

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра промышленной теплоэнергетики

КОТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Выполнение контрольной работы

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:
С. Н. Смородин
В. Н. Белоусов
К. Г. Живаева
С. В. Антуфьев

Санкт-Петербург

2026

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
19.01.2026 г., протокол № 5
Рецензент В. Г. Злобин

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Котельное оборудование тепловых электростанций» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

В настоящих методических указаниях представлены описание котла-утилизатора, основы расчета котлов-утилизаторов ПГУ, порядок выполнения контрольной работы, а также расчетные задания.

Методические указания предназначены для магистров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний.

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 17.03.2026 г. Рег. № 5086/26

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	4
Техническое описание котла-утилизатора	5
Теплообмен в котлах-утилизаторах за газовыми турбинами	12
Задание.....	18
Методика расчета	18
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	29
ПРИЛОЖЕНИЯ	30

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Курс «Котельное оборудование тепловых электростанций» необходимо изучать по темам и разделам в той последовательности, которая дается в рабочей программе. При изучении курса необходимо добиваться полного уяснения изучаемого материала. Прежде всего следует уяснить физическую сущность явлений и процессов. Математические формулы и выводы расчетных уравнений имеют вспомогательное значение и должны способствовать более глубокому пониманию сущности явлений.

Учебным планом по курсу «Котельное оборудование тепловых электростанций» предусмотрен зачет. Для сдачи зачета необходимо выполнить контрольную работу.

Контрольные работы выполняются по варианту задания, согласно последней цифре шифра (номера зачетной книжки) студента. Работы, выполненные не по установленному варианту, рассматриваться не будут, они возвращаются студенту без зачета.

При выполнении контрольных работ необходимо руководствоваться следующими указаниями:

1. Каждая контрольная работа должна быть выполнена полностью и содержать решение всех задач. Пропуски решений отдельных задач не допускаются. Профилирующая кафедра организует консультации для студентов-заочников.
2. В каждой контрольной работе необходимо обязательно выписывать полностью условие задачи и содержание поставленного вопроса.
3. Решение задач нужно сопровождать краткими пояснениями и ссылками на источник, откуда взяты исходные формулы, коэффициенты и пр.
4. Вычисления при решении задач давать в развернутом виде, показывая все подстановки и преобразования.
5. Необходимо строго следить за исходными данными, их размерностью и за размерностью вычисленных величин. При выполнении контрольных заданий необходимо пользоваться международной системой единиц измерения СИ.

На титульном листе контрольной работы нужно написать фамилию и инициалы студента, шифр, кафедру, наименование изучаемой дисциплины, вариант контрольного задания.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

В настоящем описании применены следующие обозначения и сокращения:

Обозначение, сокращение	Полное наименование
АВР	автоматический ввод резерва
БВД	барабан высокого давления
БЗК	бак запаса конденсата
БНД	барабан низкого давления
БРОУ ВД	быстродействующая редукиционно-охладительная установка высокого давления
БРУ НД	быстродействующая редукиционная установка низкого давления
БСК	бак слива из котлов
ВВТО	водо-водяной теплообменник
ВД	высокое давление
ГПЗ	главная паровая задвижка
ГПК	газовый подогреватель конденсата
ГТУ	газотурбинная установка
ДЗ	дождевая заслонка
ДУ	деаэрационное устройство
ИВД	испаритель высокого давления
ИНД	испаритель низкого давления
ИПК	импульсно-предохранительный клапан
КИПиА	контрольно-измерительные приборы и автоматика
КСН	коллектор пара собственных нужд
КУ	котел-утилизатор
НД	низкое давление
ПВТ	пароводяной тракт
ПГУ	парогазовая установка
ПК	предохранительный клапан
ППВД	пароперегреватель высокого давления
ППНД	пароперегреватель низкого давления
ПТ	паровая турбина
ПЭН	питательный электронасос
РК	регулирующий клапан
РКВД	регулирующий клапан высокого давления
РКНД	регулирующий клапан низкого давления
РНП	расширитель непрерывной продувки
РПК ВД	регулирующий питательный клапан высокого давления
РПК НД	регулирующий питательный клапан низкого давления
РПП	расширитель периодической продувки
РОУ СН	редукиционно-охладительная установка собственных нужд

РЭН	рециркуляционный электронасос (насос рециркуляции конденсата ГПК)
СКВД	стопорный клапан высокого давления
СКНД	стопорный клапан низкого давления
ЦЭНВД	циркуляционный электронасос высокого давления
ЦЭННД	циркуляционный электронасос низкого давления
ЭВД	экономайзер высокого давления

Двухконтурный барабанный котел-утилизатор башенной компоновки поверхностей нагрева с принудительной циркуляцией в испарительных контурах высокого и низкого давлений предназначен для выработки перегретого пара высокого и низкого давления, нагрева конденсата паровой турбины до температуры близкой к насыщению и для работы в составе парогазовой установки с использованием в нем в качестве греющей среды продуктов сгорания природного газа в камерах сгорания газовой турбины.

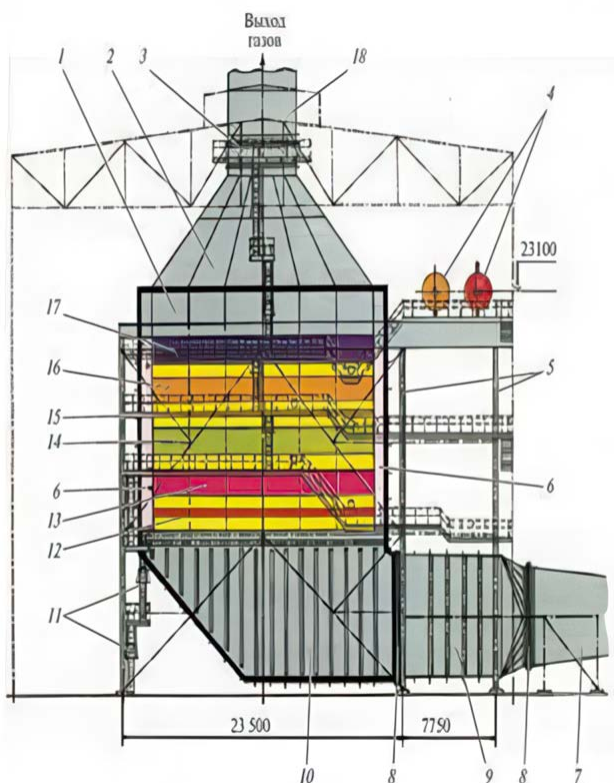


Рисунок 1. Конструкция котла-утилизатора:

- 1 – основной газопровод КУ; 2 – конфузор; 3 – шибер; 4 – барабаны; 5 – колонны каркаса; 6 – «теплый ящик»; 7 – выходной диффузор ГТУ; 8 – компенсаторы; 9 – входной газопровод КУ; 10 – поворотный короб; 11 – лестничные марши; 12 – ППВД; 13 – ИВД; 14 – ЭВД; 15 – ППНД; 16 – ИНД; 17 – ГПК; 18 – выходной газопровод

Основным и резервным топливом для ГТУ является сухой природный газ.

КУ рассчитан для работы на скользящих параметрах, определяемых режимом работы энергоблока.

Описание конструкции котла-утилизатора

В состав КУ входят следующие основные узлы:

- барабан высокого давления БВД;
- барабан низкого давления БНД с встроенным деаэрационным устройством;
- поверхности нагрева с коллекторами;
- трубопроводы и арматура в пределах КУ;
- линии дренажей, воздушников, отборов проб пара и воды в пределах КУ;
- «дождевая» заслонка на выходе газов из КУ с электроприводом;
- шумоглушитель;
- расширитель непрерывной продувки высокого давления РНПВД;
- расширитель периодической продувки и сливов дренажей РПП;
- циркуляционные насосы контуров высокого и низкого давления;
- насосы рециркуляции в контуре ГПК;
- питательные насосы высокого давления.

