

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

Мирсалихов Кирилл Маратович

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

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель
Доктор химических наук, профессор
Чичирова Наталия Дмитриевна

Казань 2024

Введение.....	5
1 Основные направления в совершенствовании методического обеспечения для проектирования дымовых труб тэс и разработки новых конструктивных решений.....	11
1.1 Методики определения оптимальных параметров дымовых труб	11
1.2 Модели рассеивания вредных веществ в атмосферу от дымовых труб ..	34
1.3 Современные конструкции дымовых труб.....	42
1.4 Выводы по главе	48
2 Универсальная методика определения оптимальных параметров дымовых труб.....	51
2.1 Использование суммарных дисконтированных затрат для определения оптимальной скорости газов.	51
2.2 Определение оптимальной скорости газов для одноствольной дымовой трубы.....	52
2.3 Определение оптимальной скорости газов для многоствольной дымовой трубы.....	62
2.4 Расчет статических давлений по высоте дымовой трубы.....	72
2.5 Выводы по главе	77
3 Сравнительный анализ и варианты оптимизации существующих типов многоствольных дымовых труб.....	78
3.1 Условия сопоставимости вариантов подключения оборудования к дымовой трубе	78
3.2 Техничко-экономический анализ существующих многоствольных дымовых труб	86
3.3 Методика расчета геометрических параметров трехствольных труб со стволами разных диаметров.....	89
3.4 Техничко-экономический анализ и расчет оптимальной скорости газов в стволах трехствольной дымовой трубы со стволами разных диаметров.....	94
3.5 Методика расчета геометрических параметров четырехствольных труб со стволами разных диаметров.....	97

3.6	Технико-экономический анализ и расчет оптимальной скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы со стволами разных диаметров	101
3.7	Выводы по главе	118
4	Исследование и моделирование распространения дымового факела.....	120
4.1	Натурные эксперименты по исследованию распространения дымового факела на начальном участке	120
4.1.1	Порядок проведения натурального эксперимента по исследованию распространения дымового факела с использованием аэрологического шаропилотного теодолита	121
4.1.2	Методика обработки результатов натурального эксперимента по исследованию распространения дымового факела с использованием аэрологического шаропилотного теодолита	124
4.2	Методика определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка	131
4.3	Моделирование начального участка траектории дымового факела с использованием CFD моделирования	149
4.3.1	Постановка задачи CFD моделирования траектории дымового факела...	149
4.3.2	Граничные условия и условия построения CFD модели.....	151
4.3.3	Результаты расчета и их верификация	158
4.4	Выводы по главе	163
	Заключение	166
	Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.....	170
	Список литературы	171
	Приложения	183
	Приложение 1. Блок-схема методики определения основных параметров дымовой трубы.....	183
	Приложение 2. Основные программные решения для поиска минимального диаметра оболочки дымовой трубы с тремя стволами различного диаметра	184
	Приложение 3. Основные программные решения для поиска минимального	

диаметра оболочки дымовой трубы с четырьмя стволами различного диаметра.185
Приложение 4. Акт об использовании результатов диссертационной работы в филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1	187

ВВЕДЕНИЕ

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 и 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, касающиеся 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 и практических работников. 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, Б.Г. Тувальбаев, Л.А. Мамрукова, В.Г. Лебедев, В.Б. Прохоров, Ф.П. Дужих, И.Б. Заседателев, 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 профильные правительственные комиссии или частные научно-исследовательские компании. К основным специалистам можно отнести Ronald L. Petersen, D. Bruce Turner, Richard H. Schulze, William H. Snyder, Albert De Kreij.

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 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.

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.).

1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЫМОВЫХ ТРУБ ТЭС И РАЗРАБОТКИ НОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

1.1 Методики определения оптимальных параметров дымовых труб

Основной задачей дымовой трубы является рассеивание вредных выбросов в больших объемах воздуха и на большие расстояния с целью снижения концентрации вредных веществ на уровне дыхания человека. Все развитые и развивающиеся страны - лидеры по выработке электроэнергии и с развитым экологическим и энергетическим законодательством в основных нормативных документах, касающихся выбросов вредных веществ из дымовых труб, исходят из этого требования, но подход к решению задачи выбора оптимальных параметров и конструкций в существующих методиках различен.

Сопутствующим результатом является экономия собственных нужд на привод тягодутьевых машин за счет самотяги дымовой трубы.

В России попыткой сделать методику определения оптимальных параметров дымовых труб стал утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 14 декабря 2017 г. № 1667/пр [1] и введенный в действие с 15 июня 2018 г. свод правил «Трубы дымовые промышленные. Правила проектирования» [2]. Но в данном своде отсутствует методика расчета оптимальных значений скорости выхода газов и высоты дымовой трубы, а даны лишь общие рекомендации по их выбору, которые не гарантируют от существенных ошибок при проектировании дымовых труб. Кроме того, в данном своде нет рекомендаций для многоствольных дымовых труб. Таким образом в утвержденном своде для проектирования дымовых труб отсутствуют методики определения ряда параметров, а выбор диаметра устья и высоты дымовой трубы проектные организации проводят на основании методик технико-экономических расчетов, не утвержденных в качестве обязательных

стандартов. К тому же эти методики иногда опираются на планово-распределительную модель экономического развития страны.

Западные страны проектируют дымовые трубы согласно разработанным международным комитетом промышленных сооружений (International Committee for Industrial Construction (CICIND)) кодам, то есть методики расчета параметров труб остаются различными в каждой стране, но конструкция труб приводится в соответствии с кодами CICIND [3].

В Великобритании после выхода из Евросоюза касательно дымовых труб на данный момент действует несколько нормативных документов:

- Акт об окружающей среде, 1995 г. (Environment Act, 1995) [4];
- Акт о защите окружающей среды 1990 г. (Environmental Protection Act, 1990) [5];
- Третье издание акта чистого воздуха 1956 года меморандум по высотам дымовых труб (The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights (Department of the Environment, (1981) [6];
- Акт чистого воздуха 1993 (The Clean Air Act 1993) [7].

Все эти нормативные документы связаны между собой, но особое внимание необходимо уделить Environmental Protection Act 1990, так как в нем в главе «Руководство по определению высоты рассеивающей трубы для загрязняющих выбросов» (Guidelines on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions) достаточно подробно изложена методика определения оптимальных параметров дымовых труб.

По этой методике высота дымовой трубы рассчитывается с использованием индекса загрязнения (Pollution Index), P_i , и информации о выбросах в данном районе и ближайших источниках выбросов. Расчет состоит из трех этапов. Рассчитываются две высоты дымовой трубы в первом приближении, U_b и U_m , с учетом тепловой и динамической составляющей подъема дымового факела, соответственно. Затем рассчитывается окончательная высота трубы с поправкой на выброс из близлежащих источников.

Индекс загрязнения, m^3/c определяется по формуле:

$$P_i = \frac{D}{(G_d - B_c)} \cdot 1000, \quad (1.1.1)$$

где D - скорость выброса загрязняющего вещества, г/с;

G_d - концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества, мг/м³;

B_c - фоновая концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества для конкретного района/области или ее эквивалент B_e , мг/м³.

Нескорректированная высота дымовой трубы U_b , м, рассчитывается с использованием индекса загрязнения P_i и плавучести выбросов. В подавляющем большинстве случаев, когда выбрасываемые газы являются продуктами сгорания или, в основном, представляют собой воздух, содержащий небольшую долю загрязняющих веществ, плавучесть обеспечивается непосредственно за счет тепла, содержащегося в выбрасываемых дымовых газах Q (МВт) на выходе из трубы.

U_b можно найти по формулам:

$$U_b = 10^a \cdot P_i^b, \quad (1.1.2)$$

где для $Q \leq 1$ МВт:

$$a = -1,11 - 0,19 \cdot \log_{10} \cdot Q, \quad (1.1.3)$$

$$b = 0,49 + 0,005 \cdot \log_{10} \cdot Q, \quad (1.1.4)$$

и для $Q > 1$ МВт:

$$a = -0,84 - 0,1 \cdot \exp(Q^{0,31}), \quad (1.1.5)$$

$$b = 0,46 + 0,011 \cdot \exp(Q^{0,32}). \quad (1.1.6)$$

Нескорректированная высота дымовой трубы U_m рассчитывается с использованием индекса загрязнения P_i и динамической составляющей выбрасываемых газов M .

Динамическая составляющая движения выбрасываемых газов M ($\text{м}^4/\text{с}^2$) определяется как:

$$M = \frac{\rho_d}{\rho_a} \cdot V \cdot w, \quad (1.1.7)$$

что эквивалентно

$$M = \frac{\rho_d}{\rho_a} \cdot \frac{\pi \cdot w^2 \cdot d^2}{4}, \quad (1.1.8)$$

где ρ_d и ρ_a плотности рассеиваемых газов и атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

w - скорость истечения газов, $\text{м}/\text{с}$;

d - диаметр устья трубы, м ;

V - объемный расход истечения дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$.

Высоту дымовой трубы U_m можно найти по формуле:

$$\log_{10} U_m = x + (y \cdot \log_{10} P_i + z)^{0,5}, \quad (1.1.9)$$

где

$$x = -3,7 + (\log_{10} M)^{0,9}, \quad (1.1.10)$$

$$y = 5,9 - 0,624 \log_{10} M, \quad (1.1.11)$$

$$z = 4,24 - 9,7 \cdot \log_{10} M + 1,47 \cdot (\log_{10} M + 1,47(\log_{10} M)^2 - 0,07(\log_{10} M)^3), \quad (1.1.12)$$

где x, y, z – вспомогательные величины.

Далее проводится расчет окончательной высоты трубы с поправкой на застройку около источника выброса, для этого вводятся следующие величины:

U - нескорректированная высота дымовой трубы, меньшее из U_m или U_b ;

$A = U_m / U_b$. Если значение U_b отсутствует или $U_b > U_m$, то $A = 1$;

H - высота здания (измеряется до конька или другой наивысшей точки, без учета лифтов, резервуаров и других выступов менее 1% площади крыши);

B - ширина здания (измеряется под прямым углом к линии, соединяющей дымовую трубу и ближайшую точку);

K - меньшее из высоты здания H или ширины здания;

T - высота возмущенного потока над зданием, определяется как $H + 1,5 \cdot K$;

T_m - максимальный T с учетом всех соответствующих зданий;

H_m - максимум H с учетом всех соответствующих зданий;

C - окончательная скорректированная высота дымовой трубы.

Для часто встречающегося случая, когда есть одно доминирующее здание, которое шире, чем высота, окончательная высота дымовой трубы C определяется как:

$$C = H + 0,6 \cdot (U + (2,5 \cdot H - U) \cdot (1 - A^{-U/H})). \quad (1.1.13)$$

Если неизвестно значение для U_b или $U_b > U_m$, то $A = 1$ и тогда расчет сокращается до:

$$C = H + 0,6 \cdot U. \quad (1.1.14)$$

В случаях, отличных от одиночных, широких зданий:

1. Выбираются все соответствующие здания, то есть те, которые находятся на расстоянии $5 U_m$, и записываются H и B для каждого здания.

2. Оценивается K для каждого здания (меньшее из H или B).

3. Рассчитывается T для каждого здания ($T = H + 1,5 \cdot K$).

4. Находится H_m (наибольшее значение H).

5. Находится T_m (наибольшее значение T).

6. Если U больше, чем T_m , тогда $C = U$ и коррекция высоты дымовой трубы не требуется.

7. В противном случае рассчитывается скорректированная высота трубы, C , с использованием формулы:

$$C = H_m + (1 - H_m / T_m) \cdot (U + (T_m - U) \cdot (1 - A^{-U/H_m})). \quad (1.1.15)$$

Если неизвестно значение для U_b или $U_b > U_m$, то $A = 1$ и тогда расчет сокращается до:

$$C = H_m + U(1 - H_m / T_m). \quad (1.1.16)$$

По поводу выбора скорости выхода дымовых газов отмечено только, что для предотвращения аэродинамического смыва вниз выбрасываемого шлейфа и его стекания за пределы устья вниз вдоль трубы рекомендуются их следующие минимальные значения:

при тепловой мощности выброса Q :

- менее 0,1 МВт - 10 м/с.
- более 1 МВт - 15 м/с.
- от 0,1 МВт до 1 МВт, пропорционально.

При динамической составляющей M :

- менее $10 \text{ м}^4/\text{с}^2$ - 10 м/с.;
- более $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$ - 15 м/с.;
- от 10 до $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$ – пропорционально.

Приведенный пример рекомендаций по поводу выбора скорости выхода является одним из самых подробных в рассмотренных источниках, но и в нем отсутствуют технико-экономические обоснования выбора скорости выхода газов.

В США в настоящее время действует разработанное в 1985 Агентством по защите окружающей среды (Environment Protection Agency) «Руководство по определению высоты дымовой трубы согласно надлежащей инженерной практике» (Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document For the Stack Height Regulations) [8], как документ технической поддержки руководства по определению высоты дымовой трубы. Высота дымовой трубы по [8] больше или равна высоте, на которой выброс струи из дымовой трубы не зависит от нисходящих потоков. Срыв потока вниз, в свою очередь, относится к застойному циркулирующему вихрю воздуха, который образуется с подветренной стороны источника выброса.

Высота дымовой трубы по [8] зависит от следующих переменных:

- форма и размер соседних зданий;
- окружающая местность;
- ближайшие здания и сооружения;
- характеристики местного климата.

Согласно правилам Агентства по защите окружающей среды (EPA), высота дымовой трубы по [8] определяется как самая высокая из следующих:

- Не менее 65 метров при измерении от отметки уровня земли у основания дымовой трубы.
- $2,5 \cdot H$ (для труб, построенных до 12 января 1979 г.), или $H + 1,5 \cdot L$ (для всех других дымовых труб), где H - высота самого высокого здания или любой значимой соседней конструкции или сооружений, а L - меньшее из проектируемых высоты или ширины рассматриваемого здания.
- Высота, определенная с учетом атмосферной турбулентности в пределах пограничного слоя и вихревых эффектов, создаваемых застройкой. Расчет подробно изложен в [9].

Первый критерий устанавливает минимальную высоту дымовой трубы, в то время как второй является общим, но тем, который не может охватить все возможные ситуации. В этом случае, индивидуальный подход при проектировании может дать более точные результаты.

Исследование атмосферного пограничного слоя в аэродинамической трубе предлагаемого или существующего здания является общепринятым методом, который можно использовать для обоснования оптимальной высоты трубы, которая может сильно отличаться от часто цитируемого значения высоты здания, увеличенной в 2,5 раза. Это подтверждается в статье [10], где в ходе воздушного мониторинга было обнаружено, что в городе Ринландер (США) имело место превышение часовой нормы концентрации оксидов серы SO_2 . Анализ источников выбросов и моделирование качества воздуха показали, что дымовая труба котельной Expera Rhineland Mill высотой 63 м вносит основной вклад в загрязнение окружающего воздуха. Для устранения превышения допустимых значений одним из решений было увеличение высоты дымовой трубы до высоты по [8]. Исходя из габаритов здания котельной, высота дымовой трубы составила 75 м. После исследования геометрии здания Expera Rhineland Mill было замечено, что угол здания котельного агрегата №7 находится с наветренной стороны от дымовой трубы. Когда ветер дует вдоль угла здания, образуются вихри в углах здания, которые усиливают снос дымового факела вниз в два раза по сравнению с тем, что наблюдается для направлений ветра, нормальных к фасаду здания. Проведенные в аэродинамической трубе эксперименты показали, что необходимая высота трубы может достигать 95 м для ситуации, когда формируется угловой вихрь. Таким образом, высота дымовой трубы, рассчитанная по [8], и уточненная по результатам моделирования в аэродинамической трубе, с учетом повторяемости опасного направления ветра была принята 90 м. Наиболее подробно исследования по определению высоты GER представлены в [11-20].

Таким образом методика [8] рекомендуется при отсутствии рядом расположенной застройки, во всех других случаях необходимы исследования в аэродинамической трубе. Касательно скорости выхода газов указано лишь, что она

должна быть такой, чтобы не допустить срыва дымового факела вниз по стволу дымовой трубы.

Несмотря на то, что в последней версии методики [8] отсутствует связь между высотой дымовой трубы и скоростью выхода газов из устья, в США, в проведенном ранее исследовании [21] отмечалось, что при проектировании крупных котельных установок прослеживается тенденция к использованию более высоких скоростей газов на выходе из устья трубы. В случаях, когда имеется законодательное ограничение высоты дымовой трубы, для обеспечения допустимых приземных концентраций может не быть другого способа, как применение более высоких скоростей газов на выходе из трубы. В других случаях существующие конструкции могут не выдерживать ветровую нагрузку, создаваемую на более высокие трубы. Для электростанций больших мощностей, где для рассеивания шлейфа предусмотрены дымовые трубы, превышающие высоту здания электростанции более чем в 2,5 раза, эффективность применения более высоких скоростей выхода газов считается сомнительной. В качестве проверки более высоких выходных скоростей для увеличения эффективной высоты дымовой трубы в устье дымовой трубы от котла блока мощностью 150 МВт на трубе был установлен конфузор, увеличивающий скорость с 13,7 до 27,4 м/с. Наблюдения и сравнение с соседними агрегатами без конфузора не выявили заметного увеличения подъема шлейфа во время инверсии или в условиях высокой скорости ветра. Однако некоторый эффект был обнаружен при скорости ветра от 2,2 до 3,6 м/с. Точность расчета по этой метеорологической модели, как правило, выше, чем по другим. На начальном участке траектории дымового факела преобладающее значение имеет динамическая составляющая подъема, с удалением от трубы начинает преобладать тепловая составляющая. Скорость выхода газов от 15 до 18 м/с была традиционно принята как достаточная для предотвращения значительного срыва вниз с подветренной стороны дымовой трубы. Более высокие скорости 27 ... 37 м/с увеличивают размер и стоимость тягодутьевой машины, двигателя, затраты на обслуживание дымовой трубы, а также могут препятствовать поднятию дымового шлейфа из-за плавучести.

В статье 5 Директивы ЕС по сжиганию топлива [22] указано: «Установки для сжигания топлива или совместного сжигания различных видов топлива должны быть спроектированы, оборудованы, построены и эксплуатироваться таким образом, чтобы предотвращать выбросы, вызывающие значительное загрязнение воздуха на уровне земли, в частности, дымовые газы сбрасываются контролируемым образом и в соответствии с соответствующими стандартами качества воздуха». Однако не существует общеевропейской методологии моделирования качества воздуха и расчета высоты дымовой трубы. Для этой цели используются национальные стандарты и рекомендации. В настоящее время существует большое количество расчетных моделей, которые различаются в каждой стране ЕС. Наиболее точными являются модели рассеяния в воздухе, основанные на краткосрочных метеорологических данных, всегда представляемых в виде компьютерных программ. Эти модели обычно покупаются крупными компаниями или используются консалтинговыми компаниями для работы на конкретных заводах и ТЭС и, как правило, они используются для больших котельных агрегатов или иных установок со значительными выбросами в атмосферу.

Методика определения высоты дымовых труб, принятая в Испании, изложена в постановлении Министерства окружающей среды от 18 октября 1976 г. «О предотвращении и устранении промышленного загрязнения атмосферы» [23]. Как указано в этом документе: «Настоящее распоряжение устанавливает инструкции по определению высоты дымовой трубы для достижения необходимого рассеивания загрязняющих веществ с целью обеспечения требуемого качества воздуха». Методика применима в целом для установок с общей выходной мощностью менее 100 МВт (тепловых), а также для дымовых труб, выбрасывающих максимум 720 кг/ч любого газа или 100 кг/ч твердых частиц. Методика также применима, если разница температур дымовых газов на выходе из трубы и окружающей среды минимальна:

$$\Delta T > 188 \cdot \frac{V^2}{H^2} \cdot \sqrt{S}, \quad (1.1.17)$$

где ΔT - разница между температурой дымовых газов в устье дымовой трубы и средней температурой максимума самого теплого месяца, °C;

V - скорость дымовых газов, м/с;

H - Расчетная высота дымовой трубы, м;

S - Минимальное внутреннее сечение дымохода, м².

Процедура расчета высоты дымовой трубы подробно описана ниже по шагам:

определение параметра A – этот параметр представляет климатологические условия места, где расположена установка, и равен:

$$A = 70 \cdot I_0, \quad (1.1.18)$$

при этом:

$$I_0 = \frac{\Delta T + 2\delta t}{T_m} + \frac{80}{h}, \quad (1.1.19)$$

где δt - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °C;

T_m - среднегодовая температура, °C;

h - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %.

Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это условие не выполняется, то используется $T_m = 10$.

В итоге высота дымовой трубы рассчитывается следующим образом:

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot Q \cdot F}{C_M}} \cdot \sqrt[3]{\frac{n}{v \cdot \Delta T}}, \quad (1.1.20)$$

где H – расчетная высота дымовой трубы, м;

Q - максимальный расход загрязняющих веществ, кг/ч;

F - коэффициент, характеризующий скорость осаждения загрязняющих веществ в атмосфере. Для газообразных загрязнителей $F = 1$, а для твердых частиц и других тяжелых примесей $F = 2$;

n - количество дымовых труб, расположенных на расстоянии менее $2 \cdot H$ по горизонтали от исследуемой дымовой трубы;

v - расход дымовых газов, м³/ч;

C_m - максимальная концентрация загрязняющих веществ на уровне земли, выражается в мг/м³ (среднее значение за 24 часа).

В Швеции требования для расчета высоты дымовой трубы в качестве руководящих принципов установлены Шведским агентством по охране окружающей среды (SEPA), особенно для тепловых установок небольшого размера и мощности. Эти рекомендации были созданы в 1970 году и сначала включали только выбросы диоксида серы от сжигания нефти. Спустя годы это руководство было обновлено на основе отчетов, которые Шведский метеорологический и гидрологический институт (SHMI) разработал для SEPA [24]. Эти новые правила включали расчет высоты дымовой трубы с учетом также выбросов оксидов азота. Эта методика не применима для использования в сложных ситуациях, где рекомендуется дальнейшее конкретное исследование, например для:

- ТЭС, расположенных на особо пересеченной местности;
- ТЭС со значительными выбросами из нескольких труб;
- труб высотой более 60 м;
- ТЭС, расположенных в городских районах, где концентрация NO₂ у земли близка к превышению.

В Германии действуют правила контроля загрязнения воздуха «Технические инструкции по контролю качества воздуха» и обычно называемые TA Luft [25]. Они содержат требования к крупномасштабным установкам и включают график для оценки высоты дымовых труб. В этом документе указывается, что: «Отработанные газы должны сбрасываться таким образом, чтобы было возможно

их беспрепятственное рассеивание свободным потоком воздуха. Как правило, требуется выброс через дымовые трубы, высота которых должна определяться в соответствии с пунктами 5.5.2–5.5.4. В этих разделах документа указано, что «дымовые трубы должны иметь высоту не менее 10 м над уровнем земли», а для более точного расчета включают номограмму для оценки высоты дымовой трубы, представленную на рисунке 1.1.1.

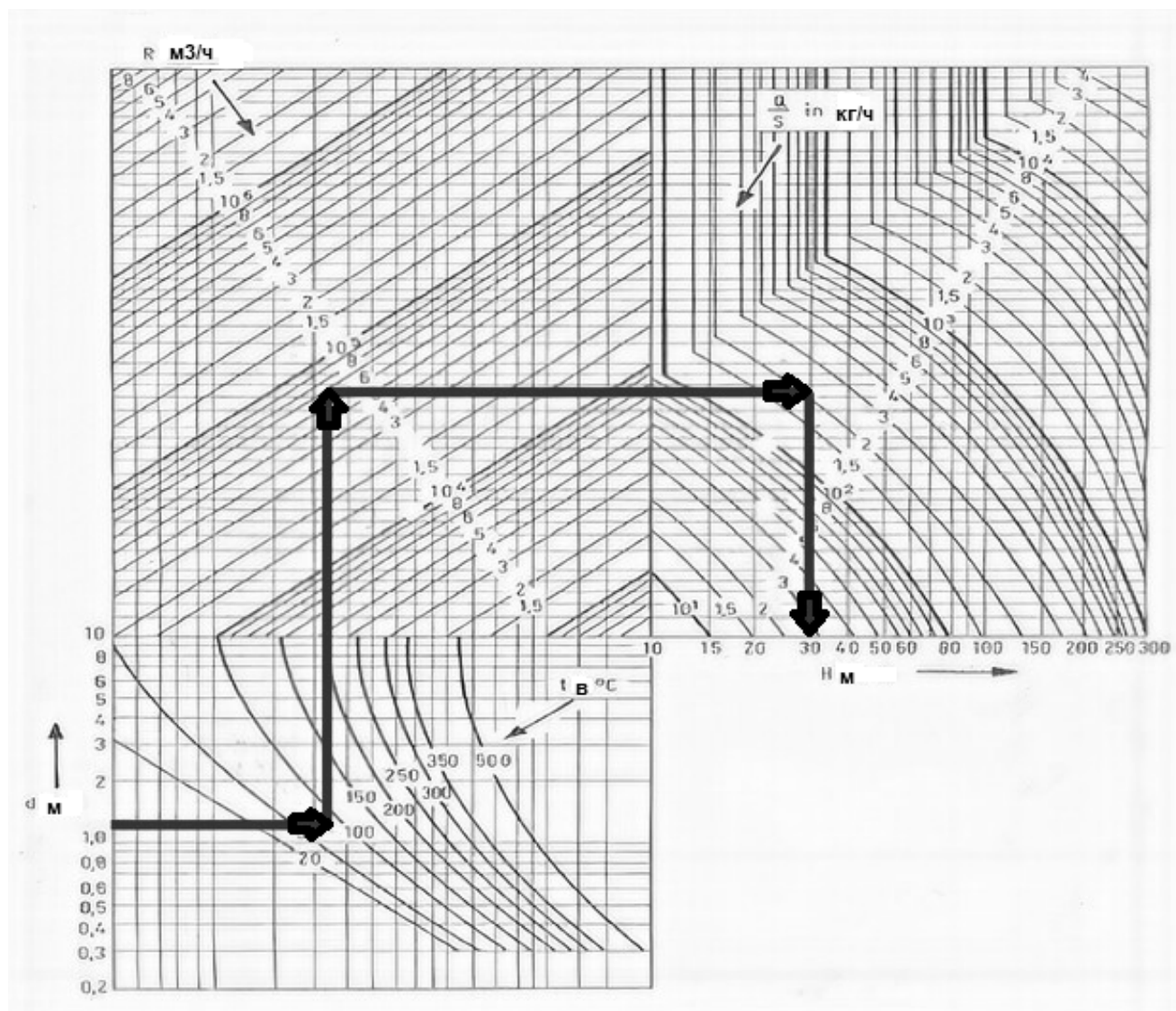


Рисунок 1.1.1 — Номограмма TA LUFT для определения высоты дымовой трубы

На рисунке 1.1.1: R - сухой объемный расход уходящих газов, $\text{м}^3/\text{ч}$; H - высота дымовой трубы по номограмме, м; d - внутренний диаметр дымовой трубы, м; T -

температура отходящего газа на выходе из дымовой трубы, °C; Q - массовый расход выбрасываемого загрязнителя в атмосферу, кг/ч; S - коэффициент определения высоты трубы.

Вместо номограммы можно использовать компьютерную программу BESMIN, интерфейс которой изображен на рисунке 1.1.2.

Berechnung der Schornsteinbauhöhe nach Nr. 5.5 TA Luft 2016 (Entwurf)

Rauigkeitslänge z_0 0.5 m
 Substanz Stickstoffoxide S 0.1 mg/m³
 Quellstärke e_q 8.528 kg/h
 Schornsteindurchmesser d_q 1.1 m
 Austrittstemperatur t_q 67 °C
 Ausströmgeschwindigkeit v_q 14.5 m/s
 Relative Feuchte r_q 0 %
 Flüssigwassergehalt l_q 0 kg/kg

Bauhöhe berechnen

Berechnete Bauhöhe h_b 11.9 m

Bereits durchgeführte Berechnungen

z_0	S	e_q	d_q	t_q	v_q	r_q	l_q	h_b	Substanz
0.50	1.00e-01	8.53e+00	1.1	67	14.5	0.0	0.000	11.9	Stickstoff

Zwischenergebnisse

k_1	u_a	h_{eff}	dev	h_b
1.0	1.0	29.8	1.6%	10.0
1.0	1.5	27.8	1.4%	10.0
1.0	2.0	26.1	1.1%	10.0
2.0	1.0	41.8	0.8%	10.0
2.0	1.5	35.3	0.9%	10.0
2.0	2.0	30.9	0.7%	10.0
2.0	3.0	25.1	0.8%	10.0
3.1	1.0	40.6	1.0%	10.0
3.1	1.5	31.0	0.8%	10.0
3.1	2.0	26.3	0.7%	10.0
3.1	3.0	21.4	0.8%	10.0
3.1	4.5	17.9	0.6%	11.8
3.1	6.0	15.9	0.6%	11.9 *
3.1	7.5	14.5	0.6%	11.6
3.1	9.0	13.6	0.6%	11.3
3.1	12.0	12.2	0.5%	10.6
3.2	1.0	36.2	0.8%	10.0
3.2	1.5	29.6	0.9%	10.0
3.2	2.0	25.5	0.7%	10.0
3.2	3.0	21.1	0.7%	10.0
3.2	4.5	17.6	0.7%	11.8
3.2	6.0	15.6	0.6%	11.7
3.2	7.5	14.2	0.5%	11.4
3.2	9.0	13.3	0.5%	11.1
3.2	12.0	11.8	0.5%	10.4

Rechenergebnisse speichern

Рисунок 1.1.2 — Компьютерная программа BESMIN

Центральный совет по контролю за загрязнением (CPCB), национальное агентство правительства Индии, реализующее закон об окружающей среде, предложило «формулу минимальной высоты дымовой трубы», основанную на уравнении Гаусса, в качестве ориентира для оценки высоты дымовой трубы (CPCB) [26], далее были уточнения в [27] и [28]. Формула, разработанная CPCB в 1984 году, считалась применимой для всего Индийского полуострова. Считалось, что метеорологические данные двух городов Мумбаи и Калькутта представляют прибрежную метеорологию, а метеорологические данные Дели использовались для представления внутренней метеорологии. Высота смешения была определена на

основе данных радиозонда, собранных Метеорологическим департаментом Индии (IMD). Температура дымовых газов принималась такой же, как и температура окружающего воздуха. Предложенная формула считалась действительной для всех мощностей ТЭС, т.е. влияние скорости на выходе и подъема факела не учитывалось. Было получено уравнение с учетом метеорологии трех городов:

$$H = a \cdot Q \cdot b, \quad (1.1.21)$$

где H - физическая высота трубы, м;

Q - скорость выбросов SO_2 , кг/ч;

a и b - константы.

Чтобы получить общую формулу для всей страны, коэффициент a и показатель степени b , полученные для всех трех городов, были арифметически усреднены. Окончательная полученная формула была в виде:

$$H = 14 \cdot Q^{0,3}. \quad (1.1.22)$$

При наличии подробных метеорологических данных, имеющих высокую точность, доступны более сложные модели качества воздуха, которые обеспечивают более строгий учет условий рассеивания [29]. На рисунке 1.1.3 показано изменение требуемой высоты дымовой трубы в зависимости от интенсивности выбросов SO_2 для разных мест для двух случаев ТЭС мощностью 110 МВт и 500 МВт. Точки на кривой — это высота дымовой трубы, полученная в результате моделирования. Сплошной линией представлена кривая, полученная с помощью регрессионного анализа. Регрессионный анализ проводится для определения уравнения, которое лучше всего соответствует точкам данных. Кривая, которая дает коэффициент регрессии R^2 более 0,9, принимается. В таблицах 1.1.1 и 1.1.2 представлено уравнение для высоты дымовой трубы, коэффициента регрессии и диапазона интенсивности выбросов SO_2 , в пределах которого уравнение действительно для ТЭС 110 МВт и 500 МВт соответственно.

Таблица 1.1.1 Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 110 МВт

Регион (время года)	Выведенная формула	Диапазон эмиссии SO ₂ (кг/ч)	R ²
Матхура (летний сезон)	$H = 0,075 \cdot Q - 85,6$	От 1800 до 3960	0,9984
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0887 \cdot Q - 118,6$	От 1800 до 3960	0,9967
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,9201 \cdot Q^{0,5895}$	От 1800 до 3960	0,9972
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,3153 \cdot Q^{0,6895}$	От 1800 до 3060	0,9973
	$H = 7e - 12 \cdot Q^{3,7511}$	От 1800 до 3960	0,9933

Таблица 1.1.2 Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 500 МВт

Регион (время года)	Выведенная формула	Диапазон эмиссии SO ₂ (кг/ч)	R ²
Матхура (летний сезон)	$H = 0,0589 \cdot Q - 143,3$	От 3600 до 7200	0,9956
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0656 \cdot Q - 180$	От 3600 до 7200	0,9945
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,3086 \cdot Q^{0,6619}$	От 3600 до 7560	0,991
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,0752 \cdot Q^{0,7846}$	От 4320 до 6660	0,9969
	$H = 4e - 19 \cdot Q^{5,2945}$	От 6660 до 7560	0,9912

Графики, аналогичные рис. 1.1.3, полученные для различных источников и при различных метеорологических условиях (подробно изложены в [29]), позволили авторам сделать выводы о том, что характер кривой высоты дымовой трубы показывает изменение рассеивающего потенциала атмосферы, усредненного за 24-часовой период, с изменением высоты. Это указывает на то, что изменение скорости газа на выходе, диаметра верхней части трубы, температуры газа на выходе не вызывает каких-либо изменений в тенденции кривой. Вместо этого именно метеорология определяет тенденцию кривой высоты трубы и, следовательно, потенциал вертикального разбавления в атмосфере. Во-вторых, при той же количестве вредных выбросов, высота дымовой трубы, необходимая для станции 110 МВт, больше, чем для станции 500 МВт. Это объясняется тем, что из дымовой трубы станции мощностью 500 МВт выбрасывается больший объем газов, эти газы имеют на выходе более высокую скорость, дымовая труба имеет больший диаметр выходной части и более высокую температуру дымовых газов, что приводит к большему подъему дымовых газов в атмосфере по сравнению с трубой для станции мощностью 110 МВт. Сравнивая уравнение для двух сезонов, лета и зимы, было обнаружено, что высота дымовой трубы, определяемая по зимним условиям, оказывается меньше, чем в летний период из-за более высокой разницы температуры дымовых газов и окружающего воздуха.

В Китае действует нормативный документ, разработанный министерством экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики (Ministry of ecology and environment the people's Republic of China) (MEE) GB 13223-2011 «Стандарт по загрязняющим выбросам ТЭС» («Emission standard of air pollutants for thermal power plants») [30]. В предыдущих версиях этого документа [31] был приведен расчет по определению высоты дымовой трубы, в новой же версии этот расчет отсутствует и теперь вопросом определения высоты дымовой трубы должны заниматься специализированные организации, а их расчет подтверждать МЭЭ.

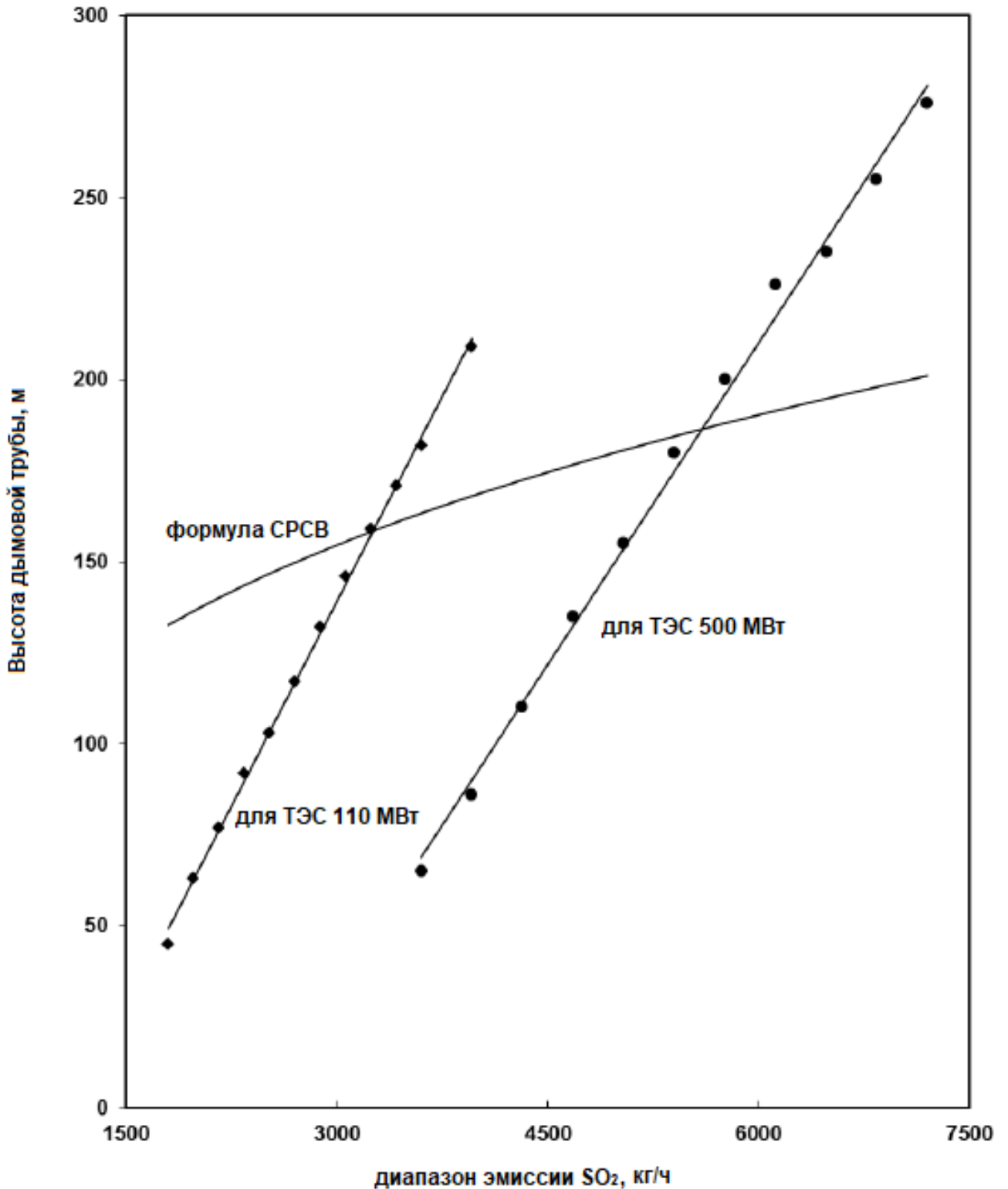


Рисунок 1.1.3 — Варианты определения высот дымовых труб ТЭС для г. Матхура (летний сезон) в зависимости от эмиссии SO_2

«Контроль загрязнения воздуха. Основные инженерные технические положения», НД2000-2010 из [32], в котором скорости газов на выходе из трубы рекомендуется принимать равными 15 м/с. Если дымовая труба высокая или

объемный расход газов велик, то целесообразно увеличить скорость газов на выходном срезе трубы до 20 м/с ~ 25 м/с.

О скорости дымовых газов описано в статье [33]. Отмечается, что поскольку полное преимущество от увеличения скорости газов на выходе может быть получено только при работе котельного агрегата с полной нагрузкой, тогда как дополнительная высота трубы будет полезна при любой нагрузке, делается вывод, что более экономично вложиться в увеличение высоты трубы, чем тратить средства на увеличение скорости газов на выходе. Кроме того, отмечается, что при увеличении высоты трубы можно достичь более высокого экологического эффекта при равных затратах.

В [34] говорится о том, что модели рассеивания показали, что высота дымовой трубы гораздо более важна для рассеивания дымовых газов, чем подъем дымовых газов за счет их более высокой температуры, чем окружающий воздух (плавучесть). Плавучесть выпускаемых газов и их взаимопроникновение с окружающим воздухом (дисперсия), могут быть увеличены путем дополнительного нагрева дымовых газов, но дисперсия также может быть улучшена и за счет более высокой скорости на выходе из трубы.

В СССР, а затем и в России с 1987 г. действовала методика разработанная под руководством М.Е. Берлянда по расчету концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий - ОНД-86, целью которой стало установление требований в части расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе при размещении и проектировании предприятий, нормировании выбросов в атмосферу реконструируемых и действующих предприятий, а также при проектировании воздухозаборных сооружений [35]. С 1 января 2018 г. приказом Минприроды России от 06.06.2017 №273 ОНД-86 прекратил свое действие, а вместо этого были введены «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [36]. В сравнении ОНД-86 была добавлена возможность учёта источников, температура которых не более 3000 °С, возможность учета загрязняющих веществ при скорости не более скорости звука, был уточнен

коэффициент A , учитывающий повторяемость неблагоприятного распределения температуры с высотой (температурная стратификация атмосферы), был изменён расчёт по коэффициенту F , который учитывает скорость осаждения мелких твердых частиц, был изменён расчёт, связанный с учётом рельефа местности, был изменён подход к расчёту границ максимально разовых концентраций на разных высотах, добавлен новый термин «долгопериодные» средние концентрации загрязняющих веществ. «При разработке данной методики использовались разностные решения уравнения турбулентной диффузии, сведенного к последовательности аналитических выражений, полученных в результате аппроксимации и линеаризации решения уравнений гауссовской модели рассеивания. [37]». Кроме того, в [38] рассматривалось влияние переноса диоксида серы на Южный Байкал со стороны Ново-Иркутской ТЭЦ по [35] и [36], в результате чего отмечалось что значение концентрации SO_2 , полученное на основе новых расчетных методов [36], заметно ближе к измеренному на станции ИСЗФ СО РАН значению, по сравнению с расчетом по ОНД-86 [35].

Согласно новой методики [36] максимальная приземная разовая концентрация загрязняющего вещества c_m , мг/м, при выбросе газовойоздушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при опасной скорости ветра u_m на расстоянии x_m от источника выброса и определяется по формуле:

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \quad (1.1.23)$$

где A - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;

M - масса загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса), г/с;

F - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющих веществ (газообразных и аэрозолей, включая твердые частицы) в атмосферном воздухе;

m и n - безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

η - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

H - высота источника выброса, м;

V_1 - расход ГВС, определяемый по формуле (24), м/с;

ΔT - разность между температурой выбрасываемой газовой смеси T_2 и температурой атмосферного воздуха $T_в$, °С.

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_0 \quad (1.1.24)$$

где D - диаметр устья источника выброса, м;

w_0 - средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса, м/с.

В России в 2018 г. был опубликован свод правил [1], в котором отсутствует методика расчета важнейшей характеристики – скорости газов в дымовой трубе. Указано только, что для дымовых труб, работающих с образованием конденсата, скорость газов в устье трубы должна быть не более 18 м/с для предотвращения значительного выброса конденсата в атмосферу. В [2] минимальную скорость дымовых газов на выходе из устья трубы рекомендуется принимать не менее 4 м/с в летний период и 7 м/с в зимний период для исключения эффекта задувания и «окутывания» оголовка трубы. Максимальную скорость на выходе рекомендуется определять из условия отсутствия избыточного статического давления по всему газоотводящему каналу ствола трубы (кроме труб с газонепроницаемыми газоотводящими стволами и труб с противодавлением). Ствол железобетонной дымовой трубы рекомендуется проектировать в виде цилиндра, усеченного конуса или комбинированной формы (сочетание усеченного конуса и цилиндра). Отношение высоты всего ствола или отдельного его участка к наружному диаметру

должно быть, как правило, не более 20/1. Наклон образующей поверхности трубы к вертикали следует принимать не более 0,1. Вопросами технико-экономического анализа оптимальных параметров дымовых труб наиболее глубоко занимался Рихтер Л.А., в работе [39] подробно изложена разработанная им методика по выбору оптимальной скорости газов и высоты дымовой трубы как для одноствольных так и для многоствольных конструкций. На основе статистической обработки данных института Теплопроект им была получена формула для определения стоимости одноствольной трубы:

$$K_T = K_{\phi} + K_c = (1,06 \cdot 10^{-3} k_{\text{Гр}} \cdot k_{\phi.в.} \cdot d_0^{0,45} + 3,13 \cdot 10^{-3} \cdot k_{с.в.}^m \cdot k_t \cdot d_0^n) \cdot H^{2,13}, \quad (1.1.25)$$

где K_{ϕ} - стоимость фундамента, руб.;

K_c - стоимость ствола руб.;

$k_{\text{Гр}}$ – коэффициент, учитывающий величину модуля деформации грунта под трубой;

$k_{\phi.в.}$ – коэффициент, учитывающий влияние ветровой нагрузки на фундамент;

d_0 – диаметр устья трубы, м;

$k_{с.в.}$ – отражает влияние ветровой нагрузки на необходимость увеличения прочности и, соответственно, стоимости ствола и учитывает величину максимальной скорости ветра в районе строительства дымовой трубы;

k_t – коэффициент, учитывающий удорожание конструкции трубы при повышении температуры дымовых газов.

Для многоствольной дымовой трубы на основе сметно-финансовых расчетов института Укрпроектстальконструкция и сметных данных института Теплопроект была выведена формула:

$$K = K_{\phi} + K_{об} + K_M, \quad (1.1.26)$$

где K_M – стоимость стволов и металлоконструкций, определяемая как произведение массы металла на его стоимость, руб.

K_ϕ - стоимость фундамента, которая определяется по формуле:

$$K_\phi = V_\phi \cdot k_{\text{гр}} \cdot k_{\phi.в.} \cdot d_0^{0,45} \cdot H^{2,13}, \quad (1.1.27)$$

где V_ϕ - коэффициент пропорциональности, который при прочих равных условиях зависит от цен на материалы;

$K_{об}$ – стоимость оболочки, которая определяется по формуле:

$$K_{об} = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot k_{с.в.} \cdot D_0^{0,65} \cdot H^{1,75}, \quad (1.1.28)$$

где D_0 - внутренний диаметр железобетонной оболочки, м.

Затем была выведена формула минимальных расчетных затрат на строительство дымовой трубы:

$$З = 10^{-2} \cdot z_{т.д.} \cdot \xi \cdot V \cdot (\Delta h_{\text{тр}} + h_{\text{вых}} - h_c) + \rho_{\text{тр}} \cdot K_{\text{тр}}, \quad (1.1.29)$$

где V - объем газов, транспортируемых через дымовую трубу;

$\Delta h_{\text{пот}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{вых}}$ – гидравлические потери в дымовой трубе без учета самотяги, Па;

ξ – коэффициент, зависящий от принципиальной схемы газоздушного тракта, для уравновешенной тяги равен 1, под наддувом 0,62;

h_c – самотяга дымовой трубы, Па.

$z_{т.д.}$ – удельные расчетные затраты, руб./(\text{кВт}*\text{год});

$\rho_{\text{тр}} = \rho_n + \rho_a$ – суммарные ежегодные отчисления от стоимости трубы, как сумма нормативного коэффициента эффективности капитальных вложений и нормативного коэффициента на амортизацию и ремонт суммарные ежегодные

отчисления на трубу, как сумма нормативного коэффициента эффективности капитальных вложений и расходов на амортизацию и ремонт;

$K_{тр}$ – стоимость трубы, руб.

