

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 24.08.2023 11:25:14

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476fd2d064c12781953be730df2374d16f5c0ce536f0fca

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжения



Расчет котла-утилизатора

Методические указания для практических занятий студентов,
обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнер-
гетика и теплотехника, 08.04.01 – Строительство

Курск 2017

УДК С07.34

Составитель В.С. Ежов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Н.Е. Семичева

Расчет котла–утилизатора: методические указания для практических занятий студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева; Юго-Зап. гос. ун-т. - Курск, 2017. - 48 с. – Библиогр.: с. 47

Наряду с теоретическими сведениями об основных принципах утилизации тепловых ВЭР промышленных печей, излагаются материалы для выполнения курсового и дипломного проектирования студентов, по дисциплинам «Теплоутилизующие установки и оборудование», «Утилизация вторичных энергоресурсов на объектах теплоэнергетики», «Теплоиспользующие установки и утилизация вторичных энергоресурсов», тепловой и аэродинамический расчет, котла–утилизатора, определение его основных конструктивных размеров и технологических параметров.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, обучающимся по направлениям 13.04.01– Теплоэнергетика и теплотехника и 08.04.01 – Строительство.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2017 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,1 Тираж 30 экз. Заказ _____. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
ВВЕДЕНИЕ	4
1 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ	6
2 КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ	16
3 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	27
4 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	38
4.1 Расчет пароперегревателя	39
4.2 Расчет испарительных секций	41
4.3 Расчет экономайзера	43
4.4 Расчет паропроизводительности котла	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	46

ВВЕДЕНИЕ

Использование вторичных энергетических ресурсов /ВЭР/, т.е. энергетических отходов технологических процессов, является наиболее экономичным по сравнению с остальными способами получения энергии, так как для этого не требуется дополнительного расхода топлива. Такой путь позволяет сократить расход постоянно дорожающего топлива, уменьшить загрязнение окружающей среды, разгрузить транспорт. Основные виды вторичных энергоресурсов – это ВЭР давления (ДВЭР), горючие ВЭР (ГВЭР) и тепловые (ТВЭР). Первые и вторые используются почти полностью, вторые – совершенно недостаточно. Поэтому данные методические указания посвящено утилизации ТВЭР.

Как правило, на технологические цели расходуется очень много топлива с низким коэффициентом полезного действия. Например, для промышленной печи он составляет всего 20...30%, а значит, имеют место огромные потери теплоты. Утилизация этой теплоты ТВЭР в масштабе страны может дать значительную экономию условного топлива – более 63 млн.т.в год. При рациональном решении сопутствующих вопросов теплоэнергетики и с учетом потерь транспортировки заменяемого топлива или электроэнергии экономия составит 75 млн.т. Такое количество топлива достаточно для теплоснабжения 50 городов с население 50 млн.чел. или эквивалентно годовой выработке электроэнергии 10 АЭС мощностью 4 млн. кВт каждая.

Главная возможность использования ТВЭР – обеспечение теплоснабжения, т.е. покрытие тепловой нагрузки технологических нужд, питательного цикла котлов и систем испарительного охлаждения, горячего водоснабжения городов, отопления и вентиляции, кондиционирования воздуха.

Кроме того, энергетические выбросы могут существенным образом влиять на состояние окружающей среды.

Так, анализ выбросов теплоты в атмосферу от совокупности промышленных объектов показывает наличие регионов площадью до 10 тыс. км² с тепловыделением от 10 до 200 Вт/м². Результатом такого теплового воздействия является образование устойчивого «острова теплоты» с температурой, на (1-4)°С, превышающей естественную для воздушной среды данного региона. Это приводит к возникновению в «островах

теплоты» туманов, облачности, увеличению атмосферных осадков.

Сброс теплоты в водоемы повышает температуру континентальных и прибрежных вод. Это приводит к уменьшению содержания растворенных в них кислорода, диоксида углерода, азота, что негативно сказывается на воспроизводстве рыб, насекомых, растений. Вместе с тем часть тепловых потерь, прежде всего установок конечного использования (технологических аппаратов), может быть утилизирована как вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

Предлагаемые методические указания посвящены утилизации и снижению тепловых выбросов в атмосферу.

1 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В соответствии с официальным определением, *вторичные энергоресурсы* – это энергетический потенциал (запас энергии в виде физической теплоты, потенциальной энергии избыточного давления, химической энергии и др.) продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, которые не могут быть использованы в самом агрегате, но могут частично или полностью применяться для энергоснабжения других потребителей [1].

По виду содержащегося в них энергетического потенциала ВЭР подразделяются на три основных группы: горючие, тепловые и избыточного давления.

Горючие ВЭР – это отходы одного производства, которые могут быть утилизированы непосредственно в виде топлива в других производствах. К ним относятся, например, технологические газы черной и цветной металлургии, жидкие и твердые топливные отходы химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, щепы, опилки, стружка, щелоки деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной отраслей.

Тепловые ВЭР – это физическая теплота отходящих газов, основной и побочной (нецелевой) продукции производства: нагретых металла, шлаков и зол; горячей воды и пара, отработанных в технологических установках, системах охлаждения и пр.

Следует отметить, что тепловая энергия отходов, выходящая из технологического агрегата и используемая для подогрева вещественных потоков, поступающих в этот же агрегат (процессы регенерации и рекуперации), ко вторичным энергоресурсам не относятся.

ВЭР избыточного давления – это потенциальная энергия покидающих установку газов, воды, пара, имеющих повышенное давление, которое может быть еще применено перед выбросом в окружающую среду. Основное направление утилизации таких ВЭР – получение электрической или механической энергии.

Многие горючие ВЭР, например черной металлургии, имеют низкую теплоту сгорания и химически агрессивны. Это создает значительные трудности при их утилизации. Они же имеют место и при сжигании высококалорийных, но одновре-

менно легко воспламеняемых, взрывоопасных и токсичных ВЭР (водород, сухие абгазы и др.).

Для утилизации горючих вторичных энергетических ресурсов часто необходимо специальное оборудование, однако основной путь их использования – применение в агрегатах индустриальных технологий.

Тепловые ВЭР – наиболее распространенный вид энергетических отходов. Их утилизация проводится практически повсеместно. В то же время привлекаются в основном высокопотенциальные (высокотемпературные) тепловые ВЭР (см. далее). Значительно меньше востребованы среднетемпературные энергетические отходы, низкотемпературные применяются еще реже.

Основное оборудование для использования тепловых ВЭР – котлы-утилизаторы (к/у), системы испарительного охлаждения промышленных печей, различного рода теплообменники, в том числе контактные нагреватели.

ВЭР избыточного давления образуются в ряде металлургических, химических, нефтеперерабатывающих производств. Ими могут обладать жидкие и газообразные отходы. Однако их применение пока не носит массового характера (избыточное давление доменного газа используют, например, в газовых бескомпрессорных турбинах).

По температуре, с которой тепловые ВЭР покидают технологические агрегаты, их делят на высоко-, средне- и низкопотенциальные.

