

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович

Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Дата подписания: 09.06.2026 13:18:36

Уникальный программный ключ:

528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Саратовский университет генетики, биотехнологии и

инженерии имени Н.И. Вавилова»

**Методические указания по выполнению
курсовой работы «Определение эффективности применения
котла-утилизатора» по дисциплине «Энергосбережение в
теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях»**

для студентов 4,5 курса

Направление подготовки

Теплоэнергетика и теплотехника

Направленность (профиль)

Энергообеспечение предприятий

САРАТОВ 2026

Методические указания по выполнению курсовой работы «Определение эффективности применения котла-утилизатора» по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях» для студентов направления подготовки Теплоэнергетика и теплотехника/ Сост.: Л.А. Лягина // ФГБОУ ВО «Вавиловский университет». – Саратов, 2026. – 30 с.

Методические указания направлены на формирование навыков по эффективному использованию энергии на основе нормативно-правовой базы энергосбережения, по разработке и осуществлению мероприятий по энерго- и ресурсосбережению на производстве. Материал ориентирован на вопросы профессиональной компетенции будущих специалистов в области теплоэнергетики и теплотехники.

ВВЕДЕНИЕ

Для закрепления знаний теоретических основ энергосбережения в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях, практического их применения и приобретение навыков пользования ГОСТами, СНиПами, справочниками, учебной и научной литературой в разрезе дисциплины «Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях» предусмотрена курсовая работа.

В объеме курсовой работы студенты выполняют расчеты котла-утилизатора, по результатам которых производят заключение об эффективности энергосберегающего мероприятия: установки в теплотехнологической схеме дополнительного устройства для использования вторичных ресурсов. Каждый студент по заданию производит расчеты котла-утилизатора при заданных параметрах.

Методические указания содержат методики по расчеты основных устройств котла-утилизатора. Приводятся правила оформления расчетно-пояснительной записки и графической части курсовой работы.

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из текстовой и графической частей. Текстовая часть включает в себя пояснительную записку и спецификации к графической части работы.

Пояснительная записка курсовой работы содержит:

- Титульный лист
- Задание
- Содержание
- Введение
- Расчетная часть:
 - расчет энтальпии газов и параметров пара и воды
 - тепловой баланс и паропроизводительность котла-утилизатора
 - расчет пароперегревателя
 - расчет испарителя
 - расчет экономайзер
 - расчет параметров электродного водонагревателя непроточного типа.
- Заключение
- Список литературы
- Приложения

Титульный лист является первым листом пояснительной записки и включает наименование министерства, университета, факультета и кафедры, наименование курсовой работы, подписи преподавателя и студента, и оформляется по образцу, приведенному в приложении А.

Задание на выполнение курсовой работы выдается каждому студенту в соответствии с индивидуальным номером варианта по данным таблицы приложение Б.

Текстовый материал пояснительной записки выполняется машинописным способом в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-2001 ЕСКД «Общие требования к текстовым документам» на одной стороне листа формата А4 (210 × 297 мм) с рамкой и основной надписью в соответствии с ГОСТ 2.104-2006 по форме 2 (40 × 185 мм) для заглавного листа и по форме 2а (15 × 185 мм) – для последующих листов. Шрифт машинописи или высота букв и цифр в рукописи должны быть не менее 2,5 мм с двойным интервалом (в компьютерном наборе шрифт «Times New Roman», начертание «обычный», размер «14», междустрочный интервал «полуторный»).

При оформлении текста пояснительной записки от рамки формы текстового документа до границ текста следует оставлять: в начале строк не менее 5 мм, в конце строк не менее 3 мм. Расстояние от верхней или нижней строки текста до рамки формы должно быть не менее 10 мм. Каждый абзац начинают, отступая 12,5 мм от левой границы текста.

Каждый раздел работы должен начинаться с новой страницы. Подразделы следуют друг за другом без вынесения последующего на новую страницу, за исключением случая, когда подраздел начинается внизу страницы, а после заголовка на странице остается менее двух-четырех строк основного текста. В структуру пояснительной записки могут быть введены пункты и подпункты. Каждый подраздел должен отступать от предыдущего текста на 15 мм. Расстояния между заголовком раздела и последующим заголовком подраздела должно составлять 10 мм.

Разделы должны иметь сквозную нумерацию в пределах всей записки и обозначаться арабскими цифрами без точки. Исключение составляют разделы «Содержание», «Введение», «Заключение», «Список литературы» и «Приложения», которые не нумеруются. Если документ имеет подразделы, то нумерация подразделов должна быть в пределах раздела, а нумерация пункта должна состоять из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точками. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Все листы записки должны быть последовательно пронумерованы проставлением номера в соответствующую графу основной надписи каждого листа. Нумерация листов должна быть сквозной от титульного листа до последнего.

Спецификацию составляют на отдельных листах на каждую сборочную единицу и оформляют согласно ГОСТ 2.106-96 на листах формата А4 с основной надписью по форме 2 и 2а. При брошюровании пояснительной записки спецификации вкладываются как приложения.

Графическая часть курсового проекта состоит из листов формата А3 на которых представляется сборочный чертеж котла-утилизатора, принципиальная схема котла-утилизатора, схема присоединения котла-утилизатора в парогазовой установке, принципиальная электрическая схема управления работой водонагревателя, типовые схемы системы ГВС, функциональная схема УПУ с котлом-утилизатором. Допускается выполнение схемы на листах формата А4.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ

Назначение и виды. В процессе работы некоторых технологических установок, таких как печи различного назначения, газотурбинные электростанции и газоперекачивающие установки, образуется большое количество выхлопных газов, температура которых доходит до нескольких сотен градусов. Это огромное количество тепловой энергии, выбрасывать которую в атмосферу не только неразумная трата денег, но еще и большой вред для экологии.

Для полезного использования тепла уходящих газов были разработаны котлы-утилизаторы. Котлы-утилизаторы (КУ) представляют собой теплообменные устройства, передающие тепловую энергию, содержащуюся в выхлопных газах, другим теплоносителям, в качестве которых может выступать вода или термальное масло. Конструктивной особенностью котлов-утилизаторов является отсутствие собственной горелки. В ней просто нет необходимости ввиду того, что в котле не происходит сгорание топлива.

Практическое применение котлов-утилизаторов.

В качестве реального примера применения котлов-утилизаторов можно привести нефтеперерабатывающие и металлургические заводы. В процессе переработки нефти или плавки металла образуется огромное количество энергии, которую никак невозможно применить в производственном процессе кроме, как пустить на котел-утилизатор и использовать для других целей, таких как отопление помещений, горячее водоснабжение (ГВС), кондиционирование (производство холода), или производство пара для покрытия сторонних технологических нужд.

На НПЗ применяются термомасляные котлы утилизаторы, в которых температура теплоносителя может достигать 350⁰С. Этой температуры вполне достаточно для того, чтобы постоянно поддерживать нефтепродукты с высокой вязкостью, такие как мазут, гудрон и битум, в жидком состоянии. Это дает возможность в любой момент произвести перекачку нефтепродуктов и их отгрузку потребителю.