На основе выведенных формул были произведены расчеты и сделан вывод о том, что стоимость дымовой трубы и эксплуатационные затраты на транспорт газов через трубу по-разному зависят от скорости газов. При увеличении скорости газов стоимость трубы уменьшается, так как уменьшается ее диаметр и необходимая высота при обеспечении постоянной величины создаваемых ею приземных концентраций вредных выбросов. При этом учитывается, что напряжения в дымовой трубе от движущихся в ней газов в рассматриваемом диапазоне скоростей практически одинаковы. А эксплуатационные затраты растут при увеличении скорости газов. В результате находится такая скорость газов, когда сумма отчислений от стоимости трубы и эксплуатационных затрат оказывается минимальной. Такая скорость является оптимальной для данной трубы. Учитывая высокую стоимость дымовых труб, нельзя сделать рекомендации по скорости выхода дымовых газов для какой-то группы труб, а требуется индивидуальный расчет для каждой дымовой трубы.

1.2 Модели рассеивания вредных веществ в атмосферу от дымовых труб

Все методики определения параметров дымовой трубы были разработаны на основе моделей рассеивания вредных веществ. Рассеивание дымовых газов осуществляется одновременно с их подъемом в атмосфере. Этот подъем имеет место как за счет начальной скорости выхода дымовых газов из устья трубы, так и за счет их более высокой температуры, чем окружающий воздух. Величина этого подъема соизмерима с высотой дымовой трубы, а зачастую и превосходит ее.

В настоящее время существует много моделей позволяющих рассчитывать приземные концентрации загрязнений воздуха в районах действия промышленных источников. Всего насчитывается около 120 моделей различного уровня сложности и назначения, из них можно выделить следующие: ISC (США), ADMS

(Англия), AERMOD (Канада, США), MARS (Греция), DISPERSION21 (Швеция), EURAD (Германия), MERCURE (Франция), MILORD (Италия), SLP-2D (Испания), OPS (Нидерланды) и др. [40] Некоторые из них являются законодательно закрепленными как регулирующие (нормативные), другие носят научно-исследовательский характер или представляют собой коммерческий продукт, разработанный для проектировочных организаций.

Модели распространения вредных выбросов в атмосферу можно классифицировать по различным признакам, например:

- по масштабу пространственного и временного разрешения:

1) модели микромасштабные (локальные), описывающие распространение загрязнений на расстоянии до нескольких километров от источников выбросов.

Примеры: модели смешивания, модели диффузии;

2) модели мезомасштабные (региональные), описывающие распространение загрязнений на расстоянии до нескольких сотен километров от источников выбросов. Примеры: модели конвекции-диффузии, модели сеточно-эйлеровского типа;

3) модели макромасштабные (глобальные), описывающие распространение загрязнений на масштабах планетарных масштабов. Примеры: модели химического транспорта, модели климата;

- по типу процессов, учитываемых в модели:

1) модели с расчетом физических процессов, включающие уравнения движения, теплового и материального баланса и т.д. Примеры: модели конвекции-диффузии, модели сеточно-эйлеровского типа;

2) модели с расчетом физико-химических процессов, включающие химические реакции и трансформации вредных веществ в атмосфере. Примеры: модели химического транспорта, модели химической кинетики;

3) эмпирические модели, основанные на статистическом анализе экспериментальных данных о распространении загрязнений. Примеры: модели регрессии, модели временных рядов;

- по степени учета географических особенностей и атмосферных условий:

- 1) универсальные модели, не учитывающие региональные различия в климате и географии. Примеры: модели смешивания, модели диффузии;

- 2) региональные модели, учитывающие географические особенности и климатические условия конкретного региона;

- по области применения: моделирование выбросов промышленных предприятий, автотранспорта, аэропортов, пожаров и т.д;

- по виду вредных выбросов: газы, пары, аэрозоли.

Основным и общепринятым разделением всех моделей рассеивания вредных веществ является разделение по типу уравнения, описывающего процесс распространения: эйлеровы, лагранжевы, гауссовские, боксовые и модели CFD [41].

Эйлеровы модели — это физические модели в которых предполагается, что выброс распространяется вместе с потоком среды и движется по траектории, заданной полем скоростей. Эйлеровы модели рассматривают атмосферу как континуум, и учитывают изменения концентрации в точке пространства в зависимости от времени. Такие модели основываются на уравнениях неразрывности и имеют дело с расчетами полей скорости и давления, а также с изменением концентрации в каждой точке атмосферы. Таким образом, в эйлеровых моделях загрязнение рассматривается как часть потока воздуха, перемещающаяся вместе с ним. Такие модели учитывают такие факторы как диффузия, конвекция и характеристики источника загрязнения. Эйлеровы модели хорошо подходят для описания локальных выбросов, но плохо справляются с учетом турбулентности потока. В общем случае для эйлеровых моделей можно записать уравнение переноса как:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\vec{u} \cdot \nabla C + D \nabla^2 C + Q, \quad (1.2.1)$$

где C - концентрация вредных веществ;

t – время, с;

\vec{u} - вектор скорости ветра;

D - коэффициент диффузии;

∇ - оператор градиента;

∇^2 - оператор Лапласа;

Q – массовый расход загрязняющего вещества, кг/с.

Это же уравнение можно записать в трехмерной постановке [41]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \cdot \left(u \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - Q, \quad (1.2.2)$$

где u , v и w - компоненты скорости потока.

Уравнение переноса для эйлеровской модели распространения дымовых газов от дымовой трубы описывает изменение концентрации вредных веществ в пространстве и времени. В каждый момент времени, оно определяет, как концентрация вредных веществ изменяется в каждой точке пространства, исходя из их перемещения и диффузии. Таким образом, физический смысл уравнения заключается в описании процессов переноса и распространения вредных веществ в окружающей среде.

Уравнение неразрывности можно записать как:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1.2.3)$$

где ρ – плотность выбросов;

t – время, с.;

\vec{u} - вектор скорости потока выбросов, кг/м³;

∇ - оператор градиента.

Или в трехмерной постановке [42]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1.2.4)$$

это уравнение описывает закон сохранения массы в системе. Оно говорит о том, что изменение плотности дымовых газов во времени в точке пропорционально сумме входящих и выходящих массовых потоков в эту точку. Таким образом, плотность дымовых газов сохраняется во времени в каждой точке пространства.

Одна из наиболее распространенных моделей Эйлера — это модель Гаусса. Гауссовские модели являются одной из разновидностей эйлеровских моделей потому, что они используют уравнение переноса Эйлера в качестве базового уравнения для моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере [43]. Гауссовская модель предполагает, что загрязняющие вещества имеют колоколообразную форму распределения (гауссова функция), в то время как модели на основе уравнения переноса Эйлера учитывают диффузию, конвекцию и характеристики источника загрязнения. Гауссовская модель является статистической моделью, а модели на основе уравнения переноса Эйлера являются физическими моделями. Гауссовская модель хорошо подходит для прогнозирования загрязнения на больших расстояниях, в то время как модели на основе уравнения переноса Эйлера могут быть точнее для более мелких масштабов.

Гауссова функция в гауссовских моделях записывается следующим образом [43]:

$$G(x, y, z) = \left(\frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right) \right], \quad (1.2.5)$$

здесь x_0, y_0, z_0 - координаты точечного источника на поверхности земли, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - параметры, определяющие ширину функции вдоль соответствующих осей. Схема гауссовой струи приведена на рисунке 1.2.1 [44].

Одним из основных уравнений гауссовских моделей распространения вредных веществ в атмосфере является уравнение для плотности концентрации загрязнения в точке (x, y, z) с учетом интегрирования по времени концентрации загрязнений, которое выражается следующей формулой [43,44]:

$$C(x, y, z) = \left(\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left(\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{(y+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) \quad (1.2.6)$$

Известны гауссовы модели с различными функциями рассеяния σ_y, σ_z : модель Паскуилла–Бриггса, модель Паскуилла–Гиффорда и другие [45,46,47].

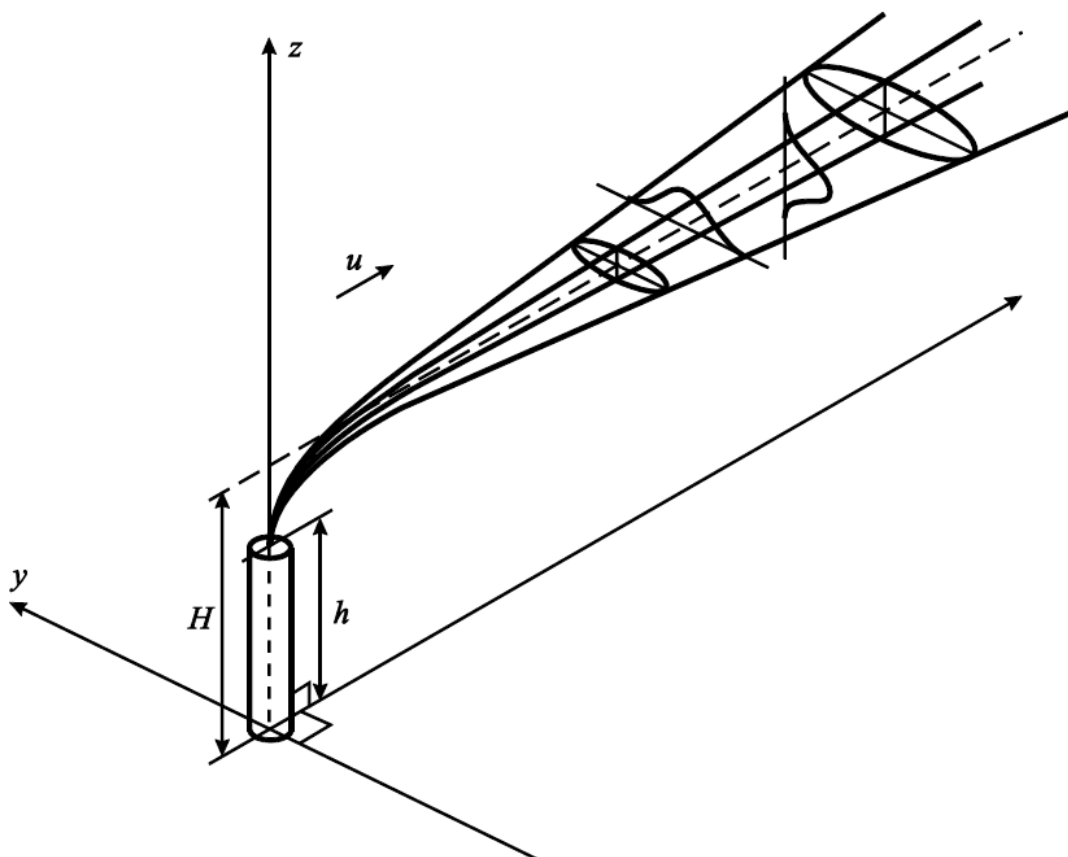


Рисунок 1.2.1 – Схема гауссовой струи

В лагранжевых моделях предполагается, что частицы вредных веществ движутся независимо от потока среды, и их траектория определяется уравнением движения:

$$\frac{d}{dt}x(t) = u(t) \quad (1.2.7)$$

Лагранжевы модели учитывают турбулентность потока, но требуют больших вычислительных ресурсов.

Боксовые модели представляют собой систему уравнений, описывающих перемещение выбросов в замкнутом объеме. Боксовые модели используются для моделирования загрязнения в зданиях, выбросов от транспортных средств [48].

Модели CFD (Computational Fluid Dynamics) это метод численного моделирования и решения уравнений Навье-Стокса, которые описывают поведение жидкостей и газов в пространстве. В этих моделях описывается движение среды и взаимодействие вредных выбросов с потоком среды. Модели CFD позволяют учитывать сложную геометрию объектов и использовать различные методы численного анализа [49].

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме задается как:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta^2 \vec{v} \quad (1.2.8)$$

где \vec{f} - гравитационные силы, ν – коэффициент кинематической вязкости, p – давление [50].

Модели CFD могут быть как лагранжевыми, так и эйлеровыми, в зависимости от того, каким образом они описывают движение жидкости или газа.

Эйлеровы модели CFD используют уравнения Навье-Стокса. Уравнения Навье-Стокса включают в себя уравнение сохранения массы, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии. Основной принцип

Эйлеровых моделей CFD заключается в решении системы уравнений Навье-Стокса для каждой точки расчетной сетки. Для этого используются численные методы, такие как метод конечных объемов Finite Volume Method (FVM) [51], метод конечных элементов Finite Element Method (FEM) [52]. В общем случае эти уравнения записываются в дифференциальной форме, но для решения в численном виде они преобразуются в интегральную форму методом объемных интегралов.

К моделям CFD эйлеровского типа можно отнести модель k - ω , модель k - ϵ , модель имитации большого вихря Large Eddy Simulation (LES), модель Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) и др. [53].

Важно отметить, что эйлеровы модели CFD имеют ограничения по точности и применимости в случаях с большими изменениями плотности, турбулентным потоком, разрывами или другими нетипичными условиями, где необходимо учитывать столкновения индивидуальных частиц.

Основной принцип лагранжевых моделей CFD заключается в том, что каждая частица выброса рассматривается индивидуально, и ее перемещение определяется в зависимости от характеристик течения (например, скорости и направления ветра).

Существует несколько различных лагранжевых моделей CFD, которые могут использоваться для моделирования рассеивания вредных примесей в атмосфере. Одной из наиболее распространенных является модель отслеживания частиц Particle Tracking Model (PTM) [54], которая позволяет рассчитать перемещение каждой частицы в соответствии с уравнениями Навье-Стокса, а также учитывает взаимодействие частиц с другими объектами в атмосфере (например, со зданиями и деревьями).

Другой распространенной лагранжевой моделью является модель случайного блуждания Random Walk Model (RWM) [55], которая использует случайный процесс для определения перемещения частиц в течение времени. Эта модель может быть полезна для моделирования рассеивания вредных примесей в условиях переменных ветровых условий.

1.3 Современные конструкции дымовых труб

Возведение труб сопряжено с большим объемом строительного-монтажных работ (СМР), высокими трудозатратами, значительной продолжительностью, в некоторых случаях соизмеримой со сроками строительства всей ТЭС. Технологии сооружения этих сложных объектов достаточно разнообразны и в значительной степени определяются типом трубы, ее конструктивными особенностями. В отечественной практике наибольшее распространение получили следующие виды труб [56]:

- «монолитная железобетонная труба (труба с железобетонной оболочкой) с футеровкой из кирпича; варианты с вентилируемым кольцевым (в плане) зазором между железобетонной оболочкой и футеровкой, с наличием или отсутствием теплоизоляции и с естественной или принудительной вентиляцией зазора;
- монолитная железобетонная труба с футеровочным слоем из полимербетона;
- монолитная железобетонная труба с расположенным внутри одним или несколькими теплоизолированными цилиндрическими газоотводящими стволами из металла при проходном зазоре между железобетонной оболочкой и стволом (стволами);
- монолитная железобетонная труба с внутренними газоотводящими стволами из кремнебетонных панелей;
- труба с металлической решетчатой башней и одним или несколькими металлическими газоотводящими стволами внутри нее;
- труба, состоящая из 3 или 4 металлических теплоизолированных газоотводящих стволов, объединенных по высоте связями в жесткую самонесущую конструкцию. Часто каждый ствол такой трубы состоит из наружной несущей металлической оболочки и внутреннего металлического газоотводящего ствола— конструкция «труба в трубе». Диаметр внутренней трубы, которая обычно выполняется из коррозионностойкой стали и теплоизолируется, на 400...600 мм меньше наружной;

- труба с газоотводящими стволами из полимерных материалов (стеклопластик, стеклоуглепластик, стеклофаолит). Выполняется как с внутренними газоотводящими стволами в монолитной железобетонной оболочке, так и с наружными в металлическом каркасе. Такое решение получило широкое распространение при реконструкции монолитных железобетонных труб с расположенным внутри одним или несколькими теплоизолированными цилиндрическими металлическими газоотводящими стволами» [56].

Дужих Ф.П. в [57] отмечал, что наиболее совершенными и надежными с точки зрения обслуживания и эксплуатации являются одноствольные или многоствольные дымовые трубы с проходным зазором между оболочкой и газоотводящими стволами. Рихтер в своей работе [58] также особое внимание уделил необходимости разделения функции внешних несущих конструкций и конструкций, ограждающих газовый поток, в целях повышения надежности. Трубы такого типа были разработаны и успешно установлены на Лукомльской ГРЭС, Омской ТЭЦ, ТЭЦ-23 и ТЭЦ-25 Мосэнерго и др. Конструктивная схема таких дымовых труб изображена на рисунке 1.3.1 [57], где 1 – железобетонная оболочка; 2 – газоотводящий ствол; 3 – газоходы. Многоствольные дымовые трубы с проходным зазором между железобетонной оболочкой и металлическими газоотводящими стволами получили широкое распространение во всем мире и являются на данные момент наиболее предпочтительным вариантом при строительстве.

Одной из главных проблем при проектировании, реконструкции или модернизации новых ТЭС является вопрос выбора количества одноствольных дымовых труб или количества стволов многоствольной трубы, и в целом выбор между многоствольной или одноствольной трубами. В [58 и 59] отмечается, что многоствольные дымовые трубы, кроме профилактического осмотра и текущего ремонта позволяют при ревизионных осмотрах и капитальном ремонте стволов или выводе ствола из строя отключать один-два агрегата, подсоединенные к этому газоотводящему стволу, а не все энергетическое оборудование, подключенное к трубе, что увеличивает надежность работы оборудования по сравнению с

одноствольными дымовыми трубами, что является существенным преимуществом, несмотря на более низкую стоимость одноствольных труб. Также отмечается существенное преимущество многоствольных дымовых труб для ТЭЦ в виду сложности резервирования тепловой мощности и необходимости подключения совместно пиковых и энергетических котлов, которые имеют разное количество часов работы в течении года и соблюдения для большинства пиковых котлов условий работы на самотяге. Дымовые трубы с проходным зазором обеспечивают надежную изоляцию несущей железобетонной оболочки от агрессивных дымовых газов, обеспечивая тем самым длительный срок ее эксплуатации.

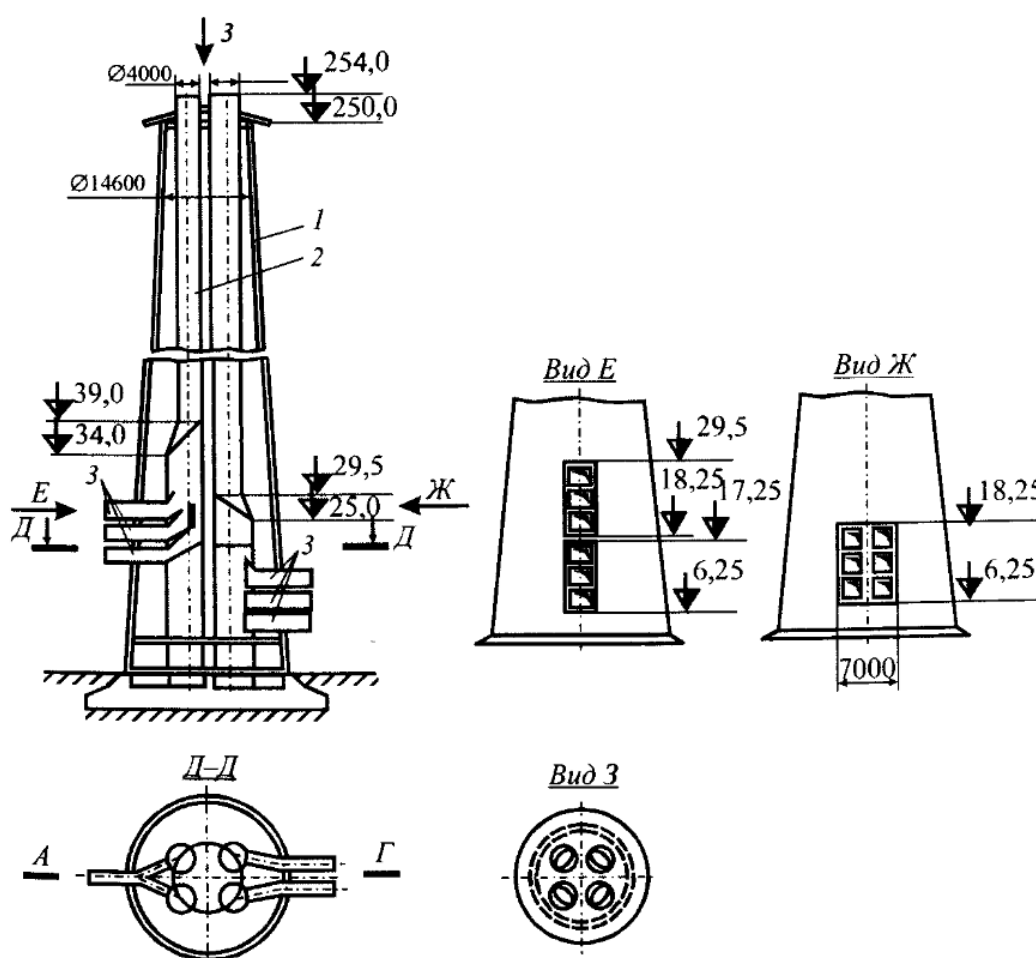


Рисунок 1.3.1 — Конструктивная схема многоствольной дымовой трубы с проходным зазором между железобетонной оболочкой и металлическими газоотводящими стволами

Международный комитет промышленных сооружений (International Committee on Industrial Construction (CICIND)) разработал стандарты – модельные

кодексы (Model Codes) для проектирования дымовых труб [3, 60, 61, 62, 63]. Модельные кодексы и руководства CICIND представляют собой наилучший доступный набор передовой международной практики в области проектирования дымовых труб, предоставленный экспертами в данной области. В ходе анализа модельных кодов CICIND не было выявлено существенных отличий в предлагаемых конструкциях относительно Российской практики строительства дымовых труб.

В [64] для примера рассматривалась ТЭС мощностью 2000 МВт и отмечалось, что на станциях с аналогичной мощностью ранее использовались дымовые трубы с одним газоотводящим стволом, но современные тенденции заключаются в использовании многоствольных дымовых труб на всех будущих станциях этого типа. Для электростанций с четырьмя котлами необходимо предусмотреть четыре газоотводящих ствола, по одному на каждый котел, при этом использовать железобетонную оболочку в качестве защиты от ветровых нагрузок на стволы. Аналогичные рекомендации даны в [65]. На рисунке 1.3.2 показана типичная конструктивная схема для дымовых труб этого типа. Отмечается, что несмотря на то, что подобная конструктивная схема подходит для станций мощностью 2000 МВт, для более крупных станций может потребоваться другое расположение газоотводящих стволов в оболочке, включая отвод дымовых газов от двух котлов в один газоотводящий ствол. Внешняя оболочка выполнена из бетона и выдерживает большую часть ветровой нагрузки и собственной статической нагрузки. Вход газоходов осуществляется на самом низком промежуточном этаже или фундаментной плите. При этом место соединения выполняется из кислотоупорной кирпичной кладки. Между дымоходами и ветровым стеклом нет конструктивной связи, дымоходы могут свободно расширяться или сжиматься в зависимости от колебаний температуры. Пространство между оболочкой и стволами доступно в любое время, в том числе в период работы котлов. Доступ к различным уровням обеспечивается бетонной или стальной лестницей, а в некоторых дымовых трубах этого типа также предусмотрен лифт.

В Японии, США, Германии и некоторых других западных странах были построены многоствольные дымовые трубы в каркасной башне. Пример таких дымовых труб приведен на рисунке 1.3.3.

В работе [57] отмечается, что распространения дымовые трубы такого типа не получили в связи с большим расходом металла на их постройку и как следствие - высокой стоимости. В работе [58] также отмечается, что стоимость многоствольных дымовых труб с железобетонной оболочкой гораздо ниже каркасных вариантов, при этом они не уступают в надежности.

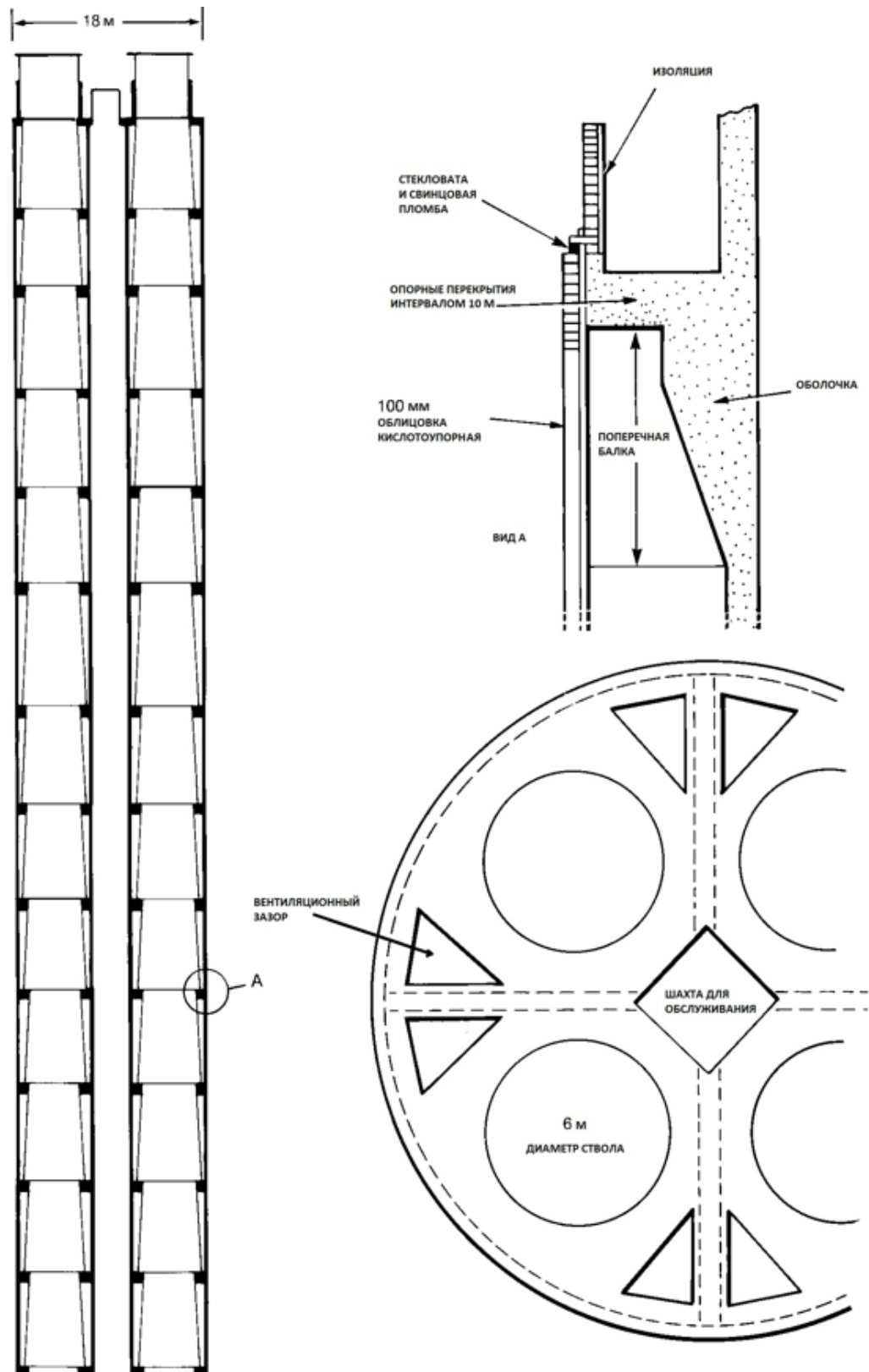


Рисунок 1.3.2 — Многоствольная дымовая труба



**Рисунок 1.3.3 — Многоствольные дымовые трубы в каркасной башне на ТЭС
JERA в префектуре Тиба, Япония**

1.4 Выводы по главе

Были проанализированы основные зарубежные материалы, опубликованные ведущими учеными и специализированными фирмами. Ни одна из рассмотренных методик выбора основных параметров дымовой трубы не основана на определении оптимальной скорости выхода газов, исходя из технико-экономического анализа. Выбор скорости выхода газов носит рекомендательный характер, в основном связан с условиями формирования начального участка дымового факела, не учитывается влияние стоимости материалов трубы и возможность сокращения затрат за счет оптимизации скорости газов в стволах. В то же время многие исследователи в своих статьях и комментариях к нормативным документам сходятся на мнении, что скорость газа на выходе из дымовой трубы является определяющей характеристикой для выбора оптимальных параметров дымовой трубы.

К положительным моментам в методике [2] можно отнести тот факт, что при расчете учитывается тепловая и динамическая составляющие подъема дымовых

газов, а также информация о ближайших источниках выбросов. Однако в [2] и [8] не учитывается ландшафт, плотность и высота застройки.

В большинстве рассмотренных нормативных документах приведены рекомендации для установок малой и средней мощности, поэтому даются упрощенные расчеты и общие рекомендации по выбору оптимальных параметров. В свою очередь расчет рассеивания примеси для крупных установок проводится с помощью метеорологических моделей, компьютерного моделирования и испытаний в аэродинамической трубе, а затем утверждается государственным регулирующим органом.

Как и [1], [2], так и рассмотренные иностранные нормативные документы не учитывают важнейшие характеристики при определении оптимальных параметров дымовых труб. Российская методология выбора оптимальных параметров дымовой трубы, основанная Л.А. Рихтером [39], является передовой и в настоящее время. Аналогичных подробных исследований в зарубежных источниках не найдено, поставленные в них задачи актуальны и требуют дальнейшего развития.

Были проанализированы основные модели распространения вредных примесей в атмосфере. Так, например в Эйлеровых моделях, загрязнение рассматривается как часть потока воздуха, перемещающаяся вместе с ним. Лагранжевы модели, наоборот, отслеживают движение отдельных частиц загрязнения в атмосфере. В этих моделях каждая частица загрязнения рассматривается как отдельный объект, и ее перемещения и дисперсия определяются индивидуально. Таким образом, Лагранжевы модели позволяют рассчитывать траектории движения каждой частицы загрязнения, и, соответственно, оценивать долговременные эффекты. Однако, обе модели могут быть использованы для описания транспорта и дисперсии загрязнений в атмосфере в различных условиях. Их выбор зависит от конкретной задачи и условий исследования. Отмечено, что Эйлеровы модели хорошо подходят для расчета рассеивания загрязнений на большие расстояния, в то время как Лагранжевы модели могут использоваться для расчета траекторий загрязнения вблизи источника выбросов.

Анализ конструкций дымовых труб, применяемых в России и за рубежом, показал, что используемые варианты конструкций не имеют существенных различий. Как российскими, так и зарубежными исследователями отмечено, что наиболее предпочтительным вариантом конструкции является многоствольная дымовая труба с железобетонной оболочкой и проходным зазором между стволами.

В результате аналитического обзора получены данные для разработки наиболее целесообразных направлений дальнейших научных исследований в области определения оптимальных параметров дымовых труб, а именно: скорости газов в трубе, высоты дымовой трубы, диаметров стволов и несущей оболочки, гидравлического сопротивления и самотяги дымовой трубы, необходимых ресурсов для сооружения дымовой трубы.

2 УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ.

2.1 Использование суммарных дисконтированных затрат для определения оптимальной скорости газов.

В ходе аналитического обзора, проведенного в главе 1, был сделан вывод о том, что методика, разработанная Рихтером Л.А. в работе [39], является передовой и в настоящее время, а зарубежных аналогов, которые бы основывались на технико-экономическом анализе и одновременно отвечали требованиям местных государственных органов по охране окружающей среды касательно рассеивания вредных веществ, не обнаружено. Но данная методика разрабатывалась для планово-распределительной модели экономического развития страны поэтому она требует актуализации для условий рыночной экономики Российской Федерации.

За последние три десятилетия существенно выросли стоимостные показатели товаров и услуг (сталь, бетон, электроэнергия, монтаж, наладка), применяемых при сооружении дымовой трубы. Кроме этого, с учетом фактора времени стала переменной величиной стоимость денег (покупательная способность).

При выборе лучшего варианта инвестиционного проекта в условиях рыночной экономики необходимо использовать критерий наименьших суммарных дисконтированных затрат. Следовательно, оптимальной является скорость газов, при которой суммарные дисконтированные затраты на сооружение дымовой трубы, рассчитываемые по формуле (2.1.1), являются минимальными [66, 67].

$$Z_{\text{д}} = \sum_{t=0}^{T_{\text{р}}} (K_{\text{тр}} + I'_t + I_{\text{фт}t}) \cdot (1 + E)^{-t}, \quad (2.1.1)$$

где $K_{\text{тр}}$ – инвестиции, в год, руб.;

I'_t – издержки без учета амортизации, в год, руб.;

$I_{\text{фт}t}$ – финансовые издержки, в год, руб.;

t – расчетный срок работы дымовой трубы, лет;

E – норма дисконтирования.

Дымовые трубы относятся к шестой группе общероссийского классификатора основных фондов [68] со сроком полезного использования до 15 лет включительно. Поэтому расчетный срок работы дымовой трубы принимаем $t=15$.

«Если оценка экономической эффективности инвестиционного проекта проводится исходя из реальных условий финансирования, то учитывается фактическая цена капитала. Цена собственного капитала принимается равной рентабельности альтернативных проектов или величине инфляции, заемного капитала — банковскому проценту, акционерного — величине дивидендов» [66].

Норма дисконтирования E определяется по выражению [66]:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \cdot a_i, \quad (2.1.2)$$

где E_i – цена i -го капитал [67];

a_i - доля i -го капитала в общей сумме инвестиций;

n –количество видов капитала в общей сумме инвестиций.

Задаваясь различными значениями скорости газов w , находим суммарные дисконтированные затраты для этих значений скорости.

2.2 Определение оптимальной скорости газов для одноствольной дымовой трубы

Рассмотрим наиболее распространенный вид дымовой трубы, а именно одноствольную с прижимной футеровкой. У таких труб несущая железобетонная оболочка рассматривается как единое целое с футеровкой, поэтому стоимость трубы $K_{тр}$ определяется следующим выражением:

$$K_{тр} = K_{оф} + K_{ф}, \quad (2.2.1)$$

где $K_{\text{ф}}$ – стоимость фундамента;

$K_{\text{оф}} = V_{\text{ж/б.о.}} \cdot \text{Ц}_{\text{ж/б.о.}} + \text{Тр}_{\text{оф}}$ – стоимость оболочки с футеровкой, руб.;

$V_{\text{ж/б.о.}}$ – объем железобетона оболочки, м³;

$\text{Ц}_{\text{ж/б.о.}}$ – стоимость материала, затраченного на один м³ железобетона оболочки, руб.;

$\text{Тр}_{\text{оф}}$, – трудозатраты на сооружение оболочки с футеровкой, руб.

Объем железобетонной оболочки с футеровкой находим по формуле из [57]:

$$V_{\text{ж/б.о.}} = 0,01 \cdot H^{2,2} \cdot D_0^{0,5} \cdot K_{\text{в.оф}}^{0,3} \cdot \left(\frac{T_{\text{Г}}}{T_{\text{баз}}} \right)^{0,5}, \quad (2.2.2)$$

где H – высота дымовой трубы, м;

D_0 – диаметр дымовой трубы в устье, м;

$T_{\text{Г}}$ – абсолютная температура дымовых газов, °К;

$T_{\text{баз}} = 423$ °К – абсолютная температура газов, принятая в качестве базовой;

$K_{\text{в.оф}}$ – коэффициент ветровой нагрузки для оболочки дымовой трубы, принимается в зависимости от ветрового района.

На основании таблицы 10.3 из [57] коэффициент пропорциональности в формуле (2.2.2) принят равным 0,01.

Стоимость одного м³ материалов железобетона ($\text{Ц}_{\text{ж/б}}$, руб./м³), складывается из цены бетона и стали в конструкциях. Стоимость бетона в современных оптовых ценах можно принять $\text{Ц}_{\text{б}} = 3000$ руб./м³, стоимость стали в конструкциях $\text{Ц}_{\text{ст}} = 40$ руб./кг. Принимая степень армирования оболочки 200 кг/м³ получаем стоимость железобетона оболочки $\text{Ц}_{\text{ж/б.о.}} = 11000$ руб./м³.

Высота дымовой трубы в первом приближении в соответствии с [36] определяется по выражению:

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{c_{\text{тр}} \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}}}, \quad (2.2.3)$$

где A – коэффициент, зависящий от метеорологических условий в рассматриваемом районе;

M – массовый выброс вредных веществ, г/с;

F – коэффициент, учитывающий скорость оседания вредного вещества в атмосферном воздухе: для газообразных выбросов $F = 1$, для золы $F = 2 - 3$;

m и n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$c_{\text{тр}}$ – 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.

Высота дымовой трубы с учетом параметров выбросов находится по формуле:

$$H = \sqrt{m} \cdot H_0, \quad (2.2.4)$$

где m определяется в зависимости от комплекса $\frac{k}{D_0^3}$ по данным, представленным в

[69].

В комплексе $\frac{k}{D_0^3}$ для одноствольной трубы D_0 – диаметр устья дымовой

трубы, а коэффициент k находится как:

$$k = 1621 \cdot \frac{V^2}{H_0^2 \cdot \Delta T}, \quad (2.2.5)$$

где V – объемный расход дымовых газов, выбрасываемых через устье дымовой трубы, м³/с, вычисляется по формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_0. \quad (2.2.6)$$

В формуле (2.2.6) D_0 – диаметр устья одноствольной трубы, м;
 w – скорость выхода дымовых газов из трубы, м/с.

В процессе расчета задаемся различными значениями этой скорости. Та скорость, при которой суммарные дисконтированные затраты будут минимальными, является оптимальной.

Трудозатраты на сооружение ж/б оболочки с футеровкой, $Tr_{оф}$, в формуле (2.2.1) находим, исходя из количества затраченных человеко-дней, по таблице 10.3 из [57], которые зависят от объема железобетона и цены рабочего дня, $Ц_{рд}$, руб./день, по формуле:

$$Tr_{оф} = 3,6 \cdot V_{ж/б.о.} \cdot Ц_{рд}, \quad (2.2.7)$$

где $Ц_{рд}$ –принимается равной 2000 руб./день.

Стоимость фундамента $K_{ф}$ находим как:

$$K_{ф} = V_{ж/б.ф.} \cdot Ц_{ж/б.ф.} + Tr_{ф}, \quad (2.2.8)$$

где $V_{ж/б.ф.}$ – объем железобетона фундамента дымовой трубы, м³; $Ц_{ж/б.ф.}$ – стоимость материала, затраченного на один м³ железобетона фундамента, руб.; $Tr_{ф}$ – трудовые затраты на сооружение фундамента, руб.

Зависимости объема железобетона от диаметра и высоты дымовой трубы взяты из [69, 70], а коэффициент пропорциональности, равный 0,004 получен как средневзвешенная величина по данным таблицы 10.2 из [57], тогда:

$$V_{ж/б.ф.} = 0,004 \cdot H^{2,3} \cdot D_0^{0,45} \cdot K_{в.оф}^{0,2} \cdot K_{Г}^{0,25}. \quad (2.2.9)$$

Принимая степень армирования фундамента 100 кг/м^3 , получаем стоимость железобетона $\text{Ц}_{\text{ж/б.ф}} = 7000 \text{ руб./м}^3$.

Трудовые затраты на сооружение фундамента, $\text{Тр}_{\text{ф}}$, находим, исходя из количества затраченных человеко-дней, по таблице 10.2 из [57], которые зависят от объема железобетона и цены рабочего дня $\text{Ц}_{\text{рд}}$, руб./день, по формуле:

$$\text{Тр}_{\text{ф}} = 0,7 \cdot V_{\text{ж/б.о.}} \cdot \text{Ц}_{\text{рд}}. \quad (2.2.10)$$

В рассматриваемых вариантах издержки $\text{И}'_t$ находятся по формуле:

$$\text{И}'_t = n_p \cdot \mu^2 \cdot a_{\text{ЭН}} \cdot N_{\text{ТГ}}, \quad (2.2.11)$$

где n_p – число часов фактической работы котла, час/год. При среднем простое котла в один месяц $n_p = 8000$ час;

$a_{\text{ЭН}}$ – себестоимость электроэнергии, ориентировочно принимаем $a_{\text{ЭН}} = 1,5$ руб./кВт·час;

Реальная загрузка котла определяется коэффициентом загрузки, ориентировочно принимаем $\mu = 0,75$.

Мощность, затрачиваемая на транспорт газов через дымовую трубу, $N_{\text{ТГ}}$, кВт, находим по формуле:

$$N_{\text{ТГ}} = 10^{-3} \cdot \frac{V \cdot \Delta h}{\eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}}, \quad (2.2.12)$$

где V определяется по формуле (2.2.6);

Δh – перепад давлений, необходимый для транспорта газов, Па;

$\eta_{\text{ТД}}$ – КПД тягодутьевой машины, принимаем равным 0,7;

$\eta_{\text{ДВ}}$ – КПД двигателя тягодутьевой машины, принимаем равным 0,98.

Перепад давлений, Δh , Па, складывается из потерь на трение $\Delta h_{\text{тр}}$, на местные сопротивления $\Delta h_{\text{мс}}$, с выходной скоростью $\Delta h_{\text{вс}}$ и самотяги дымовой трубы $\Delta h_{\text{с}}$:

$$\Delta h = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{мс}} + \Delta h_{\text{вс}} + \Delta h_{\text{с}}. \quad (2.2.13)$$

Для одноствольных конических труб потери на трение ориентировочно можно принимать:

$$\Delta h_{\text{тр}} = 0,3 \cdot h_{\text{д0}}, \quad (2.2.14)$$

где: $h_{\text{д0}}$ – динамический напор в устье трубы, Па, находится по формуле:

$$h_{\text{д0}} = \rho_{\text{г}} \cdot \frac{w^2}{2}, \quad (2.2.15)$$

где $\rho_{\text{г}}$ – плотность дымовых газов, кг/м³;

w – скорость газов в устье трубы, м/с.

Плотность дымовых газов $\rho_{\text{г}}$, кг/м³, рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{г}} = 1,29 \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{г}}}, \quad (2.2.16)$$

где $t_{\text{г}}$ – температура дымовых газов, °С.

Потери на местные сопротивления $\Delta h_{\text{мс}}$, Па, находятся как:

$$\Delta h_{\text{мс}} = \Sigma \zeta \cdot h_{\text{д0}}, \quad (2.2.17)$$

где $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений. Для конических одноствольных дымовых труб $\Sigma \zeta = 0$. Коэффициент сопротивления ввода газохода в трубу относится к местным сопротивлениям газохода.

Потери напора с выходной скоростью $\Delta h_{\text{вс}}$, Па, принимаются равными динамическому напору в устье трубы $h_{\text{д0}}$, Па:

$$\Delta h_{\text{вс}} = h_{\text{д0}}. \quad (2.2.18)$$

Самотяга трубы $\Delta h_{\text{с}}$, Па, в формуле (2.2.13) вычисляется как:

$$\Delta h_{\text{с}} = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}}) \cdot g \cdot H, \quad (2.2.19)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²; H находится по формуле (2.2.4). Плотность воздуха $\rho_{\text{в}}$, кг/м³, рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{в}} = 1,29 \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{в}}}, \quad (2.2.20)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С.

Для дальнейшего анализа берем за базу отсчета данные рисунка 2.2.1, на котором приведены оптимальные скорости дымовых газов в одноствольных железобетонных дымовых трубах в ценах 1975 года, [39].

По вышеописанной методике разработана программа, в которой проведены расчеты для тех же высот дымовых труб и такими же подключаемыми объемными расходами дымовых газов.

Результаты расчетов в случае сооружения дымовой трубы за счет собственных средств и при постоянной цене денег (реальная стоимость денежных знаков с учетом инфляции, а также изменение стоимости денег с учетом банковского процента и временного фактора) приведенных на рисунке 2.2.2. Средняя стоимость рабочего дня в 2018 году принята 2000 руб./чел.

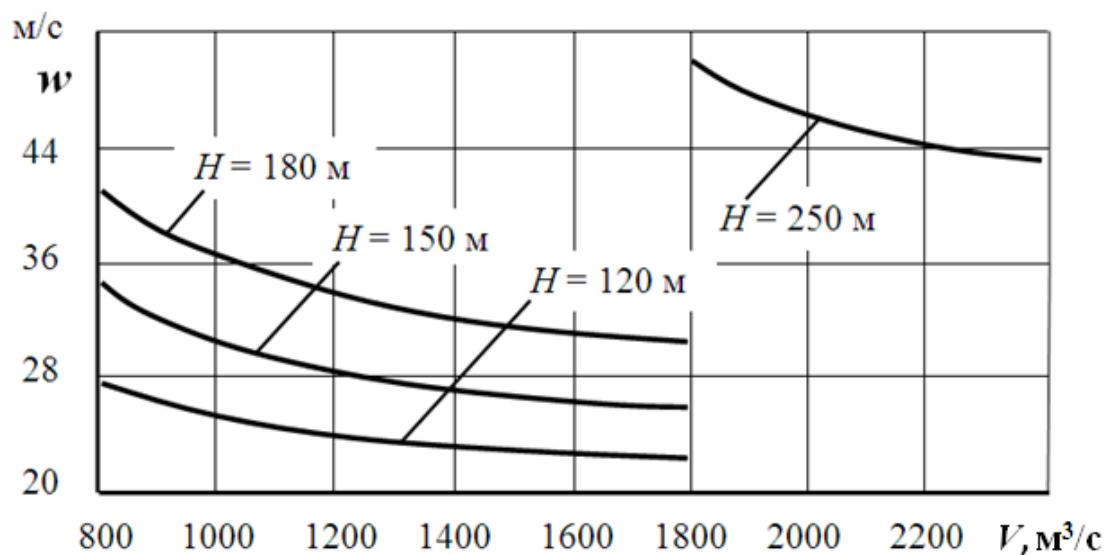


Рисунок 2.2.1 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из одноствольных железобетонных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых газов (в ценах 1975 года) [39]

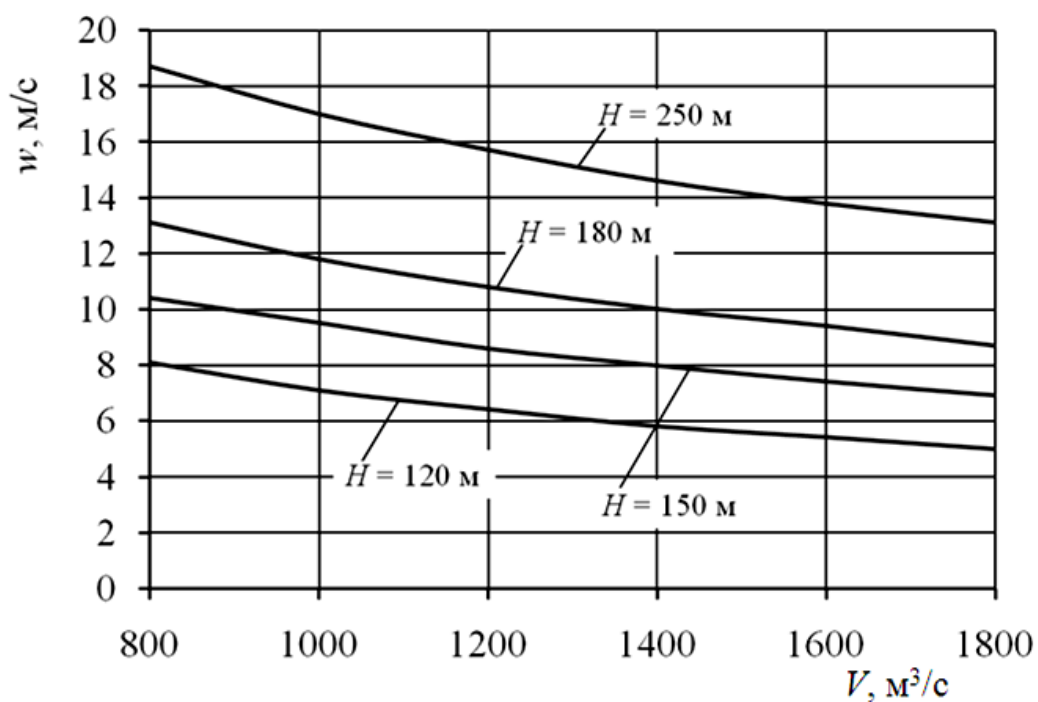


Рисунок 2.2.2 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из одноствольных железобетонных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых газов (на 2018 г. при постоянной цене денег)

Результаты расчётов, приведенные на рисунке 2.2.3, отображают оптимальные скорости дымовых газов в железобетонных дымовых трубах в

современных условиях строительства за счет заемных средств, полученных под 10% с учетом инфляции 5%.