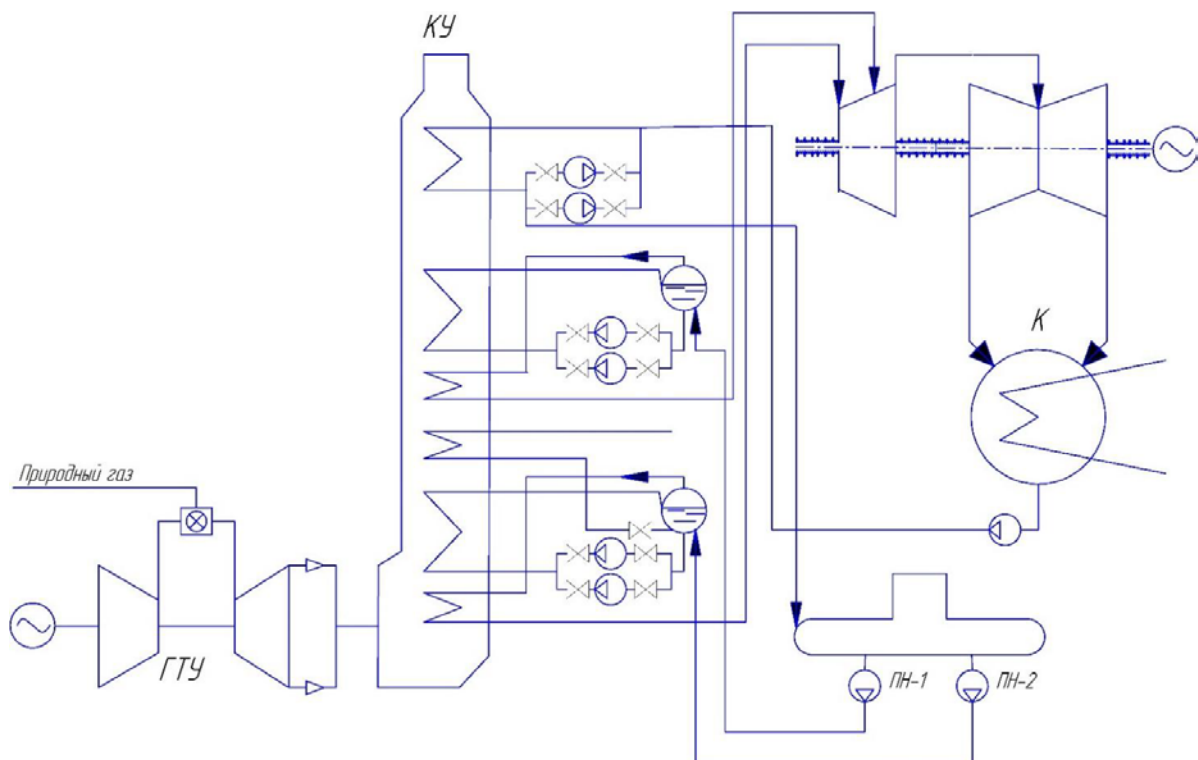


Рисунок 2. Тепловая схема котла-утилизатора

Барабан

Барабан высокого давления БВД предназначен для:

- смешивания питательной и котловой воды;
- обеспечения запаса воды для системы принудительной циркуляции;
- обеспечения расширения воды/пара во время пуска;
- обеспечения отделения пара от воды (сепарация происходит по одноступенчатой схеме в сепарационном устройстве, находящемся в верхней части барабана).

Поступающая в БВД питательная вода распределяется через перфорированный коллектор, размещенный в водяном объеме.

Подвод в БВД пароводяной смеси односторонний, патрубки подвода расположены выше горизонтальной оси барабана. Отвод котловой воды из БВД производится по опускающему стояку.

В качестве сепарационных устройств в БВД применены горизонтальный и вертикальный дырчатые листы и демистеры (многослойные сетки). Горизонтальный распределительный и вертикальный дырчатые листы расположены на входе пароводяной смеси в БВД, демистеры – на выходе пара из них. Отвод отсепарированного пара из барабана после демистеров производится по двум пароотводящим трубам во входной коллектор ПВД.

Также БВД оснащен трубопроводом аварийного слива, перфорированными коллекторами подачи пара от КСН, ввода химреагентов, отбора на непрерывную продувку. Над опускающим стояком БВД установлена крестовина, служащая для защиты от воронкообразования.

Непрерывная продувка из БВД заведена в РНП. На линии непрерывной продувки установлены расходомер, регулирующий клапан и набор дроссельных шайб.

Аварийный слив из барабана производится в РПП.

На барабане установлены водоуказательные колонки магнитопоплавкового типа для измерения уровня, импульсные предохранительные устройства, состоящие из импульсного и главного предохранительного клапана.

Барабан низкого давления БНД предназначен для:

- смешивания конденсата и котловой воды;
- обеспечения запаса воды для системы принудительной циркуляции и питания контура ВД;
- обеспечения расширения воды/пара во время пуска;
- обеспечения отделения пара от воды (сепарация происходит по одноступенчатой схеме с помощью сетчатого сепарационного устройства, размещенного в верхней части барабана).

В БНД установлено деаэрационное устройство, в котором происходит удаление кислорода.

В водяной объем БНД питательная вода поступает из деаэрационного устройства, расположенного в его верхней центральной части.

Подвод в барабан НД пароводяной смеси производится с одной стороны, патрубки подвода расположены выше горизонтальной оси барабана. Отвод котловой воды из барабана производится по опускающему стояку.

В качестве сепарационных устройств в барабане НД применены горизонтальный и вертикальный дырчатые листы и демистеры (многослойные сетки). Горизонтальный распределительный и вертикальный дырчатые листы расположены на входе пароводяной смеси в БНД, демистеры – на выходе пара из него. Отвод отсепарированного пара из барабана производится по пароотводящим трубам, присоединенным к его верхней образующей.

Также БНД оснащен трубопроводом аварийного слива, перфорированными коллекторами подвода пара от КСН и ввода химреагентов. Над опускным стояком барабана установлена крестовина, служащая для защиты от воронкообразования.

В линию подвода пара на разогрев барабана заведена рециркуляция ЭВД с арматурой и регулирующим клапаном, исключающая безрасходный режим работы ЭВД при пусках котла.

Аварийный слив из барабана срабатывает при превышении допустимого уровня и производится в РПП через запорную арматуру

Барабан оборудован двумя водоуказательными колонками магнитоплавкового типа (по одной слева и справа), для измерения уровня манометрами давления, датчиками температуры металла барабана, датчиками уровня.

В БНД заведены выхлопной трубопровод из РНП ВД с задвижкой и линия рециркуляции ПЭН ВДс задвижками. Из деаэрационного устройства барабана предусмотрены трубопроводы выпара в атмосферу и в БРОУ НД со стороны конденсатора.

В БНД предусмотрены отборные точки с запорными вентилями на линиях отбора: из деаэрационного устройства, из линии подачи конденсата, из паропровода к ПНД, со всаса ЦЭН НД.

Элементы газового тракта котла-утилизатора.

Газоход котла образован листометаллической обшивкой. Состоит из горизонтальной части: диффузор, поворотный короб и вертикальной части: газоход поверхностей нагрева, конфузор и газоход за «дождевой» заслонкой. Снаружи газоход покрыт изоляцией и закрыт декоративной металлической обшивкой.

Дымовые газы из КУ направляются в дымовую трубу, установленную в вытяжной башне. Вытяжная башня – это труба расположена на здании котельного отделения и представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, с квадратной планировкой, и расположенным в ней стальным газоотводящим стволом в виде тонкостенной цилиндрической оболочки, укрепленной ребрами жесткости. К нижней части ствола примыкают два газохода от двух КУ.

За поверхностями нагрева КУ расположен двухступенчатый шумоглушитель. Каждая из двух ступеней шумоглушителя выполнена в виде секций со стенками из просечных листов. Секции заполнены звукопоглощающими матами из БСТВ, обернутыми стеклотканью.

За шумоглушителем размещена «дождевая» заслонка, имеющая 2 створки, каждая из которых расположена на своей оси. Заслонка оснащена электроприводом. В открытом положении створки занимают вертикальное положение, в закрытом – под небольшим углом к горизонтали с наклоном к оси заслонки, что обеспечивает сток осадков в водоотводчик.

Компенсаторы газохода котла состоят из металлических и неметаллических частей. Неметаллические части компенсаторов представлены

гибкими неметаллическими элементами (НГЭК) и теплозащитными элементами (ТЗЭ).

Пароводяной тракт котла-утилизатора

Пароводяной тракт КУ состоит из контуров: высокого давления (ВД), низкого давления (НД) и контура ГПК.

Контур высокого давления включает в себя: БВД, ЭВД, ИВД, ПВД, систему трубопроводов, питательные электронасосы с регулируемым приводом ПЭН ВД (2шт.), циркуляционные электронасосы ЦЭН ВД (2шт.).

Питательная вода из БНД подается на всас ПЭН ВД и далее насосами в ЭВД.

Из ЭВД подогретая вода поступает в БВД. Питательный узел включает в себя РПК ВД с запорной задвижкой. Установка РПК ВД после ЭВД позволяет поддерживать в нем давление в пусковых режимах на значениях, исключающих вскипание воды в ЭВД, а также поддерживает заданный уровень в БВД. Трубопровод после ЭВД оборудован линией минимального расхода со сбросом в БНД с запорным и регулирующим клапанами и набором дроссельных шайб, используемой в случае срабатывания блокировки при недопустимом повышении давления за ЭВД и для обеспечения минимального расхода в пусковых режимах. На входе и выходе ЭВД установлены пружинные предохранительные клапаны. Их сбросные линии заведены в РПП для утилизации воды.