Четкой градации ВЭР по этому признаку нет. Можно принять, что к *высокопотенциальным* относятся ВЭР, температура которых превышает наименьшую температуру газов в автогенном процессе сжигания топлива (не менее 600°C). К *низкопотенциальным* принадлежат ВЭР, представляющие собой жидкости с температурой менее 100°C и газы с температурой ниже 300°C [2]. В этом случае *среднепотенциальные* ВЭР по температуре будут занимать промежуточное положение между высоко- и низкопотенциальными энергетическими отходами.

В целом основными источниками тепловых ВЭР в различных отраслях промышленности выступают технологические агрегаты, как правило, недостаточно совершенные с энергетической стороны. Особенно неблагоприятны с точки зрения

использования теплоты сгорания топлива нагревательные и термические печи (их тепловой КПД равен 12-18%), вагранки чугунолитейных цехов (теплопотери с газами превышают 50-60%), паровые котлы низкого давления (КПД порядка 50%), паровые молоты кузнечных цехов (КПД не более 2-5%) и др.

Разработка методов и способов утилизации ВЭР промышленных предприятий в нашей стране началась в 20-30-е гг. 20 в. Тогда были заложены теоретические основы энергосбережения и предложены первые технические решения. Наиболее значительные достижения в практике утилизации тепловых отходов приходится на послевоенные годы (конец 40-х–начало 50-х гг. прошлого столетия).

В 60-х–70-х гг. 20 в. за счет использования ВЭР в стране ежегодно экономилось около 20 млн т условного топлива. Примерно на этом же уровне (около 25 млн т/год) сохранялось энергоснабжение за счет ВЭР в следующие десять лет.

Однако следует отметить, что за этот период объем энергопотребления вырос в 2,4 раза, а общая экономия энергоресурсов снизилась с 270 за 60-70 гг. до 135 млн т/год условного топлива за последующее десятилетие.

Эта негативная тенденция была связана со снижением в 60-х гг. стоимости первичных энергоресурсов за счет массового вовлечения в топливный баланс страны нефти и природного газа.

Начиная с конца 70-х–начала 80-х гг., интерес к использованию ВЭР вновь возрастает, поскольку энергоемкость единицы валового внутреннего продукта в нашей стране существенно (до 11 раз в сравнении с Японией) превысила уже достигнутый за рубежом уровень.

По мере интеграции в мировую экономику и в связи со вступлением страны в ВТО такое положение приводит к все большей неконкурентоспособности нашей продукции на мировом рынке. Именно поэтому в настоящее время одной из важнейших задач народного хозяйства России является всемерное использование ВЭР.

Из всех отраслей народного хозяйства России первое место по выходу и утилизации ВЭР занимает черная металлургия. Суммарный выход ВЭР в этой отрасли в пересчете на условное топливо равен 30-50 млн т/год при максимально возможном

показателе утилизации около 20 млн т. Остальные отрасли промышленности (цветная металлургия, химическая промышленность и др.) имеют значительно меньшие выходы и утилизацию ВЭР.

На долю черной металлургии приходится около 40% тепловых и до 80% горючих ВЭР, применяемых в промышленности. Потребности предприятий с полным металлургическим циклом в топливе (без угля для коксования) только на 30-40% покрываются за счет его привоза и на 60-70% — вторичными энергетическими ресурсами).

По виду потенциала ВЭР черной металлургии представлены всеми группами (горючие, тепловые, избыточного давления). К горючим прежде всего относятся доменный, конвертерный и коксовый газы. Они же являются высокопотенциальными тепловыми выбросами с температурой от 300 до 1600°C, а доменный газ обладает также избыточным давлением. Из металлургических печей выносятся 30-50% тепла, охлаждающими элементами воспринимается 8-20% и до 5% рассеивается в окружающую среду.

Наиболее мощным вторичным энергетическим ресурсом является доменный, или, точнее, *колошниковый* газ. В частности, за счет его сжигания в газовом балансе металлургических предприятий покрывается 35-45% потребности в теплоте. Характеристика колошникового газа: температура (175-250)°C, выход (1100-2200) м³/т чугуна; состав, %:(23-40) CO, (12-22) CO₂, (1,5-6,0) H₂, остальное — азот (N₂); теплота сгорания, Q_C — 4 МДж/м³; давление на колошнике, P_K до 0,4 МПа.

Очищенный от пыли колошниковый газ применяется главным образом в доменных воздухонагревателях, энергетических котлах, для отопления коксовых батарей, нагревательных колодцев и печей прокатного производства. В данных случаях реализуется его горючий и тепловой потенциалы. Первый обусловлен горением CO до CO₂.

Кроме того, доменный газ, обладая избыточным давлением, используется также в газовых бескомпрессорных турбинах. В 80-е гг. 20 в. себестоимость электроэнергии, вырабатываемой в них, была в 1,5-2,0 раза ниже получаемой на ТЭЦ завода и в 3,0-3,5 раза меньше, чем в единой энергетической системе (срок окупаемости не более двух лет) [3].

В США, Японии, Великобритании, Франции, Германии имеются десятки газотурбинных установок, работающих на кокшиновом газе. Германия, установив, 7 в частности, газовые турбины на всех крупных доменных печах, ежегодно вырабатывает на них до 360 млн кВт-ч электроэнергии.

К ВЭР доменного производства относится также теплота отходящих газов воздухонагревателей, составляющая 15-20% от ее расхода на подогрев доменного дутья. Их температура колеблется в пределах 150-600°C. Они могут быть использованы для выработки пара, горячей воды или для подогрева доменного газа перед входом в газовую турбину.

Вторым (после доменного) по значению источником оксида углерода на предприятиях черной металлургии является *конвертерный* газ. Его усредненный состав при плавке с верхней и нижней продувкой, %: (67-79) CO, (13-16) CO₂, (0-3) H₂ и H₂O, (5-14) N₂. Теплота сгорания газа составляет (8,4-9,2) МДж/м³ при его температуре на выходе из конвертера 1400-1600°C.

Расчеты показывают, что на крупном заводе с производительностью порядка 7 млн т/год конвертерной стали выход газа составляет ~570 млн т/год, или около 130 млн м³ в пересчете на природный газ (при теплотворной способности последнего на уровне 40 МДж/м³). Таким образом, при выплавке 1 т стали с конвертерными газами выносится энергетический потенциал, равный 17-20 м³ природного газа.

На эффективность использования ВЭР конвертеров существенное влияние оказывает способ отвода газов от них. В настоящее время применяют три варианта:

1). с полным дожиганием CO перед котлом-утилизатором, т.е. с утилизацией физического тепла конвертерных газов и их энергетического потенциала. В этом случае в атмосферу сбрасывается обеспыленный охлажденный газ, содержащий CO₂, O₂, N₂ и пары воды;

2). с частичным дожиганием CO перед котлом-утилизатором (при коэффициенте α расхода воздуха, равном 0,3-0,6) и полным его сжиганием на «свече» при сбросе газов в атмосферу. В данном варианте используется их физическое тепло и, частично, энергетический потенциал;

3). без дожигания СО перед котлом-утилизатором и его сжиганием на «свече» при сбросе газов в атмосферу (отечественная практика) или применением в качестве топлива (иностраный опыт). В первом случае утилизируется лишь их физическое тепло (при $\alpha = 0$).