Темпы роста стоимости электроэнергии за период 1975 – 2018 гг. значительно выше по сравнению с темпами роста стоимости строительных материалов и это не могло не сказаться на изменении оптимальных скоростей газов в дымовых трубах. Теперь выгоднее применять относительно дешевые стройматериалы и стремиться к снижению собственных нужд на транспорт дымовых газов. Поэтому оптимальные скорости существенно снизились. Рассматривая условия рассеивания на начальном участке с преобладающим динамическим подъемом дымового факела, необходимо учитывать, что они в основном зависят от соотношения скорости ветра и скорости дымовых газов. На участке теплового подъема – от количества тепла, содержащегося в границах дымового факела и состояния атмосферы. Снижение скорости выхода дымовых газов приводит к необходимости увеличивать высоту дымовой трубы, чтобы сохранились условия сопоставимости вариантов, а именно постоянство приземных концентраций. Этот факт учитывается в приведенной методике.

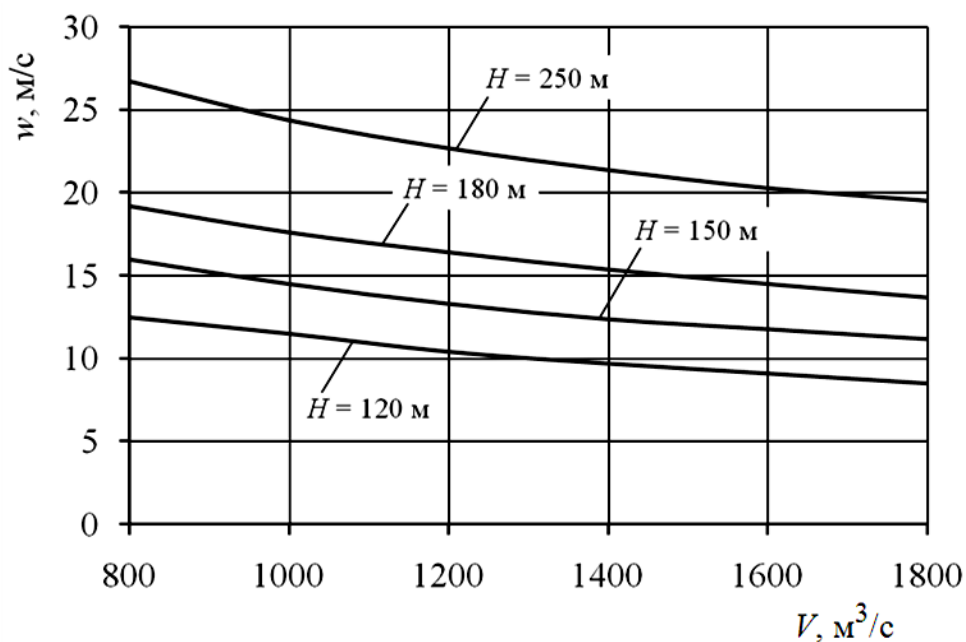


Рисунок 2.2.3 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из одноствольных железобетонных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых газов (на 2018 г. с учетом инфляции)

Как видно из рисунков 2.2.2 и 2.2.3, учет инфляции и стоимость кредита довольно заметно влияют на величину оптимальной скорости газов. Эта скорость увеличивается примерно на 4 м/с для труб высотой 120 м, на 5 м/с для труб высотой 150 м и 180 м, на 7 м/с для труб высотой 250 м. Так например, если для трубы высотой 250 м при объемном расходе дымовых газов 800 м³/с на рисунке 2.2.2 оптимальная скорость составляет 19 м/с, то на рисунке 2.2.3 для этих же параметров уже 26 м/с.

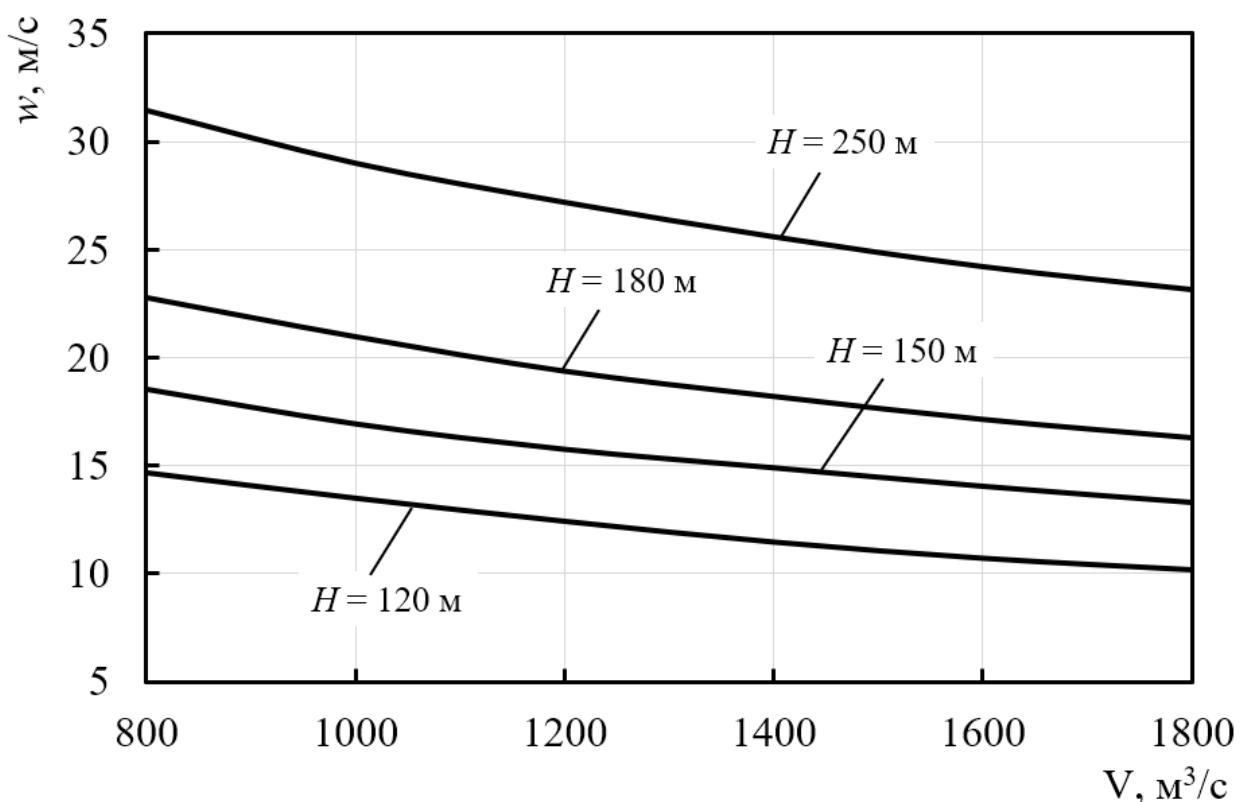


Рисунок 2.2.4 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из одноствольных железобетонных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых газов (на 2023 г. с учетом инфляции при стоимости человеко-дня 3000 руб.)

Условия 2023 г. (заемные средства, взятые под 15%, инфляция 10% и трудозатраты 3000 руб./день, рисунок 2.2.4) привели к увеличению оптимальной 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.

Для верификации разработанной методики на рисунке 2.2.5 приведены результаты расчетов для цен 1975 года [39]: $C_{ж/б.о} = 316,8$ руб./м³, $C_{ж/б.ф} = 253,4$ руб./м³, $C_{рд} = 10$ руб./день, себестоимости электроэнергии $a_{эп} = 0,005$ руб./кВт·ч.

Сравнивая данные рисунков 2.2.5 и 2.2.1 необходимо отметить, что оптимальные скорости газов для одинаковых параметров дымовых труб довольно близки, особенно для трубы высотой 180 м, где они практически совпали.

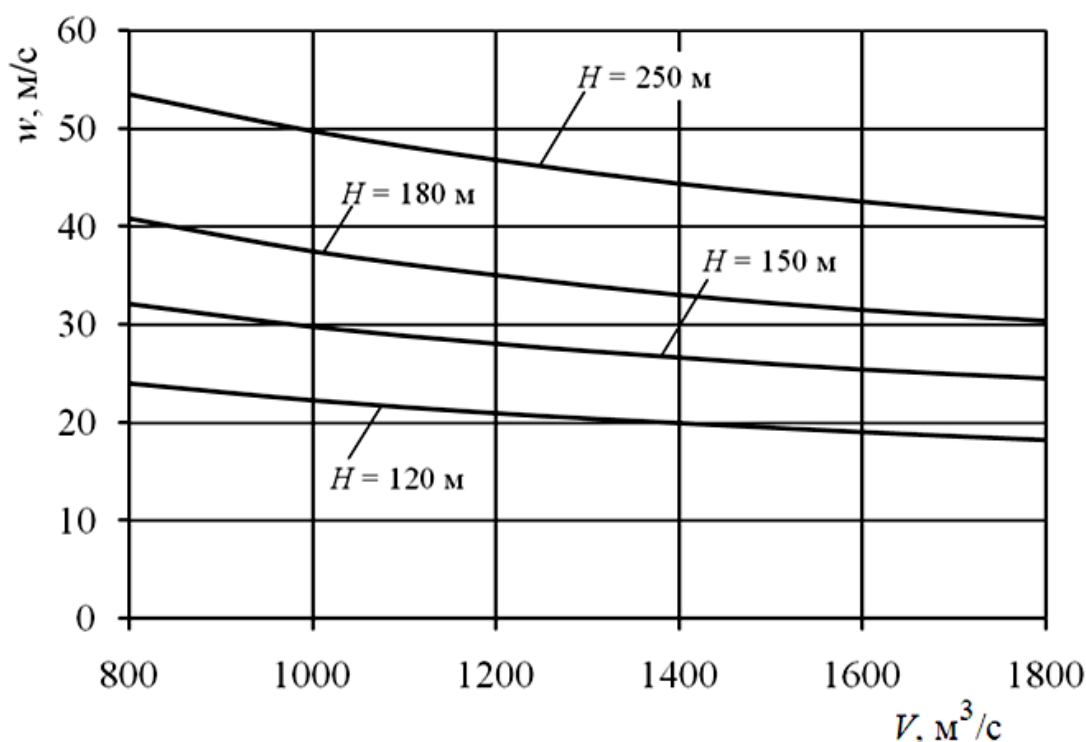


Рисунок 2.2.5 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из одноствольных железобетонных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых газов (в ценах 1975 года, при нулевой инфляции и строительстве за счет собственных средств)

2.3 Определение оптимальной скорости газов для многоствольной дымовой трубы

Для анализа оптимальных скоростей в многоствольных трубах рассмотрим наиболее часто встречающиеся четырехствольные дымовые трубы, которые применяются в основном на ТЭЦ.

Принимаем, что все четыре ствола одинаковые и изготовлены из углеродистой стали со средней толщиной стенки ствола с учетом запаса на 14 мм. Стволы по всей высоте цилиндрические, а увеличение объема металла в цокольной части учитывается в средней толщине стенок труб. Минимальное расстояние между стенками стволов составляет 1,2 м, а от внешней стенки ствола до внутренней стенки железобетонной оболочки в верхней ее части – 1,0 м. Стоимость таких труб $K_{тр}$, млн руб., находится по формуле:

$$K_{тр} = K_0 + K_{ф} + K_c, \quad (2.3.1)$$

где K_0 – стоимость оболочки, млн руб., (футеровка в данном случае отсутствует); K_c , - стоимость стволов, млн руб.

В формуле (2.3.1), K_0 находим как:

$$K_0 = V_{ж/б.об} \cdot Ц_{ж/б.о} + Тр_0, \quad (2.3.2)$$

где $V_{ж/б.об}$ – объем железобетона в оболочке многоствольной дымовой трубы, m^3 ; $Ц_{ж/б.о}$ – стоимость материала, затраченного на один m^3 железобетона оболочки, руб./ m^3 ; $Тр_0$, – трудовые затраты на сооружение железобетонной оболочки.

Коэффициент ветровой нагрузки таких труб берём из [69]. Коэффициент пропорциональности выбираем по данным объемов железобетона из [68]. В результате имеем следующее выражение:

$$V_{ж/б.о} = 0,09 \cdot H_0^{1,75} \cdot D_0^{0,6} \cdot K_{в.о}, \quad (2.3.3)$$

где H_0 – высота железобетонной оболочки, принимается на 5 м ниже, чем высота трубы;

D_0 – внутренний диаметр оболочки на выходе из дымовой трубы, м;

$K_{в.о}$ – коэффициент ветровой нагрузки для оболочки, принимается по таблице 3, [71].

Цену железобетона многоствольной дымовой трубы принимаем такой же, как для одноствольной, т.е. $C_{ж/б.о} = 11000$ руб./м³.

В формуле (2.3.2) трудовые затраты на сооружение ж/б оболочки определим исходя из количества затраченных человеко-дней, по таблице 10.3 [57], которые зависят от объема железобетона и цены рабочего дня $C_{рд}$, руб./день. Эти данные с достаточно высокой степенью точности аппроксимированы формулой:

$$Tr_o = 2,9 \cdot V_{ж/б.о} \cdot C_{рд} \quad (2.3.4)$$

Стоимость фундамента многоствольной дымовой трубы, $K_{ф.м}$, руб., находим по формуле:

$$K_{ф.м} = V_{ж/б.о.ф} \cdot C_{ж/б.о.ф} + Tr_{о.ф}, \quad (2.3.5)$$

где $V_{ж/б.о.ф}$ – объем железобетона фундамента оболочки многоствольной дымовой трубы, м³;

$C_{ж/б.о.ф}$ – стоимость материала, затраченного на один м³ железобетона фундамента, принимаем такую же, как для одноствольной дымовой трубы, т.е. $C_{ж/б.о.ф} = 7000$ руб./м³;

$Tr_{о.ф}$, – трудовые затраты на сооружение фундамента оболочки, руб.

Объем железобетона фундамента оболочки многоствольной дымовой трубы, $V_{ж/б.о.ф}$, м³, находим по формуле (2.2.9).

Трудовые затраты на сооружение фундамента $Tr_{о.ф}$ многоствольной дымовой трубы находим исходя из количества затраченных человеко-дней, по таблице 10.2 из [57], которое зависит от объема железобетона и цены рабочего дня $C_{рд}$, руб./день, по формуле:

$$\text{Тр}_{\text{о.ф}} = 0,2 \cdot V_{\text{ж/б.о}} \cdot \text{Ц}_{\text{рд}} \quad (2.3.6)$$

Стоимость стволов K_c , находим по выражению:

$$K_c = \text{Ц} \cdot V_M + \text{Тр}_c, \quad (2.3.7)$$

где Ц – цена 1 м³ материала. Для стали ориентировочно может быть принята $\text{Ц} = 312$ тыс. руб./м³;

V_M – объем металла, израсходованного на все стволы, м³;

Тр_c – трудовые затраты на монтаж стволов, руб.

Объем металла стволов может быть найден по формуле:

$$V_M = \pi \cdot d_c \cdot H \cdot \delta \cdot N_c, \quad (2.3.8)$$

где d_c – внутренний диаметр одного ствола, м;

H – высота дымовой трубы, м, находится по (2.2.5);

δ – толщина стенок стволов, для стали принимается 0,012-0,014 м;

N_c – количество стволов.

Диаметр ствола d_c м, находится как:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot w}}, \quad (2.3.9)$$

где V_c – расход газов через один ствол, м³/с;

w – скорость газов в стволе, м/с.

Трудовые затраты на монтаж стволов Тр_c , руб., на основании [58] принимаем:

$$\text{Тр}_c = 60 \cdot V_M \cdot \text{Ц}_{\text{рд}} \quad (2.3.10)$$

Результаты расчетов для многоствольных дымовых труб с четырьмя металлическими стволами в общей железобетонной оболочке в ценах 2018 года, при нулевой инфляции и строительстве за счет собственных средств приведены на рисунке 2.3.1.

Сравнивая рисунки 2.2.2 и 2.3.1, делаем вывод, что оптимальные скорости в многоствольной дымовой трубе выше, чем в одноствольной. И эта разница больше для относительно низких дымовых труб. Влияние объемного расхода и высоты дымовой трубы для четырехствольных труб менее выражено, чем для одноствольных.

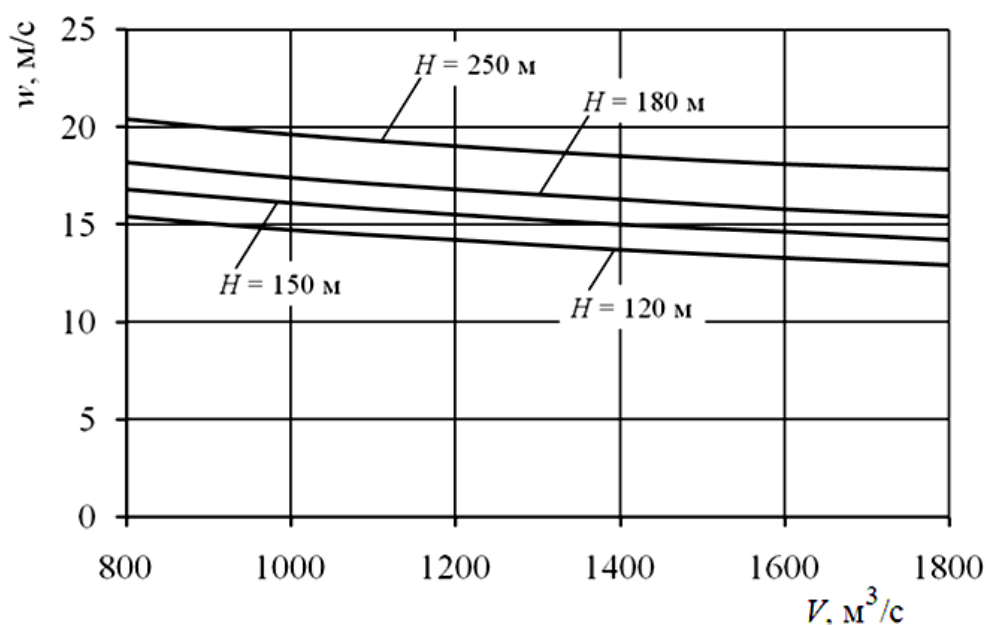


Рисунок 2.3.1 — График зависимости оптимальной скорости выхода газов из металлических стволов четырехствольных дымовых труб разных высот от объемного расхода дымовых (на 2018 г. при постоянной цене денег)

Связано это с тем, что стоимость многоствольных труб заметно больше, чем одноствольных. На рисунке 2.3.2 приведены относительные значения стоимости четырехствольных труб по отношению к одноствольным. Относительные значения мало зависят от объемного расхода дымовых газов, но довольно значительно зависят от высоты дымовой трубы. Для труб высотой 120 м это отношение составляет 2,6, а для труб высотой 250 м - 1,7.

Результаты расчетов оптимальной скорости газов для дымовых труб с четырьмя металлическими стволами в общей железобетонной оболочке в ценах 2018 года при инфляции, равной 5% и строительстве за счет заемных средств, взятых под 10% годовых, приведены на рисунке 2.3.2.

Как видно из рисунка, инфляция и процентная ставка довольно сильно влияют на выбор оптимальной скорости дымовых газов. При этом инфляция и процентная ставка влияют не на текущее значение скорости газов, но на выбор оптимального ее значения (формулы 2.1.1 и 2.1.2). Для четырехствольных труб она увеличивается примерно на 5 м/с. Оптимальные скорости дымовых газов для четырехствольных (рисунок 2.3.1) и одноствольных (рисунок 2.2.2) дымовых труб высотой 250 м достаточно близки по величине. Если для одноствольных труб оптимальные скорости дымовых газов, выходящих из трубы, лежат в пределах от 19 до 27 м/с, то для четырехствольных от 23 до 26 м/с. Для труб меньшей высоты эта разница увеличивается.

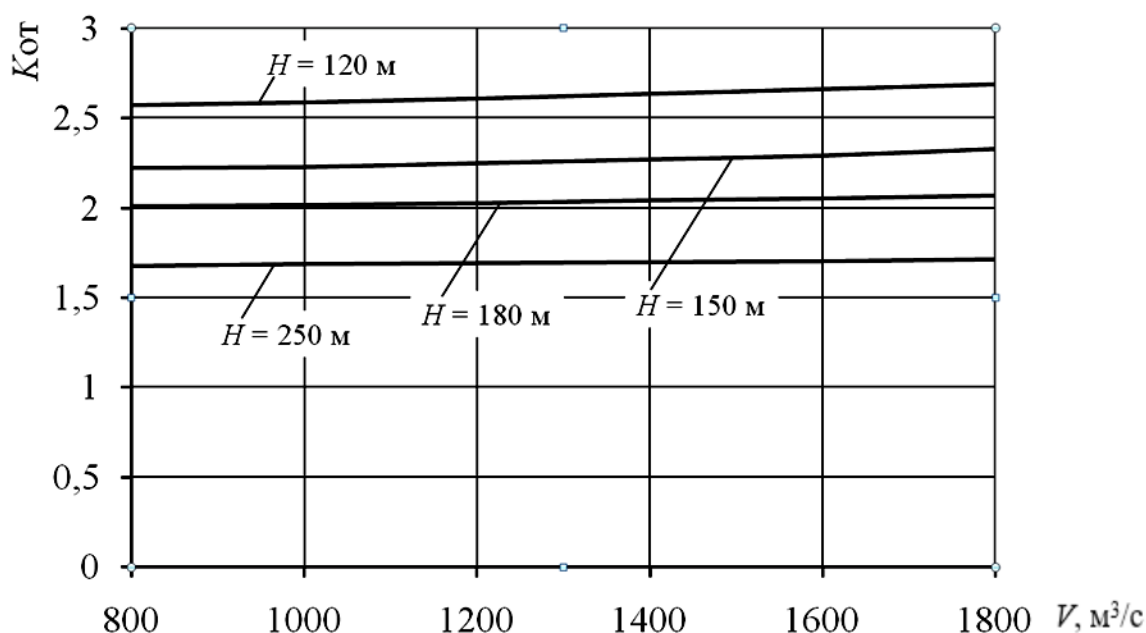


Рисунок 2.3.2 — График зависимости относительного значения стоимости четырехствольных дымовых труб различных высот с металлическими стволами к стоимости одноствольных железобетонных дымовых труб различных высот, при условии сопоставимости, от объемного расхода дымовых газов (в ценах 2018 года, при постоянной цене денег)

На рисунке 2.3.3 представлены относительные значения стоимости четырехствольных и одноствольных труб с учетом инфляции. Сравнивая с рисунком 2.3.2, видим, что эти значения изменились незначительно, однако с учетом инфляции стоимости труб уменьшились при увеличении оптимальной скорости газов.

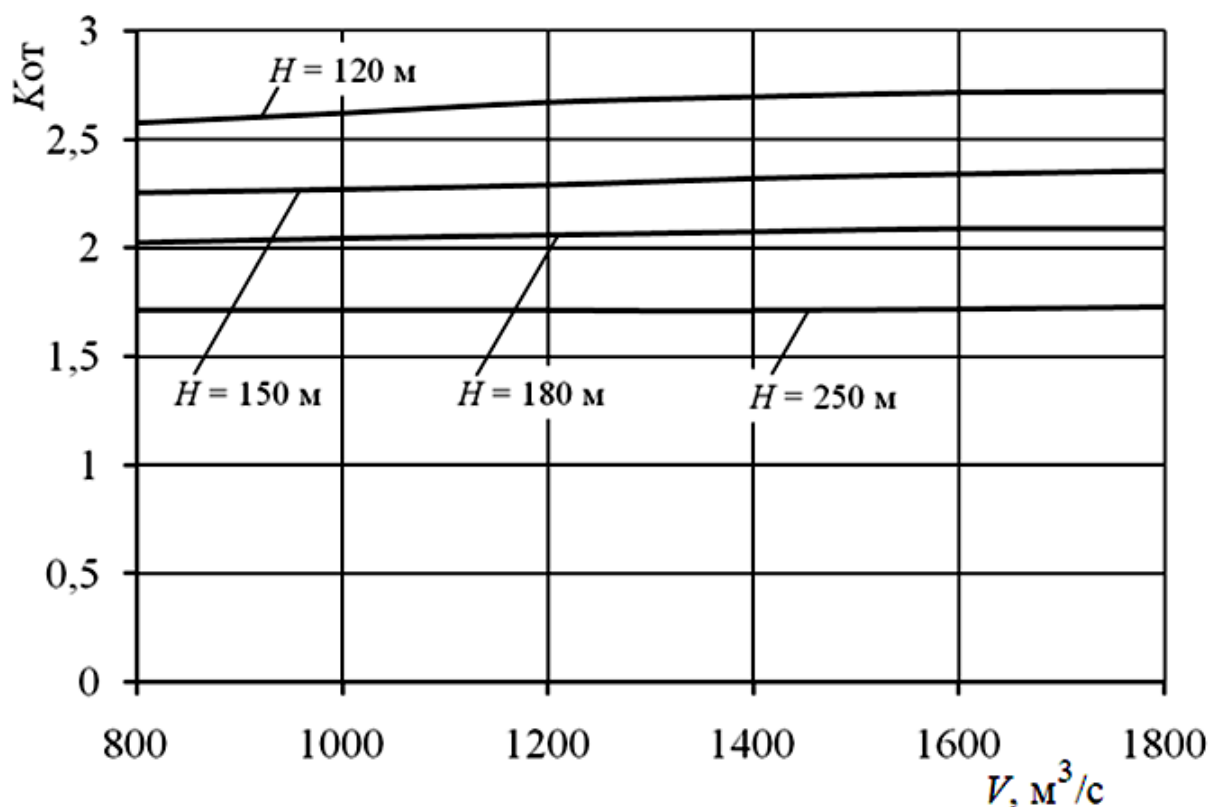


Рисунок 2.3.3 — График зависимости относительного значения стоимости четырехствольных дымовых труб различных высот с металлическими стволами к стоимости одноствольных железобетонных дымовых труб, различных высот при условии сопоставимости, от объемного расхода дымовых газов (с ценами на 2018 г. с учетом инфляции)

Из сравнения рисунков 2.3.4 и 2.3.5 можно сделать вывод о более сильном влиянии инфляции на стоимость в случае одноствольной трубы.

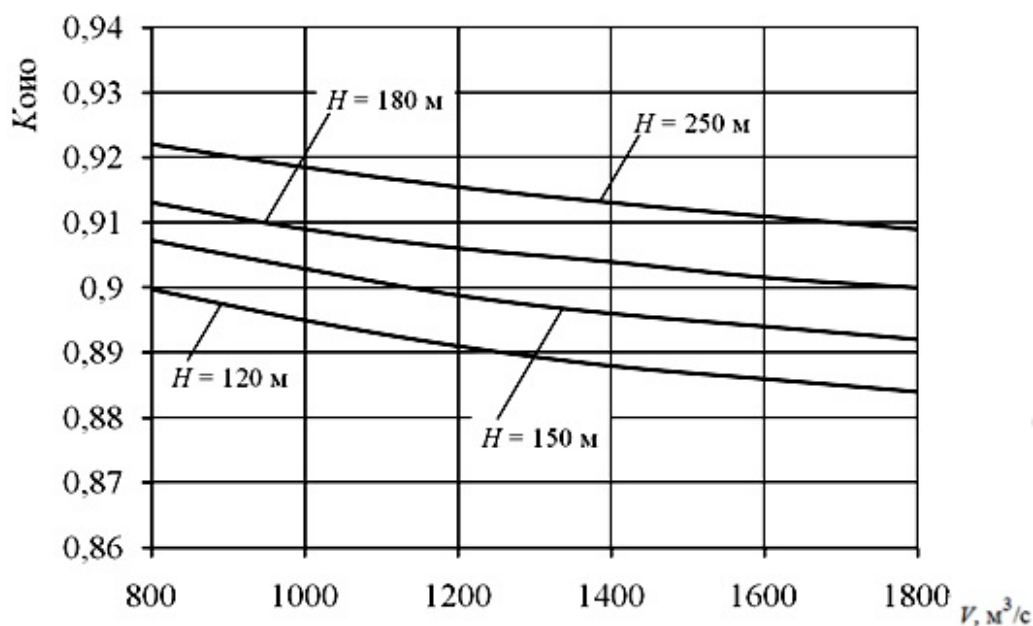


Рисунок 2.3.4 — График зависимости относительного значения стоимости одноствольных дымовых труб, различных высот с учетом инфляции к стоимости таких же труб без учета инфляции, от объемного расхода дымовых газов

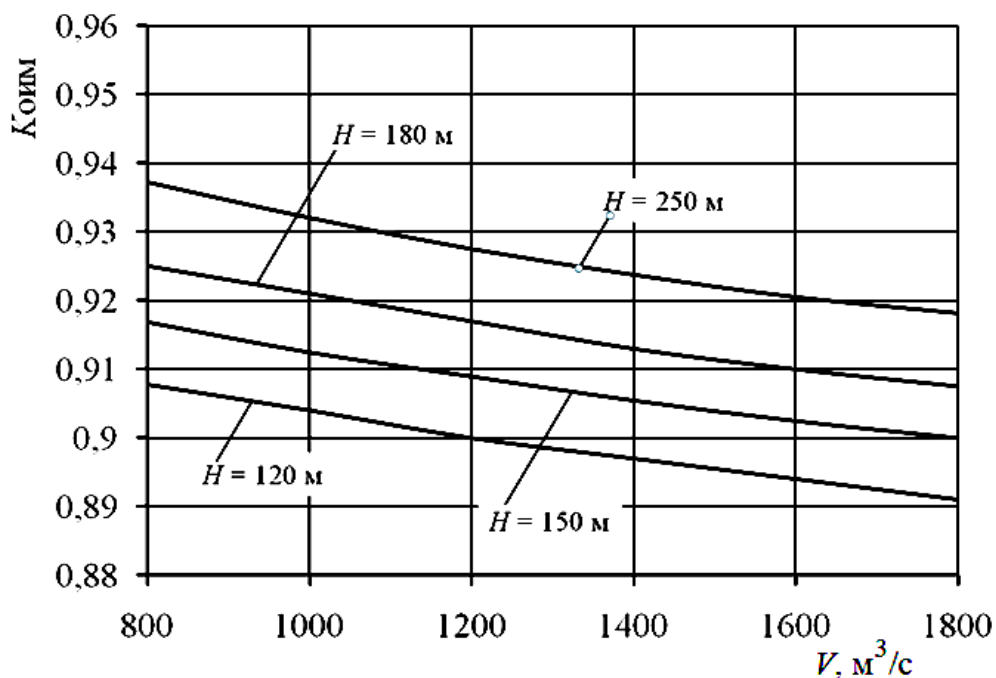


Рисунок 2.3.5 — График зависимости относительного значения стоимости четырехствольных дымовых труб, различных высот с учетом инфляции к стоимости таких же труб без учета инфляции, от объемного расхода дымовых газов

Электроэнергия, производимая тепловой электростанцией (ТЭС), в отличие от большинства видов продукции, не может храниться на складе. Поэтому ТЭС в каждый момент времени должна выдавать ровно столько электроэнергии, сколько требуется потребителю. Это условие зафиксировано в договорах с потребителями. Там же устанавливается плата за эти ресурсы и устанавливаются штрафные санкции за недоотпуск электроэнергии. Эти штрафы достаточно большие, т.к. перерыв в электроснабжении может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования, например ректификационных колонн на предприятиях нефтепереработки. И штрафы должны компенсировать такие потери. Поэтому основным требованием к работе ТЭС является надежность оборудования.

К дымовым трубам подключаются значительная часть мощностей станции, иногда до 100 %. Выход из строя такой трубы приводит к отключению присоединенных к ней котлов и к потере значительной доли мощности ТЭС.

Однако, если на станции установлена многоствольная труба, выходит из строя, как правило, одновременно только один ствол, который может ремонтироваться при работе остальных стволов. Это является существенным преимуществом многоствольных дымовых труб при обеспечении также и высокой надежности несущей железобетонной оболочки. Высокая надежность железобетонной оболочки достигается тем, что между стволами и оболочкой находится обслуживаемая зона, в которой нет газов, агрессивных для оболочки. Поэтому длительность возможной работы такой оболочки значительно превышает длительность работы самой станции. Этими преимуществами объясняется распространение многоствольных дымовых труб в настоящее время в мировой энергетике.

Влияние стоимости человеко-дня монтажных работ на оптимальную скорость дымовых газов можно увидеть, сравнивая рисунки 2.3.6 и 2.3.7. Например при объемном расходе газов $800 \text{ м}^3/\text{с}$ для дымовой трубы высотой 250 м оптимальная скорость на рисунке 2.3.6 составляет 26 м/с, а на рисунке 2.3.7 30 м/с.

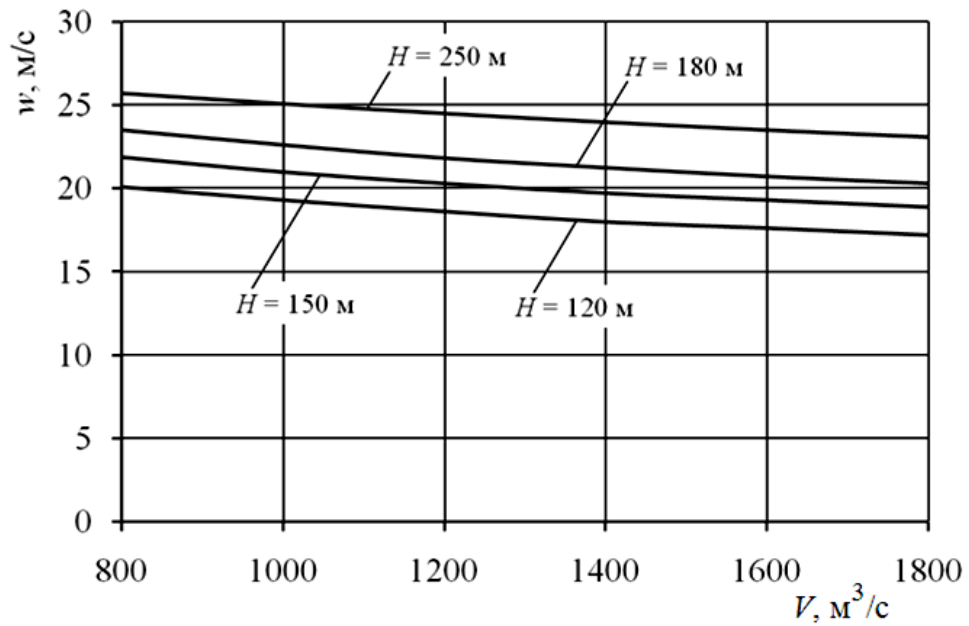


Рисунок 2.3.6 — График зависимости оптимальной скорости выхода дымовых газов из металлических стволов четырехствольных труб различных высот от объемного расхода дымовых газов (на 2018 г. с учетом инфляции, при стоимости чел.-дня 2000 руб.)

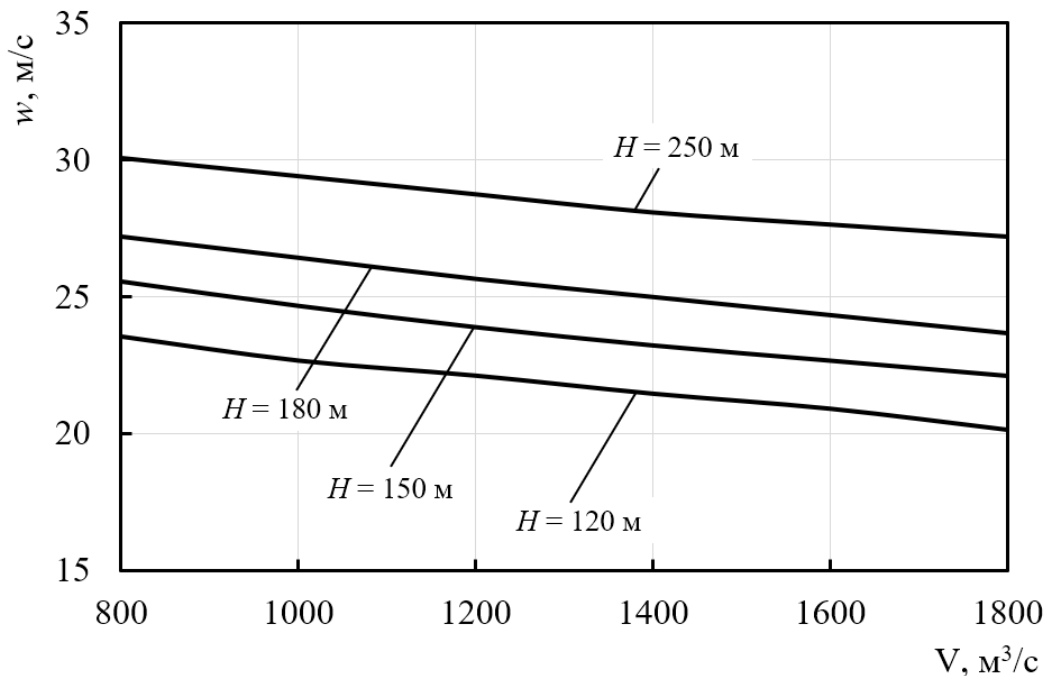


Рисунок 2.3.7 — График зависимости оптимальной скорости выхода дымовых газов из металлических стволов четырехствольных труб различных высот от объемного расхода дымовых газов (на 2023 г. с учетом инфляции и стоимости при чел.-дня 3000 руб.)

Несмотря на то, что диаметры стволов и оболочки уменьшаются, стоимость дымовой трубы на 11 – 12 % увеличивается независимо от высоты дымовой трубы. Большие значения имеют место для малых расходов. Это увеличение стоимости объясняется преобладающим влиянием увеличения стоимости труда над удешевлением используемых материалов.

Сравнивая рисунки 2.2.4 и 2.3.7, видим, что оптимальные скорости газов для труб высотой 250 м сопоставимы для одноствольных и четырехствольных труб. Для труб меньшей высоты появляется значительная разница. Если для четырехствольных труб оптимальная скорость составляет 20 м/с, то для одноствольных 10 м/с.

2.4 Расчет статических давлений по высоте дымовой трубы

После определения оптимальной скорости дымовых газов в стволах необходимо провести аэродинамический расчет для определения распределения статических давлений по высоте дымовой трубы. Особый интерес представляют при этом избыточные статические давления.

В этом случае исходными данными являются: w – оптимальная скорость дымовых газов, полученная в результате технико-экономического расчета, м/с; H – высота дымовой трубы, м; D_0 – диаметр устья дымовой трубы, м; U – уклон образующей дымовой трубы; t_T – температура уходящих газов, °С; t_B – температура воздуха, °С; P_0 – абсолютная шероховатость внутренней поверхности, м.

Расчет избыточных статических давлений проводится следующим образом. Дымовая труба разбивается на достаточно большое количество участков i , в пределах которых все параметры газового потока и дымовой трубы считаются постоянными. Высоты каждого из участков одинаковы. Температура дымовых газов по высоте дымовой трубы принимается постоянной. По известному источнику [72], в зависимости от температуры газов t_T , определяется их кинематическая вязкость ν , которая может быть выражена формулой:

$$\nu = 10^{-6} [21,5 + 0,103 \cdot (t_T - 100)]. \quad (2.4.1)$$

Расчет начинается с устья трубы, на уровне которого статическое давление в трубе равно атмосферному, то есть избыточное статическое давление равно нулю.

Размер расчетного участка можно принять $h = 1$ м. Таким образом, если высота трубы составляет 250 м, то делается расчет 250 участков. Дальнейшее уменьшение расчетного участка незначительно сказывается на результате.

Находим объемный расход дымовых газов V , м³/с:

$$V = w_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}, \quad (2.4.2)$$

где w_0 – оптимальная скорость дымовых газов в устье дымовой трубы, м/с;

D_0 – диаметр устья трубы, м.

Находим внутренний диаметр трубы в начале первого расчетного участка при $i = 1$, м:

$$D_i = D_0 + 2 \cdot i \cdot U \cdot h. \quad (2.4.3)$$

где i – номер шага, величина безразмерная;

U – уклон, в долях единицы, величина безразмерная;

h – высота трубы, м;

D_0 – диаметр устья трубы (вверху), м.

Находим скорость газов на входе в первый участок, м/с:

$$w_i = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot (D_i)^2}. \quad (2.4.4)$$

Находим плотность дымовых газов ρ_r , кг/м³:

$$\rho_{\Gamma} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + t_{\Gamma}}. \quad (2.4.5)$$

Находим плотность воздуха $\rho_{\text{В}}$, кг/м³:

$$\rho_{\text{В}} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{В}}}. \quad (2.4.6)$$

Самотяга участка h_s , Па:

$$h_s = 9,819 \cdot h \cdot (\rho_{\text{В}} - \rho_{\Gamma}). \quad (2.4.7)$$

Восстановление статического давления за счет изменения динамического напора на первом участке:

$$dh_i = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot (w_0^2 - w_i^2)}{2}. \quad (2.4.8)$$

Средний диаметр в пределах первого расчетного участка, м:

$$ds_i = 0,5 \cdot (D_0 + D_i). \quad (2.4.9)$$

Средняя скорость дымовых газов в первом расчетном участке, м/с:

$$ws_i = 0,5 \cdot (w_0 + w_i). \quad (2.4.10)$$

Число Рейнольдса в пределах первого расчетного участка:

$$\text{Re}_i = \frac{ws_i \cdot ds_i}{\nu}. \quad (2.4.11)$$

Коэффициент трения в пределах первого расчетного участка:

$$L_i = 0,1 \cdot \left[\left(1,46 \cdot \frac{P_0}{ds_i} \right) + \frac{100}{Re_i} \right]^{0,25} . \quad (2.4.12)$$

Потери на трение на первом расчетном участке:

$$dh_{\Gamma i} = \frac{L_i \cdot h \cdot \rho_{\Gamma} \cdot ws_i^2}{2 \cdot ds_i} . \quad (2.4.13)$$

Уровень начала первого расчетного участка, м:

$$h_i = H - i \cdot h . \quad (2.4.14)$$

В связи с малой конусностью конфузорного участка дымовой трубы местными сопротивлениями пренебрегаем. Поэтому статическое давление в начале первого расчетного участка находим как:

$$hst_i = dh_{mi} + dh_i - hs . \quad (2.4.15)$$

Затем расчет повторяется для последующих участков и строится профиль статического давления. Результат расчета при уклоне образующей $U = 0,015$ и абсолютной шероховатости внутренней поверхности $P_0 = 0,0015$ м для вышеприведенного примера показан на рисунке 2.4.1.

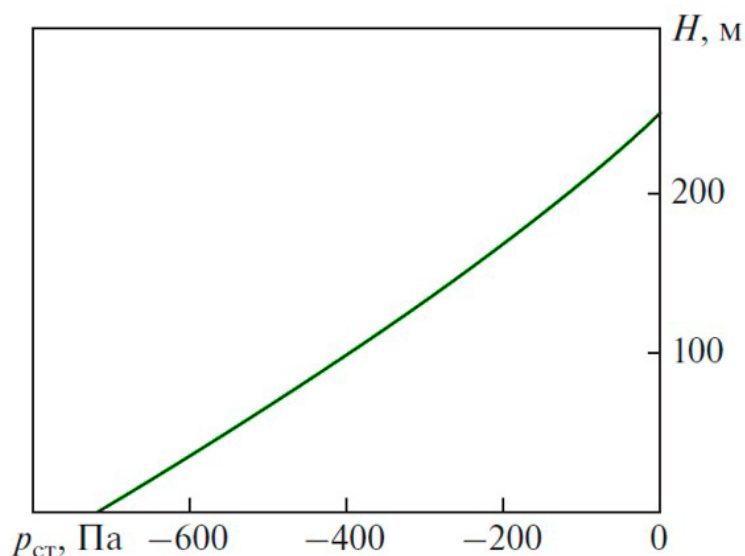


Рисунок 2.4.1 — Профиль статических давлений по высоте дымовой трубы в режиме 1

Как видно из примера, по всей высоте дымовой трубы имеет место разрежение, которое в нижней части трубы превышает 700 Па, ограничения по статическим давлениям в дымовой трубе отсутствуют. Однако, если уклон образующей принять $U = 0,025$, абсолютную шероховатость внутренней поверхности $P_0 = 0,003$ м, а скорость газов в устье трубы $w_0 = 30$ м/с, то в верхней части дымовой трубы появится избыточное статическое давление, (рисунок 2.4.2).

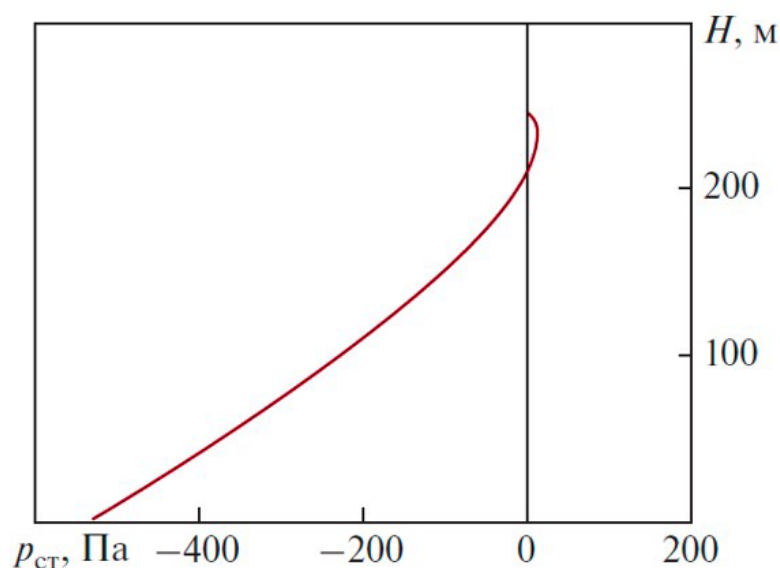


Рисунок 2.4.2 — Профиль статических давлений по высоте дымовой трубы в режиме 2

2.5 Выводы по главе

На базе математической модели, разработанной профессором Рихтером Л.А., прошедшей широкую проверку при экономических условиях, характерных для СССР, разработана новая математическая модель, позволяющая учесть более широкий спектр исходной информации и с учетом последних достижений экономической науки. Обобщенная блок-схема методики представлена в Приложении 1. Предложенная методика расчета оптимальной скорости дымовых газов подходит для любой модели развития экономики, является универсальной и не зависит от тренда цен и затрат на производство товаров и услуг. Для расчета оптимальной скорости дымовых газов необходимо только лишь вводить актуальную на современном этапе исходную информацию. Разработанная математическая модель и созданный на ее основе пакет программ верифицированы по условиям планово-распределительной модели экономического развития страны. Приведен анализ влияния инфляции, стоимости денег и стоимости рабочего дня на оптимальную скорость газов в дымовых трубах. С помощью описанной авторской программы показано, что принимаемые в настоящее время при проектировании дымовых труб скорости газов существенно завышены.

3 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВАРИАНТЫ ОПТИМИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ МНОГОСТВОЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ.

