

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Анализ эффективности и надежности воздухоподогревателей котельных агрегатов

УДК 621.184.4-192

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Кривошей Дмитрий Викторович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Голдаев С.В.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
Р3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
Р8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
Р9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.

P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ТПТ
Кузнецов Г.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
5Б2Б	Кривошей Дмитрий Викторович

Тема работы:

Анализ эффективности и надежности воздухоподогревателей котельных агрегатов

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.16

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – трубчатые и регенеративные воздухоподогреватели;
Предмет исследования – эффективность и надежность воздухоподогревателей в зависимости от различных параметров и характеристик

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Описание конструкции воздухоподогревателей и принципа их работы.</p> <p>На основе автоматизированных методик выполнить параметрический анализ воздухоподогревателей: установить влияние конструктивных параметров, типа топлива, режима работы котельного агрегата на эффективность и надежность воздухоподогревателей</p>
<p>Перечень графического материала</p>	<p>20 слайдов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>26.02.2016</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Голдаев С.В.	д.ф.-м.н		26.02.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Кривошей Дмитрий Викторович		26.02.2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 66 с., 14 рис., 2 табл., 29 источников, приложения отсутствуют.

Ключевые слова: воздухоподогреватель, анализ, эффективность, надежность, характеристика, параметр, автоматический расчет.

Объектом исследования являются трубчатые и регенеративные воздухоподогреватели котельных агрегатов.

Цель работы – проведение анализа работы воздухоподогревателей при помощи автоматизированных методик расчета и оценка их эффективности и надежности в зависимости от влияния различных факторов.

Реализована методика автоматического конструкторского и поверочного расчетов.

Выявлено влияние различных факторов на работу воздухоподогревателей, таких как конструктивные характеристики, режим работы котла.

Основные технологические характеристики: автоматический расчет характеристик воздухоподогревателей выполнен в среде программирования PascalABC.NET

Степень внедрения: планируется использовать результаты в учебном процессе.

Область применения: энергетические предприятия.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в выявлении эффективных параметров воздухоподогревателей, параметров режима работы котельного агрегата, типа топлива в зависимости от типа используемого воздухоподогревателя.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1. Конструкция и принцип действия воздухоподогревателей котельных агрегатов	10
1.1 Общие сведения	10
1.2 Конструкция трубчатых воздухоподогревателей	13
1.3 Конструкция регенеративных воздухоподогревателей	15
2. Методика теплового расчета воздухоподогревателей	18
2.1 Основные расчетные формулы	18
2.2 Порядок конструкторского расчета	19
2.3 Порядок поверочного расчета	21
3. Методика аэродинамического расчета	24
3.1 Расчет сопротивления трубчатого воздухоподогревателя	25
3.2 Расчет сопротивления регенеративного воздухоподогревателя	27
4. Результаты и обсуждение автоматических расчетов	28
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	36
4.1 SWOT-анализ	37
4.2 Экспертная оценка	38
4.3 Календарный план	42
4.4 Бюджет, смета проекта	44
4 Социальная ответственность	48
5.1 Воздействие электромагнитного излучения	49
5.2 Освещение	52
5.3 Микроклимат помещения	53
5.4 Источники шума	55
5.5 Электробезопасность	55

5.6 Пожарная безопасность	57
5.7 Региональная безопасность	58
5.8 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	59
5.9 Расчет искусственного освещения для помещения	61
Заключение	64
Список используемой литературы	66

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается обострение дефицита природных ресурсов, которое приводит к необходимости более эффективного использования топлива, уменьшения металлоемкости конструкций, оборудования, снижения потерь металла из-за коррозии [1].

Воздухоподогреватели котельных агрегатов являются теми устройствами, совершенствование которых может принести большой вклад в решение вышеперечисленных проблем.

На изготовление воздухоподогревателей уходит до 30-40 % всего металла поверхностей нагрева котельного агрегата и до 20 % металла всего котельного агрегата [2].

Воздухоподогреватель является конечной поверхностью теплообмена котла и определяет степень утилизации теплоты продуктов сгорания. Кроме того, от степени подогрева воздуха зависит полнота сгорания топлив.

Таким образом, воздухоподогреватель непосредственно влияет на экономичность работы котельного агрегата.

Цель работы: при помощи автоматизированных методик расчета проанализировать работу воздухоподогревателей разных типов и оценить их эффективность и надежность [1].

1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

1.1 Общие сведения

Температура дымовых газов за водяным экономайзером мощных котельных агрегатов составляет порядка 350...400 °С. В воздухоподогревателе она снижается до 140-160 °С [3]. Теплота, отданная газами воздуху, возвращается в топку котла. Подача горячего воздуха в топку котла значительно интенсифицирует процесс горения топлива и, как следствие, обеспечивает уменьшение топочных потерь теплоты.

Благодаря воздухоподогревателям использование теплоты, выделяемой при сгорании топлива, повышается на 10-15%, и КПД современных агрегатов достигают 92-94% [4]. Помимо этого, благодаря подогреву воздуха повышается температура в топке, увеличиваются температурные напоры в тракте котла и, следовательно, уменьшается масса дорогостоящих поверхностей нагрева, работающих под большим давлением [3].