В любом из рассмотренных вариантов очистка газов производится после их использования в котле-утилизаторе.

Схема утилизации тепла конвертерных газов с полным их дожиганием перед КУ применяется для агрегатов с емкостью по стали до 150 т. Сжигание осуществляется в газоходах паровых котлов. В этой схеме серийные котлы-утилизаторы, или ОКГ (охлаждатели конвертерных газов), имеют производительность по пару 160-210 т/ч при его пиковом давлении до 5 МПа.

В связи с внедрением в промышленность большегрузных конвертеров емкостью до 400 т стали и связанным с этим увеличением объема вдуваемого кислорода количество выделяющихся газов значительно возрастает. Их дожигание приведет к такому росту объема продуктов сгорания, который существенно увеличит габаритные размеры и стоимость всей установки. В этих условиях рациональной является система газоотвода без дожигания.

В котлах ОКГ-400 (цифра – масса садки металла в конвертере) паропроизводительность достигает 325 т/ч (в максимальном режиме).

Полагают, что системы ОКГ без дожигания целесообразны также для конвертеров с донной и комбинированной продувкой [4].

Охлажденный в ОКГ и очищенный конвертерный газ может улавливаться (направляться в газгольдер). В этом случае, в соответствии с иностранной практикой, газ поступает в струйные охладители и полые скрубберы, затем в трубы Вентури и далее в центробежные скрубберы (мокрые циклоны), после которых попадает в газгольдер. Такие системы улавливания конвертерного газа с усреднением его состава и расхода в газгольдерах (мокрых или сухих) и последующим использованием в качестве топлива весьма распространены за рубежом. В Японии ими оборудовано около 90% работающих конвертеров.

Мокрые газгольдеры представляют собой емкость для воды, над которой размещен резервуар телескопической конст-

рукции (верх ее способен подниматься, увеличивая объем резервуара).

В *сухих газгольдерах* поршень поднимается и опускается в результате изменения объема газа. Его верхнее положение соответствует полному заполнению газгольдера. Вместимость газгольдеров составляет от 30 до 70 тыс. м³ при производительности конвертеров (150-330) т.

Отметим, что на отечественных заводах конвертерный газ не улавливается.

В целом его энергетический потенциал в настоящее время используется лишь частично и только в самом конвертерном производстве. В качестве причин, сдерживающих полную утилизацию этого газа, обычно указывают нестабильность его выхода, изменяющийся по ходу плавки состав, взрывоопасность при содержании в нем 12,5-75% СО.

Коксовый газ – третий крупный источник горючих ВЭР черной металлургии. Из 1 т сухой шихты, помимо (750-800) кг кокса, получают (320-330) м³ коксового газа, а также 33 кг каменноугольной смолы, 80 кг – подсмольной воды, 11 кг – сырого бензола, 3кг – аммиака, которые перерабатывают в химические продукты. Из искусственных газообразных топлив (доменного, смешанного, конвертерного, генераторного) коксовый газ обладает наибольшей теплотой сгорания (свыше 17 тыс. кДж/м³).

Следует отметить в целом высокий выход ВЭР в коксохимическом производстве (около 80% от первичного энергопотребления). Это прежде всего энергетический потенциал коксового газа, выполняющего функции теплового и горючего ВЭР, а также физическое тепло кокса (тепловой ВЭР, не относящийся к газовым).

Потенциал коксового газа как теплового ВЭР определяется тем обстоятельством, что он покидает печь с температурой (700-800)°С и его теплосодержание составляет около 1000 МДж/т кокса, или до 30% расхода тепла.

Физическую теплоту коксового газа отбирают на разных стадиях охлаждения: в стояках коксовых камер – от (700-800)°С до 400°С; в газосборниках – от 400°С до 82°С; в первичных холодильниках – от 82°С до 30°С. Используется теплота первой и третьей стадий.

Для утилизации теплоты первой стадии стояки оборудуют теплообменниками, через которые в замкнутом контуре циркулирует теплоноситель. Его теплота может направляться для получения пара, горячей воды, нагрева органических теплоносителей. Теплота третьей стадии охлаждения применяется для подогрева улавливающих растворов цеха сероочистки коксового газа.

Физическая теплота кокса, выгружаемого из камеры, составляет порядка 50% от расходуемой на коксование. Ее утилизируют при сухом тушении кокса, т.е. охлаждении последнего в камере циркулирующим инертным газом (азотом). Нагревшись до $(750-800)^{\circ}\text{C}$, газ поступает в теплообменник вторичного теплоносителя (паровой котел, воздухо- или газоподогреватель, подогреватель угольной шихты или сочетание различных теплоиспользующих аппаратов и силовых установок).

Наибольшее распространение получило сухое тушение кокса с подачей теплоты в котельные установки для выработки пара (давление в перегретом состоянии до 39 МПа, температура 440°C). Охлажденный до $(150-170)^{\circ}\text{C}$ газ очищается в циклонах от пыли и возвращается в камеру тушения.

Сухой способ тушения позволяет утилизировать более 80% теплоты раскаленного кокса.

После охлаждения в системе отбора теплоты коксовый газ проходит сложную систему очистки от смол, аммиака и бензола [5]. После этого его отправляют в газгольдер, а оттуда потребителю топлива – непосредственно или через газосмесительную станцию.

Основной потребитель коксового газа как горючего ВЭР – металлургическое производство. В первую очередь он используется для нагревания мартеновских печей и агрегатов термообработки металла. При достаточном количестве его применяют также в нагревателях коксовых батарей. В этом случае продукты сгорания на выходе из генератора имеют температуру $(260-350)^{\circ}\text{C}$, унося $(15-20)\%$ подведенной теплоты. На некоторых предприятиях она расходуется на получение горячего воздуха для подогрева затворов угольной башни в зимнее время.

Структуру потребления коксового газа в качестве горючего ВЭР иллюстрируют данные по Японии, добившейся существенных результатов в его утилизации. В этой стране из общего

годового потребления коксового газа (~10 млрд м³) на обогрев коксовых печей расходуется около 22%, в металлургическом производстве – 56%, в городских отопительных системах – 10%, на ТЭЦ – 8% и т.д. [6]. В ней же энергию коксового газа довольно широко используют в газовых турбинах, соединенных в одном цикле с генераторами электрического тока.

Еще одним крупным источником горючих ВЭР является *газ закрытых ферросплавных печей*. Его выход составляет (400-800) м³/т сплава при концентрации СО в нем (70-90)%. После мокрого пылеулавливания на некоторых отечественных заводах он утилизируется как топливо, но в большинстве случаев сжигается на свечах. Помимо рассмотренных выше наиболее крупных горючих и тепловых ВЭР можно отметить наличие ряда других источников, преимущественно тепловых. Это газы агломерации, обжига известняка и окатышей, мартеновских, электросталеплавильных, ваграночных, металлонагревательных печей, колодцев прокатного производства и др. Их температура колеблется от (800-900)°С в печах с регенераторами до (900-1200)°С в термических, прокатных и кузнечных устройствах (без регенерации).