На металлургических заводах посредством котлов-утилизаторов тепло отходящих газов передается воде. В результате этого образуется большое количество пара, часть из которого служит для обеспечения процесса плавки стали, а часть идет на бытовые нужды (отопление, подогрев воды).

Котлы-утилизаторы стали неотъемлемой частью следующих объектов: нефтеперерабатывающие заводы, предприятия черной и цветной металлургии; газотурбинные и газопоршневые электростанции единичной мощностью от 1000кВт до 18 МВт; газоперекачивающие компрессорные станции; хлебопекарные заводы; производства резинотехнических изделий; фармацевтические предприятия; производства смол и пластиков; производства электронных компонентов и др.

Классификация котлов-утилизаторов.

Котлы-утилизаторы классифицируются по назначению и по конструктивным особенностям.

По назначению котлы-утилизаторы подразделяются на следующие виды:

- водогрейные,
- паровые,
- термомасляные.

По конструкционным особенностям выделяют две группы:

- змеевиковые, служащие для подогрева диатермического масла и выработки пара,
- жаротрубные, применяемые для производства пара и горячей воды.

Кроме того, можно выделить котлы-утилизаторы с вертикальной и горизонтальной конструкцией теплообменников. Еще одним конструкционным отличием котлов-утилизаторов является наличие или отсутствие пароперегревателей.

Влияние котлов-утилизаторов на экологию.

Использование котлов-утилизаторов в производственных процессах оказывает благотворное влияние на экологическую обстановку. Во-первых, котлы-утилизаторы снижают выброс тепловой энергии в окружающую среду. Во-вторых, позволяют значительно сократить сжигание твердого, жидкого или газообразного углеводородного топлива, а это, в свою очередь позволяет уменьшить выбросы парниковых газов (окиси углерода CO и оксиды азота NOx).

Это снижает влияние теплоэнергетики и других технологий на климат, позволяет предприятию зарабатывать на снижении издержек за счет экономии топлива.

3. РАСЧЕТ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Котлы–утилизаторы серии КУ предназначены для выработки перегретого пара на основе использования физического тепла газов.

Основными элементами котла-утилизатора являются барабан, испарительная поверхность нагрева, пароперегреватель и водяной экономайзер. В отдельных случаях могут отсутствовать пароперегреватель или водяной экономайзер, или оба вместе. Принципиальная расчетная схема котла-утилизатора дана на рисунке 1. При начальной температуре газов ниже 800°С пароперегреватель, как правило, располагается первым по ходу газов. Приведенный ниже порядок теплового расчета котла-утилизатора как раз и рассматривает этот чаще всего встречающийся на практике случай.

Для реальных условий эксплуатации необходимо уметь оценивать производительность имеющегося оборудования при различных расходах и параметрах отходящих газов. Целью расчета является определение количества теплоты, воспринимаемой имеющимися поверхностями нагрева и паропроизводительности котла-утилизатора при заданных параметрах.

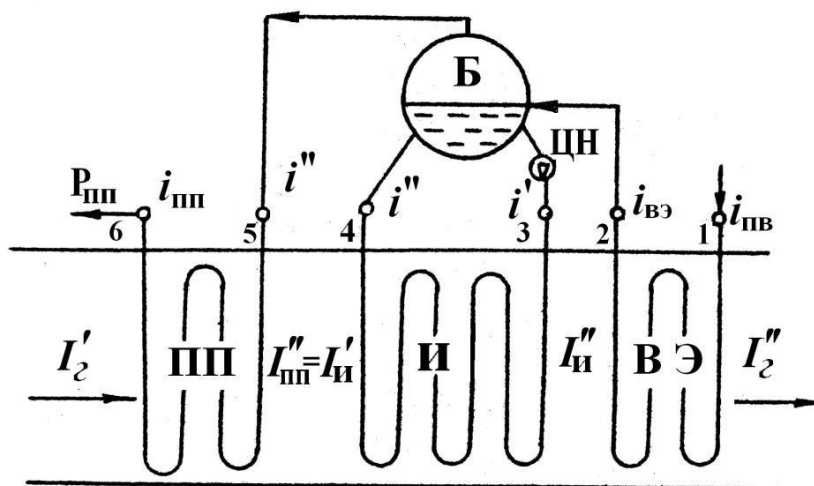


Рисунок 1. Схема котла-утилизатора:

Б - барабан; ВЭ - водяной экономайзер; И - испаритель; ПП - пароперегреватель; ЦН - циркуляционный насос; 1, 2, 3, 4, 5, 6 - коллекторы экономайзера, испарителя и пароперегревателя соответственно

3.1. РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ ГАЗОВ И ПАРАМЕТРОВ ПАРА И ВОДЫ

Объемная теплоемкость газов при входе в котел-утилизатор подсчитывается как теплоемкость смеси газов при температура газов перед котлом-утилизатором по формуле:

$$c_p = \sum c_{p_i} r_i, \quad (1)$$

где $c_{p,i}$ - объемные теплоемкости компонентов смеси при постоянном давлении при $t'_Г$, кДж/(м³·К) (П.1);

r_i - объемные доли компонентов смеси

Объемная теплоемкость газов на выходе из котла рассчитывается аналогично по формуле (1) по заданной температуре t'_2 .

Энтальпия газов на входе в котел-утилизатор, кДж/м³:

$$I'_z = c_p t'_z. \quad (2)$$

Энтальпия газов на выходе из котла-утилизатора, кДж/м³:

$$I''_z = c_p t''_z. \quad (3)$$

По вычисленным значениям I'_z и I''_z строят график зависимости изменения энтальпии газов в газоходах котла. Зависимость I_z от изменения t_z линейная и для построения графика достаточно двух точек. При дальнейшем расчете, определив из уравнения теплового баланса энтальпию газов в том или ином газоходе, по $I-t$ диаграмме определяют температуру газов.

Энтальпию перегретого пара i_{nn} при заданных значениях температуры t_{nn} и давления P_{nn} перегретого пара находят по $i-s$ диаграмме (П.2). Для этого находят точку пересечения изотермы с изобарой, и проецируют ее на ось энтальпий.

Определяют давление пара в барабане, представляющим собой сумму давления перегретого пара и гидравлического сопротивления пароперегревателя $\Delta P \approx 0,1 P_{nn}$:

$$P_{\sigma} = P_{nn} + \Delta P. \quad (4)$$

Определяют по $i-S$ диаграмме температуру пара в барабане t_s и его энтальпию i'' , при условии, что степень сухости пара, выходящего из барабана, $x=1$. Для этого находят точку пересечения изобары при давлении P_{σ} с линией соответствующей сухости пара $x=1$.

Спроецировав полученную точку на ось энтальпий определяют энтальпию пара в барабане, а его температура соответствует изотерме, проходящей через найденную точку.

Предполагая, что вода в барабане находится при той же температуре что и пар, определяют ее энтальпию i' (П.3).

Определяют энтальпию питательной воды, кДж/кг:

$$i_{ng} = 4,19 t_{ng} \quad (5)$$

3.2. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ПАРПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Принимается коэффициент сохранения тепла $\varphi=(0,95 \dots 0,98)$.