Оптимальная температура подогрева воздуха в зависимости от типа топлива колеблется в пределах 250–400 °С [5]. В связи с этим воздухоподогреватели имеют низкие температурные напоры, что приводит к установке больших поверхностей нагрева.

Повышение КПД котлоагрегата за счет снижения температуры уходящих газов приводит к тому, что холодная часть воздухоподогревателя имеет температуру стенки ниже температуры точки росы дымовых газов при сжигании сернистых топлив. В связи этим возникает коррозия и загрязнение этой части, особенно при сжигании сернистого мазута [6]. Снижение температуры точки росы возможно при газоплотном исполнении котлоагрегата, усовершенствованной конструкции топочных и горелочных

устройств, позволяющих сжигать мазут при малых избытках воздуха. Это позволяет снизить температуру уходящих газов.

При снижении температуры уходящих газов на 20 °С КПД котельного агрегата увеличивается на 1% [7], поэтому проведение мероприятия по повышению эффективности и надежности влияют очень большую роль в повышении эффективности котельного агрегата в целом.

Существуют два принципа передачи теплоты в воздухоподогревателе от газов к воздуху: рекуперативный и регенеративный. Соответственно, существуют два основных типа воздухоподогревателей: трубчатый (ТВП) и регенеративный вращающийся (РВП). Основными элементами рекуперативных воздухоподогревателей являются стальные трубки, скомпонованные в кубы, а основным элементом регенеративных воздухоподогревателей является вращающийся ротор, наполненный набивкой.

Рекуперативные воздухоподогреватели являются наиболее простыми теплообменниками. В процессе передачи теплота проходит непрерывно через стенку, одну сторону которой омывают газы, а другую – воздух. Главными достоинствами ТВП являются простота их конструкции, упрощающая изготовление и эксплуатацию, и достаточно высокая плотность, что обеспечивает меньший переток воздуха в газоходы котла по сравнению с регенеративными воздухоподогревателями. Однако при этом ТВП имеет большую массу и занимает большой объем. Масса наиболее крупных ТВП достигает 2000 т [8]. При значительной коррозии «холодного конца» появляются заметные перетоки воздуха в газовый тракт, а замена кубов трубчатого воздухоподогревателя является весьма трудоемкой операцией. Трубчатые воздухоподогреватели могут быть одноходовыми (по воздуху) и многоходовыми. Они также могут быть однопоточными и многопоточными. ТВП размещают, как правило, в опускном газоходе котла [4].

Регенеративные вращающиеся воздухоподогреватели состоят из ротора с нагревательной набивкой (металлической, керамической и др.). Ротор с

набивкой разделен на две части. В одну из них (через горловину в крышке) поступают дымовые газы, а в другую (также через горловину) поступает воздух. Дымовые газы непрерывно движутся сверху вниз, а воздух (также непрерывно) – снизу вверх. Ротор воздухоподогревателя медленно вращается на своем валу с частотой $0,008-0,065 \text{ с}^{-1}$ [9]. Часть набивки ротора, омываемая потоком дымовых газов, нагревается, а затем, при переходе в поток воздуха, отдает ему свою теплоту. В итоге организуется непрерывный нагрев воздуха за счет теплоты, аккумулированной нагревательной набивкой ротора в газовом потоке. Регенеративные воздухоподогреватели характеризуются диаметром ротора, который может быть небольшим (2-3 м), так и достаточно большой величины (до 17 м) [9]. Основными достоинствами регенеративных воздухоподогревателей считаются их компактность, меньшая удельная металлоемкость и относительно небольшое аэродинамическое сопротивление, а также независимость присосов воздуха от коррозии поверхности теплообмена.

Размещают регенеративные воздухоподогреватели в специальном помещении за пределами котла.

Благодаря применению профилированных листов набивки в РВП удается добиться высокой интенсификации теплообмена. К недостаткам РВП можно отнести сложность уплотнительных устройств и большую массу вращающегося ротора, которая требует разработки специального привода и подшипников большой грузоподъемности. Размещают регенеративные воздухоподогреватели в специальном помещении за пределами котла.

В зависимости от необходимой степени подогрева воздуха может применяться одноступенчатая или двухступенчатая компоновка.

При одноступенчатой компоновке воздухоподогреватель располагают за экономайзером. При двухступенчатой компоновке воздухоподогреватель разделяют на две части, а между ними располагается ступень экономайзера

Выбор компоновки воздухоподогревателя в газоходе определяется необходимостью подогрева воздуха до той или иной температуры.

В одной ступени воздухоподогревателя возможно осуществить нагрев воздуха не более чем до 300-320 °С [10]. Это можно объяснить следующим.

Как известно, объем подогреваемого воздуха и его теплоемкость всегда меньше объема и теплоемкости греющих продуктов сгорания. Поэтому отношение водяных эквивалентов воздуха и дымовых газов всегда меньше единицы. Отсюда следует, что воздух в воздухоподогревателе греется быстрее, чем охлаждаются дымовые газы.

При таких условиях нагрев воздуха сопровождается непрерывным уменьшением разности температур и воздуха и ее значение на горячей стороне воздухоподогревателя может оказаться очень низким. Низкой будет и средняя разность температур.