Теплота уходящих высокотемпературных газов таких мощных промышленных агрегатов может быть использована газотурбинными установками, встроенными в газовый тракт для выработки электроэнергии и подачи газа и воздуха в печь. Для более полной утилизации теплоты уходящих газов за теплообменниками газотурбинных установок обычно устанавливают котел-утилизатор, поскольку температура продуктов сгорания еще значительна (~450-500)°С. Он позволяет вырабатывать пар высоких параметров для технологических или энергетических нужд.

Поскольку температура газов после котла-утилизатора достаточно высока порядка (200-250)°С, их теплоту целесообразно использовать для коммунально-бытовых нужд, включая отопление (нагрев воды).

Резюмируя, отметим высокий уровень утилизации ВЭР черной металлургии, который уже в 1975 г. составлял более 96%, а на некоторых предприятиях приближался к 100% [7,8].

Практика проектирования и экономического обоснования эффективности утилизационных установок, их фактическая

эксплуатация показывают, что они дают большой экономический эффект. Так, себестоимость «бестопливного» пара, вырабатываемого в котлах-утилизаторах, почти в два раза ниже, чем пара аналогичных параметров от котлов заводских ТЭЦ. Эффективность капитальных вложений в производство энергии при использовании ВЭР в (2-3) раза выше, чем в топливно-энергетическом комплексе промышленности.

Таким образом, важнейшим результатом применения ВЭР является экономия первичного топлива, которая в основном определяет величину получаемого экономического эффекта.

Эффективность вовлечения ВЭР резко повышается при многоступенчатой схеме утилизации тепловых выбросов. Примером такого «комплексного» использования теплоты природного газа является кузнечно-штамповочное производство Донецкого экскаваторного завода [9]. Применяемая на нем схема сводится к следующему. Продукты сгорания после кольцевой печи поступают в многофункциональный блочный теплообменник. В его первом модуле производится подогрев воды, используемой на технологические и хозяйственно-бытовые нужды. Следующие две ступени представляют собой рекуператор, в котором нагревают воздух, подаваемый на горение топлива, до 340°C. Четвертая ступень – нагреватель сжатого воздуха, поступающего на пневмомолоты. После блочного теплообменника продукты сгорания при (200-210)°C направляют в контактный экономайзер, а затем при температуре (55-60)°C – в дымовую трубу. Использование рассмотренной схемы повышает КПД с 18% (кольцевая печь) до 92%.

Эффективность вовлечения ВЭР также повышается за счет увеличения числа потребителей НПТ при теплофикации прилегающих к предприятиям промышленных узлов и жилых районов. При этом улучшается и экологическая обстановка при закрытии мелких, без пылегазоулавливающих устройств, котельных, загрязняющих окружающую среду.

Вместе с тем расширение применения ВЭР, как и другие направления рационального использования сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, требуют внедрения новой техники и прогрессивной технологии, что связано с дополнительными капитальными затратами, особенно остродефицитными в настоящее время.

Поэтому значительная часть вторичных энергетических ресурсов либо вообще не востребована, поскольку не найдены надежные технические решения их применения, например физической теплоты литейного чугуна, нагретого металла различных прокатных станков, либо утилизируется недостаточно (химическая энергия конвертерного газа, физическая теплота жидких шлаков, зол и др.). Эффективность ВЭР снижается также из-за сезонного характера потребления пара низких параметров и иных причин неполного использования действующих установок утилизации энергетических выбросов промышленных технологий.

Очевидно, что качественный и количественный рост эффективности потребления ВЭР напрямую связан с проблемой общего возрождения народного хозяйства России, что в обозримом будущем представляется маловероятным. Действительно, в течение последних десятилетий лет наша страна реализует скудный, на уровне 20% в сравнении с 1980-1990 гг., объем инвестиций в народное хозяйство. На такой незначительной инновационной основе устойчивый рост экономики невозможен, в том числе и решение более частной задачи – эффективной утилизации вторичных энергетических ресурсов [10].

2 КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Основным производителем котлов-утилизаторов является Белгородский котельный завод, разработавший совместно с НПО ЦКТИ более 200 конструкций различных типов котлов-утилизаторов.

Среди различных типов котлов-утилизаторов в отдельную группу выделены газотрубные котлы. Маркировка газотрубных котлов: Г - горизонтальный, В – вертикальный, Б – с выносным барабаном–сепаратором, И – с предвключенной испарительной поверхностью, П – с пароперегревателем, Э – с экономайзером.

Котлы Г-150, Г-420, Г-950 предназначены для охлаждения технологических газов с целью конденсации паров серы и получения насыщенного пара в процессе обезвреживания сероводородных газов. Котлы Г-250, Г-345, Г-250П, Г-345П, Г550П, Г-145Б, Г-1030Б, Г-330БИ, Г-445БИ, Г-660БИ предназначены

для выработки насыщенного пара за счет использования тепла технологических и отходящих газов в химической, нефтехимической, металлургической и других отраслях промышленности. Вертикальные котлы В-90Б и Г-460Б предназначены для охлаждения конвертированных газов и производства насыщенного пара. Котлы Г-400ПЭ и Г-420БПЭ предназначены для получения перегретого пара за счет использования тепла отходящих газов из газовой турбины и тепла нитрозных газов в схеме получения слабой азотной кислоты. Энерготехнологические котлы КС-200 ВТКУ-М и КС-450 ВТКУ-М устанавливаются за печами обжига серного колчедана в кипящем слое производительностью 200 и 450 т/сут. Ранее для этих целей выпускали котлы марок УККС (водотрубные) и ГТКУ (газотрубные). Котлы–утилизаторы серии КУ предназначены для выработки перегретого пара на основе использования физического тепла газов, выходящих из мартеновских, нагревательных и других технологических печей. Центральный пароперегреватель ЦП-60-С предназначен для перегрева насыщенного пара, вырабатываемого котлами-утилизаторами. В качестве топлива применяется доменный газ с теплотой сгорания не менее 1000 ккал/м³. Энерготехнологический котел СЭТА-Ц-100-2М предназначен для установки в технологической линии получения серной кислоты. Сжигание серы осуществляется в циклонном предтопке с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=2$. Котел энерготехнологический ПКС-Ц-10/40 предназначен для сжигания сероводорода и охлаждения продуктов сгорания. Котлы – утилизаторы КСТК-35/40-100 и КСТ-80 предназначены для охлаждения газов, поступающих в них из камеры сухого тушения кокса и выработки перегретого пара. Охладители конверторных газов (ОКГ) предназначены для дожигания и охлаждения газов, выходящих из сталеплавильных конверторов. Характеристики некоторых типов котлов-утилизаторов приведены в табл. 1, 2, 3, 4. 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 рис. 2.1. 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.