3.1 Условия сопоставимости вариантов подключения оборудования к дымовой трубе

В главе 1 и главе 2 уже были отмечены существенные преимущества многоствольных дымовых труб и, как следствие, их широкое распространение во всем мире. Наиболее часто применяются трех- и четырехствольные дымовые трубы. Если количество подключаемых котлов кратно трем, то выбирается трехствольная труба, если четырем – четырехствольная. Однако при таком обосновании выбора количества стволов не учитываются некоторые существенные факторы, которые рассмотрены в данной главе.

В соответствии с требованиями правил [73] к площадкам и лестницам котельного агрегата ширина свободного прохода площадок должна быть не менее 600 мм, а для обслуживания арматуры, контрольно-измерительных приборов и другого оборудования – не менее 800 мм. С учетом запаса для теплоизоляции минимальное расстояние между металлом соседних стволов примем равным 1,2 м, а минимальное расстояние между стволом и железобетонной оболочкой – 1,0 м.

Примерно половину стоимости многоствольных труб высотой 200 – 250 м составляет несущая железобетонная оболочка, 40 % - стволы и 10 % фундамент. Однако более точно эти соотношения зависят от длины периметров оболочки и стволов. При дальнейшем анализе долю стоимости фундамента будем считать постоянной и равной 10 %.

Если на трубу подключается однотипное оборудование, стволы выполняются одинаковых размеров. На рисунке 3.1.1 показано поперечное сечение трехствольной дымовой трубы в узком месте (на верхней площадке). На рисунке 3.1.2 показано поперечное сечение четырехствольной дымовой трубы в узком месте (на верхней площадке).

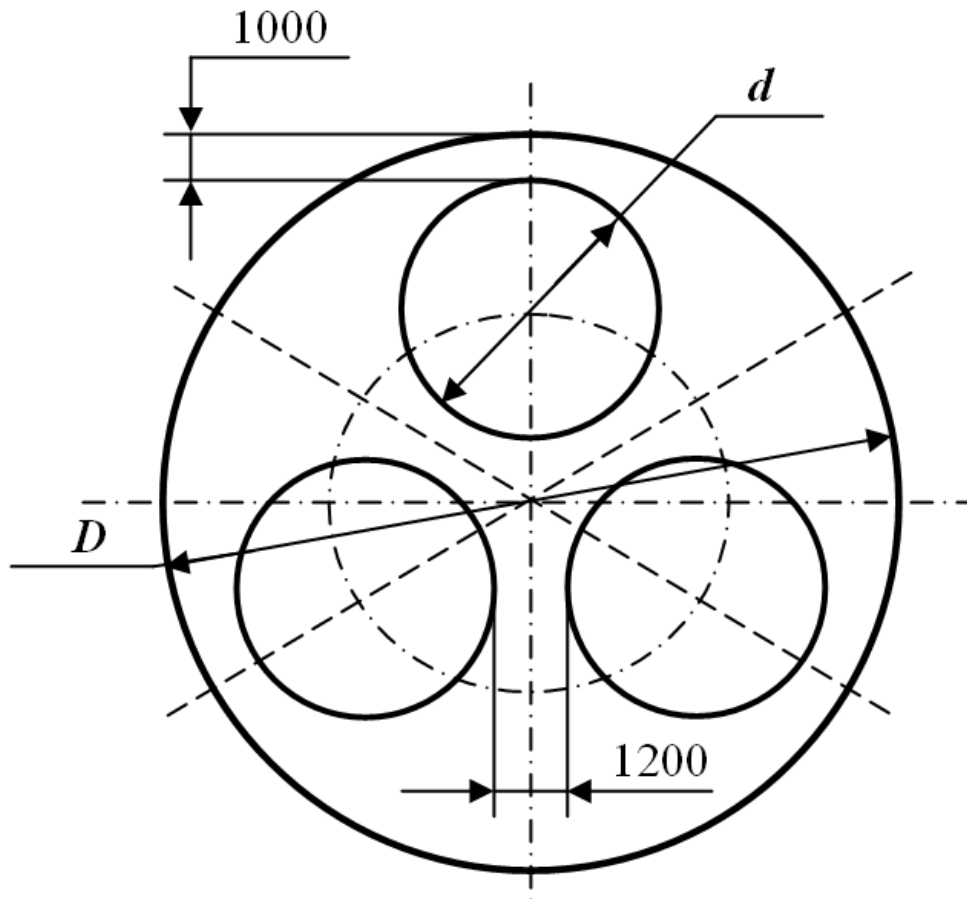


Рисунок 3.1.1 — Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы

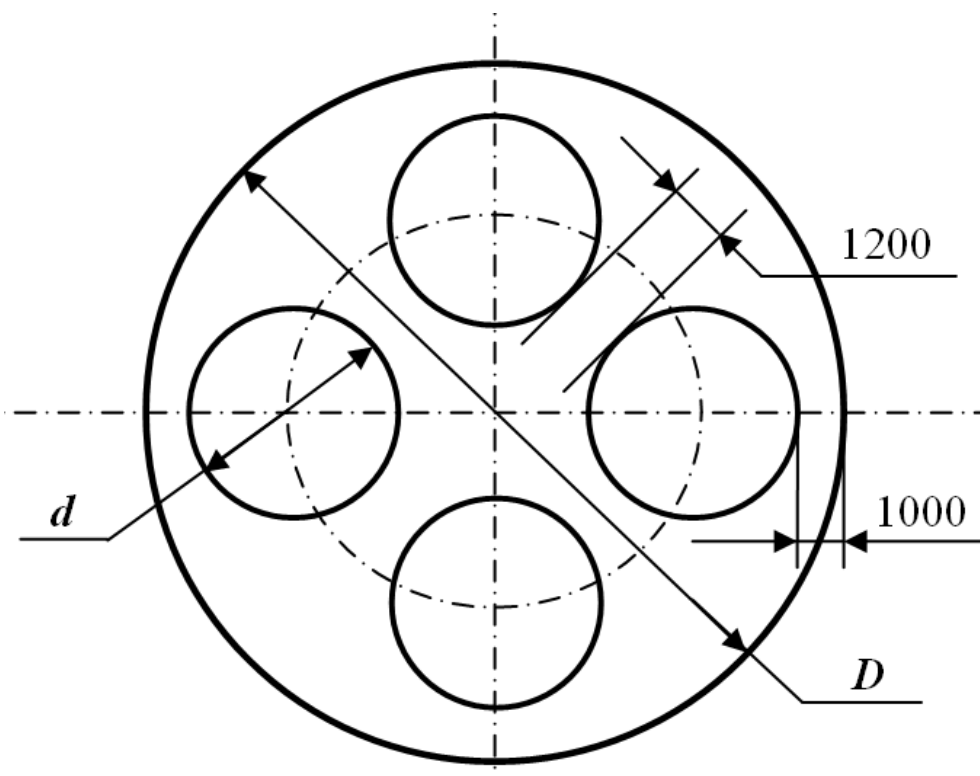


Рисунок 3.1.2 — Поперечное сечение четырехствольной дымовой трубы

Для расчета периметров нужно установить связь между диаметрами стволов и оболочки при принятых допущениях. Для трех- и четырехствольных труб с одинаковыми стволами нетрудно получить:

$$D = \frac{d + 1,2}{\sin(180^\circ / N)} + d + 2, \quad (3.1.1)$$

где d – диаметр ствола м;

N – количество стволов (3 или 4);

D – диаметр железобетонной оболочки, м.

Достаточно просто можно также показать, что при одинаковых суммарных площадях поперечных сечений стволов отношение суммарного периметра стволов трехствольной трубы P_3 , м, к суммарному периметру стволов четырехствольной трубы P_4 не зависит от размеров стволов и при любых, но одинаковых суммарных площадях поперечных сечений, составляет величину

$$\frac{P_{ст3}}{P_{ст4}} = \sqrt{\frac{3}{4}} \approx 0,866, \quad (3.1.2)$$

где $P_{ст3}$ – суммарный периметр стволов трехствольной трубы, м;

$P_{ст4}$ – суммарный периметр стволов четырехствольной трубы, м.

Доля стоимости стволов в общей стоимости трубы растет с увеличением суммарной площади поперечного сечения стволов как для трех-, так и для четырехствольных труб, так как растет отношение периметров стволов к периметру оболочки. Это можно заметить при анализе данных рисунка 3.1.3. Из рисунка 3.1.3, с учетом формулы (3.1.2), можно найти также отношение периметров оболочек трехствольной к периметру четырехствольной дымовых труб. Для этого выписываем для трехствольной трубы при $f = 10 \text{ м}^2$ значение $P_{ст3}/P_{об3} = 0,79$. Для четырехствольной трубы при этом же значении f $P_{ст4}/P_{об4} = 0,88$. Тогда

$P_{об3}/ P_{об4} = (P_{ст3}/ P_{ст4})(0,88/0,79)$. Подставляя $(P_{ст3}/ P_{ст4}) = 0,866$ из формулы (3.1.2), получаем $P_{об3}/ P_{об4} = 0,965$.

В результате получаем, что отношение периметров оболочек при изменении суммарной площади поперечного сечения f , м², от 10 до 100 м² меняется от 0,965 до 1,02. То есть, периметр оболочки трехствольной трубы во всем рассматриваемом диапазоне близок к периметру оболочки четырехствольной трубы.

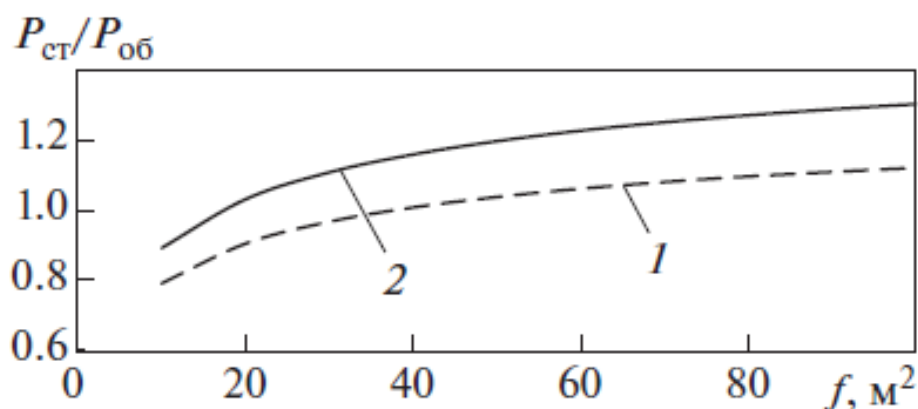


Рисунок 3.1.3 — Изменение доли периметра стволов в зависимости от суммарной площади поперечного сечения стволов для трехствольной (1) и четырехствольной (2) трубы

Таким образом, если есть возможность применить трехствольную трубу вместо четырехствольной, это нужно сделать, так как стоимость трехствольной трубы будет примерно на 6 % меньше, чем стоимость четырехствольной (от 5,5 % при $F = 10$ м² до 6,2 % при $F = 100$ м²) за счет меньшего периметра стволов. Кроме этого, у трехствольной трубы будут меньше затраты на транспорт газов из-за увеличенных диаметров стволов. В том случае, если имеется четыре котла, возможно подключение двух котлов каждого на свой ствол, а оставшихся двух - на один общий. В том случае, если имеется пять котлов, возможно подключение одного котла на свой ствол, а оставшихся четырех - по два котла на один общий. Если принять, что скорости газов во всех стволах одинаковы, то больший ствол будет иметь площадь поперечного сечения в два раза больше.

Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы, у которой два ствола такие же как у четырехствольной трубы, а третий имеет площадь поперечного сечения в два раза больше, с теми же условиями формирования проходных зазоров, приведено на рисунке 3.1.4. Расстояние между стволами и между стволами и оболочкой указано в мм.

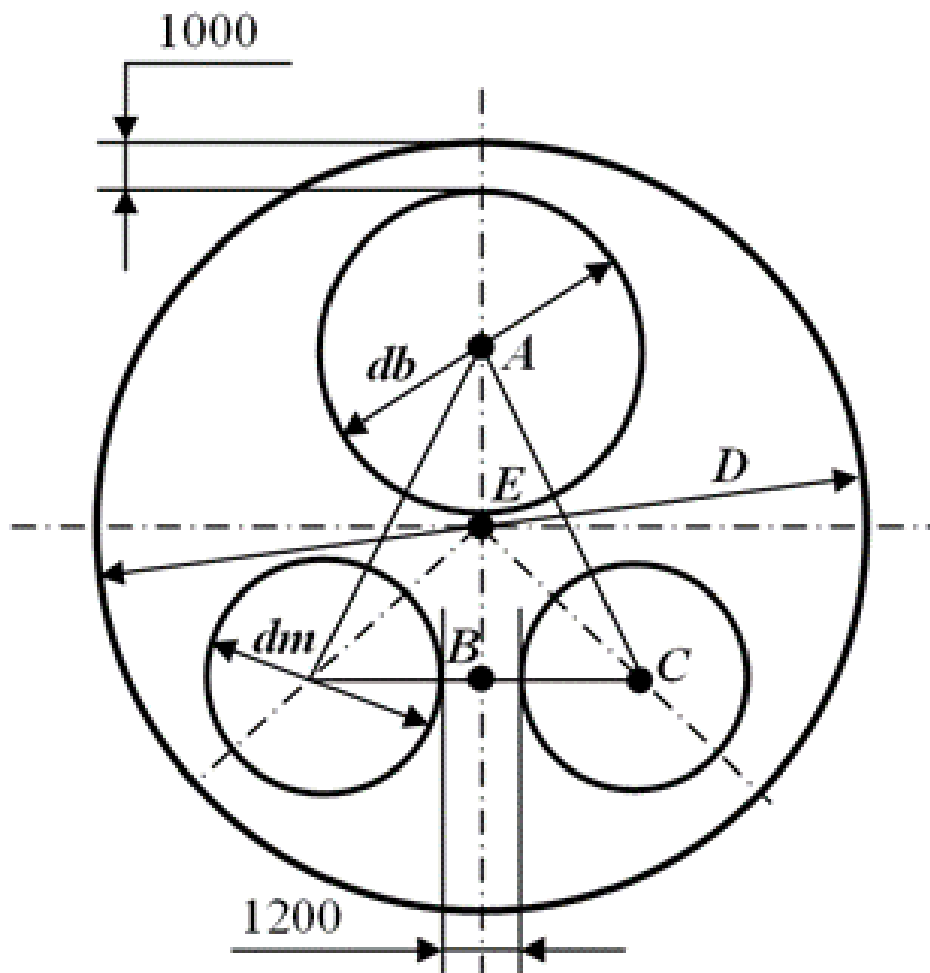


Рисунок 3.1.4 - Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с двумя малыми и одним большим стволом

Диаметр железобетонной оболочки D может быть найден из следующих условий. Радиусы этой оболочки, проходящие от центра окружности оболочки, точка E , через центр «большого» ствола с диаметром db , точка A , и через центр оболочки «малого» ствола с диаметром dm , точка C , между собой равны.

Расстояние $b = AC$, м, может быть найдено как:

$$b = \frac{db}{2} + \frac{dm}{2} + 1,2, \quad (3.1.3)$$

где db и dm —диаметры «большого» и «малого» стволов соответственно, м.

Расстояние $a = BC$, м, может быть найдено как:

$$a = \frac{dm}{2} + 0,6. \quad (3.1.4)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник ACB . Его высоту $h = AB$ найдем как:

$$h = \sqrt{(b^2 - a^2)}. \quad (3.1.5)$$

Зададимся расстоянием $s = AE$, тогда расстояние $e = BE$ найдем как:

$$e = h - s. \quad (3.1.6)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник ECB . Расстояние $c = EC$ найдем как:

$$c = \sqrt{(e^2 + a^2)}. \quad (3.1.7)$$

Тогда из условия равенства радиусов оболочки можно записать:

$$s + \frac{db}{2} + 1 = \sqrt{[(h - s)^2 + a^2]} + \frac{dm}{2} + 1. \quad (3.1.8)$$

В уравнении (3.1.8) одна неизвестная величина. Отсюда находим s , м.

$$s = \frac{h^2 + a^2 - \left(\frac{db}{2} - \frac{dm}{2}\right)^2}{2\left(\frac{db}{2} - \frac{dm}{2} + h\right)}. \quad (3.1.9)$$

Обозначим:

$$u = \frac{db}{2} - \frac{dm}{2}, \quad (3.1.10)$$

тогда

$$s = \frac{h^2 + a^2 - u^2}{2 \cdot (h + u)}. \quad (3.1.11)$$

В результате получаем диаметр оболочки

$$D = 2 \cdot s + db + 2. \quad (3.1.12)$$

Если нужно подключить пять одинаковых котлов на трехствольную трубу, то нужно установить два «больших» ствола и один «малый», что отображено на рисунке 3.1.5.

Проведя аналогичные рассуждения, получим

$$s = \frac{h^2 + a^2 - u^2}{2 \cdot (h - u)}, \quad (3.1.13)$$

где

$$a = \frac{db}{2} + 0,6, \quad (3.1.14)$$

а остальные обозначения остались теми же. Диаметр оболочки будет определяться по формуле:

$$D = 2 \cdot s + dm + 2. \quad (3.1.15)$$

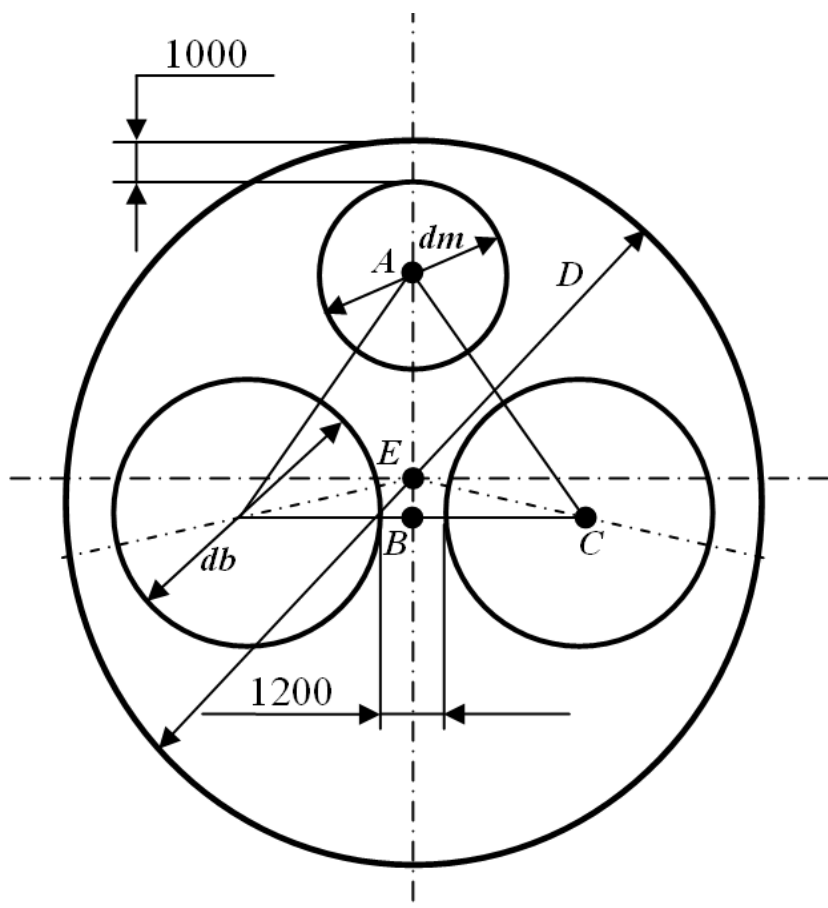


Рисунок 3.1.5 — Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с двумя «большими» и одним «малым» стволом

Проверим, останутся ли преимущества у трехствольной трубы перед четырехствольной трубой с одинаковыми стволами и для таких соотношений диаметров стволов. Условием сопоставимости вариантов будем считать одинаковую суммарную площадь поперечного сечения стволов. Вариант с двумя «малыми» и одним «большим» стволом обозначим как вариант А, а вариант с одним «малым» и двумя «большими» стволами обозначим как вариант Б.

В варианте А отношение периметров стволов трехствольной трубы к периметру стволов четырехствольной уменьшается с 0,866 до 0,854, а в варианте Б

до 0,856. Это значит, что снижение стоимости стволов будет еще более значительным, чем для трубы с одинаковыми стволами.

Диаметр оболочки трехствольной трубы в варианте А при изменении суммарной площади поперечного сечения стволов от $F = 10$ до $F = 100$ м² будет таким же, как для трехствольной дымовой трубы с одинаковыми стволами и меньше, чем диаметр четырехствольной трубы с одинаковыми стволами в интервале F от 10 до 60 м². При $F = 100$ м² диаметр оболочки трехствольной трубы будет уже незначительно больше, чем у четырехствольной (17,42 и 17,32 м).

В результате стоимость трехствольной трубы в варианте А будет меньше стоимости четырехствольной трубы с одинаковыми стволами на 5-6 %. Аналогичные результаты получаются и в варианте Б. Это подтверждается тем, что суммарный периметр стволов при одинаковой площади проходного сечения по схеме рис. 3.1.4. и по схеме рис. 3.1.5. со стволами двух разных диаметров меньше, чем со стволами одинакового диаметра. По схеме на рисунке 3.1.4. это уменьшение составляет 0,986 от 1, а по схеме на рисунке 3.1.5 - 0,984 от 1.

Соответственно уменьшается и отношение стоимости стволов трехствольной трубы к стоимости четырехствольной трубы.

3.2 Технико-экономический анализ существующих многоствольных дымовых труб

Для получения более точных результатов воспользуемся методикой и реализованным на ее основе программным комплексом, приведенными в главе 2.

Рассмотрим пример, близкий к режиму работы четырехствольной трубы Костромской ГРЭС, где на каждый ствол подключено по блоку 300 МВт. В качестве исходных данных примем: объемный расход дымовых газов на трубу $V = 1600$ м³/с; массовый выброс вредных веществ при работе на мазуте в пересчете на оксиды азота $M = 2400$ г/с; температура воздуха $t_v = 20$ °С; температура уходящих газов $t_r = 130$ °С; максимальная концентрация на уровне дыхания, которая может быть создана трубой $c_{тр} = 0,1$ мг/м³; коэффициент осаждения примеси $F = 1$; стоимость железобетона для оболочки трубы принята

$C_{ж/б} = 24000$ руб./м³; стоимость железобетона для фундамента принята $C_{ф} = 17000$ руб./м³; стволы стальные, стоимость стали в конструкциях $C_c = 585000$ руб./м³. Необходимо отметить, что стволы заранее не изготавливаются, а монтируются при возведении дымовой трубы, а стоимость стали стволов принята как стоимость стали в конструкциях; средняя толщина стенок стволов $\delta = 0,014$ м; абсолютная шероховатость стенок стволов $\Delta = 0,002$ м; стоимость электроэнергии $a_{эп} = 2$ руб./кВт·ч; доля заемных средств в общей сумме $E_1 = 0,8$; инфляция составляет $E_2 = 5$ %; кредит получен под $E_3 = 10$ %; стоимость рабочего дня составляет $C_{рд} = 3000$ руб./сут.

В результате для четырехствольной дымовой трубы с одинаковыми стволами получено, что дымовая труба должна иметь высоту $H = 252,1$ м, оптимальная скорость дымовых газов в стволах на выходе из дымовой трубы $w_0 = 25,2$ м/с; стоимость трубы составит $K_{тр} = 453,393$ млн руб.; суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 442,419$ млн руб. При этом диаметры стволов будут равны $d_c = 4,50$ м, а внутренний диаметр железобетонной оболочки вверху составит $D_{об} = 14,56$ м. Зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода дымовых газов приведена на рисунке 3.2.1, кривая 1.

Если вместо четырехствольной трубы выполнить трехствольную с двумя «малыми» стволами, на которые подключаются по одному блоку, и одним «большим» стволом, на который подключаются два блока, то для тех же исходных данных получаются следующие результаты: дымовая труба должна иметь высоту $H = 251,5$ м, оптимальная скорость дымовых газов в стволах на выходе из дымовой трубы $w_0 = 25,7$ м/с; стоимость трубы составит $K_{тр} = 427,160$ млн руб.; суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 410,489$ млн руб. При этом диаметр малых стволов составит $d_m = 4,45$ м, а большого $d_б = 6,30$ м. Внутренний диаметр железобетонной оболочки вверху составит $D_{об} = 14,47$ м. Зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода дымовых газов приведена на рисунке 3.2.1, кривая 2. Как видно из рисунка, суммарные дисконтированные затраты уменьшаются на 31,93 млн руб. или на 7,2%.

Далее проводим еще оптимизацию скорости газов при постоянном значении полученной высоты $H = 251,5$ м. В результате получаем: оптимальную скорость дымовых газов в стволах на выходе из дымовой трубы $w_0 = 21,6$ м/с; стоимость трубы составит $K_{тр} = 450,425$ млн руб.; суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 403,726$ млн руб. Диаметр «малых» стволов составит $d_m = 4,86$ м, а «большого» $d_b = 6,87$ м. Внутренний диаметр железобетонной оболочки вверху составит $D_{об} = 15,48$ м. Однако при этой скорости выхода газов и при заданной высоте дымовой трубы концентрация превысит допустимую и составит $c_{тр} = 0,108$ мг/м³.

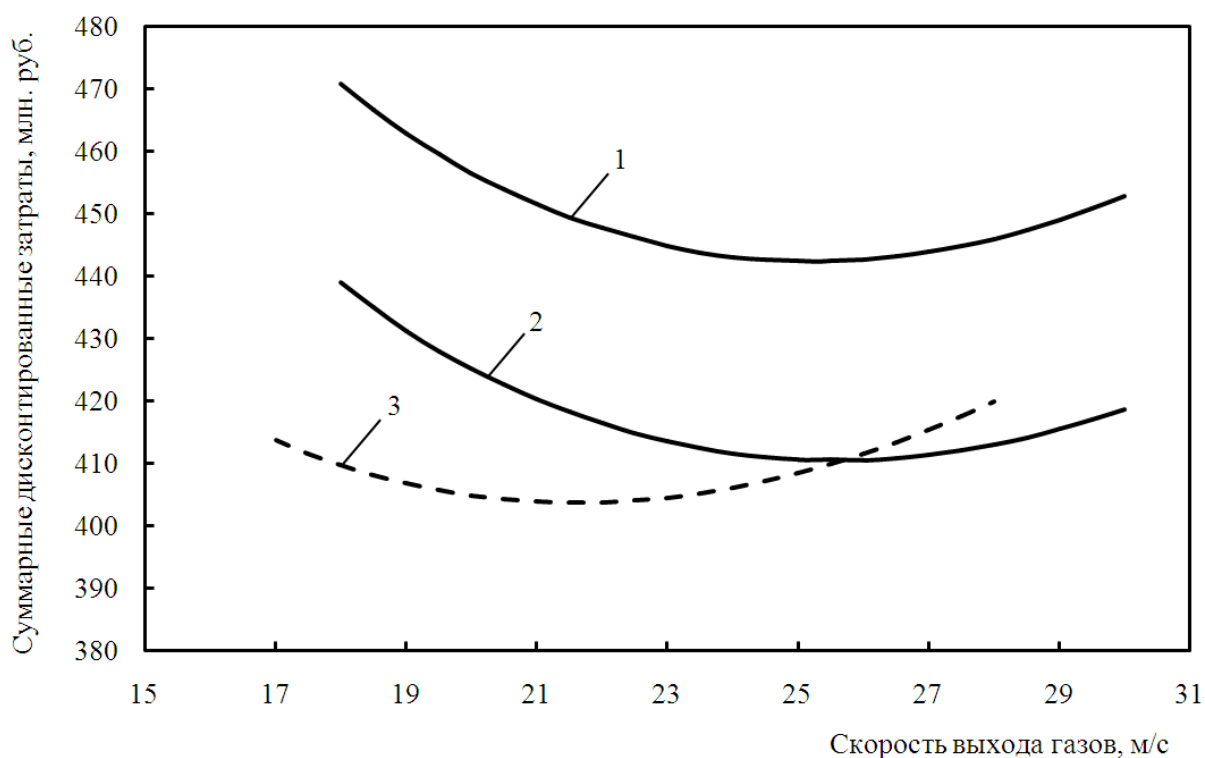


Рисунок 3.2.1 — График зависимости суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода газов при различных исходных условиях: 1 — для четырехствольной трубы при постоянных приземных концентрациях; 2 - для трехствольной трубы при постоянных приземных концентрациях; 3 - для трехствольной трубы при постоянной высоте трубы

Чтобы обеспечить заданную максимальную приземную концентрацию $c_{тр} = 0,1$ мг/м³, нужно сохранить скорость газов в устье трубы $w_0 = 25,7$ м/с, а для

этого в выходной части стволов на длине 5 м установить конфузоры с малым углом сужения. Диаметр «малых» стволов следует уменьшить с 4,86 до 4,45 м, а «большого» с 6,87 до 6,30 м. Угол сужения для «малых» стволов составит 2,3 градуса, а для большого ствола 3,3 градуса. При этом как стоимостные, так и аэродинамические характеристики дымовой трубы практически не изменяются, так как при таких малых углах сужения они могут быть сформированы при монтаже верхней царги, стоимость которой учитывается в общей стоимости ствола. Таким образом снижение скорости газов в стволах с 25,7 до 21,6 м/с позволяет уменьшить суммарные приведенные затраты еще на 6,763 млн руб. или всего на 8,7%. Стоимость дымовой трубы при этом также снизилась с 453,393 до 450,425 млн руб.

Если главной целью является уменьшение не суммарных дисконтированных затрат, а стоимости дымовой трубы, можно остановиться на варианте со скоростью газов в стволах $w_0 = 25,7$ м/с. При этом стоимость трубы снижается с 453,393 до 427,160 млн руб. или на 6 %.

В этом случае можно оптимизировать также и скорости газов в стволах. Если в малых стволах скорость газов уменьшить на 1,5 % (до 25,3 м/с), а в большом стволе увеличить на 1,5 %, (до 26,2 м/с), то суммарные дисконтированные затраты еще несколько снизятся (с 410,498 до 410,418 млн руб.) или на 72 тыс. руб.

Если в нашем примере концентрацию, создаваемую дымовой трубой, потребуется снизить с 0,1 до 0,06 мг/м³, то трубу нужно будет сооружать высотой 334,1 м, а оптимальная скорость газов составит 28,2 м/с при суммарных дисконтированных затратах в 662,752 млн руб. В этом случае увеличение скорости газов в «большом» стволе с 28,2 до 28,9 м/с при снижении скорости газов в «малых» стволах с 28,2 до 27,6 м/с позволяет уменьшить суммарные дисконтированные затраты с 662,753 до 662,518 млн руб., то есть на 235 тыс. руб.

3.3 Методика расчета геометрических параметров трехствольных труб со стволами разных диаметров

Для того, чтобы проанализировать технико-экономические характеристики трехствольной трубы с тремя разными диаметрами стволов, нужно получить

зависимость диаметра оболочки от трех стволов произвольного диаметра. Для этого рассмотрим рисунок 3.3.1.

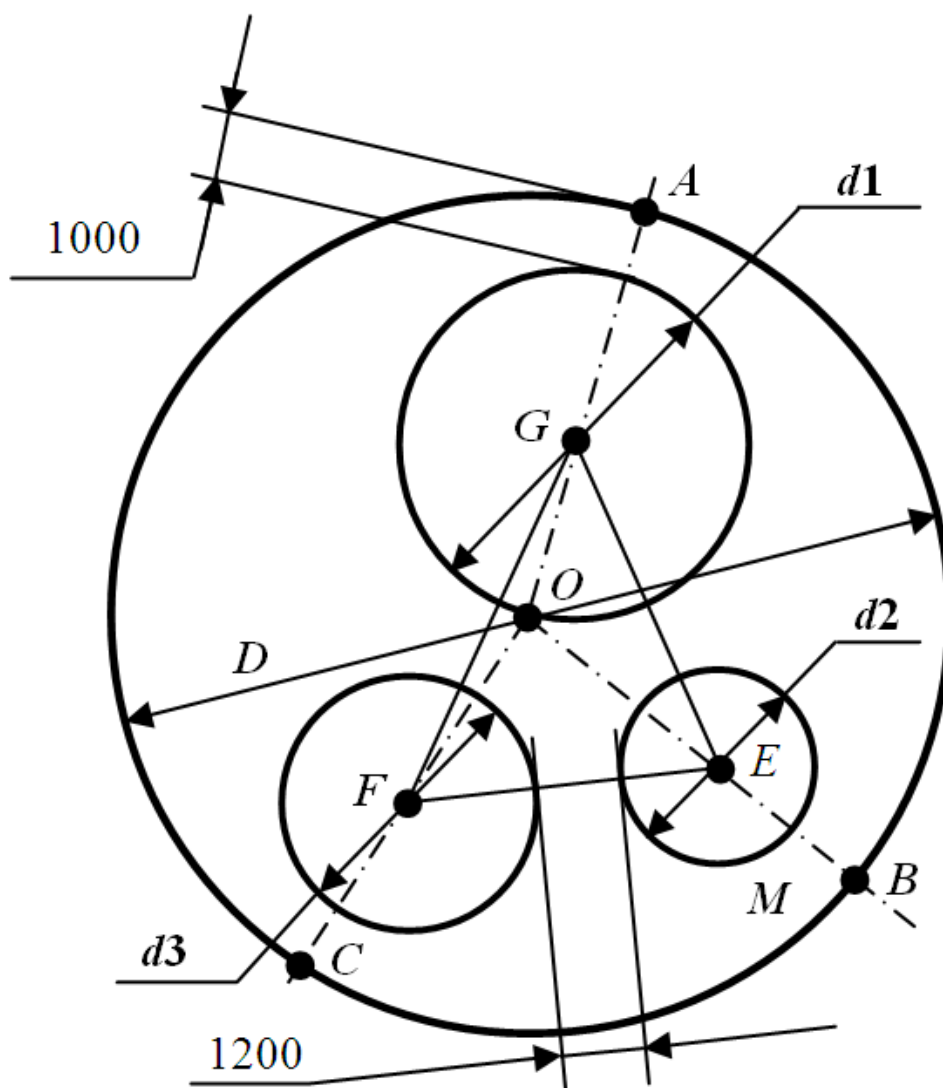


Рисунок 3.3.1 — Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с тремя разными стволами

Пусть имеется три ствола с диаметрами d_1 , d_2 и d_3 . Минимальное расстояние между стволами принимаем 1,2 м. Минимальное расстояние между стволами и оболочкой принимаем 1,0 м.

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

$$f = \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} + 1, 2. \quad (3.3.1)$$

Сторону EF обозначим как:

$$g = \frac{d_2}{2} + \frac{d_3}{2} + 1, 2. \quad (3.3.2)$$

Сторону FG обозначим как:

$$e = \frac{d_3}{2} + \frac{d_1}{2} + 1, 2. \quad (3.3.3)$$

Найдем полупериметр этого треугольника как:

$$p = \frac{(f + g + e)}{2}, \quad (3.3.4)$$

тогда площадь треугольника GEF можно найти по формуле Герона [74]:

$$S = \sqrt{p(p-f)(p-g)(p-e)}, \quad (3.3.5)$$

где S – площадь треугольника GEF , м².

Из рисунка 3.3.1 имеем:

$$OG = R - \frac{d_1}{2} - 1, \quad (3.3.6)$$

$$OE = R - \frac{d_2}{2} - 1, \quad (3.3.7)$$

$$OF = R - \frac{d_3}{2} - 1. \quad (3.3.8)$$

Обозначим:

$$\frac{d_1}{2} - 1 = c_1, \quad (3.3.9)$$

$$\frac{d_2}{2} - 1 = c_2, \quad (3.3.10)$$

$$\frac{d_3}{2} - 1 = c_3, \quad (3.3.11)$$

тогда:

$$OG = R - c_1, \quad (3.3.12)$$

$$OE = R - c_2, \quad (3.3.13)$$

$$OF = R - c_3. \quad (3.3.14)$$

Рассмотрим треугольник OGE . Его полупериметр:

$$p_1 = \frac{(OG + f + OE)}{2}, \quad (3.3.15)$$

а площадь S_1 , м²:

$$S_1 = \sqrt{p_1 \cdot (p_1 - f) \cdot (p_1 - OE) \cdot (p_1 - OG)}. \quad (3.3.16)$$

Далее рассмотрим треугольник OEF . Его полупериметр:

$$p_2 = \frac{(OE + g + OF)}{2}, \quad (3.3.17)$$

а площадь S_2 , м²:

$$S_2 = \sqrt{p_2 \cdot (p_2 - g) \cdot (p_2 - OE) \cdot (p_2 - OF)}. \quad (3.3.18)$$

Затем рассмотрим треугольник OFG . Его полупериметр

$$p_3 = \frac{(OF + e + OG)}{2}, \quad (3.3.19)$$

а площадь S_3 , м²:

$$S_3 = \sqrt{p_3 \cdot (p_3 - e) \cdot (p_3 - OG) \cdot (p_3 - OF)}. \quad (3.3.20)$$

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

$$S_S = S_1 + S_2 + S_3. \quad (3.3.21)$$

Задача решается методом последовательных приближений. Сначала задаемся радиусом оболочки, заведомо большей, чем нужно, например:

$$R = d_1 + d_2 + d_3, \quad (3.3.22)$$

и рассчитываем площадь S по уравнению (3.3.5) и S_S по уравнению (3.3.21), а затем сравниваем их. Обозначим разницу площадей как ΔS . Вначале эта разница заведомо велика, тогда уменьшаем значение R , например по формуле:

$$R = R - 0,04 \cdot (S_S - S). \quad (3.3.23)$$

Величина ΔS уменьшится. И так до тех пор, пока эта разница не снизится до приемлемой величины, например до 0,0005 м. После этого радиус считаем найденным. Затем находим диаметр оболочки:

$$D = 2 \cdot R. \quad (3.3.24)$$

Результат получается верным, если каждое из значений S_1 , S_2 и S_3 больше или равно нулю. Если подкоренное выражение в формулах (3.3.16; 3.3.18; 3.3.20) оказывается меньше нуля, это означает, что уменьшение диаметра данного ствола уже не приводит к уменьшению диаметра оболочки. Например, все три ствола имеют диаметры $d_1 = d_2 = d_3 = 5$ м. Диаметр оболочки при этом будет равным $D = 14,159$ м. Уменьшая диаметр ствола d_3 до 3,15 м, уменьшаем диаметр оболочки до $D = 13,218$ м. Дальнейшее уменьшение диаметра этого ствола к уменьшению диаметра оболочки не приведет. Сохраняя $d_3 = 3,15$ м, уменьшаем диаметр ствола d_2 до 2,33 м диаметр оболочки при этом уменьшается до $D = 11,362$ м. Дальнейшее уменьшение диаметра ствола d_2 к уменьшению диаметра оболочки не приведет.

3.4 Технико-экономический анализ и расчет оптимальной скорости газов в стволах трехствольной дымовой трубы со стволами разных диаметров

Рассмотрим пример расчета оптимальной скорости в стволах разных диаметров. Пусть суммарный расход газов на трубу остается 1600 м³/с. Расход газов по стволам распределим как 300, 500 и 800 м³/с. Сначала найдем оптимальную скорость газов при одинаковых скоростях в стволах. При этом приведенные дисконтированные затраты рассчитываются при условии, что скорости газов во всех стволах изменяются одновременно и одинаково. Эта скорость оказывается равной $w = 25,7$ м/с. Суммарные дисконтированные затраты составляют при этом $Z_d = 411,884$ млн руб. Но если скорости газов в стволах распределить следующим образом: в стволе №1 с расходом 300 м³/с установить $w_1 = 24,1$ м/с, в стволе №2 с расходом 500 м³/с сохранить $w_2 = 25,7$ м/с, а в стволе

№3 с расходом $800 \text{ м}^3/\text{с}$ установить $w_3 = 26,3 \text{ м/с}$, то суммарные дисконтированные расходы уменьшатся до $Z_d = 410,551 \text{ млн руб.}$, то есть снизятся на $1,333 \text{ млн руб.}$

При перераспределении скоростей по стволам нужно обеспечить постоянство количества движения. Проверяем: при равных скоростях $w \cdot V = 25,7 \cdot 1600 = 41120 \text{ м}^4/\text{с}^2$. При разных скоростях $w \cdot V = 24, \cdot 300 + 25,7 \cdot 500 + 26,3 \cdot 800 = 41120 \text{ м}^4/\text{с}^2$. Условие выполнено. Подъем дымового факела от трубы не изменится. Точное равенство выходных скоростей по стволам можно обеспечить за счет изменения площади поперечного сечения стволов на выходном пятиметровом участке трубы.

Разработанный пакет программ позволяет также учесть возможные отличия температуры газов по стволам. Увеличение температуры газов приводит к увеличению самотяги ствола, что предполагает возможность увеличения расхода газов через этот ствол. Покажем это на примере.

Допустим, что к рассмотренному выше варианту расчета к стволу №1 подключаются пиковые водогрейные котлы с объемным расходом газов $V_{п} = 400 \text{ м}^3/\text{с}$ и температурой $t_{п} = 180^\circ\text{С}$. К двум другим стволам подключаются по два энергетических котла с расходом газов на ствол $V_3 = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ и температурой $t_{п} = 120^\circ\text{С}$. Если принять, что скорости газов в стволах одинаковы, то оптимальной оказывается средняя скорость $w = 24,4 \text{ м/с}$, а суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 388,810 \text{ млн руб.}$ В данном случае увеличенные температуры в стволе №1 предполагают возможность увеличения в них скорости газов по сравнению со средней, но с другой стороны, увеличенные диаметры стволов №2 и №3 также предполагают такую возможность. Какой из этих факторов преобладает, зависит от конкретных условий. В данном случае преобладающим оказалось влияние увеличенных диаметров и оптимальным оказалось следующее распределение скоростей: в стволе №1 $w_1 = 24,0 \text{ м/с}$, в стволах №2 и №3 – по $24,5 \text{ м/с}$. Суммарные дисконтированные затраты уменьшились до $Z_d = 388,775 \text{ млн руб.}$

Если принять, что температура газов по стволам будет одинаковой и равной средневзвешенной, то есть $t_r = 132^\circ\text{С}$ при тех же расходах при одинаковых

скоростях газов в стволах оптимальной оказывается средняя скорость $w = 24,3$ м/с, а суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 387,352$ млн руб.

В данном случае фактора, влияющего на увеличение скорости газов в стволе №1 нет, поэтому при оптимизации получаем более глубокое уменьшение скорости газов в стволе №1: в стволе №1 $w_1 = 23,1$ м/с, в стволах №2 и №3 – по 24,6 м/с. Суммарные дисконтированные затраты уменьшились до $Z_d = 387,081$ млн руб.

Отсюда делаем выводы:

- в стволе, у которого диаметр и температура газов больше, оптимальная скорость газов также больше;
- если в стволах температура газов одинакова, то оптимальная скорость газов будет больше в том стволе, у которого больше диаметр;
- если диаметры стволов одинаковы, то оптимальная скорость газов будет больше в том стволе, в котором выше температура газов;
- если в стволе диаметр больше, но температура меньше, могут получиться различные варианты в зависимости от величины действующих факторов;
- наиболее предпочтительно, если проводится оптимизация скоростей газов по стволам, в этом случае суммарные дисконтированные затраты всегда меньше, чем при одинаковых скоростях газов по стволам.

Стволы не изготавливаются заранее, а монтируются во время сооружения дымовой трубы из скрученной в рулоны листовой стали. Поэтому стоимость их изготовления не зависит от диаметра, хотя стоимость самого ствола от диаметра имеет прямую взаимосвязь. И именно изготовление стволов таких диаметров, чтобы в них были оптимальные скорости газов, позволяет уменьшить их суммарную стоимость.

Таким образом можно найти оптимальное решение с учетом индивидуальных условий работы отдельных стволов.

3.5 Методика расчета геометрических параметров четырехствольных труб со стволами разных диаметров

При проектировании четырехствольных дымовых труб чаще всего применяются стволы одинакового диаметра и с одинаковыми характеристиками дымовых газов. Для этих условий методика выбора скорости дымовых газов по стволам подходит идеально. Но если диаметры стволов разные, то труба рассчитывалась и проектировалась по наибольшему диаметру ствола. Проектировать по наименьшему стволу нельзя, так как «большой» ствол в таком случае не удастся разместить в оболочке.

На рисунке 3.5.1 приведен рисунок из [75, рисунки 8-9, с. 286], где три «больших» ствола предназначены для подключения энергетических котлов, а четвертый, меньшего диаметра, для подключения водогрейных котлов. Диаметры стволов и железобетонной оболочки находились из условия, что скорости газов на номинальном (зимнем) режиме во всех стволах одинаковы, а скорость эта выбиралась по минимальному значению расчетных затрат. В результате вокруг ствола меньшего диаметра создавалось лишнее пространство.

Профессор Рихтер Л.А. привел формулы для расчета диаметра железобетонной оболочки для стволов одинакового диаметра. Попытка найти решение для стволов различного диаметра ему не удалась. По этому поводу он написал: «При разных диаметрах стволов аналитическое решение для нахождения минимального диаметра наружной оболочки значительно усложняется и может быть найдено из геометрического построения» [75, с. 264]. Чтобы найти диаметр оболочки для одного варианта из геометрического построения, даже с использованием современных графических программ, затрачивается существенное количество времени, что совершенно неприемлемо для многовариантных технико-экономических расчетов на компьютере.

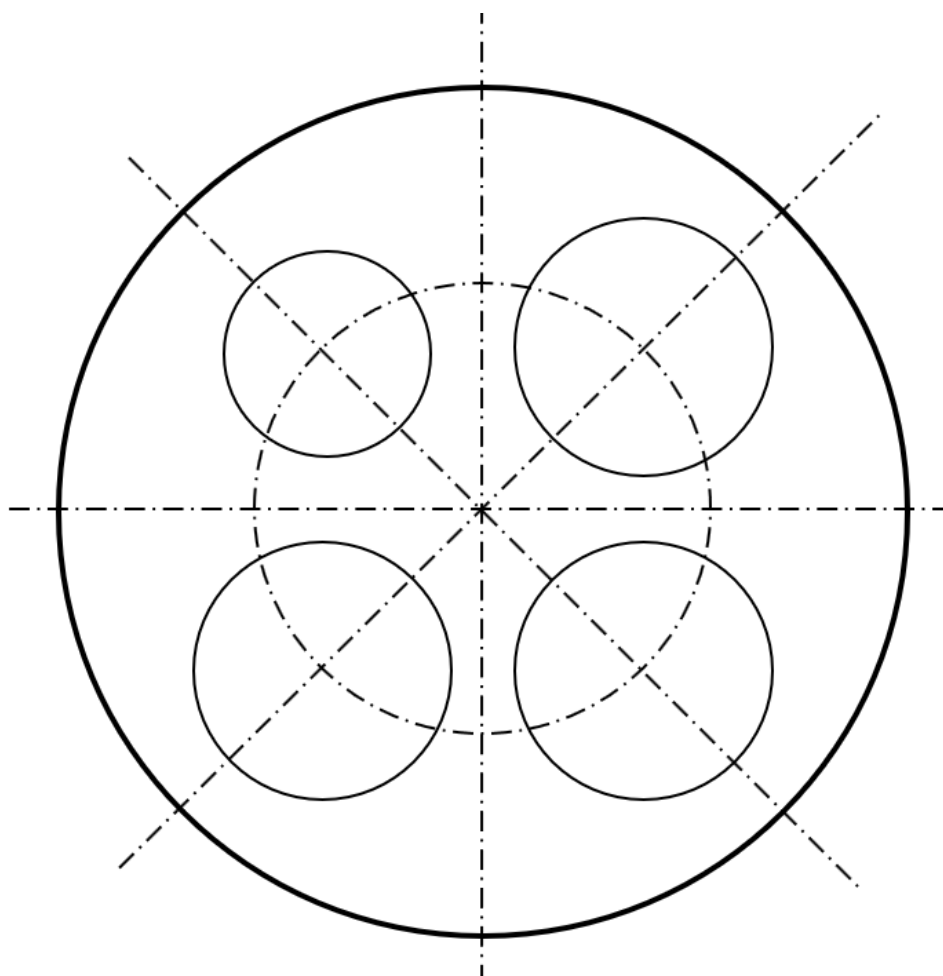


Рисунок 3.5.1 — Диаметр наружной оболочки найден по наибольшему стволу

Аналитическое решение нахождения диаметра наружной оболочки для трехствольных труб с разными стволами было представлено в подглаве 3.3, найдем аналогичное решение и для четырехствольной трубы.