1.2 Конструкция трубчатых воздухоподогревателей

Трубчатые воздухоподогреватели изготавливаются из стальных труб, собранных в секции (кубы). Дымовые газы проходят внутри труб. Воздух движется в межтрубном пространстве перпендикулярно движению газов (перекрестный ток). Концы труб при помощи сварки закреплены в трубных досках. При помощи промежуточных трубных досок и перепускных коробов осуществлено трехходовое движение воздуха. Как известно, наиболее компактным является теплообменник, работающий по схеме противотока, однако в ТВП это осуществить трудно. Обычно в воздухоподогревателях имеет место от одного до четырех ходов воздуха. Простейший (одноходовой) воздухоподогреватель работает по перекрестной, наименее выгодной схеме [11]. В таком воздухоподогревателе трудно достичь оптимальных скоростей воздуха, а температурный напор наименьший, что требует большей поверхности теплообмена. При четырехходовом движении воздуха работа воздухоподогревателя близка к противотоку. При этом достигается оптимальная скорость воздуха и значительное повышение температурного напора, в результате чего при одной и той же тепловой мощности воздухоподогреватель будет более компактным и легким по сравнению с

одноходовым. Более четырех ходов в ТВП не делают, так как это усложняет конструкцию, приводит к возрастанию сопротивления по воздушной стороне, большая доля воздуха перетекает при этом через промежуточные трубные доски, что снижает эффективность воздухоподогревателя [12].

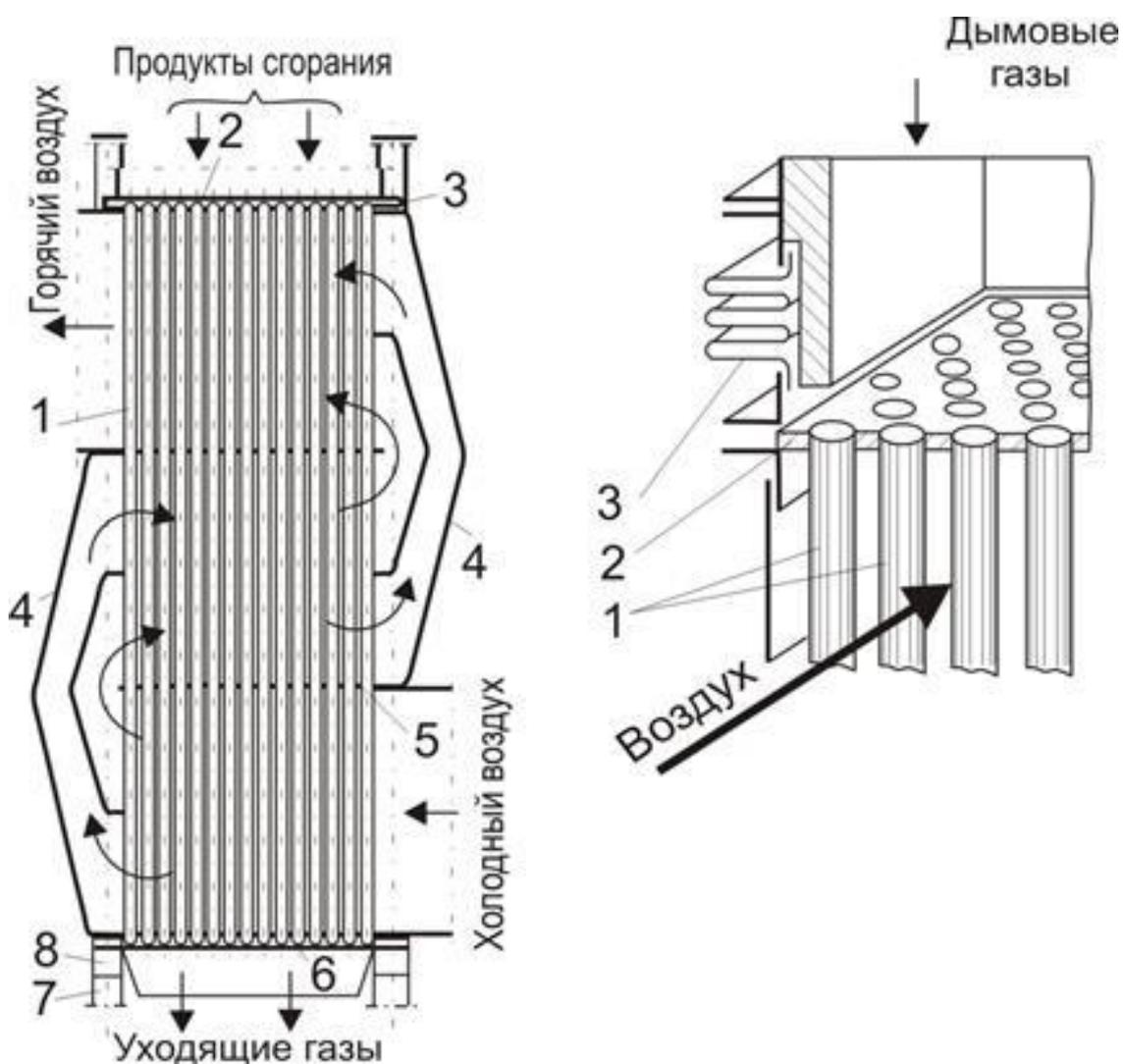


Рис. 1. 1 – стальные трубы; 2, 6 – верхняя и нижняя трубные доски; 3 – компенсатор; 4 – воздухоперепускной короб; 5 – промежуточная трубная доска; 7, 8 – опорные рамы и колонны.