Таблица 2.1 Основные технические характеристики котлов-утилизаторов

Тип котла	Назначение	Паропроизводительность, т/ч	Давление, МПа	Температура, С ⁰	Объем дымовых газов, м ³ /ч	Температура газов перед котлом, С ⁰	Температура уходящих газов С ⁰
1	2	3	4	5	6	7	8
Г-150	Охлаждение технологических газов в процессе обезвреживания сероводородных газов	0,53	0,5	151	2293	360	159
Г-420		1,0	0,5	151	7257	280	155
Г-950		5,0	0,5	151	21870	287	161
Г-250	Охлаждение технологических газов	3,2	1,4	194	16000	600	270
Г-345		8,1	1,4	194	40000	600	260
Г-250П		3,1	1,4	240	16000	600	260
Г-345П		7,9	1,4	260	40000	600	250
Г-550П		11,6	1,4	280	55000	600	240
Г-145Б		4,7	1,4	194	8000	1200	280
Г-1030Б		31	1,4	194	50000	1200	240

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Г-330БИ		9,5	1,4	194	15000	1200	310
Г-445БИ		15,7	1,4	194	25000	1200	250
Г-660БИ		23,3	1,4	194	35000	1200	235
В-90Б		5,0	0,8	170	25000	850	560
В-460Б		6,6	1,4	194	60000	400	225
Г-400ПЭ	В производ- стве азотной кислоты	7,5	1,6	230	66500	405	185
Г-420БПЭ		25	15	250	56200	900	-
КС-200 ВТКУ-М	За обжиговыми печами кипящего слоя	11	4	440	20000	900	450
КС-450 ВТКУ-М		25	4	440	44000	900	450
УККС 8/40		8	4,0	450	20740	825	350
УККС 4/40		4	4,4	255	10370	900	350
КС-100 ГТКУ		7,1	4,3	255	10370	900	350
КС-200 ГТКУ		11	4,0	450	20740	900	430
КУ-40-1	Использование теплоты отхо- дящих газов на предприятиях черной металлургии	12,9	4,5	385	40000	850	248
КУ-40-1		13,45	1,8	385	40000	850	227
КУ-60-2		19	4,5	392	60000	850	252
КУ-60-2		19,9	1,8	366	60000	850	229
КУ-80-3		25,8	4,5	385	80000	850	248
КУ-80-3		26,9	1,8	358	80000	850	227
КУ-100-1		32,6	4,5	382	100000	850	242
КУ-100-1		33,9	1,8	360	100000	850	242
КУ-125		40,8	4,5	385	125000	850	-
КУ-125		42,4	1,8	365	125000	850	-
КУ-100-Б		32,5	1,8	395	100000	850	232
КУ-150		50,5	4,5	393	150000	850	213
КСТК- 35/40-100	Котел- утилизатор установки	32,4	4	440	100000	800	170
КСТ-80		20	3,9	440	73944	800	180

Таблица 2.2 Основные технические характеристики котлов-утилизаторов с сжиганием топлива

Тип котла	Назначение	Паропроизводительность, т/ч	Давление, МПа	Температура, С	Вид топлива	Расход топлива	Температура уходящих газов С
СЭТА-Ц-100-2М	Энерготехнологический агрегат	13,1	4	440	Сера	100 т/сут	490
ПКСЦ-10/40		9,5	4	354	Сероводород	1600 м ³ /ч	589
ЦП-60-С	Центральный пароперегреватель	40	1,9	216-380	Доменный газ	4605 м ³ /ч	204

Таблица 2.3 Основные конструктивные размеры элементов газотрубных котлов-утилизаторов

Типоразмер котла	Дымогарные трубы				
	Диаметр и толщина, D x d, мм	Количество n, шт	Суммарное наружное сечение $\sum f_{if} \text{ м}^2$	Суммарное внутреннее сечение $\sum f_{of} \text{ м}^2$	Длина, мм
1	2	3	4	5	6
Г-150	32x3	356	0,286	0,08	4960
Г-420	32x3	1044	0,839	0,236	4960
Г-420	32x3	1600	1,286	0,362	8100
Г-950	50x3	500	0,981	0,76	3610
Г-345, Г-345П	50x3	500	0,981	0,76	4960
Г-550П	50x3	700	1,373	1,064	4960
Г-145Б	50x3	212	6,416	0,322	4960

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
Г-1030Б	50x3	1032	2,025	1,569	7300
Г-330БИ	50x3	648	1,271	0,985	3400
Г-445БИ	50x3	648	1,271	0,985	4960
Г-660БИ	50x3	648	1,271	0,985	7300
В-90Б	80x3,5	99	0,497	0,414	-
В-460Б	50x3	648	1,271	0,985	4960
Г-400ПЭ	50x3	790	1,550	1,208	3610
Г-420БПЭ	50x3	480	0,942	0,729	6300

Таблица 2.4 Расчетно-конструктивная характеристика конвективных, змеевиковых унифицированных КУ

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, м2				Пароперегреватель	Экономайзер
		1-й	2-й	3-й	4-й		
Расчетная площадь поверхности нагрева, F, м ²	КУ-40-1	30	109,5	122	110,5	43,5	185
	КУ-60-1	46	173	92	175	70	247
	КУ-80-3	60	219	244	221	87	370
	КУ-100-1	85	285	315	295	110	460
	КУ-125	110	370	410	380	144	615
	КУ-150	133,2	415	475	436	166	725,1
Число параллельно включенных змеевиков, z	КУ40-1	18	38	38	-	19	12
	КУ-60-2	28	60	60	-	30; 60	16
	КУ-80-3	36	76	76	-	38; 76	24
	КУ-100-1	40	80	80	-	40; 80	24
	КУ-125	52	104	104	-	52; 104	32
	КУ-150	64	120	120	-	60	32
Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, F _{п.с.} м2	КУ40-1	4,315	3,17	3,17	2,885	3,17	3,18
	КУ-60-2	7,0	5,06	5,06	4,63	5,066	4,55
	КУ-80-3	8,63	6,34	6,34	5,77	6,34	6,36
	КУ-100-1	10,8	8,04	8,04	7,35	8,04	7,67
	КУ-125	13,2	10,3	10,3	9,4	10,3	9,8
	КУ-150	16,6	12,5	12,5	11,5	12,5	9,65

Окончание таблицы 2.4

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, м ²				Пароперегреватель	Экономайзер
		1-й	2-й	3-й	4-й		
Площадь живого сечения для пара и воды, f, м ²	КУ-40-1	0,0096	0,0202	0,0202	-	0,0101	0,0063
	КУ-60-1	0,0148	0,0318	0,0318	-	0,0159 0,0318	0,0085
	КУ-80-1	0,0192	0,0404	0,0404	-	0,0202 0,0404	0,0170
	КУ-100-1	0,0212	0,0425	0,0425	-	0,0212 0,0425	0,0170
	КУ-125	0,0276	0,0552	0,0552	-	0,0276 0,0552	0,0170
	КУ-150	0,0340	0,0636	0,0636	-	0,0318	0,0170
Диаметр труб	32/26						
Количество рядов по ходу газов	Для всех котлов КУ	12	20	22		8	3; 16
Шаги по ширине		172	86			90	-
Шаги по глубине		70				-	-
Эффективная толщина излучающего слоя, м		0,161					-

Таблица 2.5 Состав газов за различными технологическими агрегатами

Тип котла	Состав газов, %						
	CO ₂	N ₂	SO ₂	CO	O ₂	H ₂	H ₂ O
Продукты сгорания среднего состава	13	78,5	-	-	1,5	-	7
Котлы за печами обжигания серного колчедана	-	78,5	5,5	-	10	-	6
Котлы для охлаждения конвертированных газов в производстве аммиака	16,8	14,0	-	3,4	-	41,8	24
Котлы установок сухого тушения кокса	5	66,6	0,04	18	-	10	-

Таблица 2.6 Теплоемкость газов

t, °C	Состав дымовых газов						
	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,3046	1,2992	129922	1,5914	1,4943	1,7333	1,278
100	1,3167	1,304	1,3013	1,8132	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	1,4645	1,385	1,3984	21788	1,6957	2,215	1,324
1000	1,4775	1,3971	1,4114	2,214	1,7229	2,24	1,328

Котлы на отходящих газах технологических агрегатов (главным образом промышленных печей) называются котлами-утилизаторами КУ.