Теплота, отданная дымовыми газами, кВт:

$$Q_{\Gamma} = \varphi G_0 (I'_r - I''_r) / 3600, \quad (6)$$

где G_0 - объемный расход газов при нормальных условиях, м³/ч.

Паропроизводительность, кг/с:

$$D_{пп} = Q_{\Gamma} / [(i_{пп} - i_{пв}) + \psi_1 (i' - i_{пв})], \quad (7)$$

где ψ_1 - величина непрерывной продувки котла, (принимаемая 0,03...0,05).

3.3. РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

Теплота, идущая на перегрев пара, кВт:

$$Q_{nn} = D_{nn} (i_{nn} - i') \quad (8)$$

Энтальпия газов за пароперегревателем, кДж/м³:

$$I'_{\text{пп}} = I'_r - 3600Q_{\text{пп}} / (G_o \cdot \varphi) \quad . \quad (9)$$

По построенному ранее графику зависимости I_2 от изменения t_2 определяется температура газов за пароперегревателем $t'_{\text{пп}}$.

Большая разность температур, °С:

$$\Delta t_{\delta} = (t'_2 - t'_s) \quad . \quad (10)$$

Меньшая разность температур, °С:

$$\Delta t_m = (t'_{\text{пп}} - t_{\text{пп}}) \quad . \quad (11)$$

Температурный напор, °С:

$$\Delta t = \frac{(\Delta t_{\delta} - \Delta t_m)}{\ln(\Delta t_{\delta} / \Delta t_m)} \quad . \quad (12)$$

Средняя температура дымовых газов в пароперегревателе, °С:

$$t_r = (t'_r + t'_{\text{пп}}) / 2 \quad . \quad (13)$$

Живое сечение для прохода газов f_g принимается по прототипу (П.4.).

Скорость движения дымовых газов, м/с:

$$w_r = \frac{G_o(t_r + 273)}{3600f_g \cdot 273} \quad . \quad (14)$$

Средняя температура пара, °С:

$$t_{\text{ср}} = (t_s + t_{\text{пп}}) / 2 \quad . \quad (15)$$

Живое сечение для прохода пара $f_{\text{п}}$ принимается по прототипу (П.4.).

Средняя скорость перегретого пара, м/с:

$$w_{\text{пер}} = \frac{v_{\text{пп}} D_{\text{пп}}}{f_{\text{п}}} \quad , \quad (16)$$

где $v_{\text{пп}}$ - удельный объем перегретого пара при средней его температуре $t_{\text{ср}}$, м³/кг (П.3).

Объемная доля водяных паров в газах, проходящих через котел-утилизатор:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H_2\text{O}}{100} \quad . \quad (17)$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке, Вт/(м² °С):

$$\alpha_1 = \alpha'_n C_z C_s C_{\phi} \quad , \quad (18)$$

где C_z - поправочный коэффициент на количество труб z по ходу газов (П.5);

C_s - поправочный коэффициент учитывающий расположение труб (П.5);

C_ϕ – поправочный коэффициент, учитывающий температуру и содержание водяных паров в газах (П.5);

α_n – коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании коридорного пучка труб, Вт/(м² °С) (П.5):

$$\sigma_1 = s_1/d; \quad \sigma_2 = s_2/d.$$

Температуру стенки принимают равной средней температуре между средней температурой дымовых газов t_2 и средней температурой пара t_{cp} .

Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/(м² °С):

$$\alpha_2 = \alpha_n C_\Gamma, \quad (19)$$

где C_Γ – поправочный коэффициент (П.6).

α_n – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/(м² °С) (П.6).

Коэффициент тепловой эффективности принимают равным $\psi = 0,6 \div 0,8$.

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м² °С):

$$k = \frac{\Psi \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}. \quad (20)$$

Тепловосприятие пароперегревателя, Вт:

$$Q_\tau = k F_{\text{пп}} \Delta t, \quad (21)$$

где $F_{\text{пп}}$ - площадь поверхности пароперегревателя, принимается по прототипу (П.4).

3.4. РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЯ

Температура газов за испарителем t принимается в пределах 260-320 °С.

Энтальпия газов за испарителем I'_I определяется по построенной ранее диаграмме.

Количество теплоты, отданное газами пароводяной смеси, кВт:

$$Q_{\text{и}} = \varphi G_o (I'_{\text{пп}} - I'_i) / 3600. \quad (22)$$

Большая разность температур, °С:

$$\Delta t_B = (t''_{\text{III}} - t_s). \quad (23)$$

Меньшая разность температур, °С:

$$\Delta t_M = (t''_I - t_s). \quad (24)$$

Средний температурный напор, °С:

$$\Delta t_{II} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}}. \quad (25)$$

Средняя температура газов в испарителе, °С:

$$t'_{\Gamma} = \frac{t'_{II} + t''_{III}}{2}. \quad (26)$$

Живое сечение для прохода газов по испарителю f_{Γ} принимается по прототипу (П.4.).
Скорость движения дымовых газов, м/с:

$$w'_{\Gamma} = \frac{G_o(t'_{\Gamma} + 273)}{3600 f_{\Gamma} \cdot 273}. \quad (27)$$

Коэффициент теплоотдачи α'_I определяется по формуле (18), Вт/(м²·°С).
Коэффициент теплопередачи испарителя, Вт/(м²·°С):

$$k_{II} = \zeta \alpha'_I. \quad (28)$$

где ζ - коэффициент использования, принимается в пределах 0,65÷0,8.

Тепловосприятие испарителя, Вт:

$$Q_{\Gamma} = k_{II} F \Delta t. \quad (29)$$

3.5. РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА

Количество теплоты, отданное водяному экономайзеру, кВт:

$$Q_{BЭ} = \varphi G_o (I'_u - I'_z) / 3600. \quad (30)$$

Энтальпия воды на выходе из экономайзера, кДж/кг:

$$i'_{\Gamma} = \frac{Q_{BЭ}}{D_{nn}} + i_{не}. \quad (31)$$

Температура воды на выходе из экономайзера, °С:

$$t'_{BЭ} = \frac{i'_{\Gamma}}{c_{H2O}}, \quad (32)$$

где c_{H2O} – теплоемкость воды кДж/(кг·°С) П.3.

Средняя температура газов в испарителе, °С:

$$t_{\Gamma}^{CP} = \frac{t'_{и} + t''_{\Gamma}}{2}. \quad (33)$$

Большая разность температур, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta t_{Б} = (t''_{\Gamma} - t_{ПВ}). \quad (34)$$

Меньшая разность температур, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta t_{М} = (t''_{И} - t''_{В}). \quad (35)$$

Средний температурный напор, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{М}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{М}}}. \quad (36)$$

Скорость движения дымовых газов, м/с:

$$w_{\Gamma} = \frac{G_o (t^{CP}_{\Gamma} + 273)}{3600 f_{\Gamma} \cdot 273}. \quad (37)$$

Коэффициент теплоотдачи α_1'' определяется по формуле (18), Вт/($\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$).
Коэффициент теплопередачи экономайзера, Вт/($\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$):

$$k_{\text{Э}} = \zeta \alpha_1'. \quad (38)$$

Тепловосприятие водяного экономайзера

$$Q_{\text{Т}} = k_{\text{Э}} F \Delta t. \quad (39)$$

Определим экономию топлива от применения котла-утилизатора за год

$$\frac{Q}{Q_{\text{н}}}$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания условного топлива.