Верхняя трубная доска делается подвижной, что вызвано значительным расширением труб при работе котла. Трубы обычно устанавливаются в шахматном порядке, реже – в коридорном.

При необходимости высокого подогрева воздуха устанавливают двухступенчатые воздухоподогреватели.

В котлах большой производительности для создания относительно малогабаритных ТВП применяется многопоточная схема подвода воздуха, которая позволяет уменьшить высоту одного хода, увеличить число ходов воздуха и тем самым повысить температурный напор [9].

1.3 Конструкция регенеративных воздухоподогревателей

Основным элементом РВП является ротор, вращающийся со скоростью 1,5-3 об/мин. Ротор разделен радиальными и аксиальными перегородками на ячейки, которые наполняются набивкой – стальными профильными листами толщиной 0,5-1,2 мм [13]. Дымовые газы, выходящие из котла с высокой температурой, проходят между листами и нагревают их. Нагретые листы вращающимся ротором переносятся на воздушную сторону, где отдают свое тепло воздуху. Воздух поступает в воздухоподогреватель по схеме противотока [13].

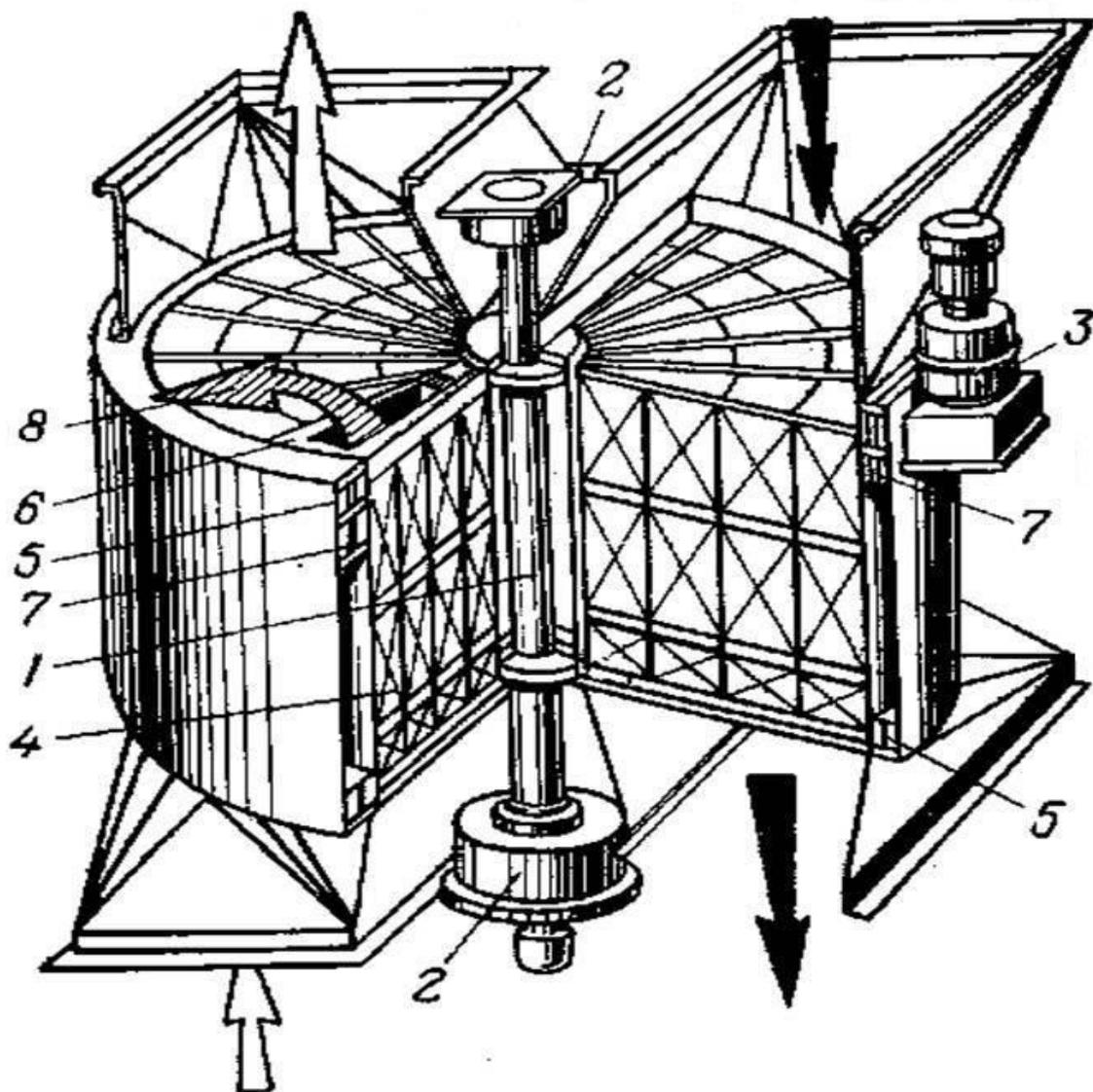


Рис. 2. Регенеративный воздухоподогреватель: 1 — вал ротора; 2— подшипники; 3— электродвигатель; 4 — набивка; 5 — наружный кожух; 6 и 7 — радиальное и периферийное уплотнение; 8 — утечка воздуха.