Наибольшее распространение находят унифицированные котлы общего назначения Белгородского завода энергетического машиностроения: КУ-40-1, КУ-60-2, КУ-80-3, КУ-125, КУ-150. Они предназначены для установки за мартеновскими, нагревательными печами и другими технологическими агрегатами. В обозначении типа КУ первое двух- или трехзначное число указывает расчетный для него проход продуктов сгорания в тыс. м³/ч для 0°С, а второе однозначное число – порядковый номер модификации.

Котлы изготавливают из унифицированных змеевиковых секций, имеют многократную принудительную циркуляцию и П-образную компоновку газоходов. Котлы обладают большим аэродинамическим сопротивлением /порядка 1,2 кПа/м²/, при работе на отходящих газах с механическими примесями быстро засоряются. Газоплотность КУ низка и подсос воздуха к газам значителен. КУ за мартеновскими печами устанавливаются для каждой печи, а при утилизации газа нагревательных печей возможна установка одного котла на несколько агрегатов.

Часто применяемый котел КУ-100 (Рис. 2.1) характеризуется следующим образом. Три секции испарительной части /позиции 4,5,7/ по ходу дымовых газов /ДГ/ включены последо-

вательно, а по воде, подаваемой циркуляционными насосами 1, - параллельно. Испарение одноступенчатое, перегрев пара не регулируется. За счет подбора длин змеевиков каждой секции их гидравлическое сопротивление одинаково, а его значение при параллельном включении в несколько раз меньше, чем было бы при последовательном. Из барабана 3 вода поступает в шлакоуловитель 2, а затем – в испарительные секции. Оттуда вода, став паровой эмульсией, попадает в барабан, куда через экономайзер 8 направляется и питательная вода $V_{\text{пит}}$ взамен пара, уходящего через пароперегреватель 6 к потребителям. Устройство котла предусматривает возможность комплексной работы с системой испарительного охлаждения печей.

Усложнение работы КУ вследствие засорения уносом теплообменных поверхностей происходит на предприятиях различных отраслей промышленности. В частности, это происходит в КУ за мартеновскими печами при переходе на кислородную плавку. Применение кислорода для продувки ванны резко увеличивает запыленность отходящих газов перед котлом /до $10..15\text{г}/\text{м}^3$ /, что приводит к образованию отложений на его поверхностях нагрева. Аэродинамическое сопротивление котла резко возрастает, паропроизводительность снижается в два-три раза. Котел останавливают на очистку. продолжительность его работы составляет 40...60% времени работы печи.

Для очистки поверхностей нагрева применяются водяная обмывка, паровая обдувка, дробеочистка, виброочистка, импульсная очистка. Эффективность всех этих способов недостаточна. Задачу может решить устройство высокоэффективной предочистки дымовых газов сухим способом или разработка конструкций незасоряемых котлов.

Весьма важна степень уплотнения ограждающих конструкций котла, так как подсос воздуха через них достигает 40% от объема подходящего газа, что снижает теплотехнические показатели КУ, повышает потребляемую мощность тяговых устройств, газоочистки.

Таблица 2.7 Характеристики котлов-утилизаторов для мартеновских печей

Параметр	КУ-60-2	КУ-80-3	КУ-100-1
Количество дымовых газов перед котлом, тыс.м ³ /ч	60	80	100
Расчетная температура газов перед котлом, °С	600	650	650
Расчетная температура уходящих газов, °С	210	210	210
Рабочее давление пара, кПа	<u>1800</u> 4500	<u>1800</u> 4500	<u>1800</u> 4500
Температура пара /при давлении 1800/4500кПа/, °С	<u>340</u> 370	<u>340</u> 370	<u>340</u> 370
Расчетная паропроизводительность, кг/с	3,67	4,94	6,22
Поверхность нагрева, м ² :			
Общая.....	903	1201	1550
Пароперегревателя.....	70	87	110
Испарительной поверхности.....	540	684	895
Водяного экономайзера.....	247	370	460
Предвключенного пакета.....	46	60	85
Внутренний диаметр барабана, мм	1508	1508	1508
Живое сечение прохода для пара /воды/, м ² :		0,0404	0,0425
Пароперегревателя.....	<u>0,0318</u> 0,0159	<u>0,0202</u>	<u>0,0212</u>
Испарительных секций:			
I.....	0,0148	0,0192	0,0212
II.....	0,0318	0,0404	0,0425
III.....	0,0318	0,0404	0,0425
IV.....	-	0,0404	0,0425
Экономайзера.....	0,0085	0,0127	0,0127
Живое сечение прохода для дымовых газов, м ² :			
Пароперегревателя.....	5,06	6,34	8,04
Испарительных секций:			
I.....	7,0	8,63	10,8
II.....	5,06	6,34	8,04
III.....	4,63	6,34	7,35
IV.....	-	5,77	7,35
Экономайзера.....	4,55	6,36	7,67

Окончание таблицы 2.7

Параметр	КУ-60-2	КУ-80-3	КУ-100-1
Число рядов труб по ходу потока: Пароперегревателя.....	8	8	8
Испарительных секций			
I.....	12	12	12
II.....	22	20	22
III.....	20	22	22
IV.....	-	22	22
Экономайзера.....	2x20	2x20	2x20
Шаг труб по ширине пучка, S_1 , мм: Испарительных секций.....	172	172	172
Остальных.....	86	86	86
Шаг труб по глубине пучка, S_2 , мм	70	70	70

Примечания: числитель – для рабочего давления пара 1800 кПа; знаменатель – для 4500 кПа.

3 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Произвести поверочный тепловой расчет котла-утилизатора, установленного за технологическим агрегатом.

Определить:

- Коэффициенты теплоотдачи всех конвективных поверхностей котла;
- Паропроизводительность котла;
- КПД котла-утилизатора.

Изобразить компоновочную схему котла-утилизатора с размещением нагревательных элементов в газоходах котла.

Исходные данные:

- Тип котла-утилизатора – КУ-80-3;
- Объем дымовых газов, поступающих в котел-утилизатор – $V_{до}$, м³/с;
- Температура дымовых газов перед котлом - t_d^H ;
- Процент непрерывной продувки – β_n ;
- Химический состав газов перед котлом: CO₂-12%; H₂O-10,5%; N₂-72%; O₂-5,5%;
- Параметры пара на выходе из котла: $P_{н.е.}$ =1800 кПа; $t_{н.е.}$ =376 °С;

- Коэффициент сохранения тепла $\varphi=0,95$.