Для этого была составлена и решена система из 31 алгебраического и тригонометрического уравнения с 31 неизвестной величиной, а также составлена схема, изображенная на рисунке 3.5.2.

Стволы нужно расположить таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$U_8 + U_{14} + U_{11} + U_{12} = U_9 + U_{10} + U_{13} + U_{15} = 180. \quad (3.5.1)$$

Задаваясь углом U_1 , получаем промежуточные результаты для всех неизвестных величин и проверяем решение уравнения (3.5.1). В том случае, если уравнение (3.5.1) не выполняется, задаемся новым значением угла. За решение принимается

результат, при котором сумма углов по уравнению отличается от 180 не более, чем на 0,01 градуса.

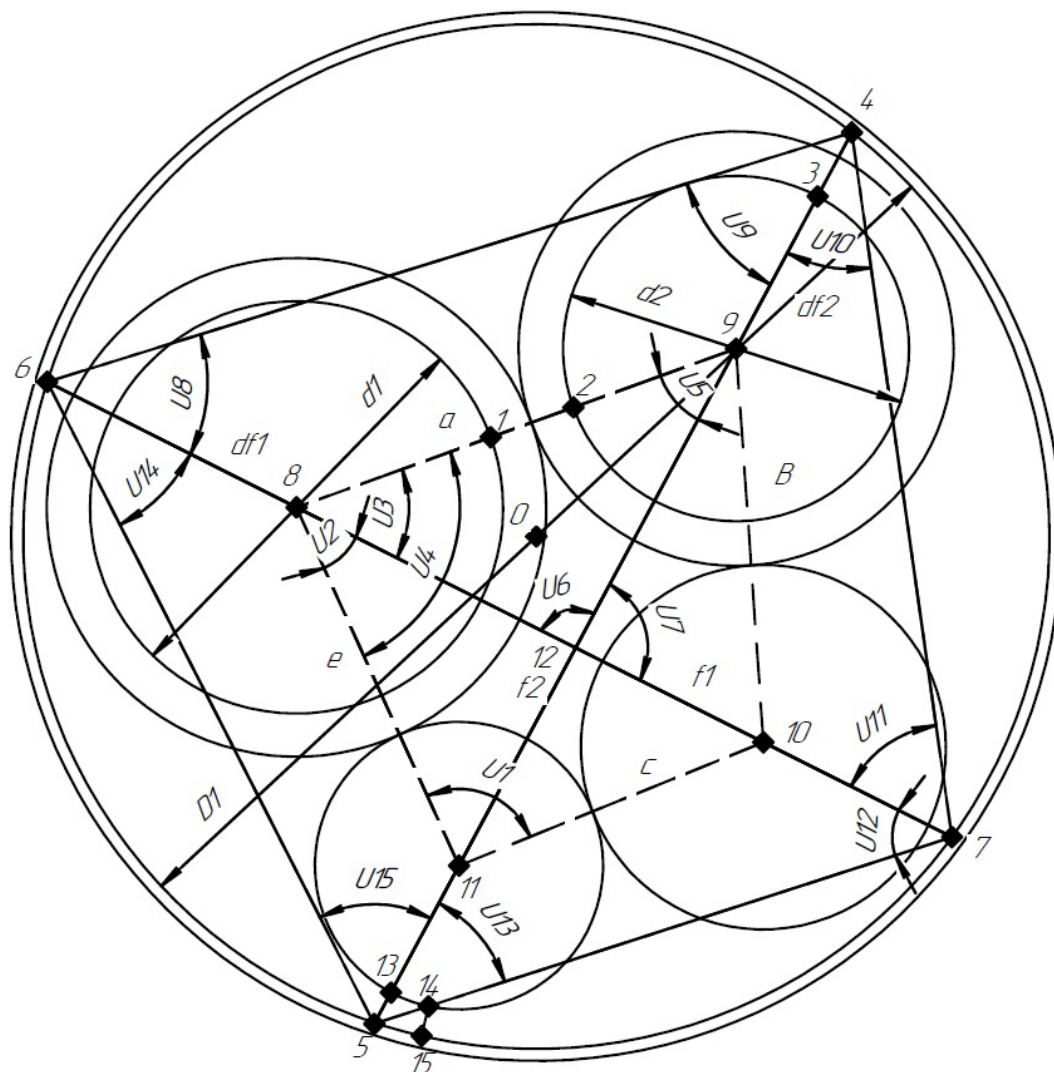


Рисунок 3.5.2 — Диаметр наружной оболочки найден по заданным расстояниям между стволами и между стволами и оболочкой

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 [76] найдем ее диаметр.

Для этого обозначим:

$$Z_1 = L(5-6)\square(4-6) + L(4-7)\square(5-7), \quad (3.5.2)$$

$$Z_2 = L(4-7)\mathbb{I}(4-6) + L(5-6)\mathbb{I}(5-7), \quad (3.5.3)$$

$$Z = L(5-7)\mathbb{I}(4-6) + L(5-6)\mathbb{I}(4-7), \quad (3.5.4)$$

$$p_0 = \frac{(L(5-7) + L(4-6) + L(5-6) + L(4-7))}{2}, \quad (3.5.6)$$

$$Z_4 = (p_0 - L(4-6))\mathbb{I}(p_0 - L(4-7))\mathbb{I} \\ \cdot (p_0 - L(5-6))\mathbb{I}(p_0 - L(5-7)) \quad (3.5.7)$$

Запишем:

$$D_1 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}{Z_4}}. \quad (3.5.8)$$

Далее вводится поправка на смещение осей.

Обозначим:

$$t_1 = \frac{L(8-12)}{L(12-10)}, \quad (3.5.9)$$

$$t_2 = \frac{L(9-12)}{L(11-12)}. \quad (3.5.10)$$

В результате получаем:

$$D = D_1 + 0,8 (t^{0,8} - 1), \quad (3.5.11)$$

где

$$t = \frac{(t_1 + t_2)}{2}. \quad (3.5.12)$$

Правильность полученных результатов проверялась с помощью программы САД «Компас-3D». Решение находится методом последовательных приближений и встроено в программу расчета суммарных дисконтированных затрат по методике, изложенной в главе 2. При этом рассчитывается и внутреннее межтрубное пространство, которое может быть использовано для размещения лифта и лестничной клетки.

Использование найденного решения позволяет обеспечить условия сопоставимости рассматриваемых вариантов по заданным интервалам между ограничивающими поверхностями (между теплоизоляцией соседних стволов, между теплоизоляцией стволов и железобетонной оболочкой) и обеспечить более точное проектирование дымовой трубы, позволяющее найти более дешевый вариант ее исполнения. Так например, для варианта, приведенного на рисунке 3.5.1, стоимость оболочки дымовой трубы может быть снижена на 5-6 % в зависимости от характеристик дымовой трубы.

3.6 Технико-экономический анализ и расчет оптимальной скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы со стволами разных диаметров

Анализ многовариантных расчетов показал также, что диаметр оболочки зависит и от порядка расположения стволов. Минимальный диаметр может быть получен только в том случае, если «большие» стволы расположены «друг против друга».

Дополнительное снижение суммарных дисконтированных затрат может быть получено, если учитывать особенности работы каждого ствола. Если в стволах дымовые газы имеют различную температуру, или через них проходят различные

объемные расходы, то и скорости в них должны быть различными. Эти скорости на выходе из дымовой трубы для формирования условий безвихревого объединения могут быть выравнены с помощью установки диффузоров или конфузоров с малыми углами раскрытия или сужения, т.к. из аэродинамики известно, что два соседних параллельных потока газов, движущихся с одинаковой скоростью и в одном направлении, объединяются за счет турбулентной диффузии без образования новых вихрей. Для получения точных значений проведем технико-экономический анализ используя методику, изложенную в главе 2.

Проведем анализ влияния объемных расходов. Температуры газов одинаковые, а расходы по стволам разные. Стволы стальные, размещаем оптимальным образом – «большие» стволы «друг против друга». Примем: расход газов по стволам: $V_1 = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_2 = 380 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_3 = 630 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_4 = 260 \text{ м}^3/\text{с}$. Температура газов по стволам: $t_{1-4} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$. Выбросы по стволам в пересчете на оксиды азота: $M_1 = 1300 \text{ г/с}$; $M_2 = 500 \text{ г/с}$; $M_3 = 850 \text{ г/с}$; $M_4 = 40 \text{ г/с}$.

На разные стволы работают различные котлы. Концентрация оксидов азота в дымовых газах зависит от многих факторов и даже при изменении нагрузки, то есть расхода газов, на одном котле концентрация оксидов азота разная и массовый выброс оксидов азота получается непропорциональным расходу газов. В данном случае принято, что на три ствола работают энергетические котлы, сжигающие мазут, а на четвертый пиковый водогрейный - сжигающий газ. Концентрация вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой на уровне дыхания с учетом фоновых концентраций принята $C_{\text{тр}} = 0,07 \text{ мг/м}^3$.

Другие исходные данные: температура воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; Коэффициент температурной стратификации $A = 160$; Коэффициент осаждения примеси $F = 1$; ветровой район – 2; цена материала ж/б оболочки – 16600 руб./м^3 ; цена ж/б фундамента – 14200 руб./м^3 ; модуль прочности грунта – 1; число часов работы в году – 8000; цена материала стального ствола – 430000 руб./м^3 ; толщина стенок ствола – 0,014 м; абсолютная шероховатость ствола – 0,001 м; коэффициент нагрузки котлов за рабочий период – 0,75; себестоимость электроэнергии – 1,25

руб./кВт · час; доля заемных средств – 0,4; собственные средства – 0,6; кредит взят под 0,15; инфляция – 0,08; стоимость рабочего дня – 3000 руб.; коэффициент ветровой для оболочки – 1; коэффициент ветровой для фундамента – 1; КПД тягодутьевых машин – 0,7; КПД двигателей – 0,98.

Сначала ищем оптимальную одинаковую скорость газов. Результаты расчета приведены в таблице 3.6.1.

Таблица 3.6.1 Оптимальная скорость газов при равномерном распределении скоростей по стволам

Вариант	Скорость газов в стволах, м/с, при объемных расходах, м ³ /с				Суммарные дисконтированные затраты, млн руб.
	№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	
1	29,9	29,9	29,9	29,9	479,211
2	30,0	30,0	30,0	30,0	479,192
3	30,1	30,1	30,1	30,1	479,198

В таблице 3.6.1: W_1-1000 – скорость газов в стволе №1 при расходе 1000 м³/с; в остальных стволах аналогично; Z_d – суммарные дисконтированные затраты, млн руб. Как видно из таблицы при скорости газов в стволах 30,0 м/с эти затраты минимальны и составляют 479,192 млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе №1 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.6.2. Оптимизация скоростей газов по стволам приводит к суммарному уменьшению потерь на трение и местные сопротивления по стволам, что позволяет котлу при той же установленной мощности тягодутьевых машин увеличить нагрузку, или при той же нагрузке котла снизить расход электроэнергии на собственные нужды котла.

Таблица 3.6.2 Оптимальная скорость газов в стволе №1

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	29,9	29,9	29,9	29,9	479,170
2	30,3	30,0	30,0	30,0	479,169
3	30,1	30,1	30,1	30,1	479,172

Путем увеличения скорости газов в стволе №1 с 30,0 до 30,3 м/с суммарные дисконтированные затраты уменьшились с 479,192 до 479,169 млн руб. В таблице 3.6.3 приведены основные расчетные параметры работы дымовой трубы.

Таблица 3.6.3 Основные расчетные параметры работы дымовой трубы с учетом изменения скорости в стволе №1

№	Параметр	По расчету		По наибольшему стволу	
		было	стало	было	стало
1	Высота дымовой трубы, м	297,4	297,2	297,4	297,2
2	Внутренний диаметр оболочки, м	15,29	15,27	19,42	19,35
3	Внутреннее пространство, м	1,04 х 5,31	1,06 х 5,29	3,99 х 3,99	3,98 х 3,98
4	Суммарные дисконтированные затраты, млн руб.	479,192	479,162	530,174	529,487
5	Трудовые затраты на оболочку, млн руб.	83,157	83,003	95,990	95,668

6	Стоимость ж/б оболочки, млн руб.	241,825	241,376	279,143	278,206
7	Трудовые затраты на фундамент, млн руб.	3,846	3,838	4,283	4,269
8	Стоимость фундамента, млн руб.	94,857	94,674	105,637	105,314
9	Трудовые затраты на монтаж стволов, млн руб.	44,789	44,689	44,789	44,689
10	Стоимость стволов, млн руб.	151,785	151,446	151,785	151,446
11	Трудовые затраты суммарные, млн руб.	131,792	131,530	145,061	144,626
12	Стоимость трубы, млн руб.	488,468	487,497	536,564	534,966

По наибольшему стволу – диаметр оболочки рассчитывается так, как если бы все стволы были одинакового и наибольшего из всех стволов размера.

Изменение режима работы стволов приведено в таблице 3.6.4.

Высокие дымовые трубы, через которые выбрасываются горячие дымовые газы, создают высокое разрежение в газоходах перед трубой, что позволяет частично компенсировать затраты электроэнергии на транспорт по тракту дымовых газов от котла до дымовой трубы.

Суммарная экономия мощности трубой была: $\Delta N_{\text{тр}} = 851,4$ кВт; стала $\Delta N_{\text{тр}} = 829,2$ кВт. Эффект от экономии мощности трубой был: $I = 4,789$ млн руб., стал $I = 4,664$ млн руб.

Как видно из сопоставления, диаметр ствола №1 уменьшился, высота трубы тоже уменьшилась, что привело к уменьшению диаметра оболочки и ее стоимости. Снизилась также стоимость фундамента и стволов. В результате стоимость трубы снизилась на $488,468 - 487,497 = 0,971$ млн руб.

Таблица 3.6.4 Изменение режима работы стволов

№	Параметр	Ствол №1		Ствол №2		Ствол №3		Ствол №4	
		было	стало	было	стало	было	стало	было	стало
1	Диаметр ствола, м	6,51	6,48	4,02	4,02	5,17	5,17	3,32	3,32
2	Потери на трение, Па	220,6	226,3	403,8	403,6	294,4	294,3	511,9	511,6
3	Потери на местные сопротивления, Па	38,9	39,7	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
4	Потери с выходной скоростью, Па	389,3	397,2	389,3	389,3	389,3	389,3	389,3	389,3
5	Самотяга стволов, Па	990,7	990,2	990,7	990,2	990,7	990,2	990,7	990,2
6	Разрежение внизу ствола, Па	341,8	327,0	158,6	158,3	268,0	267,6	50,5	50,2
7	Экономия мощности, кВт	498,3	476,6	87,9	87,7	246,1	245,8	19,1	19,0

Однако при этом увеличились издержки из-за того, что увеличились потери на трение в стволе №1, хотя в остальных стволах из-за снижения высоты дымовой трубы они незначительно уменьшились. Увеличились потери с выходной скоростью в стволе №1. Также незначительно уменьшилась самотяга в стволах. Уменьшилось разрежение внизу ствола №1 за счет увеличения потерь напора и снижения самотяги, а также и в остальных стволах за счет снижения самотяги. В

основном из-за снижения разрежения в стволе №1 уменьшилась экономия мощности дымовой трубой на $851,4 - 829,2 = 22,2$ кВт или на $4,789 - 4,664 = 0,125$ млн руб. за первый год.

Далее изменяем скорость газов в стволе №2 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в таблице 3.6.5.

Таблица 3.6.5 Изменение скорости газов в стволе №2

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	30,3	30,2	30,0	30,0	479,160
2	30,3	30,3	30,0	30,0	479,158
3	30,3	30,4	30,0	30,0	479,158
4	30,3	30,5	30,0	30,0	479,159

Путем увеличения скорости газов в стволе №2 с 30,0 до 30,3 м/с суммарные дисконтированные затраты уменьшились с 479,169 млн руб. до 479,158 млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе №3 таким образом, чтобы получить дальнейшее уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в таблице 3.6.6.

Таблица 3.6.6 Изменение скорости газов в стволе №3

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	30,3	30,3	29,3	30,0	479,072
2	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
3	30,3	30,3	29,5	30,0	479,073

В данном случае для уменьшения суммарных дисконтированных затрат скорость газов в стволе №3 пришлось уменьшить с 30,0 до 29,4 м/с. Суммарные

дисконтированные затраты при этом уменьшились с 479,158 млн руб. до 479,071 млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе №4 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в таблице 3.6.7.

Таблица 3.6.7 Изменение скорости газов в стволе №4

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	30,3	30,3	29,4	29,7	479,073
2	30,3	30,3	29,4	29,8	479,071
3	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
4	30,3	30,3	29,4	30,1	479,073

Из таблицы 3.6.7 видим, что скорость газов в стволе №4 $W_4 = 30,0$ м/с менять не нужно, она и так является оптимальной.

Еще раз уточняем скорости газов в стволах уже с учетом полученных изменений скоростей. Уточняем скорость газов в стволе №1, таблица 3.6.8.

Таблица 3.6.8 Повторное уточнение скорости газов в стволе №1

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	30,2	30,3	29,4	30,0	479,084
2	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
3	30,4	30,3	29,4	30,0	479,066
4	30,5	30,3	29,4	30,0	479,072

Увеличение скорости газов в стволе №1 с 30,3 до 30,4 м/с позволяет снизить суммарные затраты с 479,071 до 479,066 млн руб.

Далее уточняем скорости газов в стволах №№ 2, 3, 4. Получаем таблицу 3.6.9.

Таблица 3.6.9 Повторное уточнение скорости газов в стволах №2,3,4

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$З_d$
1	30,4	30,4	29,2	29,7	479,061
2	30,4	30,4	29,2	29,8	479,059
3	30,4	30,4	29,2	29,9	479,059
4	30,4	30,4	29,2	30,0	479,060

Теперь сравним вариант таблицы 3.6.1 с оптимально-одинаковыми скоростями в стволах из таблицы 3.6.9 с оптимально-различными скоростями газов в стволах, результаты представлены в таблице 3.6.10. Оптимально-одинаковыми скоростями считаем скорости, одинаковые по всем стволам при минимальном значении суммарных дисконтированных затрат. Оптимально-различными скоростями считаем скорости, оптимизированные по каждому стволу отдельно.

Стоимость дымовой трубы после оптимизации скоростей по стволам снизилась с $K_{тр} = 488,468$ до $488,324$ млн руб., то есть на $0,144$ млн руб. Экономия средств на эксплуатации в первый год тоже снизилась, но несущественно: от $I = 4,789$ до $4,787$ млн руб., то есть на $0,002$ млн руб. Таким образом экономический эффект за первый год эксплуатации от перераспределения скоростей по стволам составляет $144 - 2 = 142$ тыс. руб.

Но если оболочку рассчитывать по действующей методике, то есть по размеру наибольшего ствола, то стоимость трубы увеличивается с $488,324$ млн руб. до $K_{тр} = 536,564$ млн руб. или на $48,24$ млн руб., что составляет $9,0\%$ с перерасходом средств на э/э в первый год $I = 4,787$ млн руб./год.

Таблица 3.6.10 Сравнение оптимально-различных скоростей с оптимально-одинаковыми скоростями

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$З_d$
1	30,0	30,0	30,0	30,0	479,192
2	30,4	30,4	29,2	29,9	479,059

Если же сравнивать эффективность перераспределения скоростей по расчетным затратам по предлагаемой методике, то снижение составит всего 0,028 %. Отсюда можно сделать вывод, что если при оптимально-одинаковых скоростях диаметры стволов различаются не более чем в $(30,4/29,2)^{0,5} = 1,02$ раза, скорости газов в этих стволах можно не уточнять, а стволы принимать одинакового диаметра по условиям унификации. Если же диаметры отличаются значительно, то уточнять скорости газов нужно, так как стволы нужно будет изготавливать различных диаметров и такое уточнение даст незначительный положительный эффект.

Оценим влияние стоимости трубы. Повторим расчеты для низких труб. Для этого выбросы мазутных котлов уменьшаем в два раза. Концентрацию вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой увеличиваем с 0,07 мг/м³ до $C_{тр} = 0,12$ мг/м³.

Последовательность расчета повторим как в предыдущем варианте 1, то есть тогда исходные данные: $V_1 = 1000$ м³/с; $V_2 = 380$ м³/с; $V_3 = 630$ м³/с; $V_4 = 260$ м³/с. Температура газов по стволам: $t_{1-4} = 135$ °С. Выбросы по стволам в пересчете на оксиды азота: $M_1 = 650$ г/с; $M_2 = 250$ г/с; $M_3 = 425$ г/с; $M_4 = 40$ г/с. Концентрация вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой $C_{тр} = 0,07$ мг/м³. Другие исходные данные остаются прежними. Сначала ищем оптимальную одинаковую скорость газов, таблица 3.6.11.

Таблица 3.6.11 Оптимальная скорость при равномерном распределении скоростей по стволам

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	Z_d
1	22,8	22,8	22,8	22,8	167,407
2	22,9	22,9	22,9	22,9	167,395
3	23,0	23,0	23,0	23,0	167,418

Оптимальная одинаковая скорость газов снизилась с 30,0 до 22,9 м/с. Можно было предположить, что чем больше стоит дымовая труба, тем большие значения

скорости газов в стволах следует принимать. Это объясняется тем, что для «больших» дымовых труб, которые стоят сотни миллионов рублей, оказываются целесообразными более радикальные меры по уменьшению стоимости трубы, чем для «дешевых» дымовых труб. Основным способом уменьшения стоимости трубы является увеличение скорости газов, так как при этом уменьшается и диаметр трубы, и ее высота. В данном случае это предположение подтверждается расчетами.

Таблица 3.6.12 Параметры работы трубы с учетом изменения режима работы

№	Параметр	По расчету		По наибольшему стволу	
		было	стало	было	стало
1	Высота дымовой трубы, м	297,4	149,8	297,4	149,8
2	Внутренний диаметр оболочки, м	15,29	16,95	19,42	21,70
3	Внутреннее пространство, м	1,04 х 5,31	1,01 х 5,88	4,00 х 4,00	4,39 х 4,39
4	Суммарные дисконтированные затраты, млн руб.	479,192	167,395	530,174	182,577
5	Трудовые затраты на оболочку, млн руб.	83,157	25,866	95,990	29,993
6	Стоимость ж/б оболочки, млн руб.	241,825	75,218	279,143	87,222
7	Трудовые затраты на фундамент, млн руб.	3,846	0,800	4,283	0,894
8	Стоимость фундамента, млн руб.	94,857	19,739	105,637	22,058

9	Трудовые затраты на монтаж стволов, млн руб.	44,789	25,824	44,789	25,824
10	Стоимость стволов, млн руб.	151,785	87,515	151,785	87,515
11	Трудовые затраты суммарные, млн руб.	131,792	52,361	145,061	56,712
12	Стоимость трубы, млн руб.	488,468	182,472	536,564	196,795

Изменение режима работы стволов приведено в таблице 3.6.13.

Таблица 3.6.13 Параметры работы стволов с учетом изменения режима работы

№	Параметр	Ствол №1		Ствол №2		Ствол №3		Ствол №4	
		было	стало	было	стало	было	стало	было	стало
1	Диаметр ствола, м	6,51	7,46	4,02	4,60	5,17	5,92	3,32	3,80
2	Скорость газов в стволах, м/с	30,0	22,9	30,0	22,9	30,0	22,9	30,0	22,9
3	Потери на трение, Па	220,6	54,9	403,8	100,5	294,4	73,3	511,9	127,4
4	Потери на местные сопротивления, Па	38,9	22,7	38,9	22,7	38,9	22,7	38,9	22,7
5	Потери с выходной скоростью, Па	389,3	226,9	389,3	226,9	389,3	226,9	389,3	226,9
6	Самотяга стволов, Па	990,7	499,0	990,7	499,0	990,7	499,0	990,7	499,0

7	Разрежение внизу ствола, Па	341,8	194,6	158,6	149,0	268,0	176,2	50,5	122,1
8	Экономия мощности, кВт	498,3	283,7	87,9	82,5	246,1	161,8	19,1	46,3

Суммарная экономия мощности тягодутьевых машин за счет тяги столов дымовой трубы было: $\Delta N_{\text{тр}} = 851,4$ кВт, стало $\Delta N_{\text{тр}} = 574,3$ кВт. Эффект от экономии мощности трубой было: $I = 4,789$ млн руб., стало $I = 3,230$ млн руб.

Суммарные дисконтированные затраты по предлагаемой методике оказались на 15,182 млн руб. меньше, чем по действующей, что составляет 8,3 %, а стоимость трубы снизилась на 14,323 млн руб., что составляет 7,3 %.

Эффективность применения данной методики для «дорогих» дымовых труб несколько выше, чем для «дешевых», для которых снижение стоимости трубы в данных примерах составляет 9,0 и 7,3 % соответственно.

Так как стоимость дымовой трубы одинаковой конструкции наиболее сильно зависит от ее высоты, то более высокие трубы оказываются и более дорогими.

Далее проводим оптимизацию скоростей по стволам, таблица 3.6.14.

Таблица 3.6.14 Оптимизация скоростей по стволам

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$З_d$
1	22,7	23,5	22,4	23,9	167,307
2	22,7	23,5	22,5	23,9	167,305
3	22,7	23,5	22,6	23,9	167,313

За счет оптимизации скоростей газов по стволам суммарные дисконтированные затраты снизились с 167,395 до 167,305 млн руб. или на 0,05 %, а стоимость трубы уменьшилась с $K_{\text{тр}} = 182,472$ до 182,117 млн руб. или на 0,19 %.

Выводы, сделанные на примере «дорогой» трубы, сохраняют свое значение и для менее «дорогих» дымовых труб.

Оценим влияния температуры уходящих газов. Принимаем, что через каждый ствол проходит одинаковый расход с одинаковым выбросом вредности, но с разной температурой.

$$V_{1-4} = 380 \text{ м}^3/\text{с}; M_{1-4} = 500 \text{ г/с}; t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}; t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}; t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}; t_4 = 250 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Сохраняем $C_{\text{тр}} = 0,12 \text{ мг/м}^3$.

Сначала найдем оптимальную одинаковую скорость газов в стволах, таблица 3.6.15.

Таблица 3.6.15 Оптимальная скорость при равномерном распределении скоростей, но разных температурах газов в стволах

№	W_1-100	W_2-150	W_3-200	W_4-250	Z_d
1	27,8	27,8	27,8	27,8	221,5497
2	27,9	27,9	27,9	27,9	221,5477
3	28,0	28,0	28,0	28,0	221,5584

В Таблице 3.6.15: W_1-100 – скорость газов в стволе №1 при температуре 100 °С; в остальных стволах аналогично; Z_d – суммарные дисконтированные затраты, млн руб.

Температура уходящих газов водогрейных котлов при работе на мазуте, например для Казанской ТЭЦ-1, в номинальном режиме составляет 230 °С. Но при отклонениях режимов возможно ее некоторое повышение. Более того, вполне возможно подключение на один из стволов ГТУ. Без котла утилизатора температура дымовых газов у них составляет от 400 до 600 °С. Такие установки стоят на Якутской ГРЭС, а также на Барнаульской ГТ-ТЭЦ — газотурбинная тепловая электростанция, расположенная в г. Барнауле, Алтайский край, в

непосредственной близости от Барнаульской ТЭЦ-1. Как видно из таблицы при скорости газов в стволах 27,9 м/с эти затраты минимальны и составляют 221,5477 млн руб.

Далее уточняем скорости газов по каждому стволу, таблица 3.6.16.

Таблица 3.6.16 Уточнение скорости газов по стволам при различной температуре газов в стволах

№	W_1-100	W_2-150	W_3-200	W_4-250	$З_d$
1	26,6	27,7	28,2	29,1	221,33112
2	26,6	27,7	28,2	29,2	221,33010
3	26,6	27,7	28,2	29,3	221,33011

Уточнение скоростей по отдельным стволам позволяет уменьшить суммарные дисконтированные затраты с 221,5477 до 221,3301 млн руб. или на 0,1 %. Увеличилась стоимость дымовой трубы с 231,107 до 231,199 млн руб. или на 0,005 %, но увеличилась и экономия мощности с 516,938 до 523,891 кВт или на 1,3 % и снизились эксплуатационные издержки на 0,039 млн руб./год или на 0,013 %.

Итак, оптимальное распределение скоростей газов:

$$W_1 = 26,6 \text{ м/с}; d_1 = 4,265 \text{ м};$$

$$W_2 = 27,7 \text{ м/с}; d_2 = 4,179 \text{ м};$$

$$W_3 = 28,2 \text{ м/с}; d_3 = 4,142 \text{ м};$$

$$W_4 = 29,2 \text{ м/с}; d_4 = 4,078 \text{ м}.$$

При одинаковых скоростях $d_{1-4} = 4,164 \text{ м}$.

Отношение максимальной скорости газов в стволах к минимальной составило $29,2/26,6 = 1,1$, а отношение диаметров 1,05.

В связи с тем, что снижение суммарных дисконтированных затрат невелико, в данном случае можно ограничиться равномерным распределением скоростей по

стволам в целях унификации диаметров и выполнить все стволы диаметром $d_{1-4} = 4,164$ м.

Таким образом и в этом случае подтверждается вывод о том, что оптимизация скоростей газов по стволам целесообразна только в том случае, если предполагается выполнение нескольких типоразмеров стволов.

Рассмотрим влияние расходов и температуры газов. Наиболее распространенным случаем, когда следует провести оптимизацию скоростей газов по стволам является подключение на три ствола - энергетических котлов, а на четвертый – пиковых.

Рассмотрим вариант, при котором на три ствола подключены по два котла ТГМЕ-464, работающих на мазуте, а на четвертый два водогрейных котла КВГМ - 100, работающих на газе.

$V_{1-3} = 380 \text{ м}^3/\text{с}$; $M_{1-3} = 500 \text{ г/с}$; $t_{1-3} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$; $V_4 = 140 \text{ м}^3/\text{с}$; $M_4 = 10 \text{ г/с}$; $t_4 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$.
Сохраняем $C_{\text{тр}} = 0,07 \text{ мг/м}^3$.

Сначала найдем оптимальную одинаковую скорость газов в стволах, таблица 3.6.17.

Таблица 3.6.17 Оптимальная скорость при различных расходах и температуре газов в стволах и равномерном распределении скоростей

№	W_{1-380}	W_{2-380}	W_{3-380}	W_{4-140}	$З_{\text{д}}$
1	30,2	30,2	30,2	30,2	312,21464
2	30,3	30,3	30,3	30,3	312,21192
3	30,4	30,4	30,4	30,4	312,21268

В таблице 3.6.17: W_{1-380} – скорость газов в стволе №1 при расходе газов $380 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t_1 = 135 \text{ }^\circ\text{C}$, W_{4-140} – скорость газов в стволе №4 при расходе газов $140 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t_4 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$. $З_{\text{д}}$ – суммарные дисконтированные затраты, млн руб. Как видно из таблицы, при скорости газов в стволах $30,3 \text{ м/с}$, эти затраты минимальны и составляют $312,212$ млн руб.

В результате оптимизации скоростей газов по стволам получаем таблицу 3.6.18.

Таблица 3.6.18 Оптимизация скоростей по стволам при различной температуре и расходе газов в стволах

№	W_1-380	W_2-380	W_3-380	W_4-140	Z_d
1	30,3	30,3	30,3	29,8	312,20276
2	30,4	30,4	30,4	29,8	312,20057
3	30,5	30,5	30,5	29,8	312,20144

В таблице 3.6.19 приведено сопоставление основных показателей при предлагаемом способе проектирования (стало) с проектированием по схеме рисунок 3.5.1 (было).

Таблица 3.6.19 Сопоставление основных параметров для сравниваемых вариантов

№	Параметр	Было	Стало
1	Суммарные приведенные затраты, млн руб.	319,846	312,20057
2	Высота трубы, м	242,210	242,175
3	Стоимость трубы, млн руб.	303,342	296,050
4	Внутренний диаметр ж/б оболочки, м	13,344	12,535
5	Экономия на издержках, млн руб.	0,211	0,200
6	Экономия мощности, кВт.	37,449	35,577
7	Диаметры стволов № 1-3, м	3,996	3,989
9	Диаметр ствола № 4, м	2,425	2,446
10	Внутреннее пространство, м	2,95 x 3,74	1,90 x 3,61

Как видно из таблицы 3.6.19 предлагаемый более точный способ проектирования рассмотренного варианта позволяет уменьшить суммарные приведенные затраты на 2,4 %, а стоимость трубы снизить на 7,29 млн руб., что также составило 2,4 %.

На выбор скорости газов в стволах влияют исходные данные, в частности довольно сильное влияние оказывает себестоимость производства электроэнергии. Если себестоимость в данном примере увеличить с 1,25 до 2,0 руб. / кВт · час, то скорости газов в стволах 1-3 нужно будет снизить с 30,4 до 25,1 м/с, а в стволе №4 с 29,8 до 24,9 м/с.

Влияние остальных исходных данных на оптимальные скорости газов в стволах описано в главе 2.

3.7 Выводы по главе

1. Получены формулы для расчета диаметра оболочки дымовой трубы при двух одинаковых и третьем отличающемся по размеру стволах.
2. Разработана методика расчета диаметра оболочки при стволах трех различных диаметров. Выявлены условия применимости данной методики.
3. Показана возможность дополнительного снижения суммарных приведенных затрат при оптимизации скоростей газов в стволах при постоянной высоте дымовой трубы с сохранением условий выхода дымовых газов за счет установки конфузоров с малым углом сужения.
4. Выявлены существенные преимущества трехствольных дымовых труб по сравнению с четырехствольными. Разработан пакет программ, позволяющих найти оптимальное распределение скоростей газов по стволам трехствольной трубы и рассчитать минимальные суммарные дисконтированные затраты для дымовых труб с разными диаметрами стволов, с разными расходами газов через стволы и различными температурами газов в стволах.
5. Показано, что учет особенностей гидродинамики (объединение соосных струй с различными скоростями движения в сносящем потоке при формировании общего дымового факела) в стволах с различными скоростями газов

позволяет предложить решения, снижающие суммарные приведенные затраты на 7 – 8 % (30-40 млн руб.) по сравнению с традиционными решениями.

6. Найдено аналитическое решение для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для четырехствольной дымовой трубы для стволов произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами и между стволами и оболочкой и с расчетом свободного пространства для размещения лифта и лестничной клетки.

7. Проведен анализ современных уровней цен на материалы и услуги, необходимые при сооружении дымовых труб со стволами из металла и из кислотоупорных бетонов, на основании которого формировались наборы исходных данных.

8. Показано, что при различных расходах и температурах газов в стволах четырехствольной трубы, скорости газов в них следует принимать тоже разными. Показаны также условия, при которых в целях унификации стволов этого можно не делать.

9. 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.

10. 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 %.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА

4.1 Натурные эксперименты по исследованию распространения дымового факела на начальном участке

Характеристики исследуемого объекта

В данной работе замеряется, а затем исследуется траектория движения дымового факела, выбрасываемого из трехствольной дымовой трубы районной котельной «Азино» входящей в состав филиала АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1. Районная котельная вырабатывает тепловую энергию для централизованного снабжения промышленных предприятий и жилищно-коммунального сектора жилого массива «Азино» г. Казани. В данный момент имеет установленную тепловую мощность 460 Гкал/час. На котельной установлено три водогрейных котла – два котла ПТВМ-180 и один КВГМ-100. В качестве топлива используется природный газ и судовое топливо.

На территории РК «Азино» расположены здания и сооружения котельной, в том числе введенная в эксплуатацию в 1986 г. железобетонная трехствольная дымовая труба высотой 150 м и диаметром устья железобетонной оболочки 6,4 м, внутри которой расположены три круглых ствола диаметром 2 м. Оболочка трубы предусмотрена цилиндрической, от отметки +100,0 и ниже - конической формы, с переменным уклоном наружной образующей (от 0,02 вверху до 0,07 внизу). Количество светофорных площадок - 4 шт. Площадки расположены на отметках +25,0 м; +55,0 м; +100,0 м; +145,0 м. Количество балконов - 5 шт. Балконы расположены на отметках +40,0 м; +70,0 м; +85,0 м; +115,0 м; +130,0 м. Стальные газоотводящие стволы диаметром 2 м выполнены из цилиндрических секций постоянного сечения и диффузора. Последний, составляет выходную часть газоотводящих стволов. Каждый котел подключен индивидуальным металлическим газоходом к своему стволу трубы. Схема внешних газоходов изображена на рисунке 4.1.1.

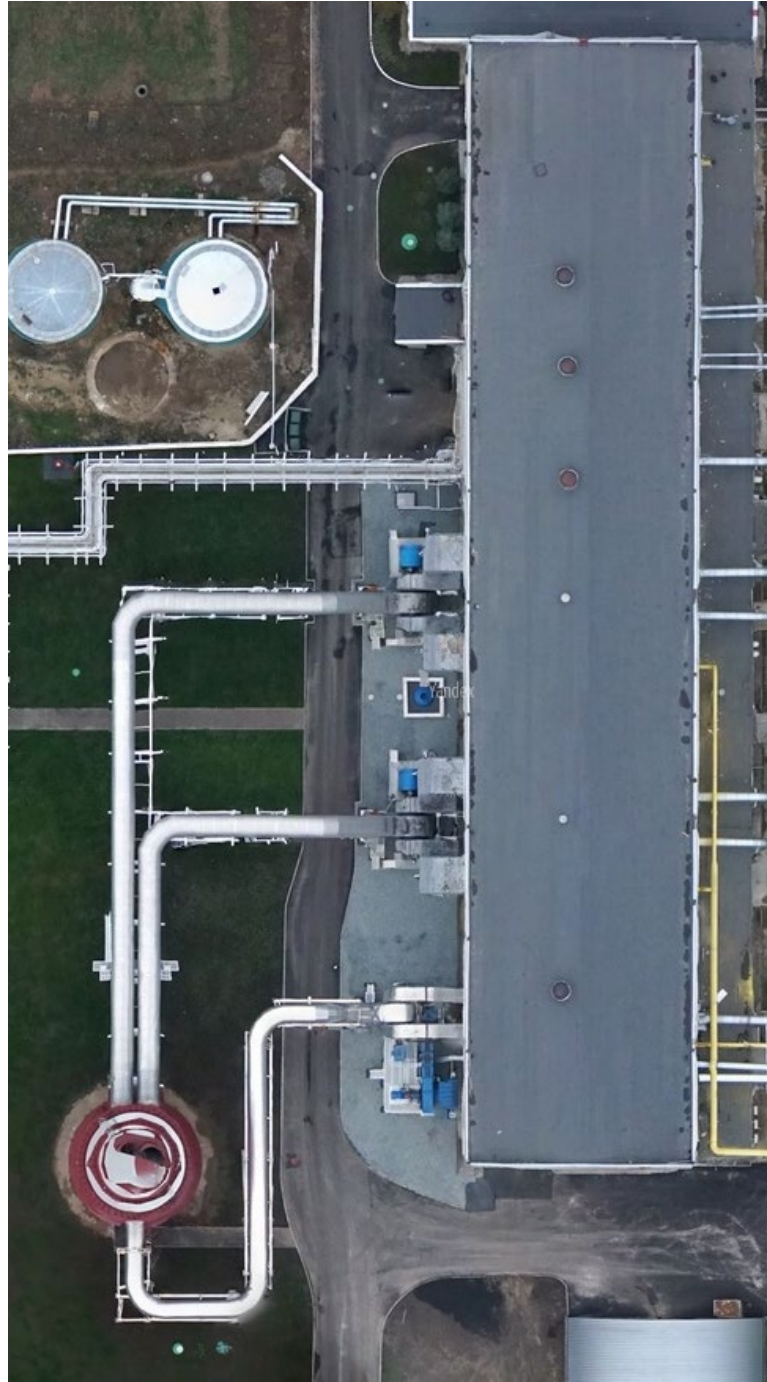


Рисунок 4.1.1 — Схема внешних газоходов РК Азино

4.1.1 Порядок проведения натурального эксперимента по исследованию распространения дымового факела с использованием аэрологического шаропилотного теодолита

Одним из возможных способов определения траектории движения дымового факела является фиксация угловых координат границ дымового факела с помощью аэрологического шаропилотного теодолита (АШТ). Данный способ позволяет

получить максимальную длину траектории по сравнению с другими способами, основанными на отличии оптической плотности дымового факела от оптической плотности атмосферы. Аналогичные работы по вопросу визирования траектории дымового факела и их последующей обработки изложены в работе [77].

Теодолит имеет следующие особенности: наличие зрительной трубы, визира и отсчётного микроскопа, передающего изображение вертикального и горизонтального кругов теодолита, неограниченного диапазона работы наводящих винтов, выполненных в виде червячных пар. Эти особенности устройства теодолита позволяют выполнять измерения с максимальной производительностью, точность замера теодолита – $0,05^\circ$.

Точка, с которой производится теодолитное визирование, выбирается в зависимости от направления ветра и длины видимой траектории дымового факела. Для повышения точности результатов желательно, чтобы угол между направлением распространения дымового факела и направлением на трубу с точки съёмки был как можно ближе к 90° . Замеры должны производить два человека, один из них ведёт наблюдения по теодолиту, а второй записывает наблюдаемые угловые координаты: $\alpha_0, \varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$

Прежде чем приступить к замеру угловых координат натурной траектории дымового факела, необходимо измерить угловые координаты устья дымовой трубы и светофорных площадок. Перекрестие сетки зрительной трубы наводится на устье дымовой трубы, определяются вертикальные углы ε_0 , под которым с точки установки теодолита видны устье дымовой трубы, $\varepsilon_{сви}$ - светофорные площадки; а также их соответствующие горизонтальные углы.

Затем можно приступить к замеру угловых координат траектории дымового факела. Для этого необходимо зафиксировать теодолитом верхнюю и нижнюю границы дымового факела ε_{iv} и ε_{in} , изменяя горизонтальный угол на $1-2^\circ$. Одновременно с замером траектории дымового факела определяется направление ветра γ . Схема замера траектории дымового факела с помощью теодолита показана на рис. 4.1.2.

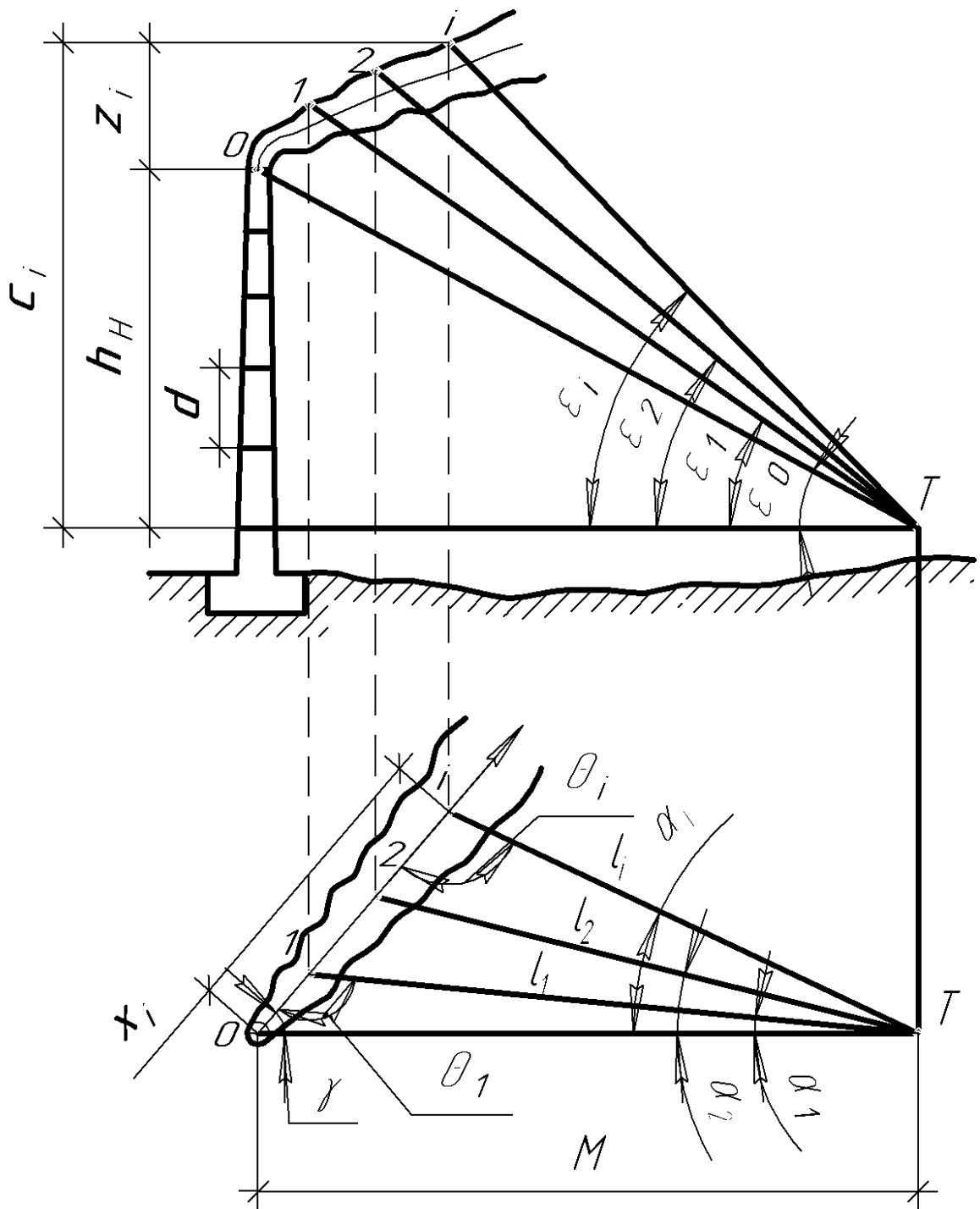


Рисунок 4.1.2 — Схема замера траектории дымового факела теодолитом

Одним из необходимых параметров для расчёта теоретической траектории дымового факела является скорость ветра u . Поэтому перед началом замера траектории дымового факела и после замера по секундомеру фиксируется время прохождения клубов дыма от трубы до объекта - ориентира t . В дальнейшем, рассчитав расстояние от трубы до объекта-ориентира и зная время, за которое клуб

дыма проходит это расстояние, можно определить скорость ветра u . Объект - ориентир при этом выбирается любой, удобный для наблюдателя. Предварительно теодолитом замеряется α ориентира, то есть горизонтальный угол между направлением на трубу и ориентиром.

4.1.2 Методика обработки результатов натурального эксперимента по исследованию распространения дымового факела с использованием аэрологического шаропилотного теодолита

Для расчета натурной траектории дымового факела необходимо определить превышение точки установки теодолита над основанием трубы, а также расстояние от точки установки теодолита до трубы.