Для проверки выполненных расчетов вычерчивается график зависимости температуры теплоносителей и их энтальпий от площади поверхности теплообмена котла-утилизатора.

Объем и содержание графической части задаются преподавателем-консультантом.

3.6 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ НЕПРОТОЧНОГО ТИПА

Электродный способ относится к прямому нагреву и применяется для проводников второго рода, т.е. обладающих ионной проводимостью: воды, молока, фруктовых и ягодных соков, сочных кормов, почвы, бетона и т.п.

Преобразование электрической энергии в тепло происходит непосредственно в нагреваемой среде – электролите, в котором под действием электрического поля начинается упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов вещества к электродам, находящимся под электрическим потенциалом. Двигаясь с ускорением, ионы сталкиваются с нейтральными атомами и молекулами веществ электролитов и отдают при этом запасенную кинетическую энергию, которая превращается в тепловое движение этих элементарных частиц. Тем самым, теплосодержание вещества и его температура повышаются.

Электродный нагрев является наиболее простым и экономичным способом нагрева, а сам электродный нагреватель не требует для своего изготовления дорогостоящих материалов и очень надежен в работе. Преобразование электрического тока в тепло в таком нагревателе происходит с высоким КПД, поскольку это преобразование происходит непосредственно в нагреваемом материале. Для такого нагревателя выкипание воды не является опасным для целостности электродов. Однако, такой нагреватель при определенных условиях является электрически опасным для животных и людей. Его мощность в процессе нагрева не остается постоянной, а по мере роста температуры – увеличивается в 3...4 раза. Кроме того, средняя мощность нагревателя зависит от удельного сопротивления воды. И, наконец, такой нагреватель применим для нагрева только токопроводящих жидкостей.

Электродная система водонагревателя по форме бывает плоской или цилиндрической. Электроды при этом выполняют лишь функцию ввода тока в нагреваемый материал, но сами током практически не нагреваются. Для их изготовления можно применять обычную или нержавеющей сталь, электротехнический графит. Во избежание электролиза воды и образования гремучего газа в таких нагревателях используется только переменный ток, т.к. постоянный ток тот час вызывает электролиз. Однако, работая на переменном токе данный тип нагревателя может также вызвать электролиз, т.е. разложение нейтральной молекулы воды H_2O на два атома водорода и один - кислорода и образования при этом гремучей смеси. Такая смесь, состоящая из двух частей (по объему) водорода и одной части кислорода очень взрывоопасна, однако ее образование можно избежать, если ограничить плотность тока на электродах до предельно допустимых значений, которые соответствуют для плоских электродов $j_{\text{доп. max}} = 0,5 \text{ A/cm}^2$, для электродов цилиндрической формы $j_{\text{доп. max}} = 2,0 \text{ A/cm}^2$

Допустимая напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве не должна превышать пробивной прочности $E_{пр}$. воды во избежание нарушения нормальной работы водонагревателя, В / см

$$E_{доп.} = E_{пр.} / (1,5 \dots 2,0)$$

Вода без примесей практически не проводит электрический ток. Проводимость воды обусловлена наличием растворенных в ней солей, кислот, щелочей, молекулы которых образуют ионы. Так, например, содержание 0,5 мг/кг солей повышает проводимость воды на $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Величина, обратная проводимости называется удельным сопротивлением.

Удельное сопротивление воды зависит от ее температуры. С возрастанием температуры увеличивается степень диссоциации молекул солей и кислот на ионы и их подвижность, вследствие чего сопротивление воды уменьшается.

Величина тока, протекающего через воду, а, следовательно, и мощность водонагревателя зависит от сопротивления воды. Поэтому эти параметры также переменны в процессе нагрева, что является одним из недостатков электродных водонагревателей.

Выбор системы электродов, схемы их соединения, напряжения питания производится согласно исходным данным (приложение_1). Определение расстояния между электродами по условию допустимой напряженности электрического поля $E_{доп.}$.

Для электродной системы 1 расстояние L (см) между электродами определяется по выражению

$$L = \frac{U_{\Phi}}{E_{доп.}}, \quad (40)$$

где U_{Φ} – напряжение между электродами, В;

$E_{доп.}$ – допустимая напряженность поля, В/см.

Допустимую напряженность поля принять равной $E_{доп.} = 125 \dots 250 \text{ В/см}$

Для электродной системы 2 целесообразно соотношение $D/d = e = 2.71$

Для электродных систем 3 и 4 $R = r/0,21$; $a = 0,51R$. Радиус электрода r принять равным $r = 3 \dots 7 \text{ см}$.

Геометрический коэффициент электродной системы K_N (N – номер схемы).

$$K_1 = \frac{L}{(n-1) \cdot b}, \quad (41)$$

где L – расстояние между электродами, см;

n – коэффициент, учитывающий схему соединения электродов ($n=4$)

b – длина электрода, см.

длину электрода принять равной $b = 3 \dots 10 \text{ см}$.

$$K_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{d}, \quad (42)$$

$$K_3 = \frac{1}{6\pi} \cdot \ln \frac{3a^2(R^2 - a^2)^3}{r^2(R^6 - a^6)}, \quad (43)$$

$$K_4 = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{3a^2(R^2 - a^2)^3}{r^2(R^6 - a^6)}, \quad (44)$$

Высота электродов, см

$$h = \frac{40M \cdot c \cdot \rho_{20} \cdot K}{3U_{\phi}^2 \cdot \tau \cdot \eta \cdot 3,6} \cdot \ln \frac{20 + t_k}{20 + t_n}, \quad (45)$$

где M – масса нагреваемой воды, кг;

c – теплоемкость воды, ($c = 4,19$ кДж/(кг·°C));

ρ_{20} – удельное сопротивление воды при 20°C, Ом·см;

τ – время нагрева, ч;

η – КПД нагрева ($\eta = 0,94 \div 0,96$);

t_n, t_k – начальная и конечная температура, °C.

Мощность через параметры электродной системы.

Начальная однофазная, Вт

$$P_H = \frac{U_{\phi}^2 \cdot h \cdot (20 + t_n)}{40 \cdot \rho_{20} \cdot K}, \quad (46)$$

начальная трехфазная, Вт

$$P_{H3\phi} = 3 \cdot P_H, \quad (47)$$

конечная однофазная, Вт

$$P_K = \frac{U_{\phi}^2 \cdot h \cdot (20 + t_k)}{40 \cdot \rho_{20} \cdot K}, \quad (48)$$

конечная трехфазная, Вт

$$P_{K3\phi} = 3 \cdot P_K, \quad (49)$$

средняя мощность, Вт

$$P_{cp} = \frac{P_{H3\phi} + P_{K3\phi}}{2}, \quad (50)$$

Мощность через технологические параметры, кВт

$$P = \frac{M \cdot c \cdot (t_k - t_n)}{3600 \cdot \tau \cdot \eta}, \quad (51)$$

Численное значение средней мощности P_{cp} , определяемой через параметры электродной системы не должно отличаться более чем на 20% от мощности, рассчитанной по технологическим параметрам.