Цифровые данные к заданию студент выбирает в соответствии с номером своего шифра /последними двумя цифрами номера зачетной книжки/.

В таблице 3.1 по последней цифре номера зачетной книжки выбираются значения $V_{до}$ и $t_{д}^H$.

В таблице 3.2 по предпоследней цифре номера зачетной книжки выбираются значения $t_{п.в.}$ и β_n .

Например, номер зачетной книжки №423093, выбирают из таблиц следующие данные: $V_{до}=22,0 \text{ нм}^3/\text{с}$; $t_{д}^H = 650^\circ\text{C}$; $t_{п.в.}=60^\circ\text{C}$; $\beta_n=8\%$.

Таблица 3.1 Значения параметров $V_{до}$ и $t_{д}^H$.

Последняя цифра шифра	Объем газов перед котлом, $V_{до}$, $\text{нм}^3/\text{с}$	Температура газов перед котлом, $t_{д}^H$, $^\circ\text{C}$
0	23,4	600
1	23,0	640
2	22,5	670
3	22,0	650
4	23,4	620
5	23,0	580
6	22,5	600
7	22,0	670
8	21,7	650
9	23,0	620

Таблица 3.2 Значения параметров $t_{п.в.}$ и β_n .

Предпоследняя цифра шифра	Температура питательной воды, $t_{п.в.}$, $^\circ\text{C}$	Процент продувки, β_n , %
0	70	8
1	80	5
2	90	6
3	80	7
4	60	5
5	70	6
6	80	7
7	90	8
8	70	6
9	60	8

Целью теплового расчета котла-утилизатора является /при заданных объеме дымовых газов и их начальной температуре/ определение паропроизводительности котла, температур газов на выходе из поверхностей нагрева отдельных элементов котла /пароперегревателя, испарительной части, экономайзера/, КПД котла-утилизатора.

Принципиальная схема котла-утилизатора представлена на рис. 2.1.

Тепловой расчет должен быть выполнен в следующей последовательности.

1. Определяется увеличение объема дымовых газов вследствие подсосов воздуха в газоходах котла:

$$V_{\text{под}} = 0,05 \times V_{\text{до}} \quad (3.1)$$

2. Для всех элементов котла последовательно определяют:

- Среднелогарифмический температурный напор $\Delta \bar{t}$;
- Среднюю скорость движения дыма $\omega_{\text{д}}$;
- Коэффициенты теплоотдачи излучением $\alpha^{\text{изл}}$ и конвекцией $\alpha^{\text{конв}}$;
- Средний коэффициент теплопередачи \bar{K} ;
- Количество тепла, воспринятое теплообменной поверхностью $Q_{\text{с}}$;
- Температуру дымовых газов на выходе из поверхности теплообмена $t_{\text{д}}$;

3. Паропроизводительность котла-утилизатора /см. табл.3.3, формула 3.3/.

4. Полезное использование тепла дымовых газов в котле /см. табл. 3.3, формула 3.9/.

5. Коэффициент полезного действия КПД котла:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{\sum Q_{\text{с}}}{V_{\text{до}} \times i_{\text{д}}} \times 100\% , \quad (3.2)$$

где $V_{\text{до}}$ и $i_{\text{д}}$ – объемный расход и энтальпия дымовых газов на входе в котел.

Тепловой расчет котла-утилизатора выполняется в последовательности, изложенной в разделе 3, основные формулы для расчета приведены в табл.3.3. Весь расчет оформляется в виде пояснительной записки к курсовой работе на листах формата А4 /210x293/.

Пояснительная записка оформляется в следующей последовательности:

- Титульный лист;
- Задание на курсовую работу;
- Содержание;
- Введение /1стр./;
- Теоретические сведения /2стр./;
- Схема котла-утилизатора с описанием работы;
- Таблица конструктивных характеристик котла /табл.2.7/;
- Расчет пароперегревателя;
- Расчет испарительных секций;
- Расчет экономайзера;
- Определение паропроизводительности и КПД котла;
- Заключение;
- Список использованных источников.

Все расчетные значения подставляются в системе единиц СИ.

Таблица 3.3 Основные формулы для расчета котлов-утилизаторов

Параметр	Единица измерения	Примечание
Расчетная производительность котла $P = Q/\Delta i$ (3.3)	кг/с	Δi - количество тепла, воспринятое в котле 1кг воды в процессе ее превращения в пар, кДж/кг
Количество тепла, отданное дымом $Q = \overline{V}_{до} \times (i_o - i_{ух} + i_{под})$ (3.4)	кВт	$\overline{V}_{до}$ - объем дыма с учетом подсоса воздуха, м ³ /с; $i_o, i_{ух}$ - энтальпии дыма перед и после котла, кДж/м ³ ; $i_{под}$ - энтальпия подсосанного воздуха, при $t_{под} = 30^\circ\text{C}$ $i_{под} = 39,6$ кДж/м ³
Количество тепла, воспринятое 1кг воды $\Delta i = i_{п.е.} - i_{п.в.} + i_{прод}$ (3.5)	кДж/кг	$i_{п.е.}, i_{п.в.}$ - энтальпия перегретого пара и питательной воды, кДж/кг, определяемые по таблицам водяного пара

Продолжение таблицы 3.3

Параметр	Единица измерения	Примечание
Энтальпия продувочной воды $i_{\text{прод}} = 0,01 \times \beta_n \times (i'_{\text{п.в.}} - i_{\text{п.в.}}) \quad (3.6)$	кДж/кг	$i'_{\text{п.в.}}$ - энтальпия питательной воды при температуре кипячения; β_n - процент продувки
Температура стенок труб $\bar{t}_{\text{ст}} = 0,5 \times (t_{\text{в}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}) + \varepsilon_1 \times \frac{Q_{\text{с}}'}{F} \quad (3.7)$	°С	$\varepsilon_1 = 0,005 \div 0,01 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ - коэффициент загрязнения поверхности; F - площадь поверхности, м^2
Количество тепла, отданное дымом в секции: ориентировочное значение $Q_{\text{с}}' = V_{\text{д}} \times (i_{\text{д}}^{\text{н}} - i_{\text{д}}^{\text{к}}) \quad (3.8)$	кВт	$i_{\text{д}}^{\text{н}}, i_{\text{д}}^{\text{к}}$ - энтальпия дыма при $t_{\text{д}}^{\text{н}}, t_{\text{д}}^{\text{к}}$; K - средний коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, определяемый по формуле (2.11)
Фактическое значение $Q_{\text{с}} = \frac{K \times \Delta t \times F}{V_{\text{до}}} \quad (3.9)$	кВт	$\bar{\Delta t}$ - среднелогарифмическая разность температур, °С (по формуле 2.13)
Средняя температура дыма $\bar{t}_{\text{н}} = 0,5 \times (t_{\text{в}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}) + \bar{\Delta t} \quad (3.10)$	°С	$\bar{\Delta t}$ - средняя разность температур между дымом и водой, определяемая по формуле (2.13) Для испарительной секции $t_{\text{в}}^{\text{н}} = t_{\text{п}}^{\text{к}} = t'$ - температура насыщения при давлении в барабане, °С, определяемая по таблицам водяного пара
Средний коэффициент теплопередачи $K = \frac{\alpha_{\Sigma}}{1 + \varepsilon_1 \times \alpha_{\Sigma}} \quad (3.11)$	Вт/(м ² К)	Рекомендуемые скорости: дыма 7-12 м/с; воды на выходе из экономайзера 0,5-0,8 м/с; пара в регревателе 15-30 м/с
Истинная энтальпия дыма на выходе из секции $i_{\text{д}}^{\text{к}} = i_{\text{д}}^{\text{н}} - \frac{Q_{\text{с}}}{\varphi} + i_{\text{под}} \quad (3.12)$	кДж/м ³	$\varphi = 0,9 \div 0,95$ - коэффициент сохранения тепла