Циркуляция по контуру БВД-ИВД-БВД осуществляется одним ЦЭН ВД, второй ЦЭН ВД должен находиться в положении АВР. На трубопроводе подачи котловой воды на всас ЦЭН ВД установлен датчик температуры. Образовавшаяся в ИВД пароводяная смесь поступает в барабан, сепарируется и возвращается в контур циркуляции, а пар поступает в ПВД. На трубопроводах от ИВД к БВД установлены термopара и воздушник с задвижкой. На подводе пара к ПВД установлена термopара и воздушник с задвижками.

Из ПВД перегретый пар по паропроводу поступает в турбину. На трубопроводе свежего пара установлены задвижки, отключающие котел от турбины – ГПЗ-1ВД с байпасом, обратный клапан. Назначение обратного клапана – защитить КУ от поступления в него пара через общие паропроводы при аварийном отключении соответствующей ГТУ и работе в режиме полублока. Паропровод оборудован линией сброса пара через БРОУ в конденсатор турбины и сбросной линией в атмосферу, служащей для регулирования скорости повышения давления в БВД при пуске с помощью регулирующего клапана продувки ПВД с отключающими задвижками. Назначение ГПЗ ВД – полное отключение КУ от паропровода, ПТ и БРОУ при останове.

Контур низкого давления включает в себя БНД, ИНД, ПНД, систему трубопроводов, циркуляционные электронасосы ЦЭН НД.

Циркуляция по контуру БНД-ИНД-БНД осуществляется одним ЦЭН НД, второй ЦЭН НД должен находиться в положении АВР. Из БНД котловая вода одним ЦЭН НД (другой в положении АВР). Образовавшаяся в ИНД

пароводяная смесь поступает в барабан, сепарируется, вода уходит в водяной объем барабана, а пар – в ПНД и затем в турбину. На паропроводе от ИНД к БНД установлен датчик температуры и воздушник с задвижкой. На паропроводе от БНД к ПНД установлены датчик температуры и воздушник с вентилем.

На трубопроводе перегретого пара НД установлены предохранительный клапан, расходомерное устройство, датчики температуры) и ГПЗ-1 НД. Трубопровод оборудован линией сброса пара через БРОУ НД в конденсатор помимо турбины и линией продувки ПНД в атмосферу с клапаном для регулирования скорости повышения давления в БНД при пуске.

Контур ГПК кроме самой поверхности нагрева включает в себя два параллельно включенных насоса НРК, ВВТО и систему трубопроводов. НРК осуществляет рециркуляцию конденсата. НРК предназначены для повышения температуры конденсата на входе в ГПК до 55–60°C при работе на газе.

Конденсат поступает в ГПК по трубопроводу с задвижкой, обратным клапаном, расходомерным устройством, кроме того предусмотрена линия сброса конденсата из ГПК в конденсатор. На трубопроводах входа и выхода ГПК установлены пружинные предохранительные клапаны для защиты ГПК от повышения давления.

Подогретый в ГПК конденсат по трубопроводу с расходомерным устройством, обратным клапаном и РПК НД поступает в деаэрационное устройство БНД, а из него сливается в водяной объем БНД. На линии подвода конденсата к БНД установлены дренаж с вентилями и воздушник с задвижками. РПК НД, установленный после ГПК, позволяет поддерживать в нем давление на значениях, исключающих вскипание конденсата в ГПК, и поддерживает заданный уровень воды в БНД.

Входной и выходной трубопроводы ГПК соединены перемычкой с линиями для поддержания температуры (LCA20CT001) подогретого конденсата на входе в деаэрационное устройство БНД на $2,0 \div 2,5^\circ\text{C}$ ниже температуры насыщения в БНД.

ВВТО предназначен для нагрева воды питьевого качества конденсатом после ГПК.

Деаэрационное устройство

Встроенное в БНД деаэрационное устройство состоит из цилиндрического распылителя, расположенного на верхней образующей барабана и корпуса с системой подводящих труб греющего пара, барботажным коробом и трубами для слива деаэрированной воды в барабан.

Конденсат в корпус деаэрационного устройства подается через распылитель. Пар на деаэрацию поступает из барабана по подводящим трубам. Деаэрация происходит в барботажном коробе и в распыленном потоке конденсата на выходе из распылителя. Деаэрированная вода по трубам сливается в барабан.

Первичная деаэрация конденсата в ДУ (до подачи греющих газов в КУ) производится сторонним паром КСН, поступающим по паропроводу на

разогрев БНД в перфорированный коллектор, размещенный в нижней части БНД.

ТЕПЛООБМЕН В КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ ЗА ГАЗОВЫМИ ТУРБИНАМИ

Чрезвычайно низкий температурный напор между газами и перегретым паром на входе в котел-утилизатор (и далее низкий температурный напор по всему тракту котла) предопределил использование в данных типах котлов оребренных труб, как правило, скомпонованных в шахматные пучки. Поэтому далее рассматривается расчет конвективного теплообмена между газами и пучком труб с поперечным оребрением.

Геометрические характеристики труб с поперечным оребрением представлены на рис. 3.

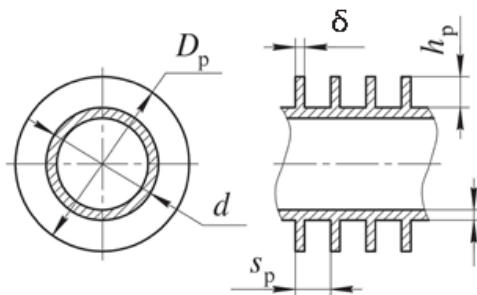


Рисунок 3. Геометрические характеристики поверхности с поперечными круглыми ребрами

К характеристикам оребренных труб относятся следующие параметры:

- наружный диаметр труб – d ;
- толщина стенки – δ ;
- шаг ребер – s_p ;
- толщина ребра – δ_p ;
- высота (вылет) ребра – h_p ;
- наружный диаметр ребра – D_p .

К характеристикам шахматного пучка (рис. 4) относятся следующие параметры:

- число рядов труб поперек хода газов – z_1 ;
- число рядов труб по ходу газов – z_2 ;
- поперечный шаг – s_1 ;
- продольный шаг – s_2 ;
- диагональный шаг – s'_2 ;
- относительный поперечный шаг – $\sigma_1 = s_1/d$;
- относительный продольный шаг – $\sigma_2 = s_2/d$;
- относительный диагональный шаг – $\sigma'_2 = s'_2/d$;
- длина труб – l .

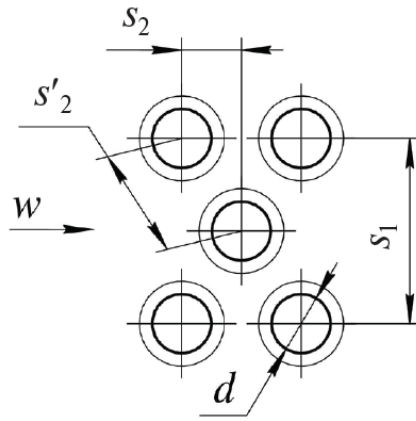


Рисунок 4. Геометрические характеристики шахматного пучка труб

По конструктивным характеристикам рассчитывается ряд параметров. Коэффициент оребрения ψ_p , равный отношению полной поверхности пучка к поверхности несущих труб на оребренном участке, для круглых ребер, в том числе спирально-ленточное оребрение, равен:

$$\psi_p = \frac{1}{2ds_{pb}} (D^2 - d^2 + 2D\delta_{pb}) + 1 - \frac{\delta_{pb}}{s_{pb}}.$$

Относительная площадь труб и ребер в оребренной поверхности

$$\frac{H_{tr}}{H} = \frac{1}{\psi_p} \cdot \left(1 - \frac{\delta_p}{s_p} \right); \quad \frac{H_p}{H} = 1 - \frac{H_{tr}}{H},$$

где H_{tr} – поверхность труб, не занятая ребрами, включая гладкотрубные участки, m^2 ;

H_{pb} – поверхность ребер, m^2 ;

$H = H_{tr} + H_{pb}$ – полная поверхность оребренной стороны труб, m^2 .

