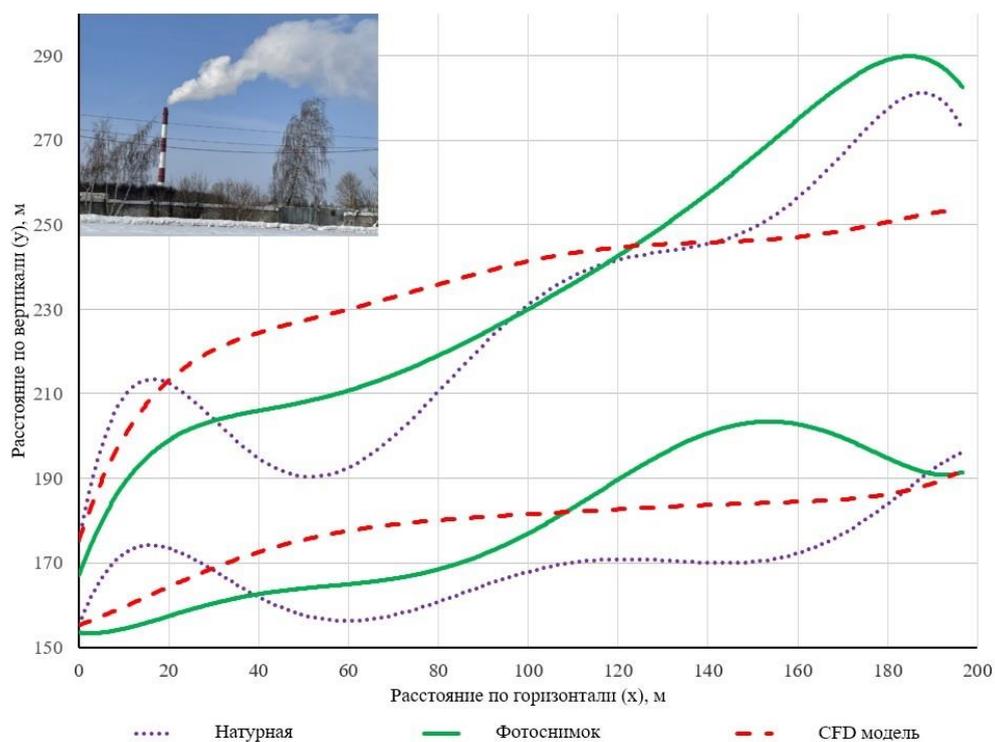


Рисунок 11. Верификационный график траектории дымового факела, полученной различными методами

С использованием полученной CFD модели было проанализировано влияние различных вариантов конструкции выходной части дымовой трубы на формирование начального участка дымового факела.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В соответствии с задачами исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Найдено аналитическое решение для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для трехствольной и четырехствольной дымовых труб для стволов произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами и между стволами и оболочкой. Показано, что предложенные варианты конструкций дымовых труб наиболее полезно используют межтрубное пространство, что позволяет снизить суммарные дисконтированные затраты. Отмечено что, при отсутствии ограничений по пространству для шахт, стволы с наибольшими диаметрами следует размещать друг против друга.

2. Разработанная универсальная методика определения основных параметров дымовой трубы верифицирована по условиям планово-распределительной модели экономического развития страны. Предложенная методика расчета скорости дымовых газов для любой модели развития экономики является универсальной и не зависит от тренда цен и затрат на производство товаров и услуг.

3. Показано, что при различных расходах и температурах газов в стволах многоствольных дымовых труб, скорости газов в них следует принимать также разными. Показаны также условия, при которых в целях унификации стволов этого

можно не делать. Приведен анализ влияния различных объемных расходов и различных температур газов по стволам на скорости газов в стволах как при раздельном, так и при совместном действии. Показано, что расчет диаметра оболочки по предлагаемой методике с оптимизацией скоростей газов по каждому стволу обеспечивает более точное проектирование и снижение капитальных затрат и эксплуатационных издержек на величину от 2,4 до 9%. Отмечено что разные скорости на выходе из стволов для формирования условий безвихревого объединения должны быть выравнены с помощью установки диффузоров или конфузоров с малыми углами раскрытия или сужения.

4. Разработанные методики определения траектории дымовых газов по фотоснимку и CFD моделированию верифицированы результатами натуральных экспериментов, относительная погрешность составила не более 12%. Показано, что при одинаковом суммарном объемном расходе газов из дымовой трубы - ствольность и установка диффузора оказывает незначительное влияние на траекторию факела, то есть при выборе конструкции выходной части необходимо в первую очередь исходить из минимизации избыточных статических давлений по высоте стволов.

Направления дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Разработанная универсальная методика определения основных параметров дымовой трубы может быть предложена для внедрения в нормативные документы по проектированию дымовых труб. Найденные аналитические решения по определению минимальных диаметров стволов и оболочки для дымовых труб со стволами разного диаметра открывают большие перспективы по их внедрению и промышленному освоению. Разработанная CFD модель позволяет продолжить исследования в направлении моделирования рассеивания вредных выбросов для различных состояний атмосферы и исследования турбулентности атмосферы в целом.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(1):131-145. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145>

2. Грибков А.М., Мирсалихов К.М., Чичирова Н.Д. Выбор конфигурации поперечного сечения многоствольной дымовой трубы с четырьмя стволами различного диаметра. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(1):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-3-13>

3. Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Мирсалихов К.М. Определение траектории дымового факела с использованием спутниковых снимков. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024;26(3):132-145. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145>

4. Грибков, А.М., Мирсалихов, К.М., Чичирова, Н.Д. Расчет скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. № 15(8). С. 900–914. DOI: 10.17516/1999-494X-0436

Статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

5. Zroichikov, N.A., Gribkov, A.M., Saparov, M.I., Mirsalikhov, K.M. Analysis of the Benefits of TPP's Three-Barrel Smokestacks // Therm. Eng. 2020. Vol. 67. P. 610–616. <https://doi.org/10.1134/S0040601520090116>

6. Zroichikov, N.A., Gribkov, A.M., Saparov, M.I., Mirsalikhov, K.M. A General-Purpose Procedure for the Calculation of the Optimum Gas Velocity in Gas Exhaust Ducts of Stacks at Thermal Power Stations // Therm. Eng. 2020. Vol. 67. P. 157–164. <https://doi.org/10.1134/S0040601520030064>

Публикации в других изданиях:

7. Мирсалихов, К.М., Федоренков, Д.И., Грибков, А.М. Влияние экологических и экономических факторов на выбор оптимальных размеров четырехствольных дымовых труб // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018: Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. Том 3. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 115-118. – EDN JTONIV.

8. Мирсалихов, К.М. Определение оптимальной скорости дымовых газов в одноствольных дымовых трубах ТЭС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 12–13 марта 2020 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2020. – С. 872. – EDN LWKRYG.

9. Мирсалихов, К.М. Определение оптимальных параметров выхлопных труб ГТУ и способы их модернизации // Энергия-2021: Шестнадцатая всероссийская (восьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т., Иваново, 06–08 апреля 2021 года. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – С. 10. – EDN SQPQJH.

10. Мирсалихов, К.М. Натурные эксперименты по определению траектории распространения дымового факела многоствольной дымовой трубы // Энергия-2022. Теплоэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т., Иваново, 11–13 мая 2022 года. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 10. – EDN YZJWSP.

Подписано в печать 20.09.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2009/1.

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