Постоянная времени нагрева электродной системы, ч

$$T = \frac{40 \cdot M \cdot c \cdot K \cdot \rho_{20} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot h \cdot \eta \cdot 3600}, \quad (52)$$

Проверка на допустимую плотность тока, A/cm^2

$$j_{max} = \frac{K_H \cdot I_{tk}}{S}, \quad (53)$$

где K_H – коэффициент неравномерности плотности тока на электродах, ($K_H = 1,1 \dots 1,3$);

S – активная площадь электродов, cm^2 ;

I_{tk} – ток при конечной температуре t_k , А.

$$I_{tk} = \frac{P_k}{U_{\phi}}, \quad (54)$$

Активная площадь круглых электродов, cm^2

$$S = \pi d \left(\frac{d}{2} + h \right), \quad (55)$$

Активная площадь плоских электродов, cm^2

$$S = b \cdot h, \quad (56)$$

Необходимым является соблюдение условия

$$j_{max} < j_{доп}, \quad (57)$$

где $j_{доп}$ – допустимая плотность тока на электродах, A/cm^2

При несоблюдении условия (1.18) расчет необходимо повторить при других значениях радиуса электрода r или допустимой напряженности электрического поля $E_{доп}$.

Построение графиков ρ , $P = f(t)$

$$P_{(3)} = \frac{3U_{\phi}^2 \cdot h(20 + t)}{40\rho_{20} \cdot K}, \text{ Вт} \quad (58)$$

$$\rho_t = \frac{40\rho_{20}}{20 + t}, \text{ Ом}\cdot\text{см} \quad (59)$$

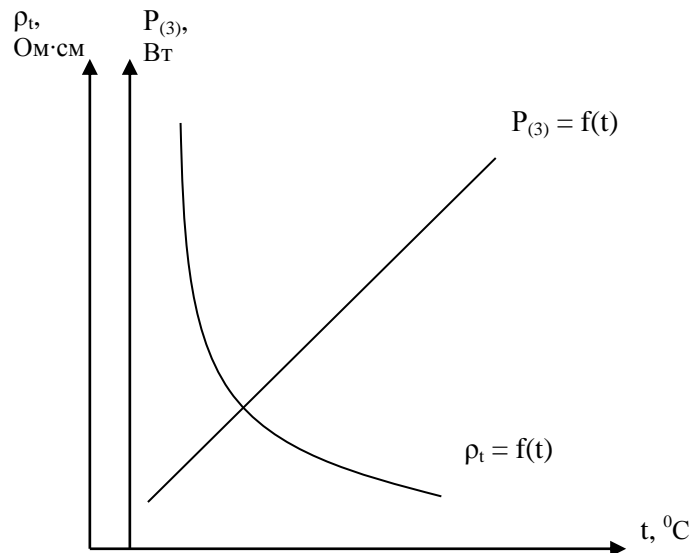


Рис.1. Зависимости удельного сопротивления воды ρ_t и мощности водонагревателя $P_{(3)}$ от температуры t

Задаваясь температурой воды t от начального значения t_n до конечного t_k и используя выражения (1.19) и (1.20), построить зависимости $\rho, P = f(t)$.

Производительность нагревателя в режиме парообразования.

Удельное сопротивление воды с учетом парообразования, Ом·см

$$\rho_{\text{кип}} = \rho_{100} \cdot \beta, \quad (60)$$

где $\beta = 0,925 \cdot e^{1,5j_{100}}$ – эмпирический коэффициент ($\beta > 1$);

1,5 – коэффициент, зависящий от давления пара;

j_{100} – плотность тока на электроде при $t = 100$ °С, А/см²

$$j_{100} = \frac{K_n \cdot I_{100}}{S}, \quad (61)$$

где I_{100} – ток при температуре $t = 100$ °С, А

$$I_{100} = \frac{P_{100}}{U_{\phi}}, \quad (62)$$

где P_{100} – мощность при температуре $t = 100$ °С

$$P_{100} = \frac{3U_{\phi}^2 \cdot h}{\rho_{20} \cdot K}, \quad (63)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление воды при $t = 100$ °С.

Мощность парообразователя по параметрам электродной системы, кВт

$$P_{\text{кип}}^{\text{э}} = \frac{3U^2 \cdot h}{K \cdot \rho_{100}} 10^{-3}, \quad (64)$$

Паропроизводительность нагревателя, кг/час

$$G = \frac{3600 \cdot P_{\text{кип}}^T \cdot \eta_{\text{п}}}{i'' - c}, \quad (65)$$

где $P_{\text{кип}}^T$ – мощность парогенератора по технологическим параметрам, кВт (принимается равной мощности парогенератора, определяемой по параметрам электродной системы $P_{\text{кип}}^э \cong P_{\text{кип}}^T$);

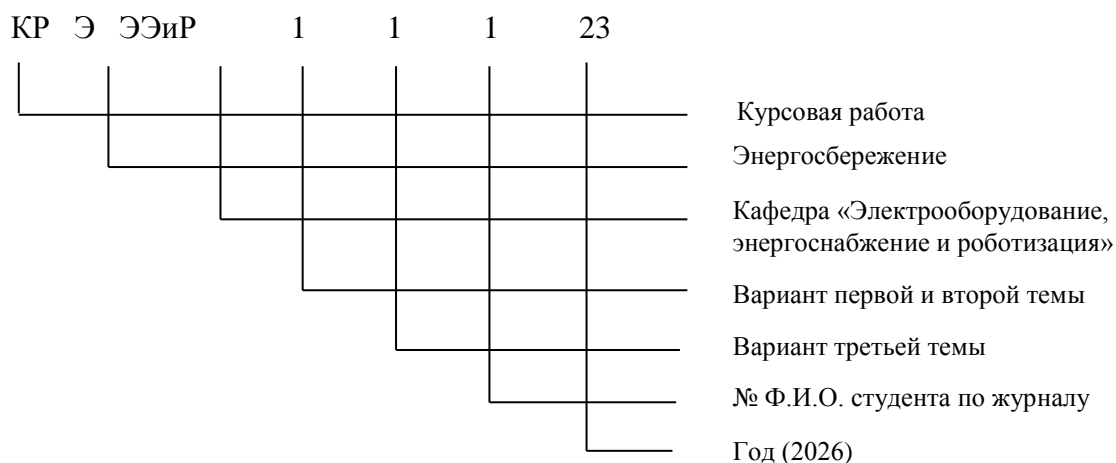
i'' – энтальпия пара при заданном давлении P , кДж/кг (приложение_1)

c – энтальпия воды при начальной температуре, кДж/кг ($c = t_{\text{н}} \cdot 4,19$)

Привести принципиальную электрическую схему управления работой водонагревателя.

Выбрать аппаратуру управления и защиты.

В верхнем поле штампа указывают индивидуальный шифр курсовой работы.
Например:



В графе против фамилии разработчик (обучающий) ставит свою подпись. В конце приводят список используемой литературы.