Коэффициент теплоотдачи конвекцией зависит от скорости и температуры потока, определяющего линейного размера канала, вида поверхности (гладкая, волнистая, ребристая), расположения труб в пучке и характера его омывания (продольное, поперечное, косое), физических свойств омывающей среды и, в отдельных случаях, от температуры стенки.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании шахматных и коридорных пучков с круглым, в том числе спирально-ленточным оребрением, отнесенный к полной наружной поверхности

$$\alpha_k = 0,113 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^n Pr^{0,33}, \text{ Вт/м}^2\text{К},$$

где $n = 0,7 + 0,08\phi + 0,005\psi_p$;

C_s – коэффициент, определяемый в зависимости от относительных поперечного и продольного шагов труб в пучке, типа пучка и коэффициента оребрения.

$$C_s = (1,36 - \varphi) \left(\frac{11}{\psi_p + 8} \right) - 0,14$$

$$\varphi = \operatorname{th} \chi$$

Вспомогательный параметр χ для шахматного пучка

$$\chi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{1,26}{\psi_p} - 2.$$

C_z – поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов
 при $z < 8$ и $\sigma_1/\sigma_2 < 2,0$ $C_z = 3,15 \cdot z^{0,05} - 2,5$;
 при $z < 8$ и $\sigma_1/\sigma_2 \geq 2,0$ $C_z = 3,15 z_2^{0,03} - 2,72$;
 при $z \geq 8$ $C_z = 1$.

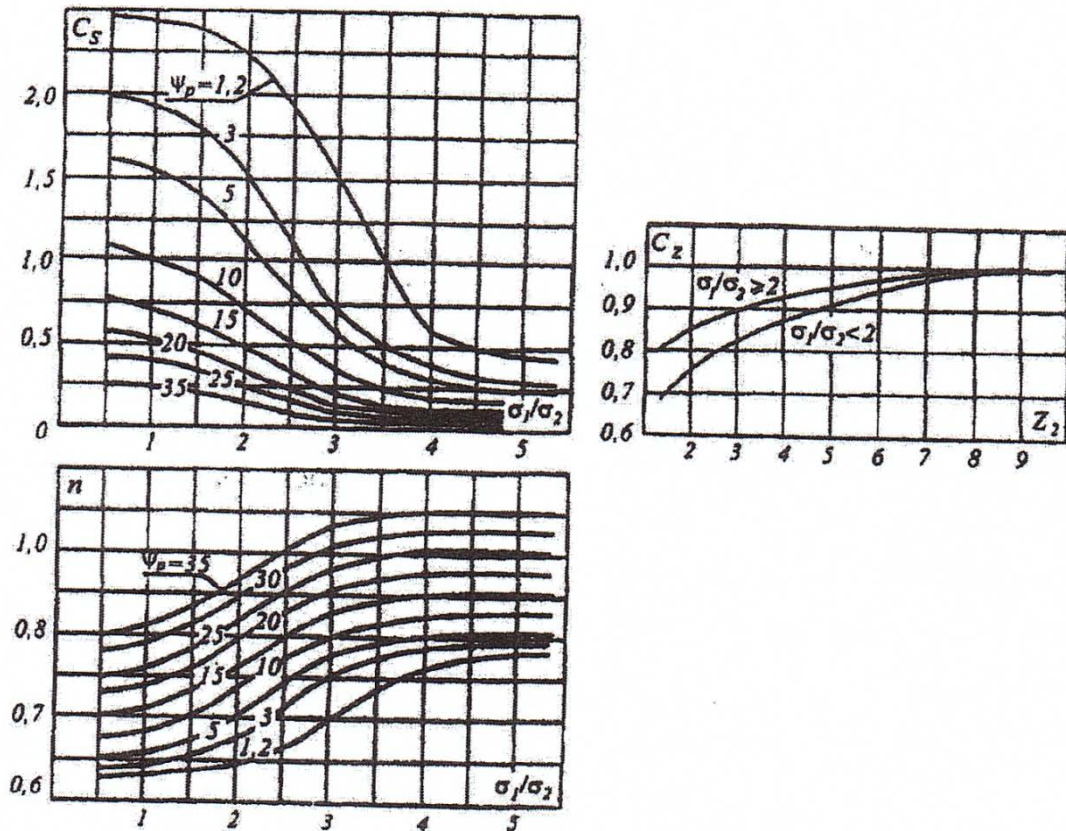


Рисунок 5. Поправочные коэффициенты C_z , C_s и показатель n для шахматных пучков труб с поперечными ребрами

Приведенный коэффициент теплоотдачи, для пучков труб с поперечными круглыми и квадратными ребрами, в том числе со спирально-ленточным оребрением, определяется без учета межтрубного излучения из-за малой толщины излучающего слоя пучков, а именно:

$$\alpha_{\text{ин}} = \left(\frac{H_{\text{тп}}}{H} + \frac{H_p}{H} \cdot E \cdot \mu \cdot \varphi_E \right) \alpha_k \text{ Вт/(м}^2\text{К)},$$

где H – полная площадь оребренной поверхности;

$H_{тр}$ – площадь поверхности труб, не занятой ребрами;

H_p – площадь поверхности ребер.

Коэффициент E – коэффициент эффективности ребра, определяется по рисунку 6 в зависимости от параметров $(mh_{pб})$ и D/d .

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta_{pб}\lambda_{pб}}},$$

Здесь

где α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\delta_{pб}$, $h_{pб}$ – средняя толщина и высота ребра;

λ_p – коэффициент теплопроводности металла ребер, Вт/(м·К).

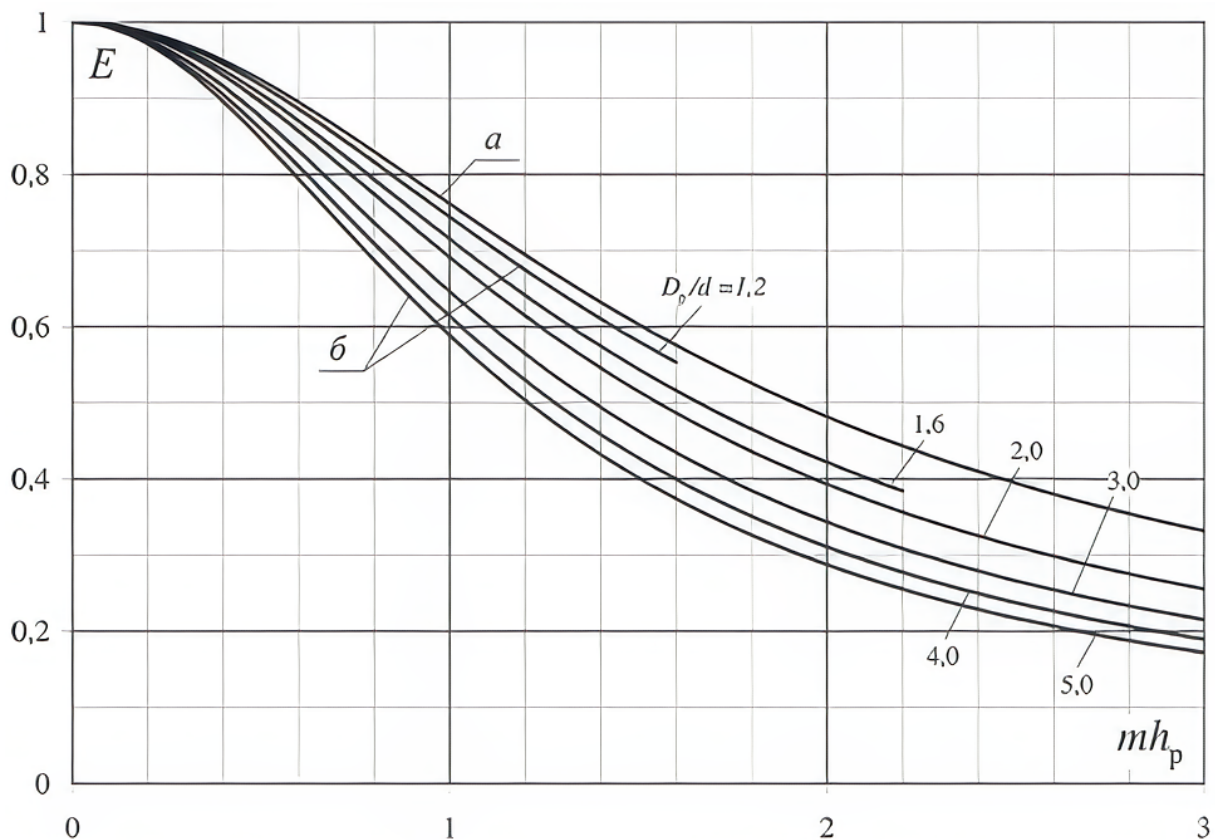


Рисунок 6. Зависимость коэффициента эффективности ребра от геометрических размеров и параметра mh_p :

a – прямые ребра, $б$ – круглые ребра

Коэффициент μ , учитывающий влияние уширения литых ребер к основанию, для плоских ребер равен 1.

Коэффициент ϕE , учитывающий неравномерность теплоотдачи по поверхности ребра, определяется соотношением: $\phi E = 1 - 0,058mh_{pб}$.