Разность температур газов, входящих в РВП, и горячего воздуха составляет, как правило, 25-40 °С. Дымовые газы охлаждаются до температуры 140-160 °С, а в ряде случаев до 120 °С [14]. Поверхность теплообмена – набивка – на холодном конце (на выходе газов из РВП и соответственно на входе воздуха) имеет сравнительно низкую температуру, лежащую ниже температуры точки росы дымовых газов для ряда топлив. Периферийные (окружные) уплотнения не дают возможности воздуху и газам проходить между кожухом и ротором. Воздухоподогреватель имеет вертикальную ось вращения. Сила тяжести ротора и радиальные нагрузки воспринимаются через вал и упорно-радиальный подшипник верхней балкой. В нижней балке или крышке установлен направляющий подшипник, воспринимающий только радиальные нагрузки. Вращение ротора производится приводом, установленным на кожухе. Набивка имеет как минимум два слоя – холодный и горячий. Горячая набивка устанавливается сверху, холодная набивка в связи с более быстрым выходом из строя устанавливается и вынимается из ротора сбоку [15]. Корпус РВП состоит из верхней и нижней крышек с газоздушными патрубками и кожуха. Кожух имеет четыре опоры.

2. МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Выполняют два вида расчетов воздухоподогревателей: конструкторский и поверочный. При выполнении конструкторского расчета проектируются новые воздухоподогреватели по заданным температурам и расходам дымовых газов и воздуха. Целью конструкторского расчета является определение площади поверхности теплообмена, а также определение других геометрических характеристик.

Целью поверочного расчета является определение температур теплоносителей в уже спроектированном воздухоподогревателе при изменении таких характеристик как расход топлива, тип топлива и др.

2.1 Основные расчетные формулы

В качестве основы для проведения расчета используется воздухоподогревателей используются три уравнения:

- 1) уравнение теплового баланса по газам

$$Q_{\text{б.г.}} = \varphi \cdot (H'_Г - H''_Г + \Delta\alpha \cdot H_{\text{опрс}}), \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)};$$

- 2) уравнение теплового баланса по воздуху

$$Q_{\text{б.в.}} = \beta_{\text{внi}} \cdot (H''_В - H'_В), \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)};$$

- 3) уравнение теплопередачи

$$Q_{\Gamma} = \frac{k \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t \cdot F}{B_p}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)},$$

где $Q_{\text{б.г.}}$ – количество теплоты, отдаваемое дымовыми газами в рассчитываемой ступени, кДж/кг (кДж/м³);

$Q_{\text{б.в.}}$ – количество теплоты, воспринимаемое воздухом в рассчитываемой ступени, кДж/кг (кДж/м³);

$H'_Г$ – энтальпия дымовых газов на входе в рассчитываемую ступень, кДж/кг (кДж/м³);

H''_r – энтальпия дымовых газов на выходе из рассчитываемой ступени, кДж/кг (кДж/м³);

φ – коэффициент сохранения теплоты;

H'_0, H''_0 – энтальпии воздуха на входе и на выходе соответственно, кДж/кг (кДж/м³);

Q_T – количество теплоты, передаваемое воздуху через стенки труб, кДж/кг (кДж/м³);

$\Delta\alpha$ – присосы воздуха в газоход в рассчитываемой ступени;

β_{Bni} – количество воздуха относительно теоретически необходимого, подогреваемого в i -й ступени;

$H_{0прс}$ – теоретическая энтальпия присасываемого воздуха, кДж/кг (кДж/м³);

k – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

Δt – температурный напор, К;

F – теплообменная поверхность, м² ;

B_p – расчетный расход топлива, кг/с [16].

2.2 Порядок конструктивного расчета

1. Определяется $Q_{б.в.}$ по заданным значениям температур воздуха на входе t'_B и на выходе t''_B ;
2. определяется энтальпия и температура уходящих газов (из уравнения теплового баланса по газам)

$$H''_r = H'_r - \frac{Q_{б.в.}}{\varphi} + \Delta\alpha \cdot H_{0прс}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)};$$

3. определяется средний температурный напор

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{m}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{m}}}\right)} - \text{для ТВП, } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{m}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{m}}}\right)} - \text{для РВП, } ^\circ\text{C},$$

где ψ – поправка на сложный ток в ТВП, $\Delta t_{\bar{o}}$ и $\Delta t_{\bar{m}}$ – больший и меньший температурные напоры соответственно;

4. рассчитывается средняя скорость воздуха

$$\omega_a = \frac{B_p \cdot V_0^H \cdot \beta_{Bni} \cdot (g_{z.c.p.} + 273)}{F_B \cdot 273}, \text{ м/с};$$

5. рассчитывается коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху

$$\alpha_k = C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu}\right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

6. определяется средняя скорость газов

$$\omega_z = \frac{B_p \cdot V_\Gamma^H \cdot (g_{z.c.p.} + 273)}{F_\Gamma \cdot 273}, \text{ м/с};$$

7. вычисляется коэффициент теплоотдачи от газов к стенке

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

8. определяется коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\zeta}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

9. определяется необходимая поверхность нагрева

$$F = \frac{Q_{\bar{o}.s.} \cdot B_p}{k \cdot \Delta t}, \text{ м}^2,$$

по величине которой определяются геометрические характеристики воздухоподогревателя, такие как высота, количество труб по глубине и ширине [16].