Принципиальные электрические схемы управления выполняют в соответствии с положениями ГОСТ 2.701-84, ГОСТ 2.755-87, ГОСТ 2.756-76 и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голов, Р.С. Основы энергосбережения в промышленности/ Голов Р.С., Теплышев В.Ю., Прокофьев Д.А. Фокин В.М. – Москва: Вузовский учебник: ИТК Дашков и К, 2025. <https://znanium.ru/catalog/document?id=461384>
2. Кондратьев, В.В. Организация энергосбережения (энергomenеджмент). Решения ЗСМК-НКМК-НТМК-ЕВРАЗ: учебное пособие/ В.В.Кондратьев. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2024. <https://znanium.ru/read?id=444674><https://znanium.ru/read?id=460210>
3. Протасевич, А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха/ А.М. Протасевич. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2025. <https://znanium.ru/read?id=460210>
4. Данилов О.Л. Энергосбережение в теплотехнологиях и теплоснабжении в примерах и задачах: учеб. пособие/ О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев – М.: Издательство МЭИ, 2006. – 48 с.
5. Моисеев, А.П. Электротехнологическое оборудование в сельскохозяйственном производстве. Учебное пособие / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин, Л.А. Лягина / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – 2-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Амирит, 2018. – 103с

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Требования к оформлению курсовой работы	4
2. Общие сведения о котлах-утилизаторах	6
3. Расчет котла-утилизатора	8
3.1. Расчет энтальпии газов и параметров пара и воды	8
3.2. Тепловой баланс и паропроизводительность котла-утилизатора	9
3.3. Расчет папоререгревателя	9
3.4. Расчет испарителя	11
3.5. Расчет экономайзера	13
3.6. Расчет параметров электродного водонагревателя непроточного типа	14
Библиографический список	21
Приложение	23

Приложения А

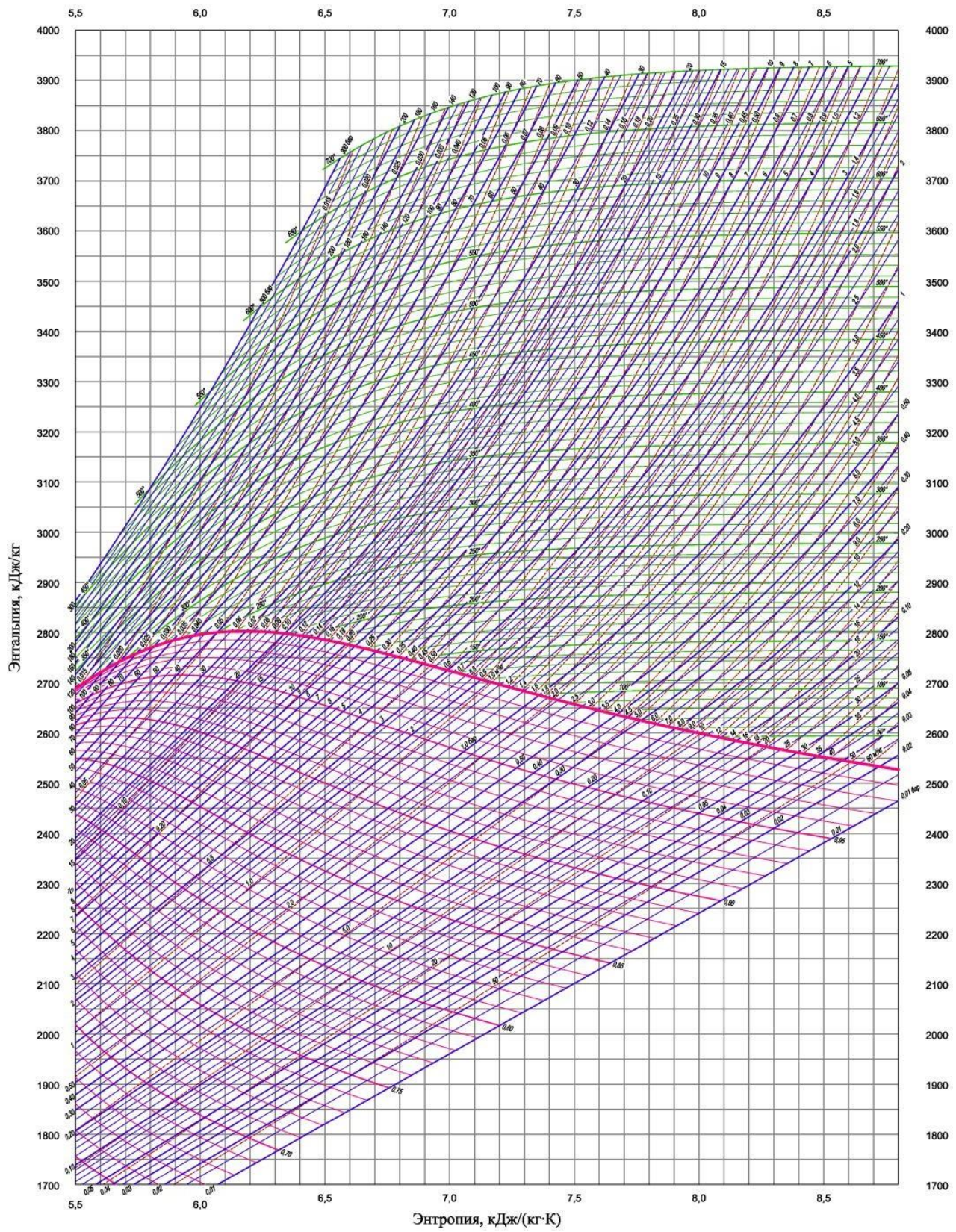
П.1 Теплоемкость газов, $c_{p,i}$ кДж/($\text{м}^3\text{К}$)

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	H ₂
0	1,3046	1,2992	1,29922	1,5914	1,4943	1,7333	1,278
100	1,3167	1,304	1,3013	1,7132	1,5056	1,813	1,2905
200	1,3356	1,3042	1,3075	1,7961	1,5219	1,888	1,299
300	1,3565	1,3113	1,3172	1,8711	1,5424	1,957	1,3
400	1,3766	1,3205	1,3289	1,9377	1,5654	2,018	1,303
500	1,3967	1,3327	1,3431	1,9967	1,5893	2,072	1,307
600	1,416	1,3456	1,3578	2,0494	1,6144	2,1114	1,309
700	1,4344	1,359	1,3716	2,0967	1,6412	2,152	1,311
800	1,4503	1,3720	1,3854	2,1395	1,6684	2,186	1,316
900	1,4662	1,385	1,3992	2,1823	1,6956	2,22	1,321

П.3 Удельные объемы и энтальпии сухого насыщенного пара и воды на кривой насыщения

P, МПа	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
$t, ^\circ\text{C}$	151,1	179,0	197,4	211,4	222,9	232,8	241,4	249,2	256,2
$v_{\text{гп}}, \text{м}^3/\text{кг}$	0,382	0,198	0,134	0,101	0,081	0,068	0,058	0,051	0,045
$i', \text{кДж/кг}$	637,3	759,2	839,7	904,6	957,8	1004	1045	1083	1117
$c_{\text{H}_2\text{O}}, \text{кДж/кг}$	4,280	4,337	4,419	4,494	4,551	4,618	4,685	4,763	4,869