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·К), для пароперегревателя с поперечными ребрами, не получающего прямое излучение из топки (в котлах-утилизаторах нет топки) рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{\psi \alpha_{1\text{пр}}}{1 + \frac{\alpha_{1\text{пр}}}{\alpha_2} \cdot \frac{H}{H_{\text{вн}}}}, \text{ Вт/(м}^2\text{К)},$$

$$\text{где } \frac{H}{H_{\text{вн}}} = \psi \cdot \frac{d}{d - 2\delta_{\text{тр}}}$$

При сжигании газа для всех гладкотрубных и оребренных поверхностей значения коэффициента тепловой эффективности принимаются равными: для пароперегревателей, испарителей и горячих ступеней экономайзера $\psi = 0,8$; для холодных ступеней экономайзера и газо-водяных подогревателей $\psi = 0,85$.

Коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки к пару рассчитывается по формуле для продольного течения однофазного потока или по рисунку 7.

$$\alpha_k = 0,023 \frac{\lambda_{\text{п}}}{d_{\text{вн}}} \left(\frac{w_{\text{п}} d_{\text{вн}}}{\nu_{\text{п}}} \right)^{0,8} Pr^{0,4} C_t C_d C_l, \text{ Вт/(м}^2\text{·К)},$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр труб пароперегревателя;

$\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности;

$\nu_{\text{п}}$ – коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля $Pr_{\text{п}}$ (определяют по таблицам в зависимости от среднего давления и средней температуры пара);

$w_{\text{п}}$ – скорость пара, рассчитывается по формуле:

$$w_{\text{п}} = \frac{D v_{\text{ср}}}{f_{\text{жс}}}, \text{ м/с},$$

где D – расход пара, кг/с;

$v_{\text{ср}}$ – средний удельный объем пара, м³/кг;

$f_{\text{жс}}$ – площадь живого сечения для прохода пара, м².

C_t – поправка, учитывает влияние температурного фактора и зависит от температур потока T , К и стенки $T_{\text{ст}}$, К. При течении пара по трубам температура стенки трубы мало отличается от температуры пара, поэтому поправка $C_t = 1$.

C_d – поправка на форму канала, принимается равной единице (не равна единице только при одностороннем обогреве среды в кольцевом канале);

C_l – поправка на относительную длину, вводится при $1/d < 50$, при продольном омывании, поэтому $C_l = 1$.

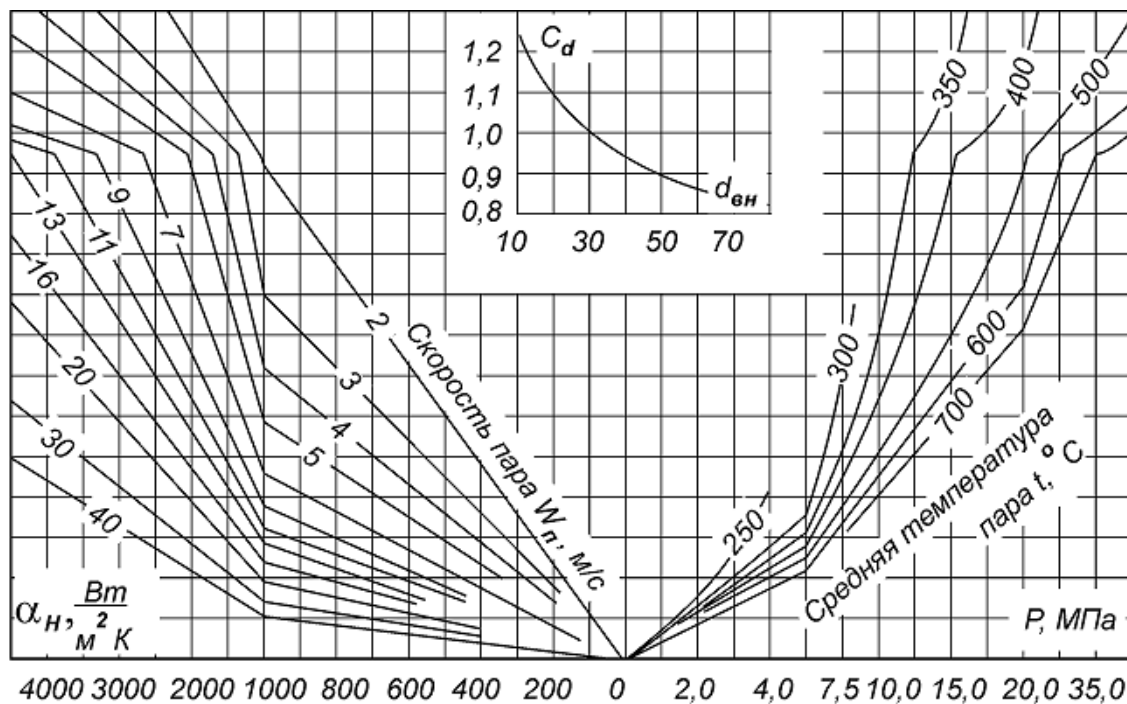


Рисунок 7. Коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки к пару $\alpha_2 = \alpha_n \cdot C_d$ Вт/м²К

Для испарительных, экономайзерных поверхностей и водонагревателей коэффициентом теплоотдачи от стенки к теплоносителю пренебрегают, а коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле:

$$k = \psi \alpha_{\text{ипр}}, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Как правило, в котлах-утилизаторах за газовыми турбинами применяют конвективные поверхности с поперечно-противоточной схемой движения теплоносителей. Тепловой напор при поперечном противоточном движении в первом приближении можно рассчитывать, как при противотоке.

Для более точного определения температурного напора в пароперегревателях и экономайзерах используется следующая методика. Температурный напор схем с перекрестным током при общем противотоке рассчитывают по выражению:

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}},$$

где ψ – поправочный коэффициент, учитывающий отличие схемы движения теплоносителей от противотока;

$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}}$ – условный температурный напор при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}},$$

где $\Delta t_6 = \vartheta'' - t'$ и $\Delta t_m = \vartheta' - t''$ – бо́льшая и меньшая разности температур теплообменивающихся сред на границах поверхности, °С;

ϑ' , ϑ'' , t' , t'' – соответственно температуры газов и среды на входе и выходе.

Если число ходов более четырех, то поправочный коэффициент $\psi = 1$. При расчете испарительных поверхностей температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}},$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ и $\Delta t_{\text{м}}$ – бóльшая и меньшая разности температур теплообменивающихся сред на границах поверхности.

ЗАДАНИЕ

Выполнить тепловой расчет части высокого давления (ППВД, ИВД, ЭВД) для вариантов 0–4 и части низкого давления (ППНД, ИНД, ГПК) котла-утилизатора. Исходные данные для расчета представлены в Приложениях (табл. 1). Конструктивные характеристики элементов котла представлены там же в таблице 2.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Пароперегреватель высокого (низкого) давления

1. Расположение труб шахматное.
2. Высота газохода h , м.
3. Ширина газохода b , м.
4. Диаметр труб d , м с толщиной стенки δ , м.
5. Шаги труб: поперечный s_1 , м; продольный s_2 , м.
6. Относительные шаги труб пароперегревателя принимаем: поперечный $\sigma_1 = s_1/d$; продольный $\sigma_2 = s_2/d$.
7. Высота ребра $h_{\text{рб}}$, м.
8. Толщина ребра $\delta_{\text{рб}}$, м.
9. Шаг оребрения $s_{\text{рб}}$ м.
10. Диаметр ребра $D_{\text{рб}} = 60$ мм.
11. Коэффициент, учитывающий уширение ребра, 1,0.
12. Число труб в каждом ряду

$$Z_1 = \frac{b - s_1}{s_1}, \text{ шт.}$$

13. Коэффициент оребрения

$$\psi_p = \frac{1}{2ds_{\text{рб}}} (D_{\text{рб}}^2 - d^2 + 2D_{\text{рб}}\delta_{\text{рб}}) + 1 - \frac{\delta_{\text{рб}}}{s_{\text{рб}}}.$$

14. Относительная площадь труб в оребренной поверхности

$$\frac{H_{\text{Тр}}}{H} = \frac{1}{\psi_p} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{\text{рб}}}{s_{\text{рб}}} \right), \text{ м}^2.$$

15. Относительная площадь ребер в оребренной поверхности

$$\frac{H_p}{H} = 1 - \frac{H_{тр}}{H}.$$

16. Живое сечение для прохода газов

$$F_{ж.с.} = \left[1 - \frac{1}{\sigma_1} \cdot \left(1 + 2 \frac{h_{рб} \cdot \delta_{рб}}{d \cdot s_{рб}} \right) \right] h \cdot b.$$

17. Температура газов на входе в пароперегреватель ϑ' , °С.

18. Теплосодержание газов на входе I' , кДж/м³ (табл. 3).

19. Температура насыщенного пара на входе в пароперегреватель $t' = t_{н\text{бвд(бнд)}}$, °С.

20. Теплосодержание насыщенного пара на входе в пароперегреватель $i' = i_{нп}$, кДж/кг.