Из рабочих чертежей дымовой трубы известны ее высота и расстояния между светофорными площадками. Для того, чтобы определить расстояние до трубы, нужно знать превышение трубы над точкой расположения теодолита T . (размер h_n) и угол ε_1 . Угол ε_1 достаточно просто определить, если с точки расположения теодолита T видна точка пересечения горизонтали через точку T с осью трубы. В этом случае достаточно оценить расстояние от этого пересечения до ближайшей площадки принимая, для малых ε линейный размер участка пропорциональным углам ε . Однако на практике часто бывает, что точка пересечения не видна так как ее загораживает или главный корпус или другие препятствия. В этом случае h_n можно определить расчётным путем, предварительно замерив вертикальные углы, под которыми расположены верхняя и нижняя из видимых светофорных площадок – ε_1 и ε_2 . Уровни h_1 и h_2 на которых расположены эти площадки известны из проекта дымовой трубы. Чтобы рассчитать h_n предварительно необходимо получить зависимость изменения угловых масштабов по оси трубы от углов ε . Для этого была составлена следующая расчётная схема, изображённая на рисунке 4.1.3.

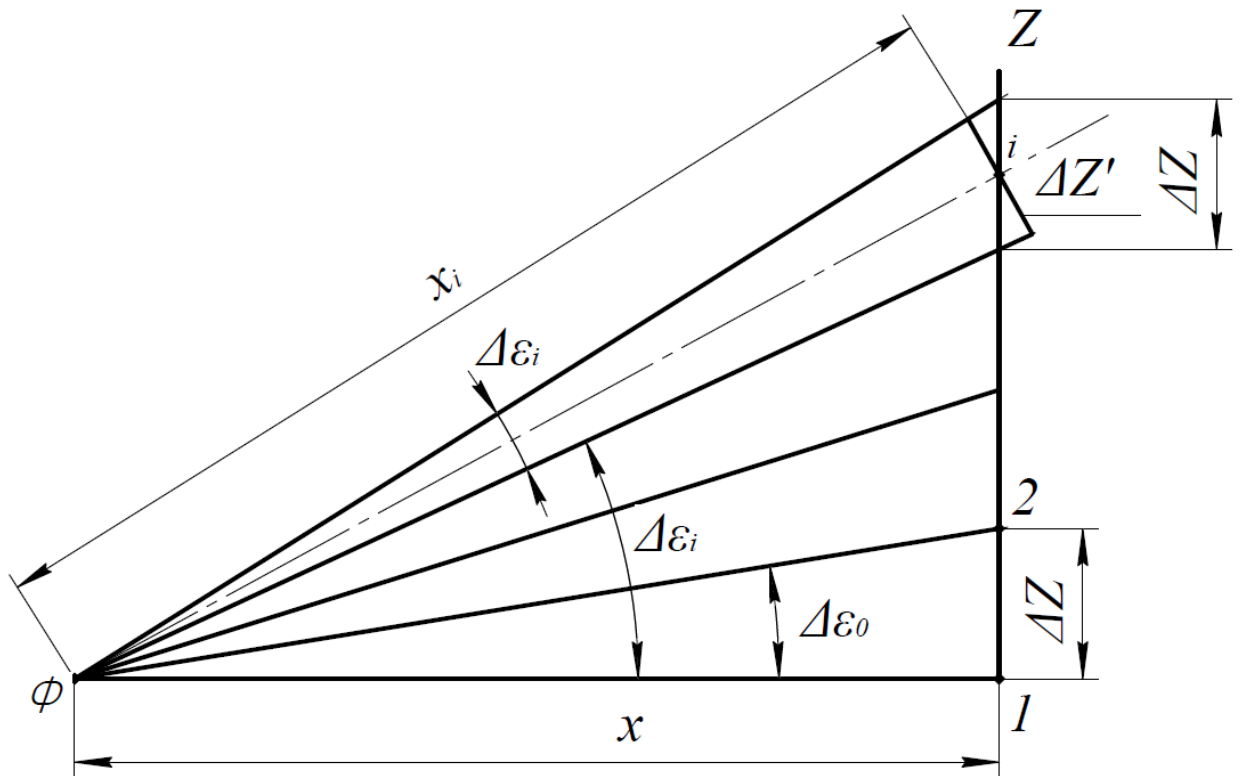


Рисунок 4.1.3. — Схема к определению угловых масштабов

Запишем угловой масштаб в i -ой точке как - (4.1.1) и в точке 1 - (4.1.2):

$$M_i(\varepsilon) = \lim_{\Delta Z \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta Z}, \quad (4.1.1)$$

$$M_1(\varepsilon) = \lim_{\Delta Z \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta Z}, \quad (4.1.2)$$

а средний угловой масштаб на участке 1- i :

$$M_{1-i}(\varepsilon) = \frac{\int_0^\varepsilon M_i(\varepsilon) \cdot d\varepsilon}{\varepsilon}. \quad (4.1.3)$$

Тогда с использованием рисунка 4.3.3 получим следующее решение:

$$\operatorname{tg} \Delta \varepsilon_0 = \frac{\Delta Z}{x}, \quad (4.1.4)$$

$$\operatorname{tg} \Delta \varepsilon_i = \frac{\Delta Z'}{x_i}, \quad (4.1.5)$$

$$x_i = \frac{x}{\cos(\varepsilon)}, \quad (4.1.6)$$

$$\Delta Z' = \Delta Z \cdot \cos(\varepsilon), \quad (4.1.7)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \Delta \varepsilon_0}{\operatorname{tg} \Delta \varepsilon_i} = \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon_i} = \frac{\Delta Z \cdot x_i}{x \cdot \Delta Z'} = \frac{\Delta Z \cdot x}{\cos(\varepsilon) \cdot x \cdot \Delta Z \cdot \cos(\varepsilon)} = \frac{1}{\cos^2(\varepsilon)}, \quad (4.1.8)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \varepsilon_0} = \cos^2(\varepsilon_0), \quad (4.1.9)$$

$$M_i = \lim \frac{\Delta \varepsilon_0 \cdot \cos^2(\varepsilon_0)}{\Delta Z} = M_1 \cdot \cos^2(\varepsilon_0), \quad (4.1.10)$$

$$M_{1-i} = M_1 \cdot \left(0,5 + \frac{1}{4} \cdot \frac{\sin(2\varepsilon)}{\varepsilon} \right). \quad (4.1.11)$$

Обозначим функции и запишем углы в градусах:

$$A(\varepsilon) = \cos^2 \left(\frac{\varepsilon \cdot \pi}{180} \right), \quad (4.1.12)$$

$$B(\varepsilon) = \left[0,5 + \frac{1}{4} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\varepsilon \cdot \pi}{90}\right)}{\left(\frac{\varepsilon \cdot \pi}{180}\right)} \right]. \quad (4.1.13)$$

Зная взаимосвязь между текущими и средними угловыми масштабами на основании рисунка 4.1.2, получим систему из 5 уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_{1-3} &= M_3 \cdot B(\varepsilon_1) \\ M_{2-3} &= M_3 \cdot B(\varepsilon_2) \\ M_{1-3} &= \frac{M_{1-2} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + M_{2-3} \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1} \\ M_{1-2} &= \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h_1 - h_2} \\ h_{\text{н}} &= \frac{\varepsilon_1}{M_{1-3}} \end{aligned} \right\}. \quad (4.1.14)$$

Из которых получаем:

$$h_{\text{н}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot (h_1 - h_2) \cdot \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \cdot \frac{B(\varepsilon_2)}{B(\varepsilon_1)} \right)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}. \quad (4.1.15)$$

После определения $h_{\text{н}}$, м, находится расстояние от точки установки теодолита до трубы M , м:

$$M = \frac{h_{\text{н}}}{\text{tg}(\varepsilon_0)}. \quad (4.1.16)$$

Далее по произведенным замерам угловых координат текущих точек траектории дымового факела ε_{i1} и ε_{i2} – вертикальные углы нижней и верхней границы дымового факела соответственно, °; α_i – разность значений горизонтального угла измеряемой точки и горизонтального угла устья дымовой трубы. С учетом рассчитанного расстояния M , определяются линейные координаты натурной траектории дымового факела x_i и z_i (рисунок 4.1.4).

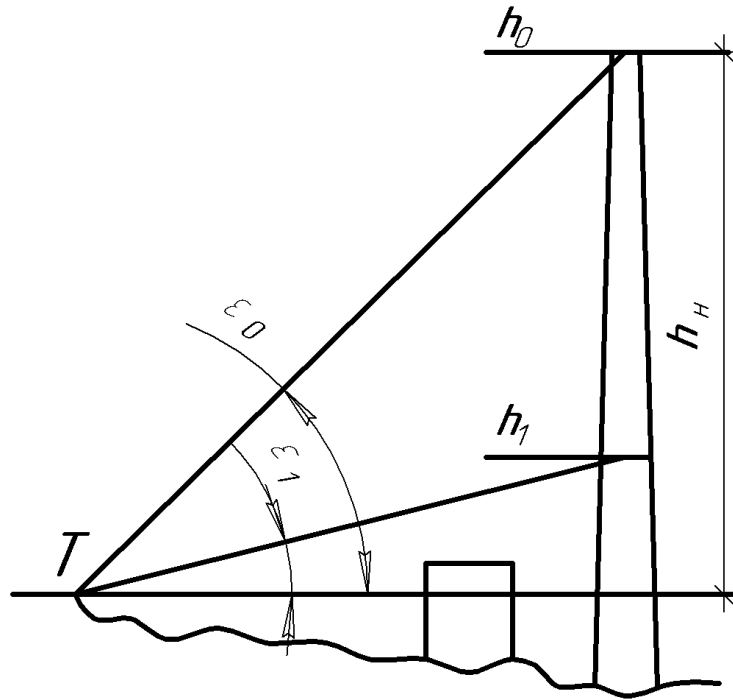


Рисунок 4.1.4 — Схема к определению размера h_n дымовой трубы

Для этого сначала определяется угол между направлением траектории дымового факела и направлением теодолита на текущую точку факела, θ_i , град:

$$\theta_i = 180 - \gamma - \alpha_i, \quad (4.1.17)$$

где γ - угол между направлением распространения дымового факела и направлением на трубу с точки съемки, определяется с использованием данных метеорологических служб и спутниковых снимков. Пример нахождения изображен на рисунке 4.1.5.



Рисунок 4.1.5 — Определение угла между направлением дымового факела и направлением на трубу с точки съёмки с помощью спутникового снимка

Расстояние от точки установки теодолита до текущей точки траектории дымового факела, м, находится из уравнения:

$$l_i = \frac{M \cdot \sin(\gamma)}{\sin(\theta_i)}. \quad (4.1.18)$$

Расстояние между устьем дымовой трубы и текущей точкой дымового факела, м, находится как:

$$x_i = \frac{M \cdot \sin(\alpha_1)}{\sin(\theta_i)}. \quad (4.1.19)$$

Вертикальная координата z_i , м, определяется следующим образом:

$$z_i = l_i \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon_i) - h_{\text{н}}. \quad (4.1.20)$$

Все замеренные и рассчитанные данные заносятся в результирующую таблицу (таблица 4.1.1). По рассчитанным линейным координатам строится график натурной траектории дымового факела (рисунок 4.1.6)

Таблица 4.1.1 Результирующая таблица расчета натурной траектории дымового факела

$\epsilon_{i1}, ^\circ$	$\epsilon_{i2}, ^\circ$	$\alpha_i, ^\circ$	X_i, M	Z_{i1}, M	Z_{i2}, M
12,5	13,5	0	0	4,615161	19,11281
12,4	16,2	1	13,76502	3,198121	58,93096
14,5	16,3	2	27,53843	33,8568	60,52992
12,4	14	3	41,32865	3,409653	26,67658
12	14,6	4	55,14411	-2,18181	35,70317
12,4	15,3	5	68,99335	3,83401	46,34725
12,1	16	6	82,88494	-0,22081	57,15957
13,2	18	7	96,8276	16,14023	87,94242
13,5	17,9	8	110,8302	20,97342	87,00054
13,3	16,5	9	124,9016	18,52756	66,2923
12,4	17,6	10	139,051	5,846444	83,80426
13,5	19,6	11	153,2878	22,65636	115,85
12,9	19,5	12	167,6216	14,43524	115,2831
14,3	19,1	13	182,0621	36,0857	110,0467
14,5	19,8	14	196,6195	39,97599	122,3915

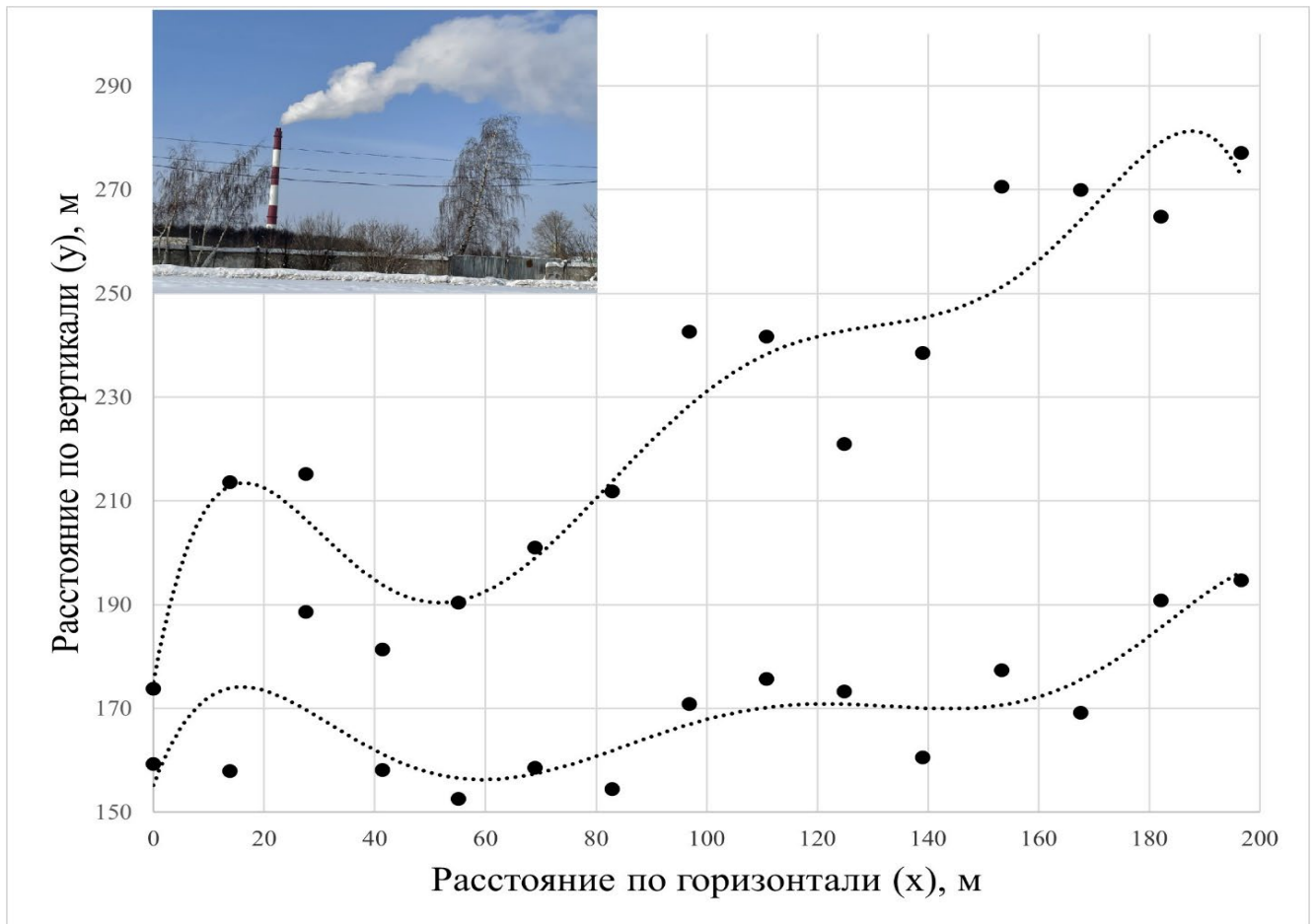


Рисунок 4.1.6 — График натурной траектории дымового факела.

4.2 Методика определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка

Одной из основных проблем при исследовании траектории дымового факела является переменная метеорологическая обстановка во время эксперимента. При использовании теодолитного визирования в силу специфики методики для фиксации одной траектории может потребоваться от 5 до 10 минут, то есть при использовании данного метода получаем осредненные результаты за данный отрезок времени. Такая методика требует фиксации нескольких траекторий для получения осредненной, что снижает точность результата. Для оценки исследования всей видимой части дымового факела одновременно, была разработана методика, основанная на определении траектории дымового факела при помощи фотоснимка. Для этого производится фотосъемка дымовой трубы и всей видимой части дымового факела, при этом для получения наиболее

достоверных результатов необходимо располагаться как можно более перпендикулярно дымовому факелу. При использовании данной методики подойдет любая современная фотокамера.

Далее необходимо приступить к обработке полученного снимка. Как видно из рисунка 4.2.1, вертикально стоящая дымовая труба на фотоснимке выглядит наклонной. Это значит, что в верхней части снимка и в нижней - разные горизонтальные линейные масштабы изображения. Это значит, что фотокамера была установлена не строго горизонтально, а под некоторым углом, который также можно рассчитать по фотографии.

Кроме этого, один и тот же интервал высот по вертикали занимает меньший участок длины в верхней части трубы и больший - в нижней. Это значит, что в верхней и нижней части снимка разные и вертикальные линейные масштабы изображения.

Необходимо учитывать также и тот факт, что предметы одинакового размера имеют на снимке разные размеры. Чем дальше расположен предмет, тем меньше места он занимает на снимке.

Таким образом, чтобы рассчитать траекторию дымового факела по фотоснимку, нужно знать ориентацию главной оптической оси во время снимка и расстояние до плоскости снимка, которую мы выбираем перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через объект, по которому мы можем определить исходные средние линейные масштабы и направление распространения дымового факела.

Для последующей обработки требуется на фотоснимке составить расчетную схему как показано на рисунке 4.2.1.

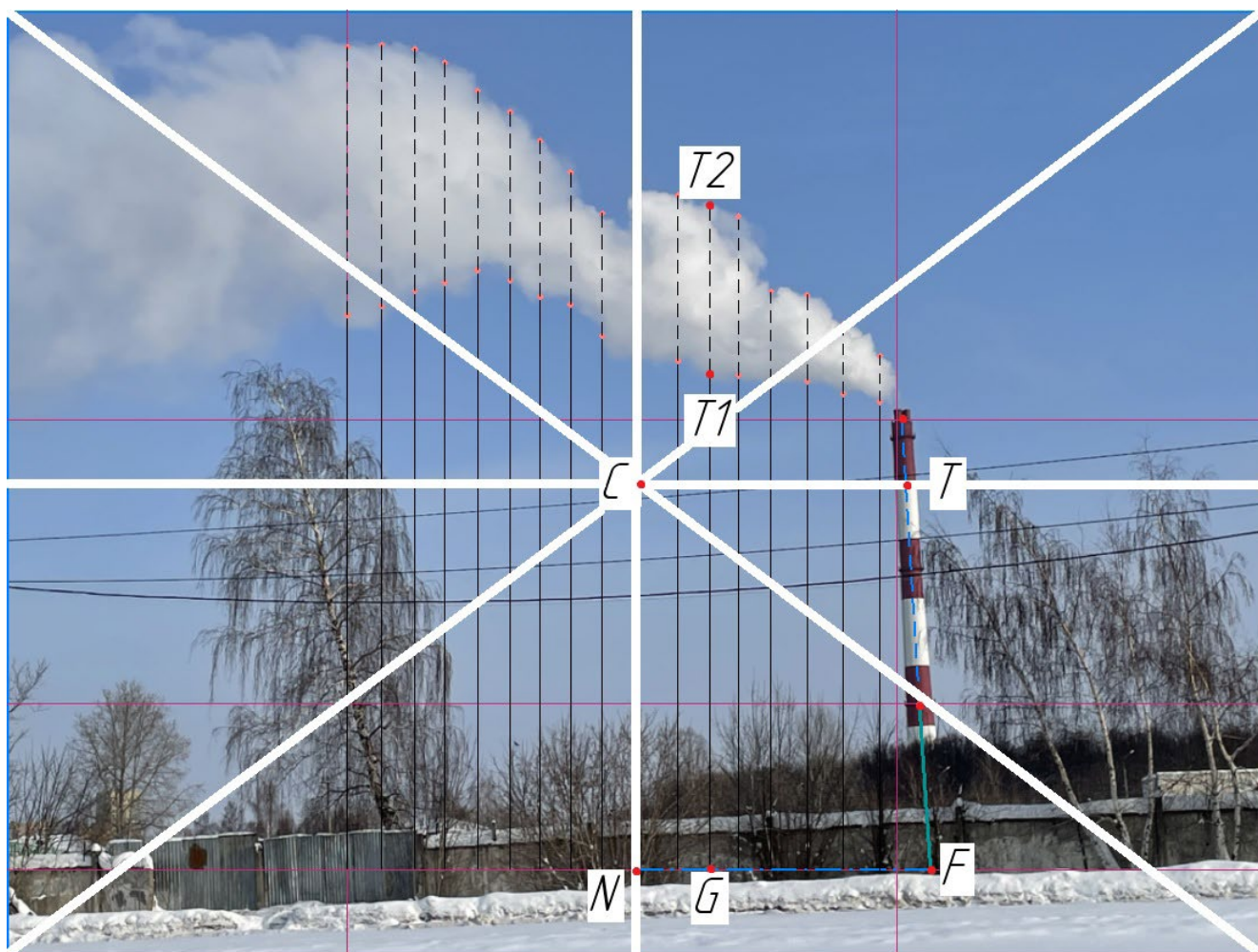


Рисунок 4.2.1 — Схема определения траектории дымового факела

На фотографии должны быть все границы снимка. Нельзя использовать только часть фотографии. На фотоснимок необходимо нанести диагонали, а также вертикальную и горизонтальную прямые, разделяющие снимок пополам. Центром пересечения этих прямых и диагоналей будет точка C .

Далее необходимо определить верхнюю и нижнюю границу рассматриваемого участка дымовой трубы. За верхнюю границу проще всего принять устье трубы, а за нижнюю границу самую нижнюю видимую на снимке светофорную площадку дымовой трубы. Эти данные можно получить из проекта дымовой трубы, в рассматриваемом случае из проекта дымовой трубы РК «Азино» известно, что высота трубы без учета высоты диффузоров $h_b = 150$ м. Как отмечалось в пункте 4.1 площадки расположены на отметках +25,0 м; +55,0 м; +100,0 м; +145,0 м. Исходя из фотоснимка, изображенного на рисунке 4.4.1 видно,

что самая нижняя видимая площадка расположена на уровне $h_n = 55$ м. Тогда фактическая длина рассматриваемого участка:

$$l_{\text{уч1ф}} = h_{\text{в}} - h_{\text{н}}, \quad (4.2.1)$$

в данном примере $l_{\text{уч1ф}} = 95$ м.

Далее требуется определить длину рассматриваемого участка на фотоснимке, в представленном примере она составит $l_{\text{уч1с}} = 77$ мм. Теперь можно определить средний вертикальный угловой масштаб по трубе на рассматриваемом (видимом) участке:

$$M_{\text{уч1}}^{\text{срв}} = \frac{l_{\text{уч1ф}}}{l_{\text{уч1с}}}, \quad (4.2.2)$$

в представленном примере $M_{\text{уч1}}^{\text{срв}} = 1,2337$.

Тогда для выполнения расчета в первом приближении принимаем, что такой же масштаб имеет место по всей длине дымовой трубы, тогда длина всей трубы на снимке (включая невидимую часть) составит:

$$l_{\text{тр1}} = \frac{h_{\text{в}}}{M_{\text{уч1}}^{\text{срв}}}, \quad (4.2.3)$$

для представленного примера $l_{\text{тр1}} = 121,6$ мм.

Для дальнейшего расчета необходимо определить расстояние от точки, где производилась фотосъемка до точки, где расположена дымовая труба. Для этого можно воспользоваться спутниковыми снимками, для рассматриваемого примера снимок приведен на рисунке 4.2.2.



Рисунок 4.2.2 — Спутниковый снимок – план места фотосъемки

В большинстве современного программного обеспечения и сервисах по работе со спутниковыми снимками можно сразу найти расстояния между объектами с достаточно высокой точностью, кроме того, в них указывается масштаб снимка, например в данном случае он составляет 1:50. На рисунке 4.2.2 точка 1 – место, откуда проводилась фотосъемка; точка 2 – расположение дымовой трубы. Для представленного примера расстояние между точкой 1 и 2 – $L = 788$ м.

Далее нам потребуется найти функции изменения угловых масштабов по вертикали и по горизонтали. Для этого необходимо разделить высоту дымовой трубы на достаточно большое количество участков. Из предварительного анализа установлено, что достаточно $n = 30$. Тогда длина каждого участка составит $m_v = 5$ м. Дальнейшее увеличение их количества на точность расчёта практически не влияет.

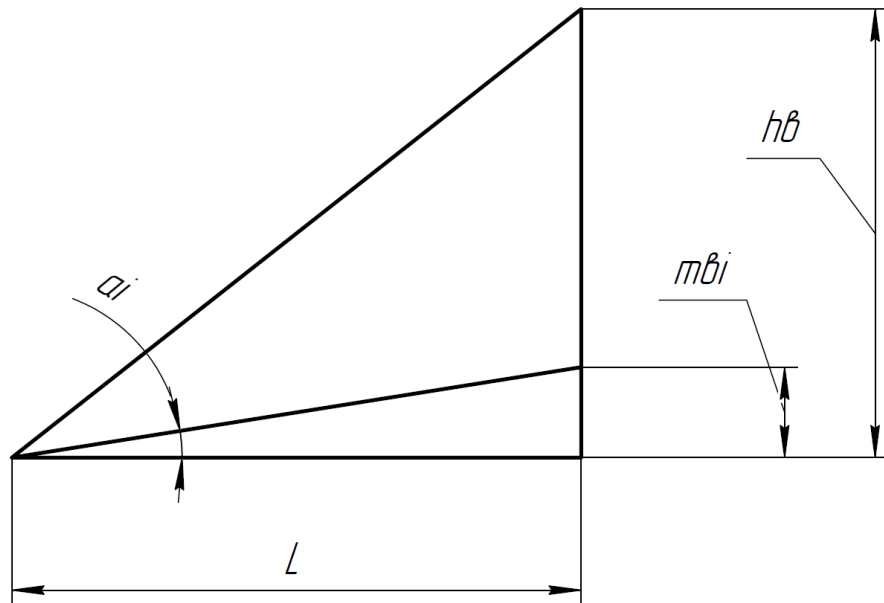


Рисунок 4.2.3 — Расчетная схема i -го участка

Разделив высоту дымовой трубы на участки, составим расчетную схему для каждого участка, как показано на рисунке 4.2.3, и найдем текущее отношение противолежащего катета к прилежащему, то есть отношение $\frac{L}{m_{Bi}}$. Затем найдем текущий угол α_i , град., как:

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{m_{Bi}} \right). \quad (4.2.4)$$

Найдем текущий средний вертикальный угловой масштаб, м/град, $M_{\text{срв}}$:

$$M_i^{\text{срв}} = \frac{m_{Bi}}{\alpha_i}. \quad (4.2.5)$$

Относительное изменение среднего вертикального углового масштаба определим как:

$$\Delta M_i^{\text{срв}} = \frac{M_i^{\text{срв}}}{M_{i+1}^{\text{срв}}}. \quad (4.2.6)$$

Найдем разность углов соседних вертикальных участков как:

$$\Delta \alpha_{\text{Ви}} = \alpha_{\text{Ви}+1} - \alpha_{\text{Ви}}. \quad (4.2.7)$$

Текущий местный вертикальный угловой масштаб:

$$M_i^{\text{МВ}} = \frac{m_{\text{В}}}{\Delta \alpha_{\text{Ви}}}. \quad (4.2.8)$$

Относительное изменение местного вертикального углового масштаба:

$$\Delta M_i^{\text{МВ}} = \frac{M_i^{\text{МВ}}}{M_1^{\text{МВ}}}. \quad (4.2.9)$$

Относительное расстояние по участку:

$$l_{\text{Ви}} = \frac{n_i}{n}. \quad (4.2.10)$$

Результаты расчета каждого участка для вертикальной составляющей приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1. Вертикальная составляющая угловых масштабов

n_i	$m_{\text{Ви}}$	$\frac{L}{m_{\text{Ви}}}$	$\alpha_{\text{Ви}}$	$M_i^{\text{срв}}$	$\Delta M_i^{\text{срв}}$	$\Delta \alpha_{\text{Ви}}$	$M_i^{\text{МВ}}$	$\Delta M_i^{\text{МВ}}$	$l_{\text{Ви}}$
1	5	0,006	0,364	13,753	1,000	0,364	13,753	1,000	0,033

2	10	0,013	0,727	13,754	1,000	0,364	13,754	1,000	0,067
3	15	0,019	1,091	13,755	1,000	0,363	13,757	1,000	0,100
4	20	0,025	1,454	13,756	1,000	0,363	13,760	1,000	0,133
5	25	0,032	1,817	13,758	1,000	0,363	13,764	1,001	0,167
6	30	0,038	2,180	13,760	1,000	0,363	13,770	1,001	0,200
7	35	0,044	2,543	13,762	1,001	0,363	13,777	1,002	0,233
8	40	0,051	2,906	13,765	1,001	0,363	13,784	1,002	0,267
9	45	0,057	3,268	13,768	1,001	0,362	13,793	1,003	0,300
10	50	0,063	3,631	13,772	1,001	0,362	13,803	1,004	0,333
11	55	0,070	3,993	13,775	1,002	0,362	13,814	1,004	0,367
12	60	0,076	4,354	13,780	1,002	0,362	13,826	1,005	0,400
13	65	0,082	4,715	13,784	1,002	0,361	13,840	1,006	0,433
14	70	0,089	5,076	13,789	1,003	0,361	13,854	1,007	0,467
15	75	0,095	5,437	13,795	1,003	0,360	13,870	1,008	0,500
16	80	0,102	5,797	13,800	1,003	0,360	13,886	1,010	0,533
17	85	0,108	6,157	13,806	1,004	0,360	13,904	1,011	0,567
18	90	0,114	6,516	13,813	1,004	0,359	13,923	1,012	0,600
19	95	0,121	6,874	13,820	1,005	0,359	13,943	1,014	0,633
20	100	0,127	7,232	13,827	1,005	0,358	13,964	1,015	0,667
21	105	0,133	7,590	13,834	1,006	0,358	13,986	1,017	0,700
22	110	0,140	7,947	13,842	1,006	0,357	14,009	1,019	0,733
23	115	0,146	8,303	13,850	1,007	0,356	14,034	1,020	0,767
24	120	0,152	8,659	13,859	1,008	0,356	14,059	1,022	0,800
25	125	0,159	9,014	13,868	1,008	0,355	14,086	1,024	0,833
26	130	0,165	9,368	13,877	1,009	0,354	14,113	1,026	0,867
27	135	0,171	9,722	13,887	1,010	0,354	14,142	1,028	0,900
28	140	0,178	10,074	13,897	1,010	0,353	14,172	1,030	0,933
29	145	0,184	10,426	13,907	1,011	0,352	14,203	1,033	0,967
30	150	0,190	10,778	13,918	1,012	0,351	14,235	1,035	1,000

На основании полученных результатов в таблице 4.2.1 были построены диаграмма изменения местного и среднего угловых масштабов по высоте дымовой трубы (рисунок 4.2.4) и диаграмма изменения текущего вертикального угла по высоте дымовой трубы (рисунок 4.2.5), а также получены уравнения описывающие полученные кривые и прямую соответственно.

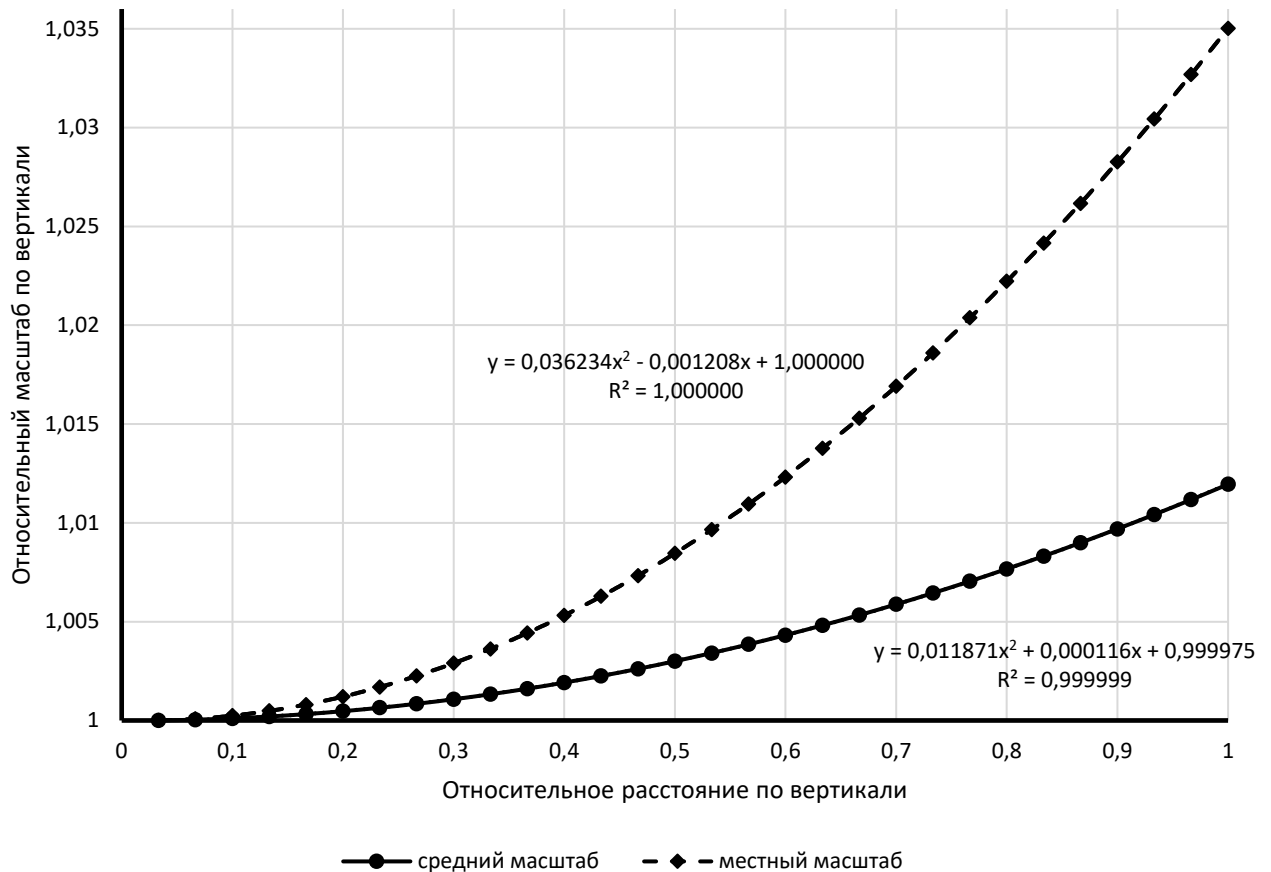


Рисунок 4.2.4 — Изменение местного и среднего угловых масштабов по высоте дымовой трубы

По методике, изложенной в подглаве 4.1 используя полученные аппроксимационные уравнения уточняем расстояние от трубы до точки, где проводилась фотосъемка. Результаты приведены в таблице 4.2.2.

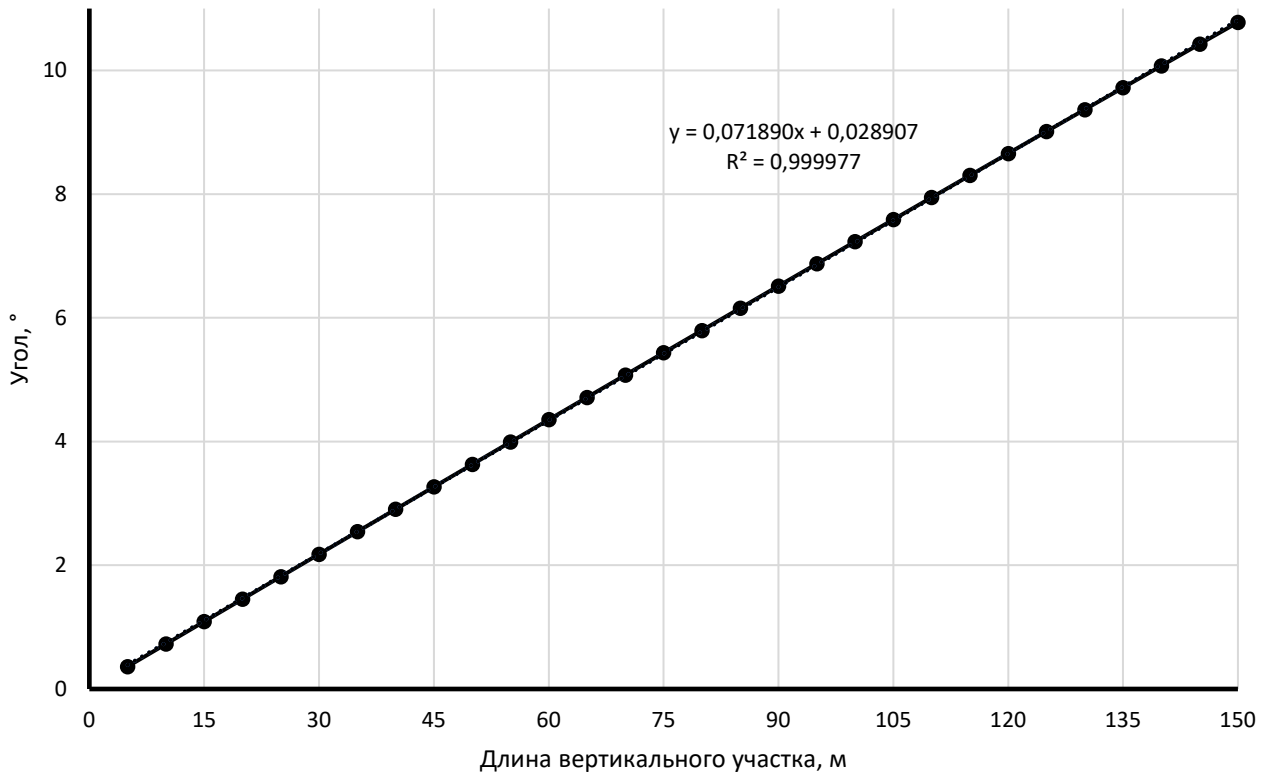


Рисунок 4.2.5 — Зависимость текущего вертикального угла от уровня по высоте дымовой трубы

Таблица 4.2.2 Проверка расстояния до трубы по площадкам

m_{Bi}	ε	$\frac{\varepsilon \cdot \pi}{90}$	$\frac{\sin(\varepsilon)}{\varepsilon} + 0,5$	$\frac{B(\varepsilon_1)}{I(\varepsilon_0)}$	$\varepsilon_0 - \varepsilon_1 \cdot \frac{B(\varepsilon_1)}{I(\varepsilon_0)}$	$\varepsilon_0 - \varepsilon_1$	$h_{тр}$	L
25	1,826	0,064	1,499	1,016	8,958	8,986	149,9	785,0
55	3,983	0,139	1,497	1,014	6,775	6,830	149,1	781,1
100	7,218	0,252	1,489	1,009	3,531	3,595	147,7	773,5
150	10,81	0,377	1,476	1	0	0		

В таблице 4.2.2 расчет проведен по трем интервалам высот: 25-150, 55-150 и 100-150 м. Наиболее точно высота рассчитывается по интервалу 25-150 м – высота получилась 149,9 м, что достаточно близко к реальной геометрической высоте 150 м. Используя значения 149,9 м уточняем расстояние до точки съемки 785 м при этом отметим, что расстояние по спутниковому снимку 788 м. Далее при расчетах используем уточненное значение.

Далее вновь вернемся к рассмотрению рисунков 4.2.1 и 4.2.2. Полученную точку C на рисунке 4.2.1 для дальнейших расчетов необходимо получить на рисунке 4.2.2. Для этого проведем прямую перпендикулярно прямой 1-2 и из точки 1, используя объекты-ориентиры на фотографии, и найдя их на спутниковом снимке, проведем прямую соединяющий данный перпендикуляр, в результате точкой их пересечения и будет искомая точка C . Далее определим расстояние от точки 2 до точки C используя спутниковые данные. Для данного примера расстояние между точкой 2 и точкой C будет равно 94 м. Расстояние от точки 1 до точки C по спутниковому снимку $L_0 = 792$ м. Далее делим отрезок 2- C также на 30 равных частей тогда размер каждого отрезка $m_{Г} = 3,133$ м и проводим аналогичный расчет масштабов по формулам 4.2.4 - 4.2.10, но теперь уже в горизонтальной плоскости по треугольнику 1- C -2 (рисунок 4.2.2). Результаты расчета представлены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 Горизонтальная составляющая угловых масштабов

n_i	$m_{Гi}$	$\frac{L}{m_{Гi}}$	$\alpha_{Гi}$	$M_i^{срг}$	$\Delta M_i^{срг}$	$\Delta \alpha_{Гi}$	$M_i^{МГ}$	$\Delta M_i^{МГ}$	$l_{Гi}$
1	3,133	0,004	0,227	13,823	1,000	0,227	13,823	1,000	0,033
2	6,267	0,008	0,453	13,823	1,000	0,227	13,824	1,000	0,067
3	9,400	0,012	0,680	13,824	1,000	0,227	13,824	1,000	0,100
4	12,533	0,016	0,907	13,824	1,000	0,227	13,826	1,000	0,133
5	15,667	0,020	1,133	13,825	1,000	0,227	13,827	1,000	0,167
6	18,800	0,024	1,360	13,826	1,000	0,227	13,830	1,000	0,200
7	21,933	0,028	1,586	13,827	1,000	0,227	13,832	1,001	0,233
8	25,067	0,032	1,813	13,828	1,000	0,226	13,835	1,001	0,267
9	28,200	0,036	2,039	13,829	1,000	0,226	13,839	1,001	0,300
10	31,333	0,040	2,266	13,830	1,001	0,226	13,843	1,001	0,333
11	34,467	0,044	2,492	13,832	1,001	0,226	13,847	1,002	0,367
12	37,600	0,047	2,718	13,833	1,001	0,226	13,852	1,002	0,400

13	40,733	0,051	2,944	13,835	1,001	0,226	13,857	1,002	0,433
14	43,867	0,055	3,170	13,837	1,001	0,226	13,862	1,003	0,467
15	47,000	0,059	3,396	13,839	1,001	0,226	13,869	1,003	0,500
16	50,133	0,063	3,622	13,841	1,001	0,226	13,875	1,004	0,533
17	53,267	0,067	3,848	13,844	1,002	0,226	13,882	1,004	0,567
18	56,400	0,071	4,073	13,846	1,002	0,226	13,889	1,005	0,600
19	59,533	0,075	4,299	13,849	1,002	0,225	13,897	1,005	0,633
20	62,667	0,079	4,524	13,852	1,002	0,225	13,905	1,006	0,667
21	65,800	0,083	4,749	13,855	1,002	0,225	13,914	1,007	0,700
22	68,933	0,087	4,974	13,858	1,003	0,225	13,923	1,007	0,733
23	72,067	0,091	5,199	13,861	1,003	0,225	13,933	1,008	0,767
24	75,200	0,095	5,424	13,864	1,003	0,225	13,943	1,009	0,800
25	78,333	0,099	5,649	13,868	1,003	0,225	13,953	1,009	0,833
26	81,467	0,103	5,873	13,872	1,004	0,224	13,964	1,010	0,867
27	84,600	0,107	6,097	13,875	1,004	0,224	13,975	1,011	0,900
28	87,733	0,111	6,321	13,879	1,004	0,224	13,987	1,012	0,933
29	90,867	0,115	6,545	13,883	1,004	0,224	13,999	1,013	0,967
30	94,000	0,119	6,769	13,888	1,005	0,224	14,011	1,014	1,000

На основании полученных результатов в таблице 4.2.3 были построены диаграмма изменения местного и среднего угловых масштабов по отрезку 2-С (горизонтальному участку) (рисунок 4.2.6), и диаграмма изменения текущего вертикального угла по отрезку 2-С (рисунок 4.2.7) а также получены уравнения описывающие полученные кривые и прямую соответственно.