2.3 Порядок поверочного расчета

1. По температуре воздуха на входе t'_B , которая считается известной, определяется энтальпия воздуха на входе I'_0 ;
2. задаются в первом приближении температурой воздуха на выходе из воздухоподогревателя (ориентировочно 180-200 °С);
3. по значению предварительно заданной температуры на выходе определяется его энтальпия H''_0 ;
4. подсчитывается средняя температура воздуха

$$t_{e.ср.} = \frac{t'_e + t''_e}{2}$$

и определяется его энтальпия при этой температуре $I_{0прс}$;

5. температура газов на выходе из воздухоподогревателя ϑ''_2 и энтальпия I''_2 принимаются равными температуре и энтальпии уходящих газов, принятых ранее при составлении теплового баланса;
6. приравнивая $Q_{б.в.}$ к $Q_{б.г.}$, которые должны быть равны, рассчитывается энтальпия газов на входе в воздухоподогреватель:

$$H'_Г = H''_Г + \frac{Q_{б.в.}}{\varphi} - \Delta\alpha \cdot H_{0прс}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)};$$

7. по полученному значению $I'_Г$ определяется температура дымовых газов на входе в воздухоподогреватель ϑ'_2 ;
8. рассчитывается средняя температура дымовых газов

$$\vartheta_{2.ср.} = \frac{\vartheta'_2 + \vartheta''_2}{2}, \text{ }^\circ\text{C};$$

9. вычисляется средняя скорость газов

$$\omega_2 = \frac{B_p \cdot V'_Г \cdot (\vartheta_{2.ср.} + 273)}{F'_Г \cdot 273}, \text{ м/с};$$

10. вычисляется средняя скорость воздуха

$$\omega_6 = \frac{B_p \cdot V_0^H \cdot \beta_{Bni} \cdot (g_{z.c.p.} + 273)}{F_B \cdot 273}, \text{ м/с};$$

11. определяется коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху

$$\alpha_\kappa = C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

12. определяется коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}; ;$$

13. находится коэффициент использования теплообменной поверхности

14. находится коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\zeta}{\frac{1}{\alpha_\kappa} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

15. рассчитывается средний температурный напор

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m} \right)} - \text{для ТВП, } ^\circ\text{С};$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m} \right)} - \text{для РВП, } ^\circ\text{С},$$

где ψ – поправка на сложный ток в ТВП;

$\Delta t_{\bar{o}}$ и Δt_m – больший и меньший температурные напоры, соответственно;

16. рассчитывается количество теплоты, передаваемое воздуху через стенки труб Q_T , кДж/кг (кДж/м³);

17. составляется невязка баланса воздухоподогревателя

$$|\Delta Q| = \frac{Q_{\bar{o}.s.} - Q_T}{Q_{\bar{o}.s.}} \cdot 100, \%$$

Допустимая величина невязки теплового баланса составляет 2 %. Если величина невязки превышает 2 %, то необходимо уточнить расчет, приняв другие температуры [17].

По данной методике были составлены программы для автоматического расчета воздухоподогревателей, с помощью которых и было проанализировано влияние различных параметров на эффективность воздухоподогревателей.

3. МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

3.1 Расчет сопротивления трубчатого воздухоподогревателя

Газовое сопротивление складывается из сопротивления труб и сопротивления входа и выхода.

Для определения сопротивления используются: средняя скорость газов в трубах, средняя температура газов, внутренний диаметр труб, суммарная площадь сечения труб, площадь живого сечения газотока до и после воздухоподогревателя и высота пакета.

Сопротивление трения, Па, определяется следующим выражением

$$\Delta h_{тр} = C_{ин} \cdot \Delta h'_{сп} \cdot l, \text{ Па,}$$

где $\Delta h'_{сп}$ - потеря давления в трубах трубчатых воздухоподогревателей, определяется по рис. 3 по значениям средней температуры и средней скорости; $C_{ин}$ - поправка на внутренний диаметр труб, выбирается в зависимости от внутреннего диаметра и коэффициента шероховатости и определяется по рис. 3.

Сопротивление, вызванное изменением скоростей газов на входе и выходе из воздухоподогревателя определяется выражением

$$\Delta h_{изм} = m \cdot (\zeta_{вх} + \zeta_{вых}) \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho, \text{ Па}$$

Воздушное сопротивление отдельной ступени трубчатого воздухоподогревателя определяется по формуле

$$\Delta h_{ст} = \Delta h_{тр} + \Delta h_{пов}, \text{ Па,}$$

где $\Delta h_{тр}$ – сопротивление поперечно омываемых труб;

$\Delta h_{пов}$ – сопротивление поворотов перепускных коробов.