21. Температура пара за пароперегревателем $t'' = t_{п\text{евд(нд)}}$, °С.

22. Теплосодержание перегретого пара на выходе из пароперегревателя $i'' = i_{п\text{евд(нд)}}$, кДж/кг.

23. Тепловосприятие пароперегревателя по балансу

$$Q_6 = \frac{D_{пе}(i'' - i')}{B_p}, \text{ кДж/м}^3.$$

24. Теплосодержание газов за пароперегревателем

$$I'' = I' - \frac{Q_6}{\varphi}, \text{ кДж/м}^3.$$

25. Температура газов на выходе ϑ'' , °С (табл. 3).

26. Средняя температура газов

$$\vartheta = \frac{\vartheta' + \vartheta''}{2}, \text{ °С.}$$

27. Средняя температура пара

$$t = \frac{t' + t''}{2}, \text{ °С.}$$

28. Коэффициент теплопроводности металла ребра $\lambda = 30$, Вт/м°С.

29. Средняя скорость газов

$$W_r = \frac{B_p V_r (\vartheta + 273)}{273 F_{жс}}, \text{ м/с.}$$

30. Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_\kappa = 0,113 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^n \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2\text{К.}$$

Поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, C_z .

Для ППВД принимаем $C_z = 1$.

Для ППНД $C_z = 3,15 \cdot z^{0,05} - 2,5$, где число рядов труб z принимаем равным 4.

Вспомогательный параметр x для шахматного пучка

$$\chi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{1,26}{\psi_p} - 2.$$

Коэффициент, определяемый в зависимости от относительных поперечного и продольного шагов труб в пучке, типа пучка и коэффициента оребрения, C_s

$$C_s = (1,36 - \varphi) \left(\frac{11}{\psi_p + 8} \right) - 0,14,$$

где $\varphi = \tanh \chi$.

Показатель степени n

$$n = 0,7 + 0,08\varphi + 0,005\psi_p.$$

Вследствие высокого коэффициента избытка воздуха в продуктах сгорания, идущих через котел-утилизатор, теплофизические свойства газов определяем по таблицам для воздуха (табл. 4.)

Коэффициент теплопроводности газов λ , Вт/м·К.

Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м²/с.

Критерий Прандтля Pr .

Приведенный коэффициент теплоотдачи для пучков труб со спирально-ленточным оребрением

$$\alpha_{1np} = \left(\frac{H_{тр}}{H} + \frac{H_p}{H} \cdot E \cdot \mu \cdot \varphi_E \right) \alpha_k, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Вспомогательный параметр для спирально-ленточного оребрения

$$mh_{p6} = h_p \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta_{p6} \lambda_{p6}}}.$$

Коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи по длине ребра

$$\varphi_E = 1 - 0,058 \cdot mh_{p6}.$$

Отношение диаметров оребрения D/d .

Коэффициент эффективности ребра E , рисунок 6.

31. Внутренний диаметр труб $d_{вн}$, м.

32. Число труб в змеевике $m = 1,0$.

33. Живое сечение для прохода пара

$$f_{жс} = \frac{\pi d_{вн}^2 Z_1 m}{4}, \text{ м}^2.$$

34. Удельный объем пара, при средних значениях давления и температуры пара в пароперегревателе υ , м³/кг.

35. Скорость пара

$$w_{п} = \frac{D \cdot \upsilon}{f_{жс}}, \text{ м/с}.$$

Если скорость пара больше 30 м/с, принять число труб в змеевике $m = 2$.

36. Коэффициент теплоотдачи со стороны пара (рис. 7).

$$\alpha_2 = C_d \alpha_n, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

37. Коэффициент тепловой эффективности $\psi = 0,8$.

38. Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\psi \alpha_{\text{лп}}}{1 + \frac{\alpha_{\text{лп}}}{\alpha_2} \cdot \frac{H}{H_{\text{вн}}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}).$$

Отношение площади оребренной поверхности к площади внутренней поверхности труб

$$\frac{H}{H_{\text{вн}}} = \psi_p \cdot \frac{d}{d - 2\delta_{\text{тр}}}$$

39. Температурный напор на входе.

$$\Delta t_1 = \vartheta' - t'', \text{ } ^\circ\text{C}.$$

40. Температурный напор на выходе

$$\Delta t_2 = \vartheta'' - t', \text{ } ^\circ\text{C}.$$

41. Условный температурный напор при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

42. Поправочный коэффициент $\psi = 1$.

43. Температурный напор схем с перекрестным током при общем противотоке

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

44. Поверхность нагрева пароперегревателя

$$H = \frac{Q_{\text{б}} \cdot B_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}, \text{ м}^2.$$

Испаритель высокого давления

1. Расположение труб шахматное.

2. Высота газохода h , м.

3. Ширина газохода b , м.

4. Диаметр труб d , м с толщиной стенки δ , м.

5. Шаги труб: поперечный s_1 , м; продольный s_2 , м.

6. Относительные шаги труб пароперегревателя принимаем: поперечный $\sigma_1 = s_1/d$; продольный $\sigma_2 = s_2/d$.

7. Высота ребра $h_{\text{рб}}$, м.

8. Толщина ребра $\delta_{\text{рб}}$, м.

9. Шаг оребрения $s_{\text{рб}}$, м.

10. Диаметр ребра $D_{\text{рб}} = 60$ мм.

11. Коэффициент, учитывающий уширение ребра, 1,0.

12. Число труб в каждом ряду

$$Z_1 = \frac{b - s_1}{s_1}, \text{ шт.}$$

13. Коэффициент оребрения

$$\psi_p = \frac{1}{2ds_{p6}}(D_{p6}^2 - d^2 + 2D_{p6}\delta_{p6}) + 1 - \frac{\delta_{p6}}{s_{p6}}.$$

14. Относительная площадь труб в оребренной поверхности

$$\frac{H_{Tp}}{H} = \frac{1}{\psi_p} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{p6}}{s_{p6}}\right).$$

15. Относительная площадь ребер в оребренной поверхности

$$\frac{H_p}{H} = 1 - \frac{H_{Tp}}{H}.$$

16. Живое сечение для прохода газов

$$F_{ж.с.} = \left[1 - \frac{1}{\sigma_1} \cdot \left(1 + 2 \frac{h_{p6} \cdot \delta_{p6}}{d \cdot s_{p6}}\right)\right] h \cdot b, \text{ м}^2.$$

17. Температура газов на входе в испаритель $\vartheta' = 481^\circ\text{C}$.

18. Теплосодержание газов на входе $I' = 20075 \text{ кДж/кг}$.

19. Температура воды на входе в испаритель $t'_B = t_{н \text{ бвд(бнд)}}$, $^\circ\text{C}$.

20. Энтальпия воды на входе в испаритель $i'_B, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

21. Температура пара на выходе $t''_B = t_{н \text{ бвд(бнд)}}$, $^\circ\text{C}$.

22. Энтальпия пара на выходе $i''_{нп}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

23. Тепловосприятие испарителя по балансу

$$Q_6 = \frac{D_{пе}(i'' - i')}{B_p}, \text{ кДж/м}^3.$$

24. Теплосодержание газов за испарителем.

$$I'' = I' - \frac{Q_6}{\varphi}, \text{ кДж/м}^3.$$

25. Температура газов на выходе $\vartheta'', ^\circ\text{C}$.

26. Средняя температура газов.

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

27. Средняя температура пароводяной смеси

$$t = \frac{t' + t''}{2}, ^\circ\text{C}.$$

28. Коэффициент теплопроводности металла ребра $\lambda = 30 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$.

29. Средняя скорость газов

$$W_\Gamma = \frac{B_p V_\Gamma (\vartheta + 273)}{273 F_{жс}}, \text{ м/с}.$$

30. Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_k = 0,113 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^n \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, $C_z = 1$

Вспомогательный параметр x для шахматного пучка

$$x = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{1,26}{\psi_p} - 2.$$

Коэффициент, определяемый в зависимости от относительных поперечного и продольного шагов труб в пучке, типа пучка и коэффициента оребрения, C_s

$$C_s = (1,36 - \varphi) \left(\frac{11}{\psi_p + 8} \right) - 0,14,$$

где $\varphi = \text{th } x$.

Показатель степени n

$$n = 0,7 + 0,08\varphi + 0,005\psi_p.$$

Коэффициент теплопроводности газов λ , Вт/м·К.

Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м²/с.

Критерий Прандтля Pr .

Приведенный коэффициент теплоотдачи для пучков труб со спирально-ленточным оребрением,

$$\alpha_{\text{ипр}} = \left(\frac{H_{\text{тр}}}{H} + \frac{H_p}{H} \cdot E \cdot \mu \cdot \varphi_E \right) \alpha_k, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Вспомогательный параметр для спирально-ленточного оребрения

$$\text{mh}_{\text{рб}} = h_p \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta_{\text{рб}} \lambda_{\text{рб}}}}.$$

Коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи по длине ребра

$$\varphi_E = 1 - 0,058 \cdot \text{mh}_{\text{рб}}.$$

Отношение диаметров оребрения D/d .