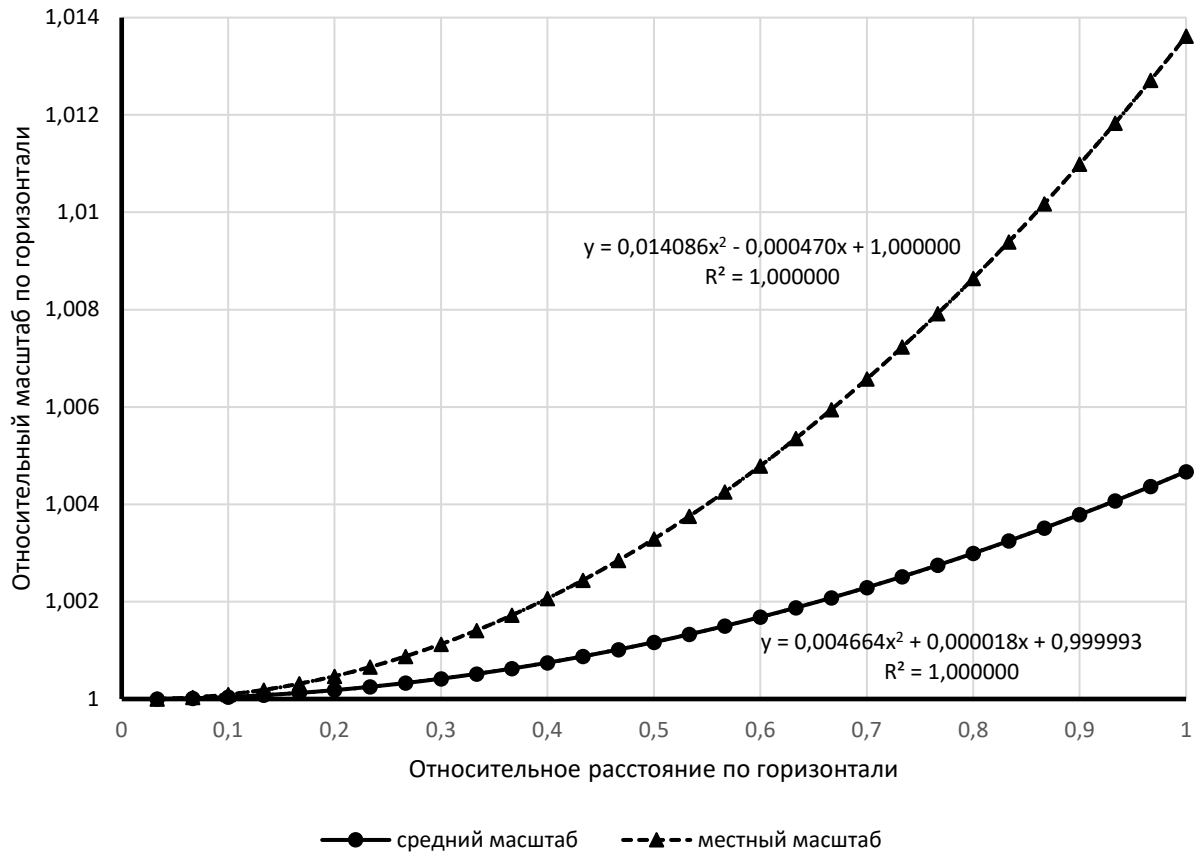


Рисунок 4.2.6 — Изменение местного и среднего угловых масштабов по длине горизонтального участка

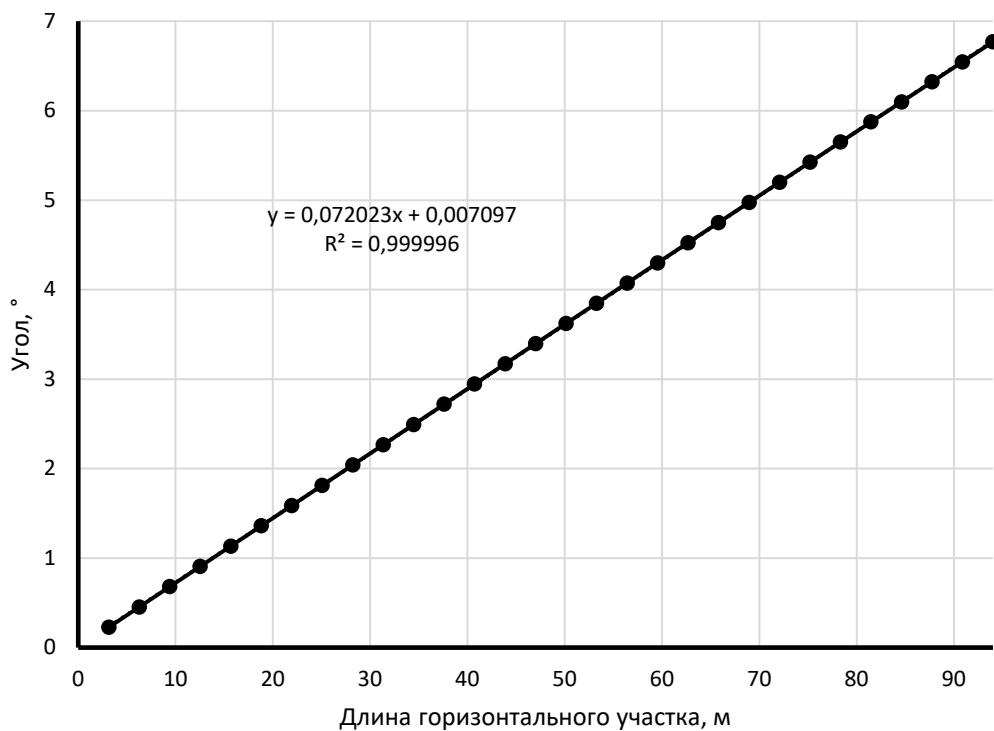


Рисунок 4.2.7 — Зависимость текущего горизонтального угла от длины горизонтального участка

Далее в первом приближении, приняв что масштаб по всей трубе такой же как на участке 55-150 м, определим местный вертикальный угловой масштаб в основании трубы:

$$M_{\text{осн1}}^{\text{мв}} = \frac{M_{\text{уч1}}^{\text{срв}}}{\Delta M_{30}^{\text{срв}}}. \quad (4.2.11)$$

Затем определив долю, занимаемую рассматриваемым участком как $\frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{н}}}$ и подставив в полученное уравнение для среднего вертикального углового масштаба по высоте трубы получим относительный средний вертикальный угловой масштаб на участке от начала трубы до первой видимой площадки (нижней границы рассматриваемого участка) $\Delta M_{\text{осн}}^{\text{срв}}$. Тогда средний вертикальный угловой масштаб в основании трубы определим как:

$$M_{\text{осн}}^{\text{срв}} = M_{\text{осн1}}^{\text{срв}} \cdot \Delta M_{\text{осн}}^{\text{срв}}. \quad (4.2.12)$$

Далее зная, $h_{\text{н}}$ можем определить длину невидимого участка от начала трубы до первой видимой площадки (нижней границы рассматриваемого участка) на снимке:

$$l_0 = \frac{h_{\text{н}}}{M_{\text{осн}}^{\text{срв}}}. \quad (4.2.13)$$

Продолжим отрезок от нижней границы рассматриваемого участка на снимке (рисунок 4.2.1) на величину полученного значения l_0 и в результате получим точку F .

Тогда учитывая $l_{\text{учс}}$ можем найти полную длину дымовой трубы $l_{\text{тр}}$ на снимке:

$$l_{\text{тр}} = l_{\text{учс}} + l_0. \quad (4.2.14)$$

В представленном примере $l_0 = 45$ мм, а $l_{\text{тр}} = 122$ мм.

Далее зная полную длину дымовой трубы на снимке, можем произвести уточнение среднего вертикального углового масштаба по всей высоте трубы:

$$M_{\text{тр}}^{\text{срв}} = \frac{h_{\text{в}}}{l_{\text{тр}}}. \quad (4.2.15)$$

А также уточним местный вертикальный угловой масштаб в основании трубы:

$$M_{\text{осн}}^{\text{мв}} = \frac{M_{\text{тр}}^{\text{срв}}}{\Delta M_{30}^{\text{срв}}}. \quad (4.2.16)$$

Тогда, подставив в полученное уравнение для местного вертикального углового масштаба (рисунок 4.2.4) уточненный местный вертикальный угловой масштаб в основании трубы, получим уточненный местный угловой масштаб на уровне от начала трубы до нижней границы рассматриваемого участка $M_{\text{уч0}}^{\text{мв}}$.

Далее на рисунке 4.2.1 проведем прямую из полученной точки F перпендикулярно вертикальной прямой разделяющей снимок пополам, точку их пересечения обозначим N . Из рисунка 4.2.2 известно, что расстояние между точками C и 2 составляет 94 м, соответственно это справедливо и для отрезка $F-N$ на рисунке 4.2.1. Тогда измерив на снимке расстояние между точкой F и N можем определить средний горизонтальный угловой масштаб на участке $N-F$:

$$M_{N-F}^{\text{срг}} = \frac{L_{N-F}}{l_{N-F}}. \quad (4.2.17)$$

Тогда средний относительный горизонтальный масштаб на участке $N-F$ $\Delta M_{N-F}^{\text{срг}}$ можно определить подставив l_{N-F} в ранее выведенное уравнение (рисунок 4.2.6).

Местный горизонтальный масштаб на участке $N-F$ можно найти как:

$$M_{N-F}^{\text{мг}} = \frac{M_{N-F}^{\text{срг}}}{\Delta M_{N-F}^{\text{срг}}}. \quad (4.2.18)$$

На рисунке 4.2.1 соединим точки N и C и замерим длину этого отрезка l_{N-C} . Затем определим долю участка $N-C$ от вертикальной базы как $\frac{l_{N-C}}{l_{\text{тр}}}$ подставив полученное значение в ранее полученные уравнения (рисунок 4.2.6), получим относительное изменение местного $\Delta M_{N-C}^{\text{мв}}$ и среднего $\Delta M_{N-C}^{\text{срв}}$ вертикальных масштабов на участке $N-C$. Тогда фактическое расстояние между точками N и C можно определить как:

$$L_{N-C} = l_{N-C} \cdot M_{\text{тр}}^{\text{срв}} \cdot \Delta M_{N-C}^{\text{срв}}. \quad (4.2.19)$$

Теперь на рисунке 4.2.1 проведем перпендикулярную прямую, соединяющую точку C с осью дымовой трубы, а точку пересечения на оси отметим как T . Замерим длину l_{C-T} отрезка $C-T$ на фотоснимке. Средний горизонтальный угловой масштаб на участке $C-T$ определим как:

$$M_{C-T}^{\text{срг}} = \Delta M_{N-C}^{\text{мв}} \cdot M_{N-F}^{\text{срг}}. \quad (4.2.20)$$

Тогда фактическая длина участка $C-T$:

$$L_{C-T} = M_{C-T}^{\text{срг}} \cdot l_{C-T}. \quad (4.2.21)$$

Тогда угол, на который повернута фотокамера по вертикали относительно горизонта, определяется положением главной оптической оси, которая проходит на фотоснимке через точку C (рисунок 4.2.1) найдем подставив L_{N-C} в ранее выведенное уравнение (рисунок 4.2.5). Угол по горизонтали между точкой C и осью дымовой трубы был найден ранее как $\alpha_{\text{т30}}$. Теперь можно перейти к определению угловых координат точек дымового факела. Для этого обозначим на отрезке $N-F$ произвольную точку G , затем проведем из нее перпендикуляр, пересекающий дымовой факел в нижней и верхней границе, точки пересечения обозначим как T_1 и T_2 соответственно. Замерим расстояния l_{N-G} , l_{G-T_1} , l_{G-T_2} на фотоснимке. Тогда относительное расстояние участка $G-T_1$ найдем как:

$$l_{G-T_1}^{\text{отн}} = \frac{l_{G-T_1}}{l_{\text{тр}}}. \quad (4.2.22)$$

Определим относительное изменение местного вертикального углового масштаба на участке $\Delta M_{G-T_1}^{\text{мв}}$ подставив полученное значение $l_{G-T_1}^{\text{отн}}$ в ранее выведенное уравнение (рисунок 4.2.4). Затем определим средний горизонтальный масштаб на уровне от средней вертикальной прямой до T_1 :

$$M_{C-T_1}^{\text{срг}} = \Delta M_{G-T_1}^{\text{мв}} \cdot M_{N-F}^{\text{срг}}. \quad (4.2.23)$$

Расстояние от средней вертикальной прямой до T_1 определим как:

$$L_{N-G} = M_{C-T_1}^{\text{срг}} \cdot l_{N-G}. \quad (4.2.24)$$

Тогда угол $\alpha_{C-T_1}^\Gamma$ по горизонтали, между средней вертикальной прямой и точкой T_1 найдем из ранее полученного уравнения (рисунок 4.2.7). Следовательно угол $\alpha_{тр-T_1}^\Gamma$, по горизонтали, между трубой и точкой T_1 можем определить как:

$$\alpha_{тр-T_1}^\Gamma = \alpha_{\Gamma 30} - \alpha_{C-T_1}^\Gamma. \quad (4.2.25)$$

Относительное изменение среднего вертикального масштаба на участке $\Delta M_{G-T_1}^{срв}$ также найдем подставив $l_{G-T_1}^{отн}$ в соответствующее уравнение (рисунок 4.2.4).

Тогда фактическое расстояние $G-T_1$ можем найти как:

$$L_{G-T_1} = \Delta M_{G-T_1}^{срв} \cdot l_{G-T_1} \cdot M_{тр}^{срв}. \quad (4.2.26)$$

Следовательно искомый угол $\alpha_{гор-T_1}^B$ по вертикали, между горизонталью и точкой T_2 , сможем найти подставив L_{G-T_1} в выведенное уравнение (рисунок 4.2.5).

Аналогичным образом по формулам 4.2.22-4.2.26 определим угловые координаты точки T_2 .

Далее по уже приведенной методике в пункте 4.1 можем найти фактические координаты T_1 и T_2 .

Результаты расчета траектории дымового факела с использованием разработанной методики по определению траектории дымового факела по фотоснимку приведены на рисунке 4.2.8.

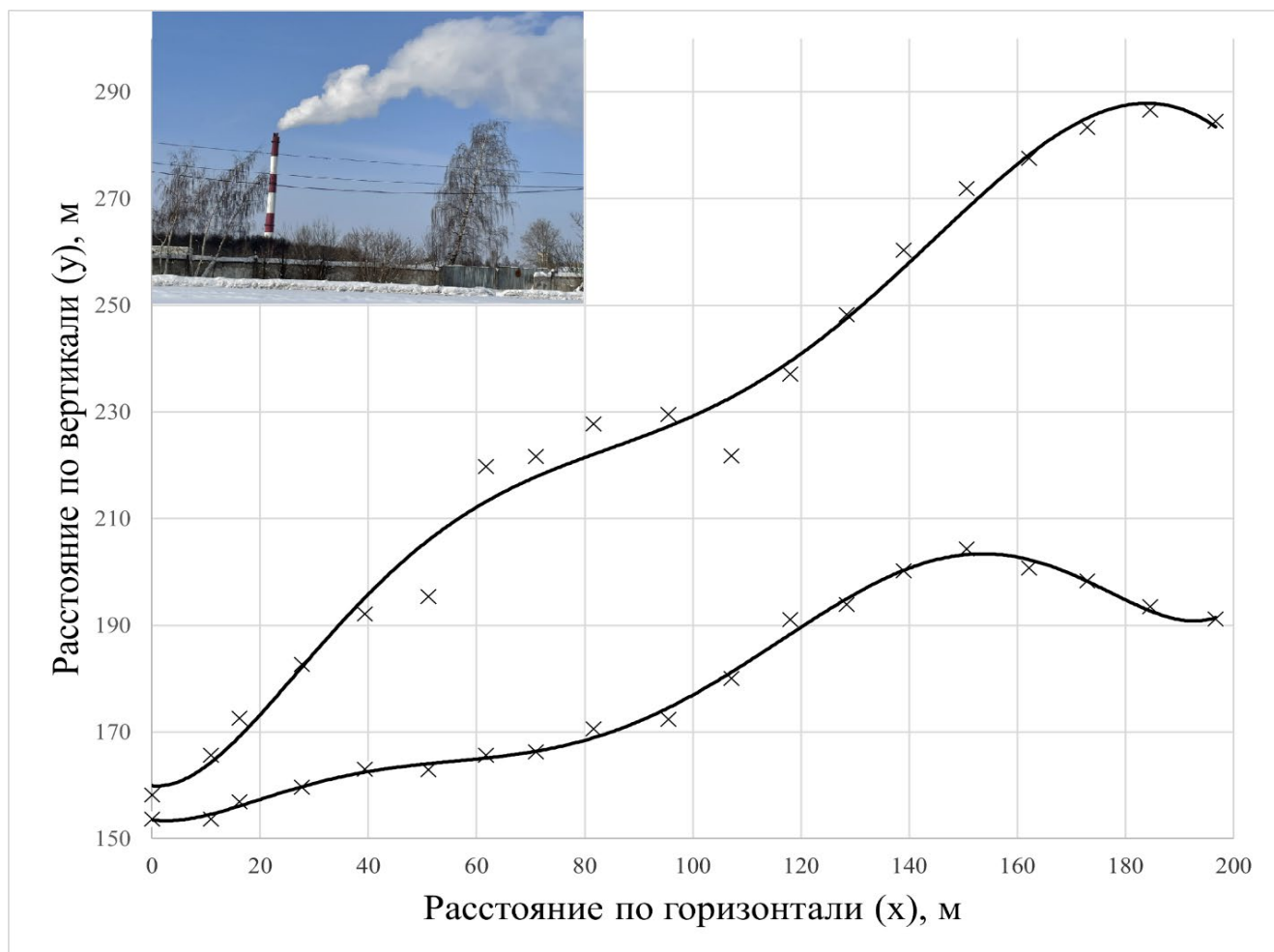


Рисунок 4.2.8 — График траектории дымового факела полученного с использованием фотоснимка

4.3 Моделирование начального участка траектории дымового факела с использованием CFD моделирования

4.3.1 Постановка задачи CFD моделирования траектории дымового факела

Как было отмечено в главе 1 для было разработано большое количество различных математических и основанных на них компьютерных моделей рассеивания дымовых газов и содержащихся в них примесей. Одним из основных методов для исследования аэродинамических характеристик, становится CFD моделирование. Дымовой факел представляет собой смесь воздуха, воды, оксида углерода, диоксида углерода, оксида азота, диоксида азота и оксида серы. Выходя из устья дымовой трубы дымовые газы начинают охлаждаться под воздействием

более низких температур окружающего воздуха. При движении в стволах дымовой трубы, если отсутствует химический недожог, дымовые газы прозрачны как при сжигании природного газа, так и при сжигании мазута. Эти газы содержат пары воды, в зависимости от количества которых и от температуры наружного воздуха могут происходить различные процессы при выходе дымовых газов в атмосферу. Если сжигается природный газ, а температура воздуха летняя, то дымовой факел остается совершенно прозрачным и наблюдатель с земли его визуальнo определить не может.

Если сжигается природный газ, а температура воздуха зимняя, как в нашем случае, то пары воды, содержащиеся в дымовых газах, конденсируются и становятся видимыми. Мелкие капли сталкиваются друг с другом, укрупняются и выпадают из факела, оставшиеся капли при дальнейшем движении факела снова испаряются и дымовой факел опять становится невидимым. Видимая длина дымового факела составляет от десятков до сотен метров. При снижении температуры газовой смеси в пределах дымового факела ниже нуля, капли воды замерзают, превращаются в кристаллы льда и также становятся видимыми. При дальнейшем движении происходит сублимация этих кристаллов и факел становится невидимым.

Фактически видимый для человеческого глаза дымовой факел представляет собой взвешенные частицы воды или льда, имеющие температуру, отличную от температуры окружающего воздуха. Программный комплекс Ansys Fluent 2023, выбранный нами для моделирования, позволяет пользователю отслеживать изменение температуры с высокой точностью и представлять температурную картину и картину турбулентности потоков расчетной области как в трехмерном, так и в двухмерном формате. Учитывая это, для исследования аэродинамики начального участка дымового факела, отслеживая траектории температурных изолиний отличных от температуры окружающего воздуха, можно определить нижние и верхние границы дымового факела с учетом турбулентности потока газов и атмосферы в однофазной постановке задачи, не прибегая к многофазному

моделированию процессов испарения, диффузии и коагуляции капель воды и вредных веществ.

4.3.2 Граничные условия и условия построения CFD модели

Для моделирования была построена точная 3D-модель дымовой трубы РК Азино, изображенная на рисунке 4.3.1.

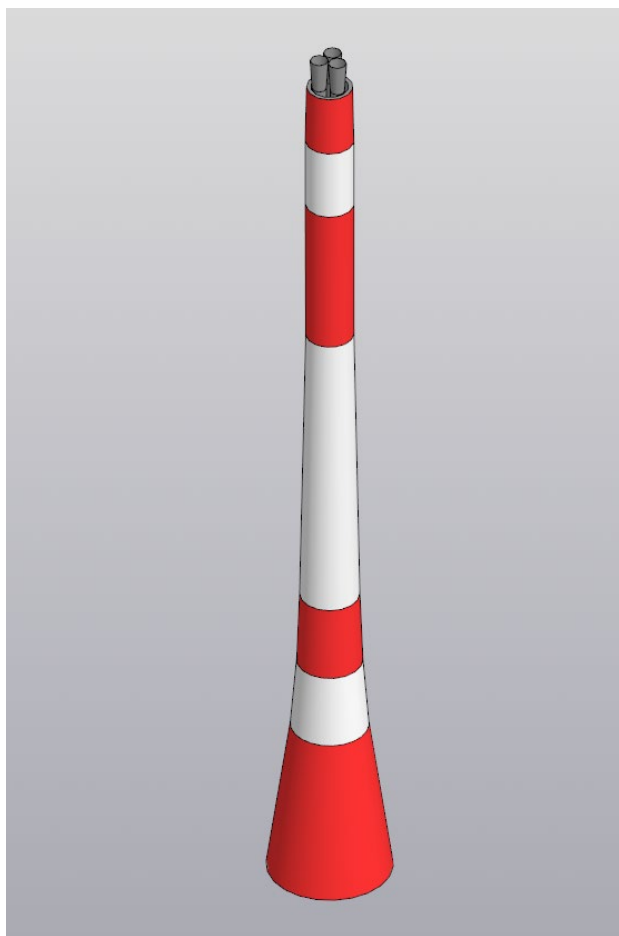


Рисунок 4.3.1 — 3D-модель дымовой трубы РК Азино

Область построения (расчётный домен) представляла собой куб длиной 450 м, высотой 300 м и шириной 100 м. Внутри домена расположена дымовая труба, в центре по ширине домена и на расстоянии 50 м от плоскости, где задавались входные условия движения ветра.

Для расчета были проведены эксперименты по построению расчётной сетки удовлетворяющей условиям сеточной сходимости. Результаты приведены в

таблице 4.3.1. Наиболее удовлетворительным вариантом является вариант с размером сеточного элемента 1 м. Отклонения исследуемых параметров перестают наблюдаться на 800 итерациях. Результаты расчета оптимальной сеточной модели представлены на рисунке 4.3.2, расчетная сетка представлена на рисунке 4.3.3.

Таблица 4.3.1 Условия сеточной сходимости

Размер сеточного элемента, м	Количество итераций, шт.	Условия построения сеточных элементов	Сеточная сходимость
10	1000	Используется adaptive sizing и element order - program controlled (адаптивный размер и порядок элементов - управляются программой)	Неудовлетворительная,
5			Неудовлетворительная,
3			Неудовлетворительная,
2			Неудовлетворительная
1,8			Наблюдаются отклонения по epsilon
1,5			Наблюдаются отклонения по epsilon
1,2			Удовлетворительная
1			Удовлетворительная
0,5			Удовлетворительная

В результате в выбранной расчетной модели получили 5475975 клеток и 1043734 узлов. Минимальной ортогональное качество клеток составило $1,13683 \cdot 10^{-2}$.

На рисунке 4.3.2 Iterations – количество последовательных операций приближения; Continuity – непрерывность приближения к результату; x-velocity – скорость потока в направлении x; y-velocity – скорость потока в направлении y; z-velocity – скорость потока в направлении z; energy – стабилизация энергии.

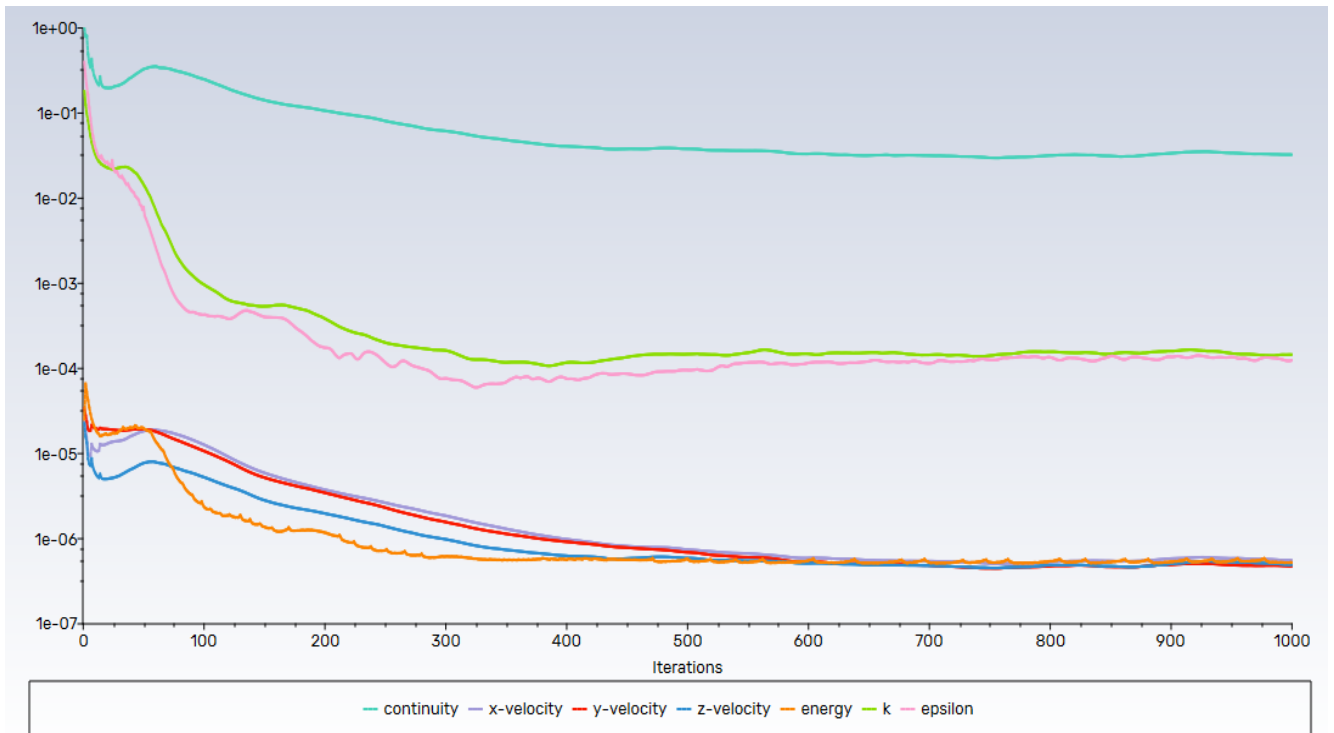


Рисунок 4.3.2 — Результаты расчета оптимальной сеточной конфигурации

В качестве граничных условий задаются реальные характеристики атмосферы и параметров дымовых газов. Далее будет представлен пример граничных условий для опытов по исследованию траектории факела, рассмотренной в параграфе 4.1 и 4.2. Функционал Ansys Fluent позволяет моделировать турбулентность потоков, для этого в нем предусмотрены различные модели Spalart-Allmaras; k - ϵ (состоящая из модификаций Standard, RNG и Realizable); k - ω (состоящая из Standard, GIKO, BLS и SST); Transition k - k_l - ω ; Transition SST; Large Eddy Simulation (LES, модель крупных вихрей); Detached Eddy Simulation (DES, модель отсоединенных вихрей); Reynolds Stress. На основе проведенного анализа изложенного материала в [78 – 85] и на основе рекомендаций данных в [86] в качестве модели турбулентности используется стандартная модель k - ϵ .

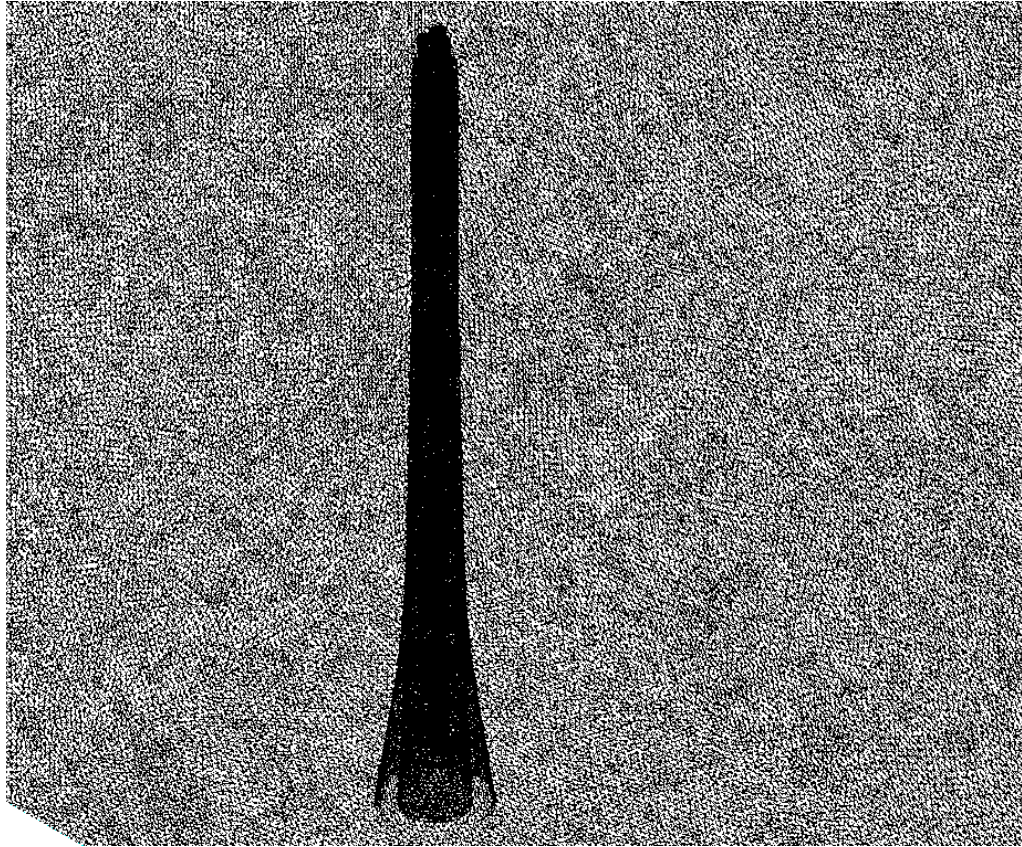


Рисунок 4.3.3 — Расчётная сетка модели

Стандартная k - ε модель представляет собой модель, основанную на модельных уравнениях переноса кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε . Уравнение переноса модели для k получено из точного уравнения, в то время как уравнение переноса модели для ε было получено с использованием физических рассуждений и мало похоже на его математически точный аналог [78].

При выводе k - ε модели предполагается, что течение полностью турбулентное, а влияние молекулярной вязкости незначительно [78].

Кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации определяются из следующих уравнений переноса [78]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

В этих уравнениях G_k представляет генерацию кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости. G_b представляет собой генерацию кинетической энергии турбулентности за счет плавучести. Y_M представляет вклад флуктуирующего расширения в сжимаемой турбулентности в общую скорость диссипации. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, и $C_{3\varepsilon}$ являются константами. σ_k и σ_ε – турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно. S_k и S_ε являются определяемыми исходными терминами [78].

Турбулентная вязкость μ_t рассчитывается путем объединения k и ε следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.3.3)$$

где C_μ константа [78].

В плоскости, расположенной на расстоянии 50 м от трубы, задаются характеристики атмосферного воздуха: профиль скорости ветра на основании анализа, проведенного по [87-94], рассчитывался по степенной функции как:

$$u_y = \left(\frac{y}{h} \right)^m, \quad (4.3.4)$$

где y – координаты профиля ветра по оси y ;

h - высота на уровне флюгера, принималась равной 10 м;

m – безразмерный параметр, зависящий от местности и характеристики установившегося режима атмосферы.

Температурный профиль в атмосфере задавался с учетом характерных градиентов для аналогичных метеоусловий в условиях натуральных экспериментов и с учетом данных, полученных в [95-97]. Интенсивность турбулентности (Turbulent Viscosity Ratio) атмосферы находилась в пределах от 10^8 до 10^9 , принималась в соответствии с рекомендациями данным в [78], исходя из фактического состояния атмосферы и анализируя фактический угол раскрытия дымового факела при натуральных экспериментах.

Для примерного анализа выбран достаточно сложный вариант единичной траектории, свидетельствующий о высокой турбулентности атмосферы в зоне взаимодействия поперечных потоков: выходящих из дымовой трубы газов и ветра.

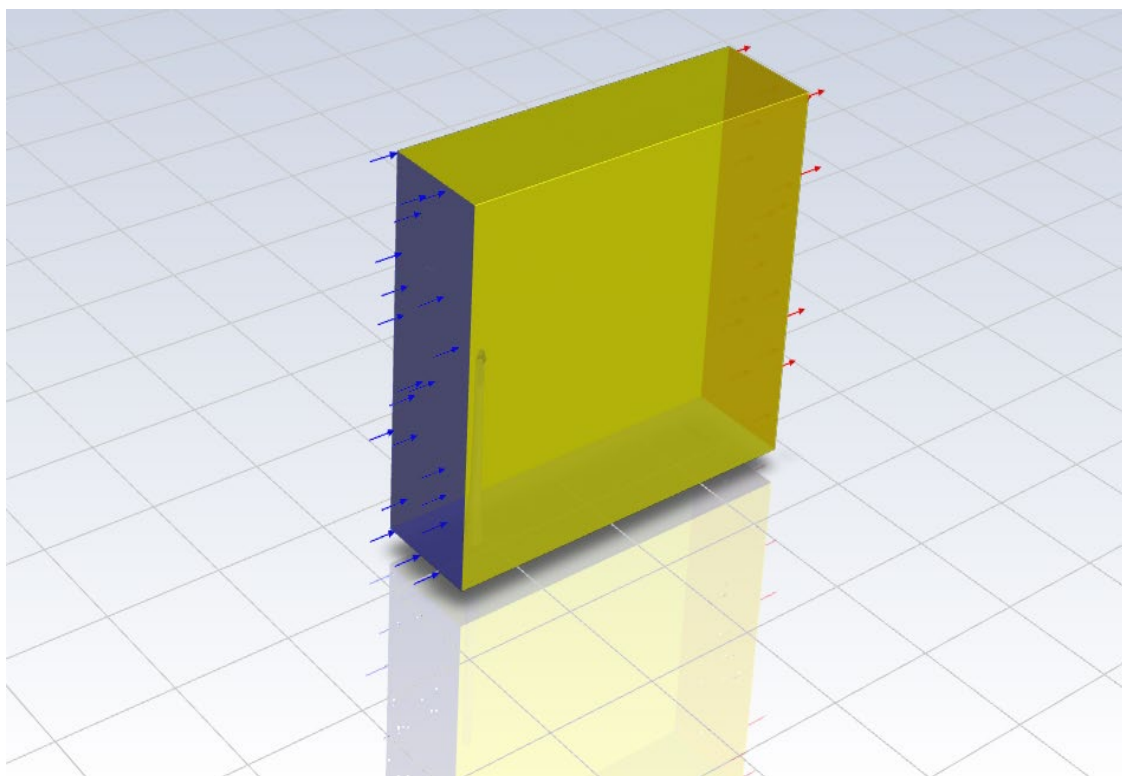


Рисунок 4.3.3 — Расчетный домен

Из диффузоров газ выходит с температурой, регистрируемой приборами учета котельной, скорость выхода газов определялась экспериментальным путем с использованием трубки Пито. В соответствии с рекомендациями, данными в [78] для высокоинтенсивного потока, интенсивность турбулентности (Turbulent Intensity) принималась 10%, шкала длины турбулентного потока (Turbulent Length

Scale) определялась по радиусу диффузора ствола 2,874 м. В качестве выходных условий задавалось атмосферное давление. Интенсивность турбулентности и температура задавались аналогично входным параметрам для ветровых характеристик.

Для верификации модели входные условия подбирались в соответствии с условиями на момент проведения натуральных экспериментов (таблица 4.3.2).

Таблица 4.3.2 Условия натуральных экспериментов

Дата	U_B , м/с	$t_{н.в.}$, °С	$P_{атм}$, мм.рт.ст	$t_{г1}$, °С	$t_{г2}$, °С	$U_{г1}$, м/с	$U_{г2}$, м/с	Направление ветра	Облачность
09.01.2022 зафиксировано 7 траекторий	6	-13	759	123	162	20	25	Южное	Высокая облачность
29.01.2022 зафиксировано 10 траекторий	3,6	-10	753	133	155	23	24	Юго- восточное	Облачно
13.03.2022 зафиксировано 6 траекторий	4,7	-12	757	127	137	22	23	Юго- западное	Облачно
04.12.2022 зафиксировано 10 траекторий	4	-18	775	155	155	24	24	Северо- западное	Ясно

В таблице 4.3.2 U_B – скорость ветра на уровне флюгера; $t_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, $P_{атм}$ – атмосферное давление; $t_{г1}$ - температура газов в стволе №1; $t_{г2}$ - температура газов в стволе №2; $U_{г1}$ - скорость газов в стволе №1; $U_{г2}$ - скорость газов в стволе №2.

Для проведения экспериментов на основе созданной модели входные условия необходимо менять в соответствии с целью и доступными ресурсами при проведении эксперимента. Решатель настроен на модель, основанную на давлении (pressure based). Задача решается в статичном состоянии (steady). Полная картина расчетного домена представлена на рисунке 4.3.3.

4.3.3 Результаты расчета и их верификация

Ansys Fluent позволяет построить трехмерную картину полученных температурных точек, отличных от температуры атмосферного воздуха, фактически в результате такого моделирования получаем осредненную траекторию дымового факела с учетом исходных параметров. Пример результата такого расчета приведен на рисунке 4.3.4.

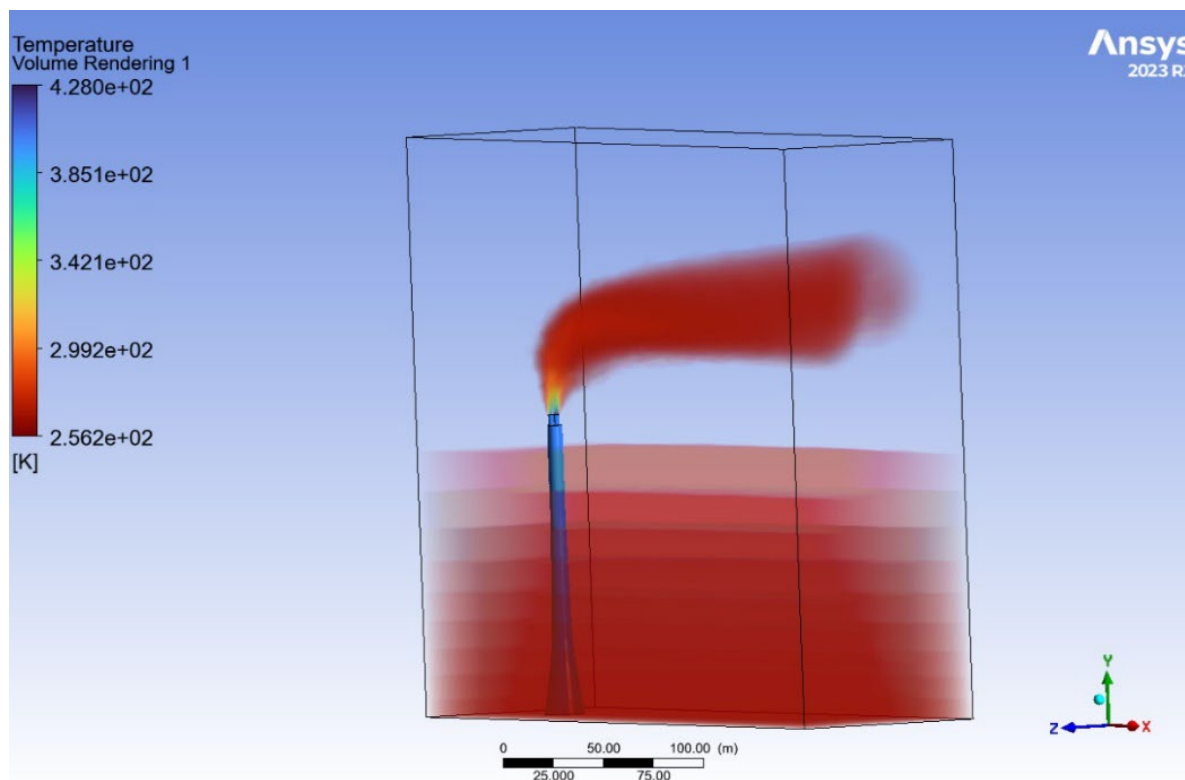


Рисунок 4.3.4 — Трехмерная траектория дымового факела

Для анализа и верификации результатов удобно воспользоваться центральным плоским контуром с помощью которого можно отслеживать значения и координаты полученных точек. Пример такого контура представлен на рисунке 4.3.5.

Для анализа картины турбулентности удобно воспользоваться потоковыми линиями, отображающими осредненные линии скоростей потоков (ветра, потоков газов из стволов). Пример графика с потоковыми линиями скорости изображен на рисунке 4.3.6. Полученная картина турбулентности газового потока достаточно точно совпадает с характером движения газов, наблюдаемым при натурном

эксперименте, а также подтверждается результатами, изложенными в [98] для схожих метеорологических условий.

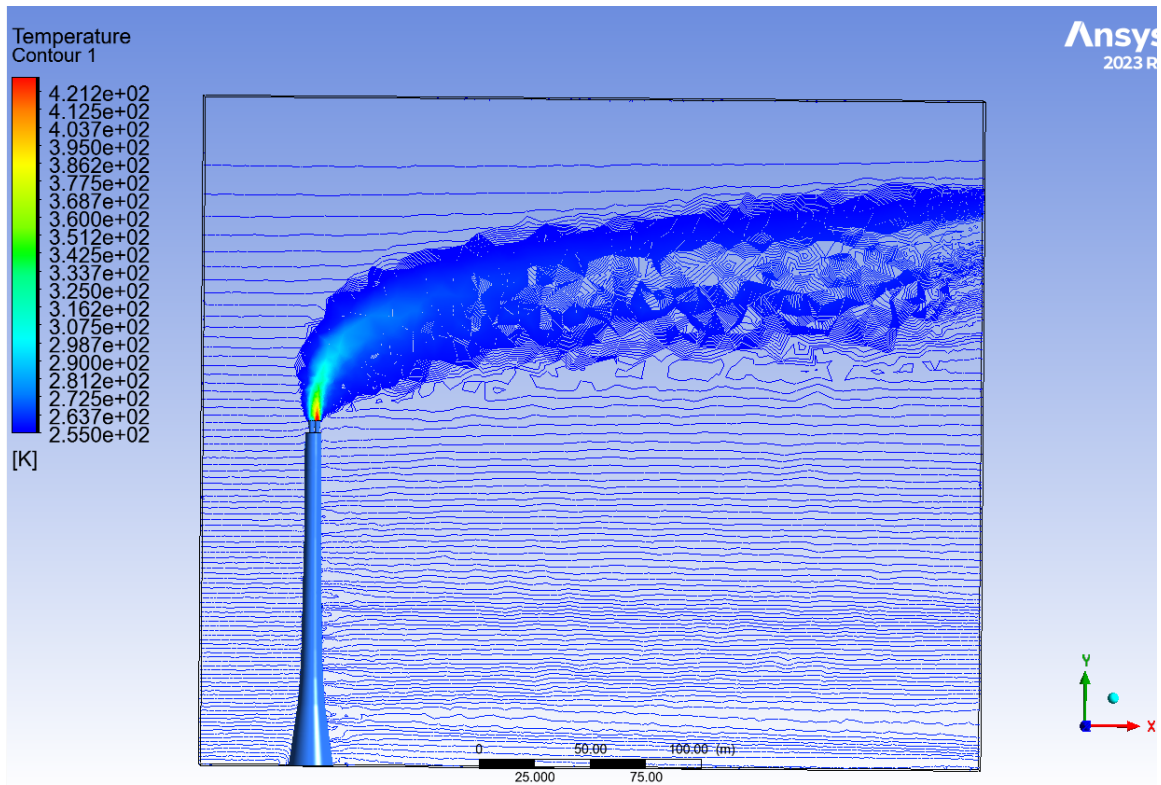


Рисунок 4.3.5 — Расчетный контур

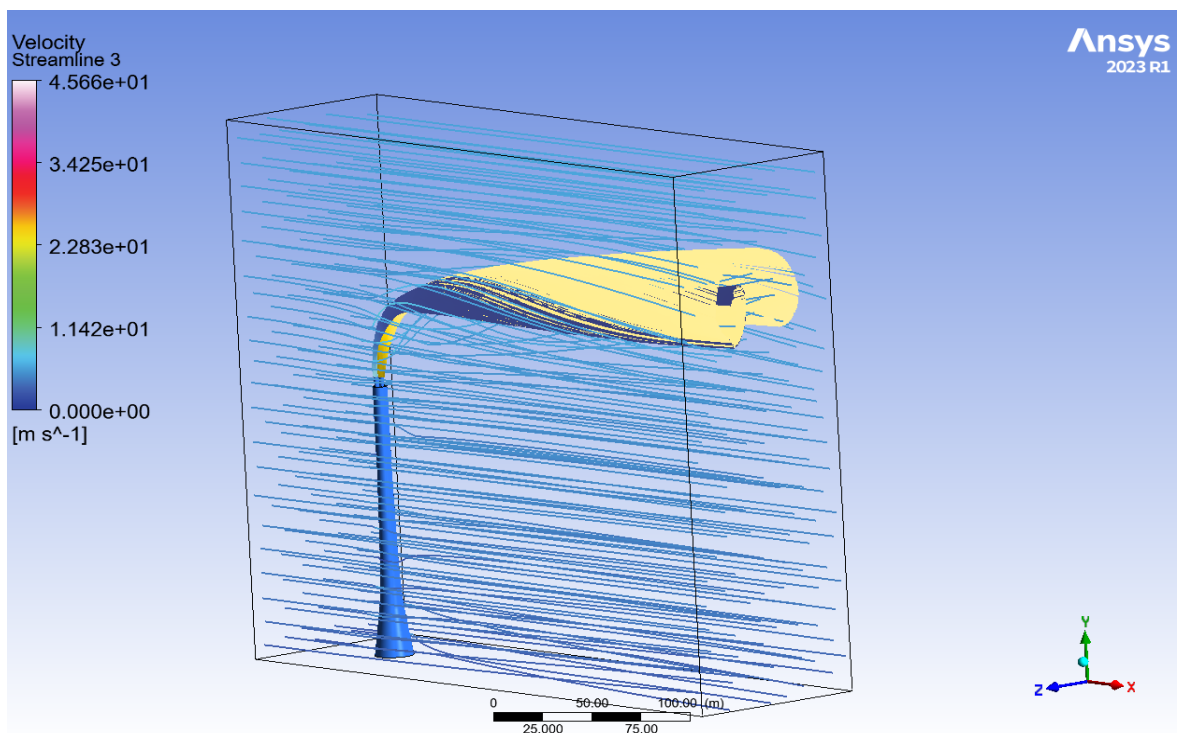


Рисунок 4.3.6 — Потокные линии скоростей

Для верификации результатов, полученных с помощью CFD моделирования, наложим координаты полученных точек на один график (рисунок 4.3.7).

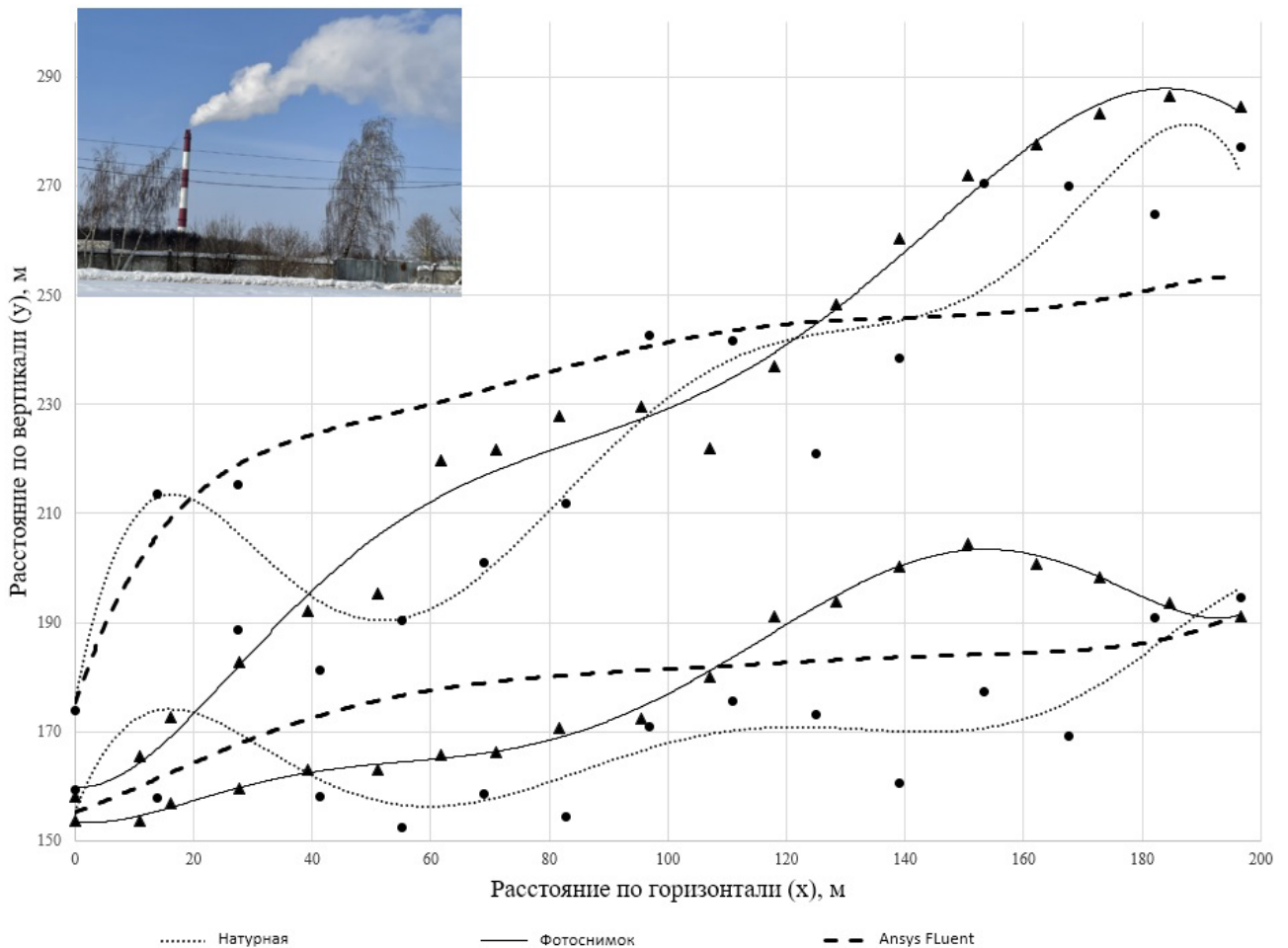


Рисунок 4.3.7 — Верификационный график траектории дымового факела, полученной различными методами

Относительная погрешность к результатам натурных испытаний составила 11,81% относительно методики по фотоснимку 12,86%.