Сопротивление поперечно омываемого шахматного пучка труб определяется по формуле

$$\Delta h_{тр} = \Delta h'_{сп} \cdot (z_2 + 1) \cdot m, \text{ Па,}$$

где Δh_{zp} – сопротивления одного ряда труб определяется в зависимости от средних значений скорости и температуры воздуха;

z_2 – количество рядов труб по глубине в каждом ходе;

m – количество ходов по воздуху.

Сопротивление поворотов в перепускных коробах вычисляется по выражению

$$\Delta h_{пов} = \zeta \cdot h_{\partial}, \text{ Па,}$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления поворота;

h_{∂} – динамический напор, Па, значение которого определяется в зависимости от средней скорости и средней температуры воздуха [19].

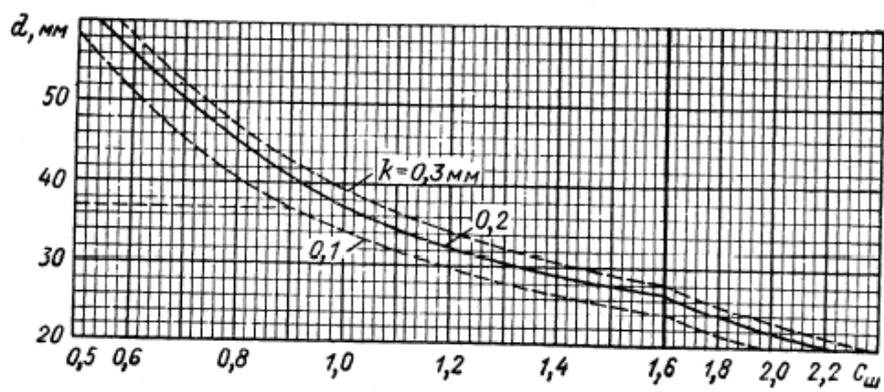
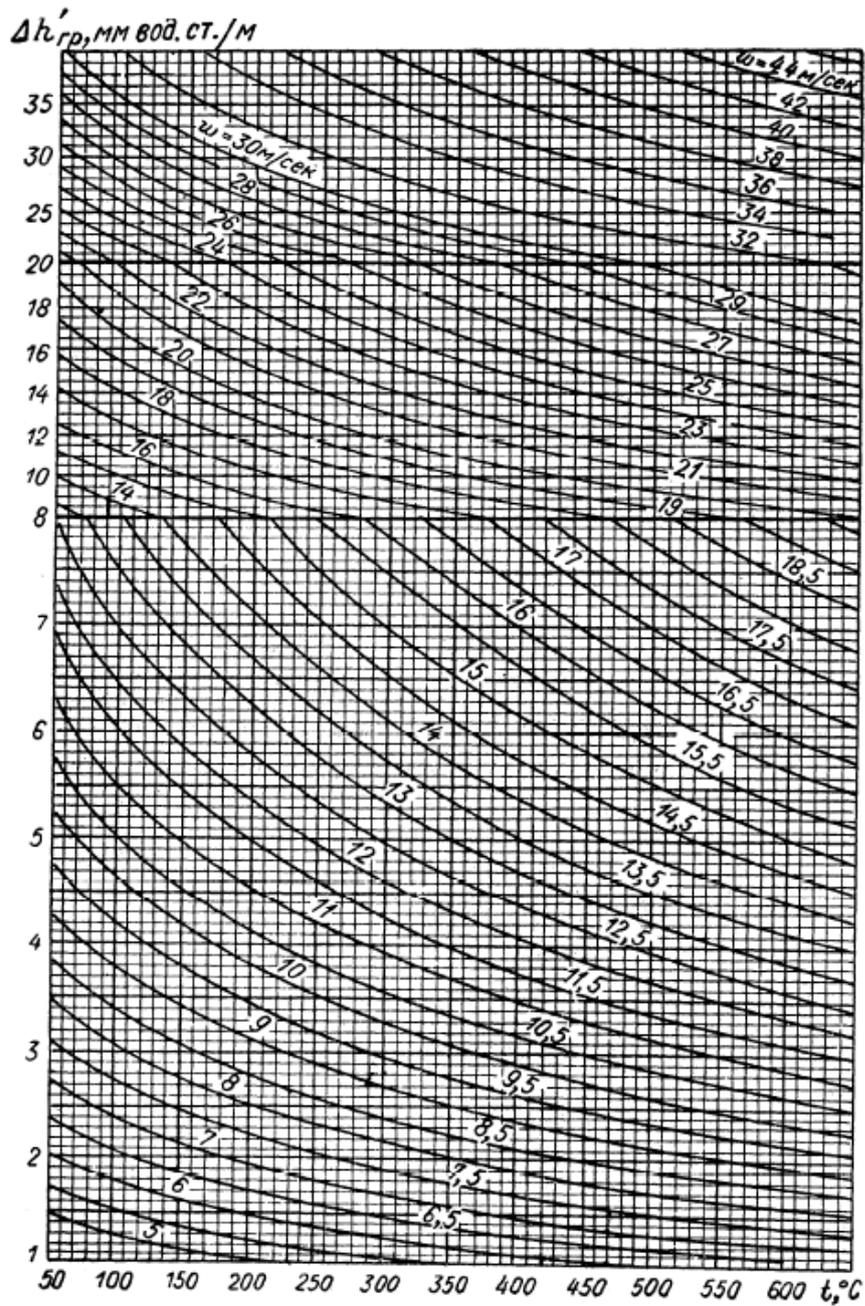