П.2 *i-S* диаграмма

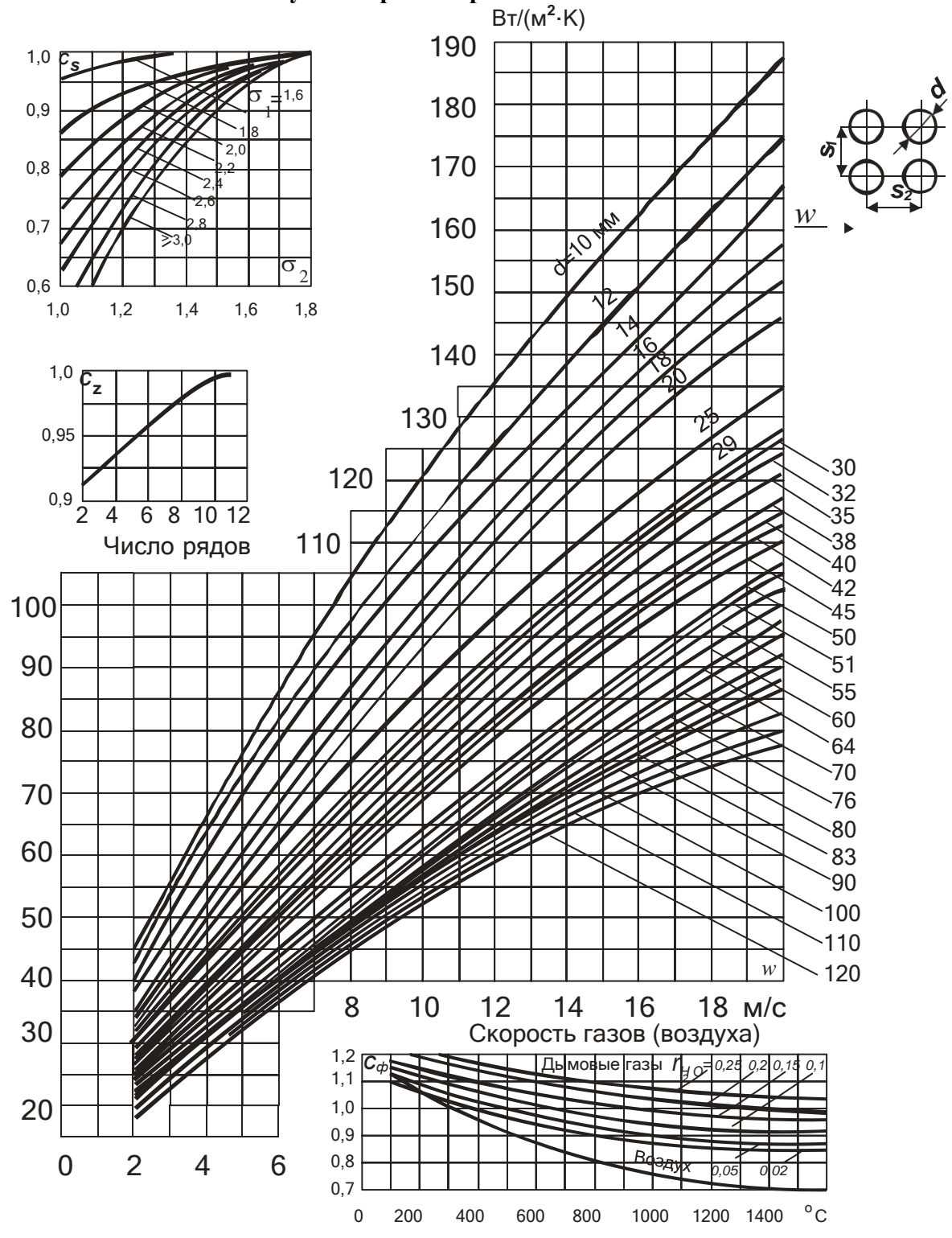


Приложение 4. Конструктивные характеристики котлов-утилизаторов

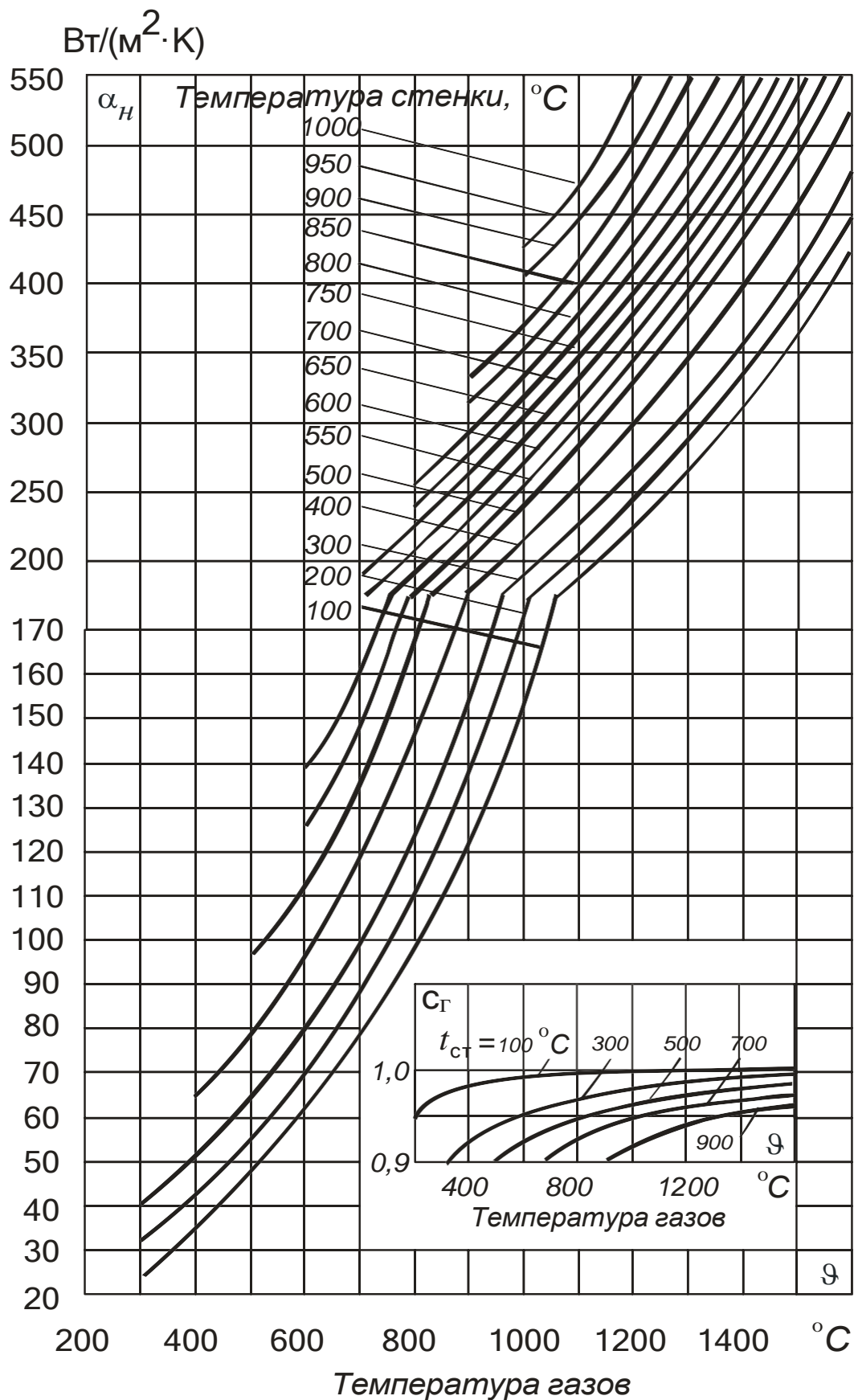
Характеристика	Типоразмер котла	Испаритель	Пароперегреватель	Экономайзер
Расчетная площадь поверхности нагрева, F, м ²	КУ40-1	122	43,5	185
	КУ-60-2	156	70	247
	КУ-80-3	244	87	370
	КУ-100-1	315	110	460
	КУ-125	410	144	615
	КУ-150	475	166	725,1
Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, fг, м ²	КУ40-1	4,315	3,17	
	КУ-60-2	7,0	5,06	
	КУ-80-3	8,63	6,34	
	КУ-100-1	10,8	8,04	
	КУ-125	13,2	10,3	
	КУ-150	16,6	12,5	
Площадь живого сечения для пара и воды, fp, м ²	КУ40-1	0,0202	0,0101	0,0063
	КУ-60-2	0,0318	0,0159	0,0085
	КУ-80-3	0,0404	0,0202	0,0127
	КУ-100-1	0,0425	0,0212	0,0127
	КУ-125	0,0552	0,0276	0,0170
	КУ-150	0,0636	0,0318	0,0170
Диаметр труб, d		32	26	