С увеличением количества сравниваемых траекторий до 10, относительная погрешность уменьшается до 10%. Для натурных опытов в атмосфере погрешность менее 20% считается удовлетворительным результатом [46].

Искривления температурных линий свидетельствуют о температуре дымовых газов, отличной от температуры окружающего воздуха, при этом стоит отметить, что отличие составляет всего 0,2 °С, подобные результаты также были получены в [98-100]. Кроме того, функционал Ansys Fluent позволяет сгружать

полученную базу точек как трехмерной модели, так и плоскости. С учетом этого после фильтрации точек по оси y по минимальным и максимальным значениям, отличным от температуры окружающего воздуха на уровне распространения факела, можем получить нижнюю и верхнюю границу дымового факела.

Исходя из полученной CFD модели были проведены серии опытов по исследованию аэродинамических характеристик, теоретически влияющих на траекторию дымового факела на начальном участке. Для этого были рассмотрены 3 варианта выходной части дымовой трубы (приведены на рисунке 4.3.8) при условии равного суммарного объемного расхода газов из стволов (дымовой трубы - для одноствольного варианта): 1) верифицированный вариант модели дымовой трубы РК Азино с установленными диффузорами; 2) вариант дымовой трубы РК Азино без диффузора; 3) вариант дымовой трубы РК Азино без металлических стволов (одноствольная дымовая труба). По результатам расчета был построен сравнительный график траектории исследуемых вариантов, изображенный на рисунке 4.3.9. Исходя из полученных траекторий можно сделать вывод о том, что ствольность и установка диффузора оказывают незначительное влияние на траекторию факела на расстояниях до 170 м.

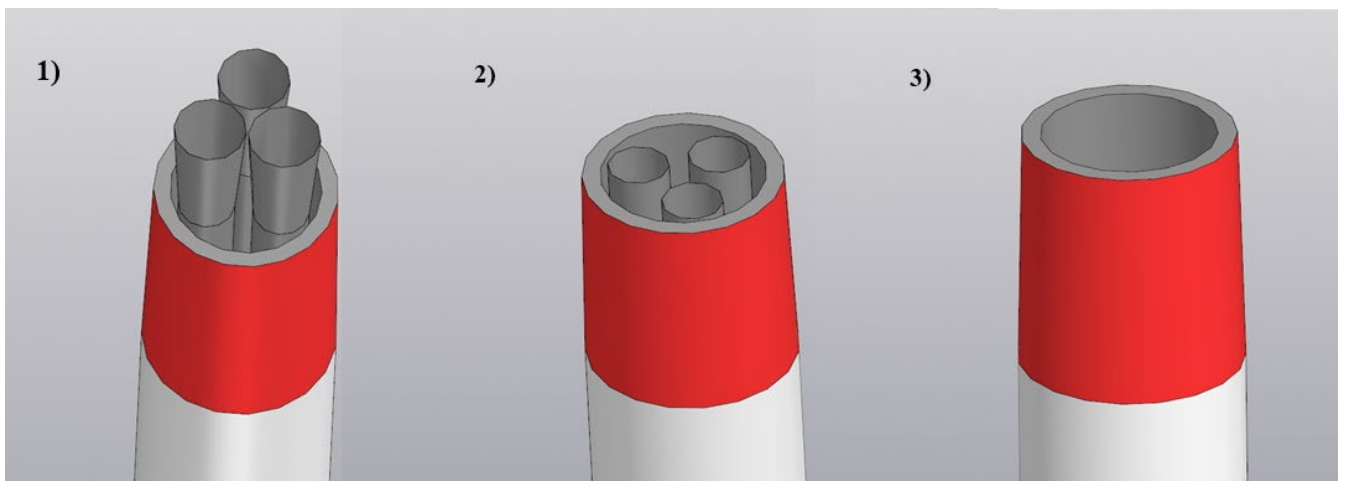


Рисунок 4.3.8 — Рассматриваемые варианты выходной части дымовой трубы: 1) многоствольная дымовая труба с диффузором, 2) многоствольная дымовая труба без диффузора, 3) одноствольная дымовая труба

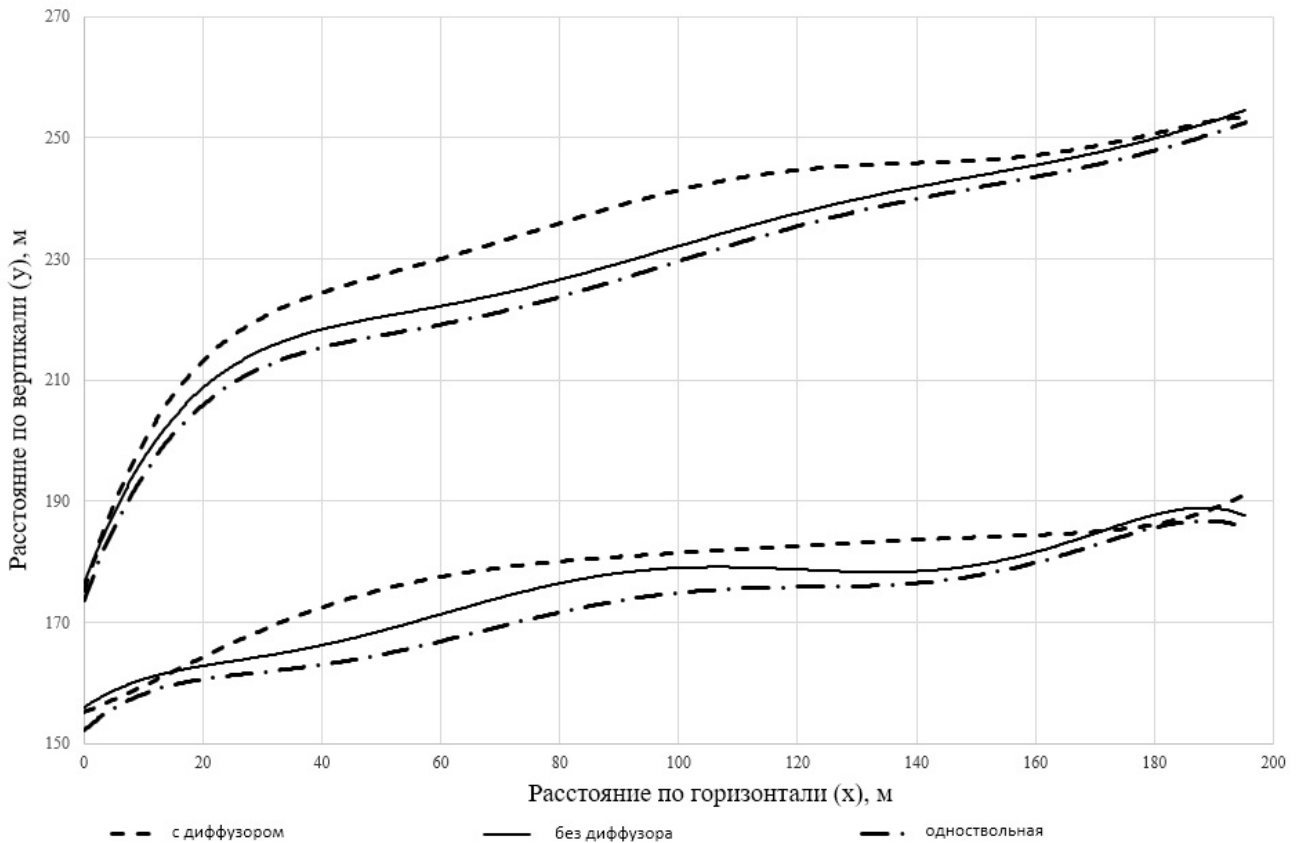


Рисунок 4.3.9 — Верификационный график траектории дымового факела, полученной различными методами

Моделирование траектории дымового факела было произведено также и в нестационарных условиях, где траектория распространения факела рассматривалась в зависимости от времени. Для этого в решателе вместо параметра Steady был выбран параметр Transient. Рассматриваемый временной отрезок – 30 секунд, при этом достаточный уровень сходимости достигался при времени шага в 0,01 секунду и при 50 итерациях на каждый временной шаг, соответственно общее количество временных шагов для выбранного временного отрезка составило 3000 шт. Для создания анимации распространения дымового факела каждые 100 временных шагов производилась запись результатов, что соответствовало 1 секунде временного отрезка. Все остальные параметры были выбраны аналогично представленной ранее стационарной задаче для верифицируемого варианта. Результаты расчёта представлены на рисунке 4.3.10.

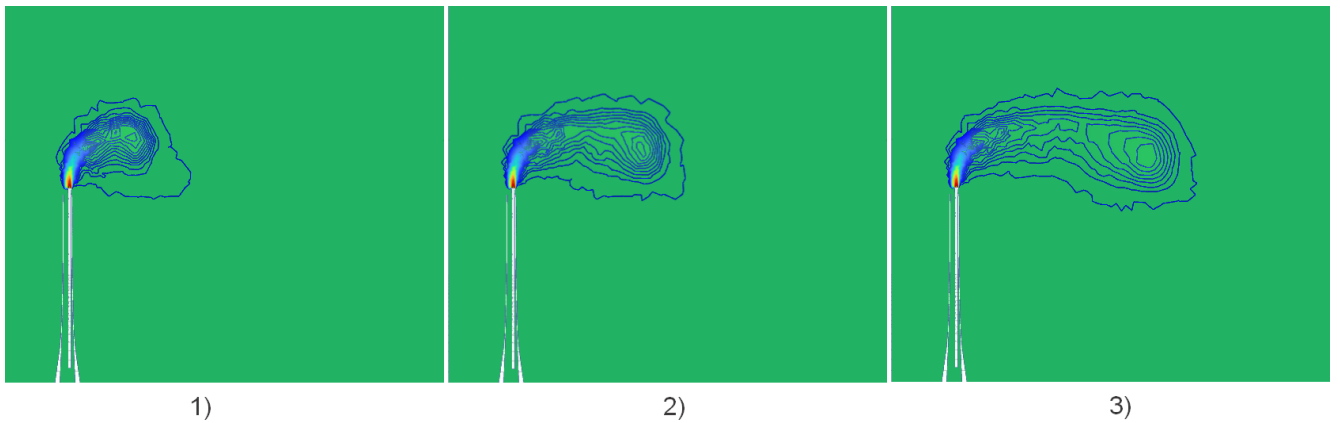


Рисунок 4.3.10 — Расчетные температурные контуры при нестационарной постановке задачи: 1) 10 секунд временного отрезка, 2) 20 секунд временного отрезка, 3) 30 секунд временного отрезка

Для каждой расчетной секунды, как и в условиях реальной атмосферы, в данном случае существуют свои верхние и нижние границы дымового факела, это можно объяснить неравномерностью задаваемого профиля скорости ветра и давления, а также влиянием турбулентности потоков, однако осредненные значения координат точек дымового факела при стационарной и нестационарной постановке отличаются не более чем на 7,8 м, что можно объяснить постоянным характером задаваемых скоростей газов, профилей скорости ветра и атмосферного давления, а также профиля температуры окружающей среды. На начальных этапах наблюдается более вертикальное поднятие факела, но по мере развития процесса теплообмена и перемешивания факел расширится и изменяет свою форму, что соответствует характеру распространения реального дымового факела при схожих условиях.

4.4 Выводы по главе

Развитие и общедоступность спутниковых снимков позволили модернизировать и повысить точность методики теодолитного визирования траектории дымового факела, изложенной в [77].

Была разработана новая методика определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка, которая позволила компенсировать недостатки

теодолитного метода визирования. Методика определения траектории дымового факела по фотоснимку позволяет оценить статичную траекторию, в то время как теодолитное визирование - динамическую. Эти методы дополняют друг друга и в целом повышают точность эксперимента, что позволило верифицировать разработанную новую методику CFD моделирования дымового факела в сносящем потоке воздуха и для различных турбулентных состояний атмосферы. Основная особенность разработанной CFD методики заключается в решении задачи моделирования дымового факела в сносящем потоке воздуха и для различных турбулентных состояний атмосферы в однофазной постановке, в результате этого находятся температурные изолинии, отличные от температуры окружающей среды с точностью до 0,2 °С, после фильтрации которых находятся нижние и верхние границы факела. Подобный подход к решению позволил исследовать большой пространственный объем (13 500 000 м³) при оптимальном использовании мощностей ЭВМ. Кроме того, разработанная модель позволяет исследовать турбулентность как атмосферы, так и турбулентность потоков газа. Модель позволяет учесть особенности формирования дымового факела и выбрать наиболее эффективный вариант выполнения выходной части дымовой трубы. Так в ходе исследования дымовой трубы РК Азино, с использованием разработанной CFD модели, влияния аэродинамических характеристик дымовой трубы на формирование дымового факела было установлено что при одинаковых условиях ствольность и установка диффузора не оказывают существенного влияния на траекторию факела. Показано что принимаемые на основе технико-экономического анализа технические решения по конструкции дымовой трубы не влияют на ее экологические характеристики и добиться этого можно путем установки диффузоров с малым углом сужения. При решении вопроса об установке диффузора нужно исходить исключительно из анализа статического давления в стволах по высоте трубы, а в вопросе определения количества стволов трубы исходить из технико-экономического анализа по методике, приведенной в главе 2, и общей оценки надежности работы оборудования.

Нестационарный подход предоставляет ряд преимуществ при моделировании распространения дымового факела по сравнению со стационарными решениями. Transient-решения позволяют учитывать изменения параметров течения со временем, так как дымовой факел может менять свою форму и интенсивность в зависимости от множества факторов. Такой подход позволяет анализировать динамические явления, такие как образование вихрей и дрейфовых течений, которые могут повлиять на распространение дымового факела, но важно отметить, что при использовании transient-решений необходимо учитывать большее количество данных и времени для вычислений, и соответственно решение таких задач требует наиболее мощных вычислительных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проанализированы статьи зарубежных и отечественных авторов, посвященных исследованию и оптимизации параметров дымовых труб, включая конструктивные характеристики, а также рассмотрены модели распространения газовых выбросов из них. Результаты анализа показывают, что основной параметр дымовой трубы – скорость газов на выходе – не исследовалось в контексте технико-экономических затрат на строительство дымовых труб. В предлагаемых методиках выбор скорости газов на выходе из трубы носит рекомендательный характер и, в основном, она увязана с условиями формирования начального участка дымового факела. По ним нельзя рассчитать оптимальную скорость газов в комплексе с экологическими параметрами и со стоимостными характеристиками дымовой трубы. В то же время многие 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 общих параметров дымовой трубы.

В большинстве рассмотренных нормативных документов приведены рекомендации для установок малой и средней мощности. В них даются упрощенные расчеты и общие рекомендации по выбору параметров трубы. Расчет рассеивания вредных газовых выбросов для крупных установок проводится с помощью метеорологических моделей, компьютерного моделирования и испытаний в аэродинамической трубе с последующим утверждением результатов в государственных регулирующих органах. На сегодняшний день наиболее востребована методология выбора параметров дымовой трубы, разработанная Л.А. Рихтером. Ее основной недостаток - расчеты построены на постоянной стоимости денежных средств (характерная черта экономической модели СССР). В данной работе это методика существенно усовершенствована. Суть усовершенствования заключается в оптимизации скорости дымовых газов с учетом минимальных дисконтированных затрат на строительство и последующую эксплуатацию дымовой трубы.

Представленная в данной работе математическая модель и созданный на ее основе пакет программ позволяют учесть текущие технико-экономические показатели при выборе основных размеров для всей системы дымовых труб ТЭС с несущей железобетонной оболочкой. Методика расчета оптимальной скорости дымовых газов подходит для любой модели развития экономики. Она является универсальной и не зависит от тренда цен и затрат на производство товаров и услуг. Согласно новой методике для расчета скорости газов в качестве исходных данных необходимо использовать актуальную на момент проектирования исходную информацию. Методика верифицирована по условиям планово-распределительной модели экономического развития страны с учетом современных уровней цен на материалы и услуги, которые используются при сооружении дымовых труб со стволами из металла и из кислотоупорных бетонов. Расчетные исследования показали, что при проектировании дымовых труб принимаемые в настоящее время скорости газов существенно завышены.

Выявлены преимущества трехствольных дымовых труб перед дымовыми трубами с большим количеством стволов за счет уменьшения суммарного периметра стволов, при сохранении суммарного расхода дымовых газов. В том случае, когда это допустимо по соображениям надежности и по компоновке оборудования, следует применять возможно меньшее количество стволов. Разработан пакет программ, позволяющий найти оптимальное распределение скоростей газов по стволам трехствольной трубы и рассчитать минимальные суммарные дисконтированные затраты для дымовых труб с разными диаметрами стволов, с разными расходами газов через стволы и различными температурами газов в стволах.

В диссертационной работе выведены формулы для расчета диаметра оболочки дымовой трубы при двух одинаковых и третьем отличающемся по размеру стволах, а также разработана методика расчета диаметра оболочки при стволах трех различных диаметров. Выявлены условия применимости данной методики. Найдено аналитическое решение для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной железобетонной оболочки для

трехствольной и четырехствольной дымовой трубы, для стволов произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами и между стволами и оболочкой и с расчетом свободного пространства для размещения лифта и лестничной клетки. Полученные решения были встроены в основную программу расчета.

Приведен анализ влияния объемных расходов и температур газов по стволам на скорости газов в стволах как при отдельном, так и при совместном истечении. Показано, что при различных расходах и температурах газов в стволах четырехствольной трубы, скорости газов в них следует принимать тоже разными. Сформулированы также условия, при которых в целях унификации стволов этого можно не делать. Разработанные методики выбора диаметров стволов и диаметра оболочки, в зависимости от характеристик газового потока в каждом стволе, позволяют сократить суммарные дисконтированные затраты по сравнению с затратами, рассчитанными традиционными методами. Показано, что учет особенностей гидродинамики в стволах при различных скоростях газов способствует снижению суммарных затрат на 7 – 8 % (30-40 млн руб.) по сравнению с традиционными решениями.

При оптимизации скоростей газов в стволах при постоянной высоте дымовой трубы с сохранением условий выхода дымовых газов выявлен дополнительный потенциал снижения суммарных приведенных затрат за счет установки конфузоров с малым углом сужения.

Развитие и общедоступность спутниковых снимков позволили модернизировать и повысить точность методики теодолитного визирования траектории дымового факела. Разработана новая методика определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка, которая позволила компенсировать недостатки теодолитного метода. Методика определения траектории дымового факела по фотоснимку позволяет оценить статичную траекторию, в то время как теодолитное визирование - динамическую. Эти методы дополняют друг друга и, в целом, повышают точность эксперимента. Предложена новая методика CFD моделирования дымового факела в сносящем потоке воздуха для различных турбулентных состояний атмосферы, которая верифицирована

экспериментальными исследованиями. CFD методика позволяет решить задачу по прогнозированию параметров дымового факела в сносящем потоке воздуха при различных турбулентных состояниях атмосферы. Задача решается в однофазной постановке. Результатами решения являются температурные значения отличные от температуры окружающей среды с отклонением до 0,2 °С, позволяющие построить границы факела. Кроме того, разработанная модель позволяет получить параметры турбулентности как атмосферы, так и потока газа. Модель позволяет учесть особенности формирования дымового факела выходной частью дымовой трубы и оптимизировать ее конструктивные параметры.

РЕКОМЕНДАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Методики, полученные в данной работе, могут быть рекомендованы к использованию в качестве нормативных, а результаты будут полезны специализированным проектным организациям, позволят им существенно модернизировать используемые методики проектирования и технико-экономического анализа по выбору наилучшего варианта для объекта капитального строительства или реконструкции. Для эксплуатирующих многоствольные дымовые трубы организаций данная работа обладает исчерпывающим объемом информации для проведения оптимизации скоростей газов в стволах. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 декабря 2017 г. № 1667/пр "Об утверждении свода правил "Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования". – М.: Минстрой России, 2017. – 10 с.
2. СП 375.1325800.2017. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 30 с.
3. Model Code for Steel Chimneys - the CICIND Chimney Standard. – Zürich: CICIND, 2010. – 120 p. – ISBN 1-902998-16-2.
4. Environment Act 1995: Act Chapter 25 1995. – London: Department of the Environment, H.M.S.O., 1995. – 150 p.
5. Environmental Protection Act 1990, 1993. Technical Guidance Note (Dispersion) D1, Guidance's on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions. – London: HMIP, 1993. – 75 p.
6. The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights. – London: Department of the Environment, H.M.S.O., 1981. – 60 p.
7. The Clean Air Act 1993: Act Chapter 25 1993. – London: Department of the Environment, H.M.S.O., 1993. – 130 p.
8. EPA, Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation) Revised. – Research Triangle Park, NC: USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, 1985. – EPA-450/4-80-023R. – 200 p.
9. EPA, Guideline for Use of Fluid Modeling to Determine Good Engineering Practice Stack Height. – Research Triangle Park, NC: USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, July 1981. – EPA-450/4-81-003. – 150 p.
10. Petersen, R. L. Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height. – In: 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition, Raleigh, NC, June 2015. – 20 p.

11. Greenway, A. R., Cermak, J. E., Petersen, R. L., McCullough, H. C. Physical Modeling Studies for GEP Stack Height Determinations. – In: 74th Annual Meeting of the APCA, Paper No. 81–20.3, CEP80–81 JAP–JEC33, Philadelphia, Pennsylvania, June 21–26, 1981. – 15 p
12. Halitsky, J. A., Petersen, R. L., Taylor, S. D., Lantz, R. B. Nearby Terrain Effects on a Good Engineering Practice Stack Height. – In: 79th Annual APCA Meeting, Minneapolis, Minnesota, 1986. – 12 p.
13. Petersen, R. L., Parce, D. K., West, J. L., Londergan, R. J. Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height. – In: 86th Annual AWMA Conference, Denver, CO, June 14-18, 1993. – 10 p.
14. Petersen, R. L. Fluid Modeling for Good Engineering Practice Stack Height at Homer City Generating Station. – Prepared for TRC Environmental Consultants, Inc., East Hartford, CT, by Cermak Peterka Petersen, Inc., Report No. 86-0338, October, 1987. – 40 p.
15. Snyder, W. H. Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion. – Research Triangle Park, NC: USEPA Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, 1981. – EPA-600/8–81–009. – 50 p.
16. EPA. AERSURFACE User’s Guide. – Research Triangle Park, NC: USEPA Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, 2008. – EPA-454/B–08–001. – 60 p.
17. Petersen, R. L., Beyer-Lout, A. Fluid Modeling Good Engineering Practice Stack Height Determination for the Rhinelander Mill Stack S09. – CPP Report 7835, October 2014. – 30 p.
18. Panofsky, H. A., Dutton, J. A. Atmospheric Turbulence. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984. – 400 p.
19. Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., Brode, R. W., Paumier, J. O. AERMOD: Description of Model Formulation. – Research Triangle Park, NC: USEPA, 2004. – EPA-454/R-03-004. – 100 p.

20. Petersen, R. L. Dispersion Comparability of the Wind Tunnel and Atmosphere for Adiabatic Boundary Layers with Uniform Roughness. – In: Seventh Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Boulder, CO, November 12-15, 1985. – 10 p.
21. Thomas, F. W., Carpenter, S. B., Gartrell, F. E. Stacks—How High? // Journal of the Air Pollution Control Association. – 1963. – Vol. 13, No. 5. – P. 198-204. – DOI: 10.1080/00022470.1963.10468165.
22. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. – Official Journal L 332, 2000. – 50 p.
23. Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. – Ministry of Industry, Spain, 2004. – 30 p.
24. Sweden Environmental Protection Agency regulations amending the Environmental Protection Agency regulations (NFS 2002:26) on air emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides and dust from combustion installations with a rated thermal input of 50 MW or more, of 31st March 2010. – 2010. – 25 p.
25. Technical Instructions on Air Quality Control- TA Luft of 24 July 2002. – Federal Ministry of Environment, Germany, 2002. – 100 p.
26. Central Board for the Prevention and Control of Water Pollution. A Method to Determine the Minimum Stack Height. – Control of Urban Pollution Series: CUPS/13/1984-85. – New Delhi, 1985. – 20 p.
27. Central Pollution Control Board. Report on Design and Operating Parameters of Electrostatic Precipitators. – Programme Objective Series: PROBES/45/1992. – September 1994. – P. 3, 20-22.
28. Central Pollution Control Board. Pollution Control Acts, Rules, and Notifications Issued Thereunder. – Pollution Control Series: PCL/2/1992 (Volume-I). – 1996. – 150 p.

29. George, K. V., Chalapati Rao, C. V., Labhsetwar, P. K., Hasan, M. Z. Minimum Stack Height Formula for Coal Based Thermal Power Plant in Northern India // Journal of the Institution of Engineers (India), Environmental Engineering Division. – 2002. – Vol. 82. – P. 31-34.
30. National Standard of the People's Republic of China. GB 13223–2011: Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants. – Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC, 2011. – 50 p. – (In Chinese).
31. National Standard of the People's Republic of China. GB 13223–2003: Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants. – Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC, 2003. – 45 p. – (In Chinese).
32. National Standard of the People's Republic of China. HJ 2000-2010: Technical Guidelines for Air Pollution Control Projects. – Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC, 2010. – 60 p. – (In Chinese).
33. Von Hohenleiten, H. L., Kent, R. H. Economic and Engineering Considerations in the Design of Stacks for Good Gas Dispersion // Air Repair. – 1954. – Vol. 3, No. 3. – P. 195-200. – DOI: 10.1080/00966665.1954.10467628.
34. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. – JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, Final Draft, June 2016. – 300 p.
35. РД 52.04.212-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД–86) / под ред. М. Е. Берлянда и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 66 с.
36. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734). – 2017. – 30 с.
37. Шагидуллин, А. Р., Гилязова, А. Ф., Амирянова, Г. Ф. и др. Расчет зоны влияния выбросов в атмосферный воздух из источников Нижнекамского

промышленного узла // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 15. – С. 177-180. – EDN WLPCFT.

38. Лысова, О. В. Сравнительный анализ Методов расчетов рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе и Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) / О. В. Лысова, А. В. Матешева, В. М. Медведева // Проблемы безопасности российского общества. – 2022. – № 1(37). – С. 18-25. – EDN OVHPIQ.

39. Рихтер, Л. А. Определение стоимости дымовых труб ТЭС и оптимизация скоростей газов в газоотводящем стволе / Л. А. Рихтер, Э. П. Волков, Е. И. Гаврилов, В. Г. Лебедев, В. Б. Прохоров // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 12-16.

40. Holmes, N. S., Morawska, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available // Atmospheric Environment. – 2006. – Vol. 40, Issue 30. – P. 5902-5928. – ISSN 1352-2310. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>.

41. Stepanenko, S., Voloshin, V. Эйлерова K-GDM модель расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий // Ukrainian Hydrometeorological Journal. – 2009. – P. 5-14.

42. Овсянников, В. М. Уравнение неразрывности Эйлера с членами высокого порядка малости по времени течения // Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. – 2020. – Том 182. – С. 95-100. – DOI: <https://doi.org/10.36535/0233-6723-2020-182-95-100>.

43. Белов, И. В., Беспалов, М. С., Ключкова, Л. В., Павлова, Н. К., Сузан, Д. В., Тишкин, В. Ф. Сравнение моделей распространения загрязнений в атмосфере // Матем. моделирование. – 1999. – Том 11, № 8. – С. 52-64.

44. Зарипов, Ш. Х., Марданов, Р. Ф., Гильфанов, А. К., Шарафутдинов, В. Ф., Никоненкова, Т. В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей

среде / Ш. Х. Зарипов, Р. Ф. Марданов, А. К. Гильфанов, В. Ф. Шарафутдинов, Т. В. Никоненкова. – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 47 с.

45. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

46. Бызова, Н. Л., Гаргер, Е. К., Иванов, В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеивания примеси. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 275 с.

47. Замай, С. С., Якубайлик, О. Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города: Учеб. пособие. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 1998. – 109 с.

48. Mensink, C., Colles, A., et al. Integrated air quality modelling for the assessment of air quality in streets against the council directives // *Atmospheric Environment*. – 2003. – Vol. 37, No. 37. – P. 5177-5184.

49. Gidhagen, L., Johansson, C., et al. Simulation of NO_x and ultrafine particles in a street canyon in Stockholm, Sweden // *Atmospheric Environment*. – 2004. – Vol. 38, No. 14. – P. 2029-2044.

50. Темам, Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ. – М.: Мир, 1981. – 408 с.

51. Eymard, R., Gallouët, T., Herbin, R. Finite volume methods // In P. G. Ciarlet, J. L. Lions (Eds.), *Techniques of Scientific Computing, Part III, Handbook of Numerical Analysis*. – Amsterdam: North-Holland, 2000. – Vol. VII. – P. 713-1020.

52. Liu, W. K., Li, S., Park, H. S. Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2022. – Vol. 29, No. 6. – P. 4431-4453. – DOI: 10.1007/s11831-022-09740-9. – ISSN 1134-3060. – S2CID 235794921.

53. Simon, F., Deck, S., Guillen, P., Sagaut, P. Reynolds-averaged Navier-Stokes/large-eddy simulations of supersonic base flow // *AIAA Journal*. – 2006. – Vol. 44. – P. 2578-2590.

54. Periañez, R. A particle-tracking model for simulating pollutant dispersion in the Strait of Gibraltar // *Marine Pollution Bulletin*. – 2004. – Vol. 49, Issues 7–8. – P. 613-623. – ISSN 0025-326X. – DOI: 10.1016/j.marpolbul.2004.04.003.
55. Mofakham, A. A., Ahmadi, G. On random walk models for simulation of particle-laden turbulent flows // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2020. – Vol. 122. – ISSN 0301-9322. – DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103157.
56. Пергаменщик, Б. К., Лесников, И. А. Газоотводящие (дымовые) трубы ТЭС: возведение, ремонт, реконструкция, демонтаж: учебное пособие / М-во образования и науки Росс. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. – Москва: МГСУ, 2014. – 200 с. – ISBN 978-5-7264-0859-0.
57. Дужих, Ф. П., Осоловский, В. П., Ладыгичев, М. Г. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с. – ISBN 5-9845701-0-6.
58. Рихтер, Л. А. Газовоздушные тракты тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭАИ, 1984. – 263 с.
59. Рихтер, Л. А., Елизаров, Д. П., Лавыгин, В. М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.
60. Model Code for GRP/FRP Chimneys. – Revision 1 – September 2018.
61. Model Code for Concrete Chimneys, with Commentaries Part A - The Shell. – Second Edition, Revision 1 – August 2001. – ISBN 1 902998 13 8.
62. Model Code for Concrete Chimneys, with Commentaries Part B - Brickwork Linings. – December 1991. – ISBN 1 902998 01 4.
63. Model Code for Concrete Chimneys, with Commentaries Part C - Steel Liners. – December 1995. – ISBN 1 902998 02 2.
64. British Electricity International. Civil engineering and building works // *Station Planning and Design*. – 1991. – P. 178–302. – DOI: 10.1016/b978-0-08-040511-7.50010-3.
65. Walker, E., Blaen, R. J. Industrial boilers // *Plant Engineer's Reference Book*. – 2002. – P. 10–1–10–28. – DOI: 10.1016/b978-075064452-5/50065-1.

66. Методические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами). Кн. 1: Методические особенности оценки эффективности проектов в электроэнергетике. – М.: НЦПИ, 2008

67. Экономика энергетики: учеб. пособие / Н.Д. Рогалев, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова, Г.Н. Курдюкова, В.В. Бологова, О.Ю. Пономарева; под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2005. – 456 с.

68. ОК 013-2014 (СНС 2008). Общероссийский классификатор основных фондов. – М.: Росстандарт, 2014. – 200 с.

69. Гаврилов, Е.И. О расчете высоты дымовых труб ТЭС // Теплоэнергетика. – 1980. – № 3. – С. 77–80.

70. Гаврилов, Е.И. Аэродинамические характеристики газоотводящих стволов и выходной части дымовых труб большой мощности: дис. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1973. – 150 с.

71. Грибков, А.М., Гаврилов, Е.И. Выбор оптимальных размеров дымовых труб и внешних газоходов: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 1986. – 200 с.

72. ГЭСН 09-06-033-02. Монтаж труб вытяжных, дымовых и вентиляционных диаметром до 3250 мм из листовой стали высотой до 45 м [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.defsmeta.com/rgsn14c/gsn_09/giesn-09-06-033-02.php.

73. СНиП II-35-76. Свод правил. Котельные установки. – М.: Стандартинформ, 2017. – 120 с.

74. Raifaizen, Claude H. A Simpler Proof of Heron's Formula // Mathematics Magazine. – 1971. – Vol. 44. – P. 27–28.

75. Рихтер, Л. А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы. – М.: Энергия, 1975. – 312 с.

76. Hoehn, L. 84.02 Circumradius of a Cyclic Quadrilateral // The Mathematical Gazette. – 2000. – Vol. 84, No. 499. – P. 69–70. – DOI: 10.2307/3621477.

77. Грибков, А.М. Натурные исследования распространения дымового факела одноствольных и многоствольных труб мощных ТЭС: диссертация кандидата технических наук: 05.14.01. – Москва, 1978. – 150 с.

78. ANSYS Fluent, 23 R1. User's and Theory Guide. – Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc., 2023. – 500 с.

79. Spalart, P., Allmaras, S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – Reno, USA, 1992. – AIAA Paper 92-0439.

80. Jones, W.P., Launder, B.E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15, No. 2. – P. 301–314. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90076-2)

81. Скибина, Н.П. Численное исследование нестационарного течения газа в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с учетом процесса теплообмена / Н.П. Скибина // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 6. – С. 50–61. – DOI: 10.25743/ICT.2020.25.6.003. – EDN: GYWIQZ.

82. Wilcox, D.C. Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models // AIAA Journal. – 1988. – Vol. 26, No. 11. – P. 1299–1310. – DOI: <https://doi.org/10.2514/3.10041>

83. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605. – DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>

84. Walters, D.K., Cokljat, D. A three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations of transitional flows // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 12. – P. 121401 (14 pages). – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2979230>

85. A correlation-based transition model using local variables. Part 1. Model formulation / F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki, Y.B. Suzen, P.G. Huang, S. Volker // Journal of Turbomachinery. – 2006. – Vol. 128, No. 3. – P. 413–422. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2184352>

86. Моделирование начального участка дымового факела от четырехствольной трубы ТЭС / А.М. Грибков, Н.Д. Чичирова, Д.И. Федоренков // Теплоэнергетика. – 2020. – № 10. – С. 48–57. – DOI: 10.1134/S0040363620100045

87. Рыхлов, А.Б. Закономерности изменения средней скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на ЮВ ЕТР для решения задач ветроэнергетики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 20. – С. 89–99.

88. Васьков, А.Г., Дерюгина, Г.В., Чернов, Д.А. Моделирование вертикального профиля ветра по данным аэрологических метеостанций России // Энергосбережение — теория и практика: Труды VI Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. М., 2012.

89. Белокрылова, Т.А. Об изменении скоростей ветра на территории СССР // Труды ВНИИГММЦД. 1989. Вып. 150. С. 38–47.

90. Берлянд, М.Е. Теория изменения ветра с высотой // Труды НИУ ГУГМС. 1947. Сер. 1. Вып. 25.

91. Ветроэнергетика: Новейшие разработки / под ред. Д. де Рензо; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.

92. Лайтхман, Д.Л., Орленко, Л.Р., Цейтлин, Т.Х. Методы оценки ветровых ресурсов по полю давления // Методы разработки ветроэнергетического кадастра. – М.: Изд. АН СССР, 1963. С. 5–25.

93. De Marrais, S.A. Wind profile at Brookhaven National Laboratory // J. Meteorology. 1959. Vol. 16, № 2. P. 117–123.

94. Diem, M., Zedler, P. Der Wind in der bodennahen Schicht bis 100 m Höhe in Karlsruhe und Mühlacker // Berichte Deutsch. Wetterdienst. 1964. № 97, Bd. 13.

95. Волков, Э.П., Грибков, А.М., Сапаров, М.И. Распространение дымового факела в процессе эксплуатации тепловой электростанции // Теплоэнергетика. 1979. № 3. С. 33–36.

96. Волков, Э.П., Гаврилов, Е.И., Грибков, А.М. Модель расчета траектории дымового факела от труб мощных ТЭС // Изв. вузов. Энергетика. 1984. № 2. С. 88–93.

97. Грибков, А.М. Влияние сил инерции на форму траектории дымового факела // Межвед. сб. тр. МЭИ. 1984. № 50. С. 101–105.

98. Грибков, А.М., Тюклин, Д.С. Подъем дымовых газов при отсутствии ветра // Электрические станции. 2009. № 10. С. 23–27.

99. Грибков, А.М. Наилучшие доступные технологии при использовании топлива на ТЭС: учебное пособие / А.М. Грибков. – Казань: КГЭУ, 2022. – 219 с.

100. Грибков, А.М., Емелин, И.В. Расчет средней температуры в поперечном сечении дымового факела ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2002. № 3–4. С. 24–28.

101. 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). С. 131–145. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145>

102. 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

103. 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). С. 3–13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-3-13>

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

105. Zroichikov, N.A., Gribkov, A.M., Saparov, M.I. et al. 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>

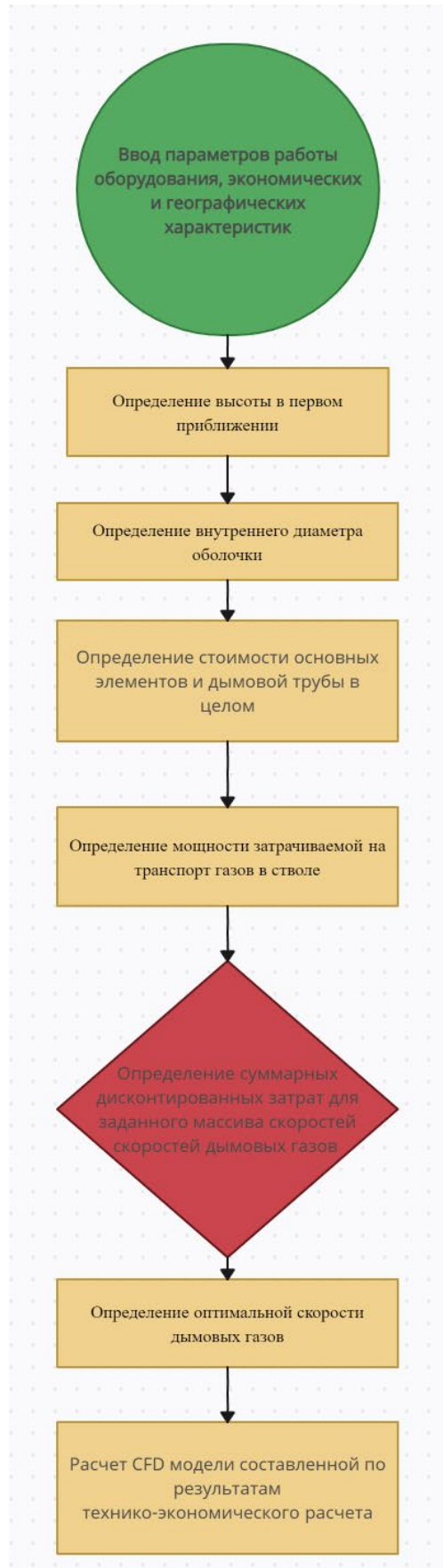
106. Мирсалихов, К.М., Федоренков, Д.И., Грибков, А.М. Влияние экологических и экономических факторов на выбор оптимальных размеров

четырёхствольных 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ**Приложение 1. Блок-схема методики определения основных параметров дымовой трубы**

Приложение 2. Основные программные решения для поиска минимального диаметра оболочки дымовой трубы с тремя стволами различного диаметра

$$e := \frac{d1 + d3}{2} + 1.2$$

$$p := \frac{(f + n + e)}{2}$$

$$s := \begin{cases} \text{return "Отрицательное подкоренное значение s"} & \text{if } [p \cdot (p - f) \cdot (p - n) \cdot (p - e)] < 0 \\ s \leftarrow \sqrt{[p \cdot (p - f) \cdot (p - n) \cdot (p - e)]} \end{cases}$$

$$s = 2.712$$

$$r := d1 + d2 + d3 \quad ds := 1$$

$$r := \begin{cases} \text{while } ds > 0.0005 \\ \quad \text{no} \leftarrow r - \frac{d1}{2} - 1 \\ \quad \text{eo} \leftarrow r - \frac{d2}{2} - 1 \\ \quad \text{fo} \leftarrow r - \frac{d3}{2} - 1 \\ \quad \text{p1} \leftarrow \frac{(\text{no} + \text{eo} + f)}{2} \\ \quad \text{return "Отрицательное подкоренное значение S1"} & \text{if } [p1 \cdot (p1 - \text{no}) \cdot (p1 - \text{eo}) \cdot (p1 - f)] < 0 \\ \quad \text{s1} \leftarrow \sqrt{[p1 \cdot (p1 - \text{no}) \cdot (p1 - \text{eo}) \cdot (p1 - f)]} \\ \quad \text{p2} \leftarrow \frac{(\text{fo} + \text{eo} + n)}{2} \\ \quad \text{return "Отрицательное подкоренное значение S2"} & \text{if } [p2 \cdot (p2 - \text{fo}) \cdot (p2 - \text{eo}) \cdot (p2 - n)] < 0 \\ \quad \text{s2} \leftarrow \sqrt{[p2 \cdot (p2 - \text{fo}) \cdot (p2 - \text{eo}) \cdot (p2 - n)]} \\ \quad \text{p3} \leftarrow \frac{(\text{fo} + \text{no} + e)}{2} \\ \quad \text{return "Отрицательное подкоренное значение S3"} & \text{if } [p3 \cdot (p3 - \text{fo}) \cdot (p3 - \text{no}) \cdot (p3 - e)] < 0 \\ \quad \text{s3} \leftarrow \sqrt{[p3 \cdot (p3 - \text{fo}) \cdot (p3 - \text{no}) \cdot (p3 - e)]} \\ \quad \text{ss} \leftarrow s1 + s2 + s3 \\ \quad \text{ds} \leftarrow |ss - s| \\ \quad r \leftarrow r - 0.04 \cdot (ss - s) \end{cases}$$

$$r = 3.187$$

$$d := 2 \cdot r = 6.374$$

Приложение 3. Основные программные решения для поиска минимального диаметра оболочки дымовой трубы с четырьмя стволами различного диаметра

```

----- Расстояние между точками 8 и 10 L910 = f1 -----
ni := cos(U1Ri)
f1i := √(e2 + c2 - 2 · e · c · ni)
df1i := f1i + L68 + L710
Треугольник 8-10-11
p81011i := (c + e + f1i) / 2
x181011i := √((p81011i - e) · (p81011i - f1i) / (p81011i · (p81011i - c)))
x281011i := atan(x181011i)
x381011i := x281011i / °
u2i := x381011i · 2
Треугольник 8-9-10
p8910i := (a + b + f1i) / 2
x18910i := √((p8910i - a) · (p8910i - f1i) / (p8910i · (p8910i - b)))
x28910i := atan(x18910i)
x38910i := x28910i / °
u3i := x38910i · 2
U4i := u2i + u3i
Треугольник 8-9-11
U4Ri := U4i · °
n8911i := cos(U4Ri)
f2i := √(e2 + a2 - 2 · e · a · n8911i)
df2i := f2i + L511 + L49
ddi := df1i - df2i
p8911i := (a + e + f2i) / 2
x18911i := { √((p8911i - a) · (p8911i - f2i) / (p8911i · (p8911i - e))) if p8911i · (p8911i - e) ≠ 0
           √((p8911i - a) · (p8911i - f2i) / 0.000000000000000000000001) otherwise
x28911i := atan(x18911i)
x38911i := x28911i / °
u5i := 2 · x38911i
u6i := 180 - u5i - u3i

```


Приложение 4. Акт об использовании результатов диссертационной работы в филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1



Акт об использовании результатов диссертационной работы Мирсалихова К.М. по теме «Влияние аэродинамических факторов и условий формирования дымового факела на основные параметры дымовых труб ТЭС»

Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 подтверждает использование результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Влияние аэродинамических факторов и условий формирования дымового факела на основные параметры дымовых труб ТЭС» выполненной в ФГБОУ ВО «Казанском государственном энергетическом университете» на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» с целью разработки новых технико-экономических решений по проектированию дымовых труб ТЭС с учетом влияния аэродинамических факторов и условий формирования дымового факела.

Важность данной работы обусловлена разработанной методикой определения скорости газов в газоотводящих стволах дымовых труб ТЭС, позволяющая связать экономические условия и технические решения, отличающаяся учетом конструкционных и гидродинамических особенностей; найденным аналитическим решением 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; установленной взаимосвязью между индивидуальными условиями течения газов в стволах многоствольных дымовых труб и их размерами; разработанной методикой определения траектории дымового факела с использованием фотоснимка, позволяющая оценить параметры дымового факела в статичном состоянии; разработанной методикой 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; разработанной новой методикой расчета основных параметров дымовых труб с несущей железобетонной оболочкой различных применяемых конструкций с учетом технико-экономических показателей; в работе 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; разработанной методикой 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

КАЗАНСКАЯ ТЭЦ-1

ФИЛИАЛ АО «ТАТЭНЕРГО» ул.Тукая, д. 125, г. Казань, Республика Татарстан, индекс 420054
«ТАТЭНЕРГО» АЖ ФИЛИАЛЫ Тукай ур., 125 нче йорт, Казан шәһәре, Татарстан Республикасы, индекс 420054
+7 843 202-48-59, +7 843 202-47-65 (факс) E-mail: office@ktec1.tatenergo.ru www.tatenergo.ru, ИНН 1657036630,
КПП 165902001, р/сч 40702810643240000050 в Филиале Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде к/сч 30101810200000000837 БИК 042202837

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.

Результаты диссертационной работы будут использованы в филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 для объектов модернизации, реконструкции и строительства вновь возводимых дымовых труб.



Директор

И.о. главного инженера

Начальник ПТО

[Handwritten signatures]

В.П. Тюклин

Р.Е. Безруков

Н.Ю. Кожарин

КАЗАНСКАЯ ТЭЦ-1

ФИЛИАЛ АО «ТАТЭНЕРГО» ул.Тукая, д.125, г.Казань, Республика Татарстан, индекс 420054
«ТАТЭНЕРГО» АЖ ФИЛИАЛЫ Тукай ур., 125 нче йорт, Казан шәһәре, Татарстан Республикасы, индекс 420054
 +7 843 202-48-59, +7 843 202-47-65 (факс) E-mail: office@ktec1.tatenergo.ru www.tatenergo.ru, ИНН 1657036630,
 КПП 165902001, р/сч 40702810643240000050 в Филиале Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде к/сч 30101810200000000837 БИК 042202837