Коэффициент эффективности ребра E , рисунок 6.

31. Коэффициент тепловой эффективности $\psi = 0,8$.

32. Коэффициент теплопередачи $k = \psi \alpha_{\text{ипр}}$, Вт/(м²К).

33. Температурный напор на входе

$$\Delta t_1 = \vartheta' - t' \text{ } ^\circ\text{C}.$$

34. Температурный напор на выходе

$$\Delta t_2 = \vartheta'' - t'', \text{ } ^\circ\text{C}.$$

35. Условный температурный напор при прямотоке

$$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

36. Поправочный коэффициент $\psi = 1$

37. Температурный напор схем с перекрестным током при общем прямотоке
 $\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}}$, °C.

38. Поверхность нагрева испарителя

$$H = \frac{Q_6 \cdot B_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}, \text{ м}^2.$$

Экономайзер высокого давления

1. Расположение труб шахматное.

2. Высота газохода h , м.

3. Ширина газохода b , м.

4. Диаметр труб d , м, с толщиной стенки δ , м.

5. Шаги труб: поперечный s_1 , м; продольный s_2 , м.

6. Относительные шаги труб пароперегревателя: поперечный $\sigma_1 = s_1/d$; продольный $\sigma_2 = s_2/d$.

7. Высота ребра $h_{\text{рб}}$, м.

8. Толщина ребра $\delta_{\text{рб}}$, м.

9. Шаг оребрения $s_{\text{рб}}$, м.

10. Диаметр ребра $D_{\text{рб}}$, м.

11. Коэффициент, учитывающий уширение ребра, 1,0.

12. Число труб в каждом ряду

$$Z_1 = \frac{b - s_1}{s_1}, \text{ шт.}$$

13. Коэффициент оребрения

$$\psi_p = \frac{1}{2ds_{\text{рб}}} (D_{\text{рб}}^2 - d^2 + 2D_{\text{рб}}\delta_{\text{рб}}) + 1 - \frac{\delta_{\text{рб}}}{s_{\text{рб}}}.$$

14. Относительная площадь труб в оребренной поверхности

$$\frac{H_{\text{тр}}}{H} = \frac{1}{\psi_p} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{\text{рб}}}{s_{\text{рб}}} \right).$$

15. Относительная площадь ребер в оребренной поверхности

$$\frac{H_p}{H} = 1 - \frac{H_{\text{тр}}}{H}.$$

16. Живое сечение для прохода газов

$$F_{\text{ж.с.}} = \left[1 - \frac{1}{\sigma_1} \cdot \left(1 + 2 \frac{h_{\text{рб}} \cdot \delta_{\text{рб}}}{d \cdot s_{\text{рб}}} \right) \right] h \cdot b, \text{ м}^2.$$

17. Температура газов на входе в экономайзер ϑ' , °C.

18. Теплосодержание газов на входе Γ' , кДж/кг.

19. Температура воды на входе в экономайзер $t' = t'_{\text{нбвд}}$, °C.

20. Энтальпия воды на входе в экономайзер $i'_в$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

21. Температура воды на выходе $t'' = t''_{\text{нбвд}}$, °C.

22. Энтальпия воды на выходе $i''_в$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

23. Тепловосприятие экономайзера по балансу

$$Q_6 = \frac{D_{\text{пе}}(i'' - i')}{B_p}, \text{ кДж/м}^3.$$

24. Теплосодержание газов за экономайзером

$$I'' = I' - \frac{Q_6}{\phi}, \text{ кДж/м}^3.$$

25. Температура газов на выходе ϑ'' , °C.

26. Средняя температура газов

$$\vartheta = \frac{\vartheta' + \vartheta''}{2}, \text{ °C.}$$

27. Средняя температура воды

$$t = \frac{t' + t''}{2}, \text{ °C.}$$

28. Коэффициент теплопроводности металла ребра $\lambda = 30 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$.

29. Средняя скорость газов

$$W_\Gamma = \frac{B_p V_\Gamma (\vartheta + 273)}{273 F_{\text{жс}}}, \text{ м/с.}$$

30. Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_\kappa = 0,113 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^n \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2\text{K.}$$

Поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, $C_z = 1$

Вспомогательный параметр χ для шахматного пучка

$$\chi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{1,26}{\psi_p} - 2.$$

Коэффициент, определяемый в зависимости от относительных поперечного и продольного шагов труб в пучке, типа пучка и коэффициента оребрения, C_s

$$C_s = (1,36 - \phi) \left(\frac{11}{\psi_p + 8} \right) - 0,14,$$

где $\phi = \text{th } \chi$.

Показатель степени n

$$n = 0,7 + 0,08\phi + 0,005\psi_p.$$

Коэффициент теплопроводности газов λ , Вт/м·K.

Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м²/с.

Критерий Прандтля Pr .

Приведенный коэффициент теплоотдачи для пучков труб со спирально-ленточным оребрением

$$\alpha_{\text{лп}} = \left(\frac{H_{\text{тп}}}{H} + \frac{H_p}{H} \cdot E \cdot \mu \cdot \phi_E \right) \alpha_\kappa, \text{ Вт/(м}^2\text{K).}$$

Вспомогательный параметр для спирально-ленточного оребрения

$$mh_{p6} = h_p \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta_{p6} \lambda_{p6}}}.$$

Коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи по длине ребра

$$\varphi_E = 1 - 0,058 \cdot mh_{p6}.$$

Отношение диаметров оребрения D/d .

Коэффициент эффективности ребра E , рисунок 6.

31. Коэффициент тепловой эффективности $\psi = 0,8$.

32. Коэффициент теплопередачи

$$k = \psi \alpha_{1np}, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

33. Температурный напор на входе

$$\Delta t_1 = \vartheta' - t'', \text{ }^\circ\text{C}.$$

34. Температурный напор на выходе

$$\Delta t_2 = \vartheta'' - t' \text{ }^\circ\text{C}.$$

35. Условный температурный напор при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \text{ }^\circ\text{C}.$$

36. Поправочный коэффициент $\psi = 1$.

37. Температурный напор схем с перекрестным током при общем прямотоке

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}}, \text{ }^\circ\text{C}.$$

38. Поверхность нагрева экономайзера

$$H = \frac{Q_{\delta} \cdot B_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}, \text{ м}^2.$$

Газовый подогреватель конденсата

1. Расположение труб шахматное.

2. Высота газохода h , м.

3. Ширина газохода b , м.

4. Диаметр труб d , м, с толщиной стенки δ , м.

5. Шаги труб: поперечный s_1 , м; продольный s_2 , м.

6. Относительные шаги труб пароперегревателя: поперечный $\sigma_1 = s_1/d$; продольный $\sigma_2 = s_2/d$.

7. Высота ребра h_{p6} , м.

8. Толщина ребра δ_{p6} , м.

9. Шаг оребрения s_{p6} , м.

10. Диаметр ребра D_{p6} , м.

11. Коэффициент, учитывающий уширение ребра, 1,0.

12. Число труб в каждом ряду

$$Z_1 = \frac{b - s_1}{s_1}, \text{ шт.}$$

13. Коэффициент оребрения

$$\psi_p = \frac{1}{2ds_{pб}} (D_{pб}^2 - d^2 + 2D_{pб}\delta_{pб}) + 1 - \frac{\delta_{pб}}{s_{pб}}.$$

14. Относительная площадь труб в оребренной поверхности

$$\frac{H_{Tp}}{H} = \frac{1}{\psi_p} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{pб}}{s_{pб}}\right).$$

15. Относительная площадь ребер в оребренной поверхности

$$\frac{H_p}{H} = 1 - \frac{H_{Tp}}{H}.$$

16. Живое сечение для прохода газов

$$F_{ж.с.} = \left[1 - \frac{1}{\sigma_1} \cdot \left(1 + 2 \frac{h_{pб} \cdot \delta_{pб}}{d \cdot s_{pб}}\right)\right] h \cdot b, \text{ м}^2.$$

17. Температура газов на входе в ГПК ϑ' , °C.

18. Теплосодержание газов на входе I' , кДж/м².

19. Температура газов на выходе ϑ'' , °C.

20. Теплосодержание газов за ГПК I'' , кДж/м².

21. Тепловосприятие по балансу

$$Q_б = \varphi(I' - I''), \text{ кДж/кг}.$$

22. Температура воды на входе в ГПК $t'_{ГПК}$, °C.

23. Энтальпия воды на входе в ГПК $i'_в, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

24. Энтальпия воды на выходе:

$$i'' = i' + \frac{Q_б B_p}{D_{ГПК}}, \text{ кДж/кг},$$

где $D_{ГПК} = D_{псевд} + D_{пенд}$.