Количество рядов по ходу газов, z	Для всех котловКУ	12	8	4
Шаги по ширине S_1		172	86	90
Шаги по глубине S_2		70		

II.5 Коэффициент теплоотдачи конвекцией для ширм и коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании



П.6. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде



Приложения Б
ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

ФГБОУ ВО Вавиловский университет
Институт инженерии и робототехники
Кафедра «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация»

Утвердил
зав. каф. Э,Э и Р _____ / _____ /

ЗАДАНИЕ
на выполнение курсовой работы по дисциплине
«Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях»

Выдано обучающемуся _____
(фамилия, имя, отчество)

Курса _____ Группы _____

Тема курсовой работы:

«Определение эффективности применения котла-утилизатора»

Номер варианта _____.

Содержание расчетно-пояснительной записки:

1. Расчет энтальпии газов и параметров пара и воды.
2. Тепловой баланс и паропроизводительность котла-утилизатора.
3. Расчет пароперегревателя.
4. Расчет испарителя.
5. Расчет параметров электродного водонагревателя непроточного типа.

Перечень графического материала:

- схема присоединения котла-утилизатора в парогазовой установке;
- принципиальная электрическая схема управления работой водонагревателя;
- типовые схемы системы ГВС;
- функциональная схема УПГУ с котлом-утилизатором.

Графическая часть курсовой работы допускается на листах формата А3, А4.

Курсовая работа оформляется согласно учебному пособию:

Методические указания по выполнению курсовой работы «Определение эффективности применения котла-утилизатора» по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях» для студентов направления подготовки Теплоэнергетика и теплотехника/ Сост.: Л.А. Лягина // ФГБОУ ВО Вавиловский _____ . – Саратов, 2026. – 23 с.

Электротехнологическое оборудование в сельскохозяйственном производстве. Учебное пособие / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин, Л.А. Лягина / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – 2-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Аимирит, 2018. – 103с

Задание выдал доцент кафедры Э, Э и Р

Дата выдачи задания _____

Срок сдачи законченной работы _____

Руководитель работы _____

Защита курсовой работы

Задание принял

к исполнению _____

подпись и дата

Варианты заданий на выполнение курсовой работы

№ варианта	G_0 , тыс. $M^3/ч$	t'_2 , °C	t'_2 , °C	P_{nn} , МПа	t_{nn} , °C	$t_{nв}$, °C	котел- прототип	Состав газа						
								N ₂	CO ₂	SO ₂	CO	O ₂	H ₂	H ₂ O
1	40	850	245	4,5	385	80	КУ-40	13	78,5	-	-	1,5	-	7
2	60	850	245	4,5	385	85	КУ-60	-	78,5	5,5	-	10	-	6
3	80	850	245	4,5	385	90	КУ-80	16,8	41,8	-	14	-	3,4	24
4	100	850	245	4,5	385	95	КУ-100	5	66,6	0,4	18	-	-	10
5	125	850	245	4,5	385	100	КУ-125	8	66,8	1,2	17	-	-	7
6	150	850	245	4,5	385	80	КУ-150	13	78,5	-	-	1,5	-	7
7	40	650	240	4,5	365	85	КУ-40	-	78,5	5,5	-	10	-	6
8	60	650	240	4,5	365	90	КУ-60	16,8	41,8	-	14	-	3,4	24
9	80	650	240	4,5	365	95	КУ-80	5	66,6	0,4	18	-	-	10
10	100	650	240	4,5	365	100	КУ-100	8	66,8	1,2	17	-	-	7
11	125	650	240	4,5	365	80	КУ-125	13	78,5	-	-	1,5	-	7
12	150	650	240	4,5	365	85	КУ-150	-	78,5	5,5	-	10	-	6
13	40	850	230	1,8	350	90	КУ-40	16,8	41,8	-	14	-	3,4	24
14	60	850	230	1,8	350	95	КУ-60	5	66,6	0,4	18	-	-	10
15	80	850	230	1,8	350	100	КУ-80	8	66,8	1,2	17	-	-	7
16	100	850	230	1,8	350	80	КУ-100	13	78,5	-	-	1,5	-	7
17	125	850	230	1,8	350	85	КУ-125	-	78,5	5,5	-	10	-	6
18	150	850	230	1,8	350	90	КУ-150	16,8	41,8	-	14	-	3,4	24
19	40	650	215	1,8	340	95	КУ-40	5	66,6	0,4	18	-	-	10
20	60	650	215	1,8	340	100	КУ-60	8	66,8	1,2	17	-	-	7
21	80	650	215	1,8	340	80	КУ-80	13	78,5	-	-	1,5	-	7
22	100	650	215	1,8	340	85	КУ-100	-	78,5	5,5	-	10	-	6
23	125	650	215	1,8	340	90	КУ-125	16,8	41,8	-	14	-	3,4	24
24	150	650	215	1,8	340	95	КУ-150	5	66,6	0,4	18	-	-	10

Оформление титульного листа курсового проекта

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова»

Институт инженерии и робототехники

Кафедра «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация»

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях»

Тема: Определение эффективности применения котла-утилизатора

Студента группы Б-ТТ-.....

Направления подготовки 13.03.01

Ф.И.О.

ПОДПИСЬ

Руководитель: _____

дата, подпись

Саратов 2026