Рис. 3. Потеря давления в трубах трубчатого воздухоподогревателя

3.2 Расчет сопротивления регенеративного воздухоподогревателя

Сопротивление регенеративных воздухоподогревателей определяется по формуле [19]

$$\Delta h_{\text{рвн}} = k \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot h_0, \text{ Па,}$$

где k – коэффициент, учитывающий сопротивление входа и выхода из каналов набивки, а также изменение скорости в крышке воздухоподогревателя;

l – величина набивки воздухоподогревателя, м;

h_0 – динамический напор, определяющийся при средней температуре и скорости, Па;

λ – коэффициент гидравлического трения определяется по рис. 4 в зависимости от конструктивных размеров и характеристик набивки, а также от критерия Рейнольдса, который определяется по формуле

$$Re = \frac{\omega_2 \cdot d_2}{\nu_2}.$$

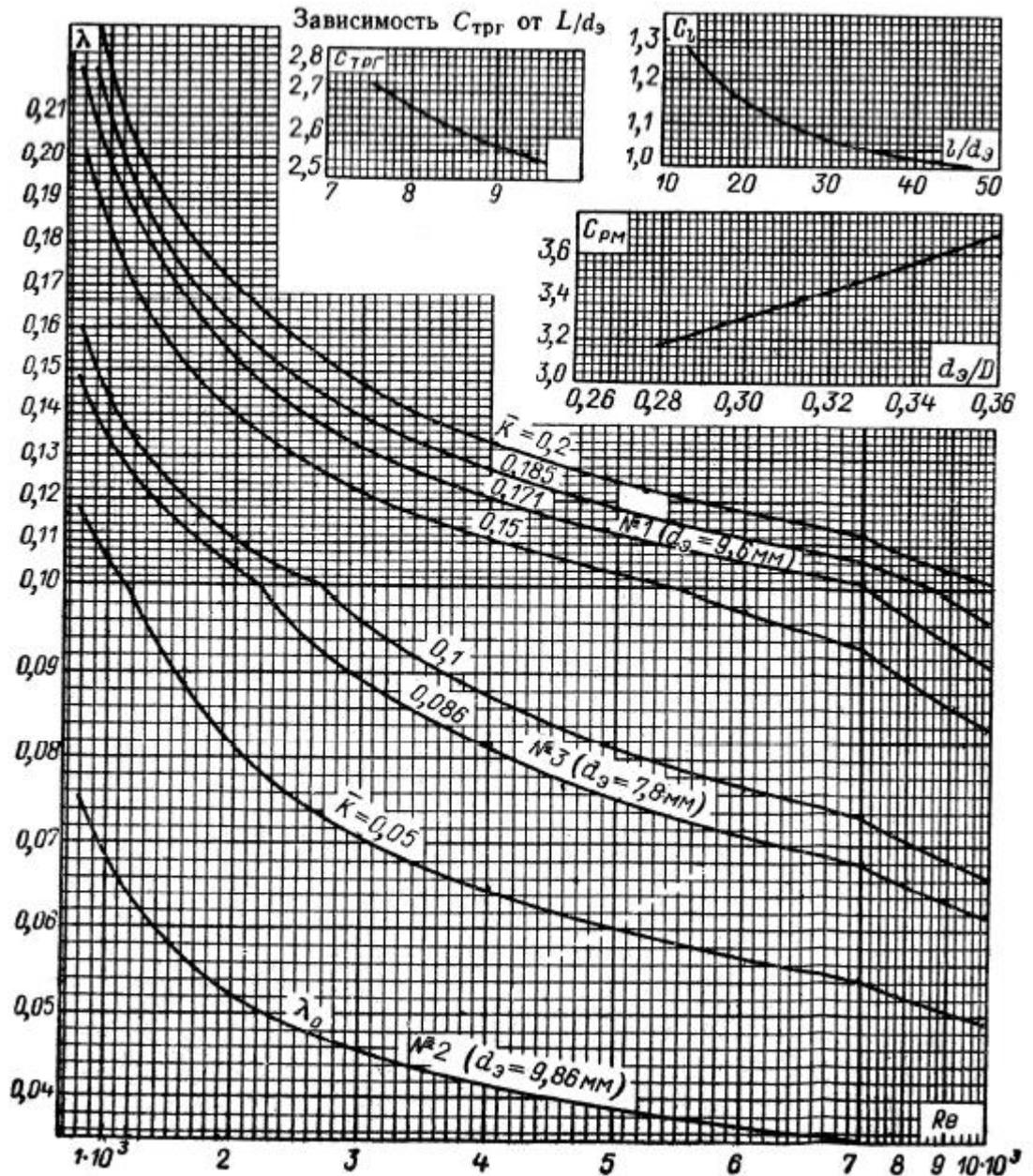


Рис. 4. Коэффициент гидравлического сопротивления в каналах регенеративных воздухоподогревателей