25. Температура воды на выходе $t''_в$, °C.

26. Средняя температура газов

$$\vartheta = \frac{\vartheta' + \vartheta''}{2}, \text{ °C}.$$

27. Средняя температура воды

$$t = \frac{t' + t''}{2}, \text{ °C}.$$

28. Коэффициент теплопроводности металла ребра $\lambda = 30 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$.

29. Средняя скорость газов

$$W_r = \frac{B_p V_r (\vartheta + 273)}{273 F_{жс}}, \text{ м/с}.$$

30. Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_\kappa = 0,113 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^n \text{Pr}^{0,33}, \text{ Вт/м}^2\text{K},$$

Поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, $C_z = 1$
 Вспомогательный параметр x для шахматного пучка

$$x = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{1,26}{\psi_p} - 2.$$

Коэффициент, определяемый в зависимости от относительных поперечного и продольного шагов труб в пучке, типа пучка и коэффициента оребрения, C_s

$$C_s = (1,36 - \varphi) \left(\frac{11}{\psi_p + 8} \right) - 0,14,$$

где $\varphi = \text{th } x$.

Показатель степени n

$$n = 0,7 + 0,08\varphi + 0,005\psi_p.$$

Коэффициент теплопроводности газов λ , Вт/м·К.

Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м²/с.

Критерий Прандтля Pr .

Приведенный коэффициент теплоотдачи для пучков труб со спирально-ленточным оребрением

$$\alpha_{\text{лп}} = \left(\frac{H_{\text{тр}}}{H} + \frac{H_p}{H} \cdot E \cdot \mu \cdot \varphi_E \right) \alpha_k, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Вспомогательный параметр для спирально-ленточного оребрения

$$\text{mh}_{\text{рб}} = h_p \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta_{\text{рб}} \lambda_{\text{рб}}}}.$$

Коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи по длине ребра

$$\varphi_E = 1 - 0,058 \cdot \text{mh}_{\text{рб}}.$$

Отношение диаметров оребрения D/d .

Коэффициент эффективности ребра E , рисунок 6.

31. Коэффициент тепловой эффективности $\psi = 0,8$.

32. Коэффициент теплопередачи $k = \psi \alpha_{\text{лп}}$, Вт/(м²К).

33. Температурный напор на входе $\Delta t_1 = \vartheta' - t''$, °С.

34. Температурный напор на выходе $\Delta t_2 = \vartheta'' - t'$, °С.

35. Условный температурный напор при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \text{ °С.}$$

36. Поправочный коэффициент $\psi = 1$.

37. Температурный напор схем с перекрестным током при общем прямотоке
 $\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}^{\text{усл}}$, °С.

38. Поверхность нагрева ГПК

$$H = \frac{Q_6 \cdot B_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}, \text{ м}^2.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мунц, В. А., Тепловой и аэродинамический расчет котлов-утилизаторов за газовыми турбинами : учебно-методическое пособие / В. А. Мунц, О. А. Раков, Ю. В. Ракова. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 100 с. – URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/55400> (дата обращения 13.01.2026). – Текст: электронный.
2. Смородин, С. Н. Котельное оборудование тепловых электростанций : учебное пособие / С. Н. Смородин, В. Н. Белоусов, К. Г. Живаева. — Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – 83 с. – URL: <https://nizrp.narod.ru/metod/kpte/1756402125.pdf> (дата обращения 15.01.2026). – Текст: электронный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1. Исходные данные для расчетов

Исходные данные	Обозн.	Ед. изм.	В.-0,5	В.-1,6	В.-2,7	В.-3,8	В.-4,9
Паропроизводительность, ВД	$D_{\text{пвд}}$	кг/с	62,17	64,03	27,78	29,58	16,67
Давление перегретого пара, ВД	$P_{\text{пвд}}$	бар	78	78	80	80	84
Температура перегретого пара, ВД	$t_{\text{пвд}}$	°C	510	510	540	540	495
Паропроизводительность, НД	$D_{\text{пенд}}$	кг/с	13,78	17,39	6,39	5,81	4,50
Давление перегретого пара, НД	$P_{\text{пенд}}$	бар	6	6	6	6	6
Температура перегретого пара, НД	$t_{\text{пенд}}$	°C	233	233	210	210	220
Температура воды на входе ГПК	$t'_{\text{ГПК}}$	°C	40	40	40	40	40
Температура уходящих газов	$\vartheta_{\text{ух}}$	°C	113	113	100	113	100
Температура газов за ГТУ	$\vartheta_{\text{ГТУ}}$	°C	536	536	531	574	531
Температура газов за ЧВД	$\vartheta_{\text{чвд}}$	°C	243	240	232	227	240
Расход газов за ГТУ	V	м ³ /с	417	417	108	167,88	107,98
Расход топлива	B_p	м ³ /с	12,632	11,014	4,074	6,5278	4,074
Расход газов за ГТУ на м ³ топлива	$V_{\text{Г}}$	м ³ /	33,03	37,89	26,50	25,72	26,50
Коэффициенты избытка воздуха	α	—	3,264	3,735	2,607	2,578	2,648

Таблица 2. Характеристики поверхностей нагрева

Наименование величин	Варианты 0,1,5,6					
	ППВД	ИВД	ЭВД	ППНД	ИНД	ГПК
Наружный диаметр, мм	38	38	38	38	38	38
Толщина стенки, мм	3,5	2,9	3,5	2,9	2,9	2,9
Расположение труб	Шахматное					
Движение среды относительно газов	проти- воток	прямо- ток	противоток	проти- воток	прямо- ток	проти- воток
Поперечный шаг, мм	92,2					
Продольный шаг, мм	79					
Шаг оребрения, мм	4,7	4,0	4,2	5	5	3,8
Высота ребра, мм	11	11	11	11	11	11
Толщина ребра, мм	1	1	1	1	1	1
Наименование величин	Варианты 2,3,7,8					
	ППВД	ИВД	ЭВД	ППНД	ИНД	ГПК
Наружный диаметр, мм	38	38	32	38	38	32
Толщина стенки, мм	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Расположение труб	Шахматное					
Движение среды относительно газов	проти- воток	прямо- ток	противоток	проти- воток	прямо- ток	проти- воток
Поперечный шаг, мм	89	80	64	89	89	64
Продольный шаг, мм	89	89	75	89	89	75
Шаг оребрения, мм	4,7	4,0	4,2	5	5	3,8
Высота ребра, мм	12	12	12	12	12	12
Толщина ребра, мм	1	1	1	1	1	1
Наименование величин	Варианты 4,9					
	ППВД	ИВД	ЭВД	ППНД	ИНД	ГПК
Наружный диаметр, мм	38	38	32	38	38	32
Толщина стенки, мм	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Расположение труб	Шахматное					
Движение среды относительно газов	проти- воток	прямо- ток	противоток	проти- воток	прямо- ток	проти- воток
Шаг оребрения, мм	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Поперечный шаг, мм	80	80	76	80	80	76
Продольный шаг, мм	69	69	65	69	69	65
Высота ребра, мм	13	13	13	13	13	13
Толщина ребра, мм	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Таблица 3. Энтальпии продуктов сгорания

$\vartheta^{\circ}\text{C}$	В.-0,5		В.-1,6		В.-2,7		В.-3,8		В.-4,9	
	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI
100	4020	4082	5016	5091	3469	3525	3452	3507	3469	3525
200	8102	4160	10107	5189	6994	3593	6959	3575	6994	3593
300	12262	4257	15296	5305	10587	3679	10533	3661	10587	3679
400	16520	4362	20602	5435	14267	3770	14194	3751	14267	3770
500	20882	4456	26037	5554	18037	3850	17945	3831	18037	3850
600	25338	4584	31591	5714	21887	3961	21776	3941	21887	3961

Примечание

Определение энтальпии газов

$$I_{\vartheta} = I_{\vartheta_0} + \frac{\Delta I}{100} (\vartheta - \vartheta_0), \text{ кДж/кг};$$

определение температуры газов

$$\vartheta = \frac{I_{\vartheta} - I_{\vartheta_0}}{\Delta I} 100 + \vartheta_0, ^{\circ}\text{C},$$

где I_{ϑ} – энтальпия газов при температуре ϑ ; I_{ϑ_0} – энтальпия газов при температуре ближайшей меньшей по данной таблице; ϑ_0 – ближайшее меньшее значение температуры газов.

Таблица 4. Физические свойства воздуха

$t, ^{\circ}\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$	Pr
0	13,6	2,42	0,70
100	23,5	3,18	0,69
200	35,3	3,89	0,69
330	48,9	4,47	0,69
400	63,8	5,03	0,7
500	723,2	5,6	0,7
600	98,0	6,14	0,71