Окончание таблицы 3.3

Параметр	Единица измерения	Примечание
Среднелогарифмическая разность температур $\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T_H - \Delta T_K}{\ln(\Delta T_H / \Delta T_K)}$ (3.13)	К	Для противотока $\Delta T_H = T_D^H - T_B^K;$ $\Delta T_K = T_D^K - T_B^H$
Коэффициент теплоотдачи излучением: $\alpha_{\text{изл}} = \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{ст.эф}}}{(t_r - t_{\text{ст}})} \times$ $\times \left[\varepsilon_d \times \left(\frac{t_r + 273}{100} \right)^4 - A_d^{\text{ст}} \times \right.$ $\left. \times \left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 \right]$ (3.14)	Вт/(м ² К)	$C_0=5,7$ Вт/(м ² К ⁴) – константа излучения абсолютно черного тела; $A_d^{\text{ст}}$ - коэффициент излучения системы дымовые газы – стенка; $A_d^{\text{ст}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} \times \left(\frac{t_r}{t_{\text{ст}}} \right)^{0,65} + \beta \times \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$ (2.14a)
Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha^{\text{конв}} = \alpha_0 \times k_z \times k_s \times k_t$ (3.15)	Вт/(м ² К)	α_0 - коэффициент конвективного переноса тепла для труб диаметром 26/32мм, расположенных в шахматном порядке б; k_z - поправка на число рядов; k_s - поправка на относительный шаг труб; k_t - поправка на температуру.

Таблица 3.4 Удельные энтальпии воздуха, газов и золы

$\theta, ^\circ\text{C}$	$(Ct)_B$	$(C\theta)_{\text{CO}_2}$	$(C\theta)_{\text{N}_2}$	$(C\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(C\theta)_{\text{зл.}}$
	кДж/м ³				кДж/кг
1	2	3	4	5	6
30	39				
100	132	169	130	151	81
200	266	357	260	304	169
300	403	559	392	463	264
400	542	772	527	626	360
500	684	996	664	794	458
600	830	1222	804	967	561
700	979	1461	946	1147	663
800	1130	1704	1093	1335	768
900	1281	1951	1243	1524	874
1000	1436	2202	1394	1725	984

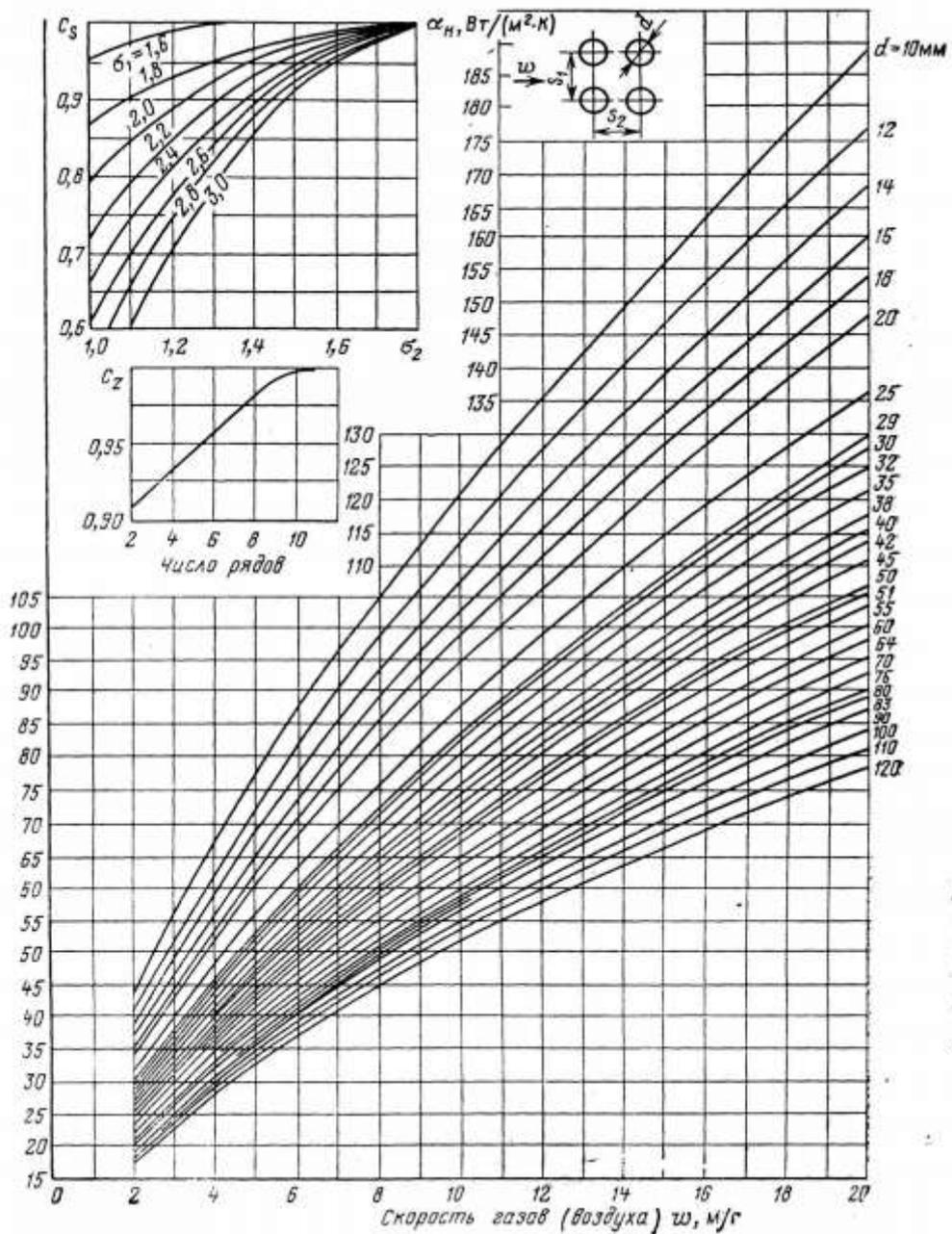


Рисунок 3.1 Коэффициент теплоотдачи конвекцией для ширм и коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании $\alpha_k = \alpha_n C_z C_s C_\Phi$

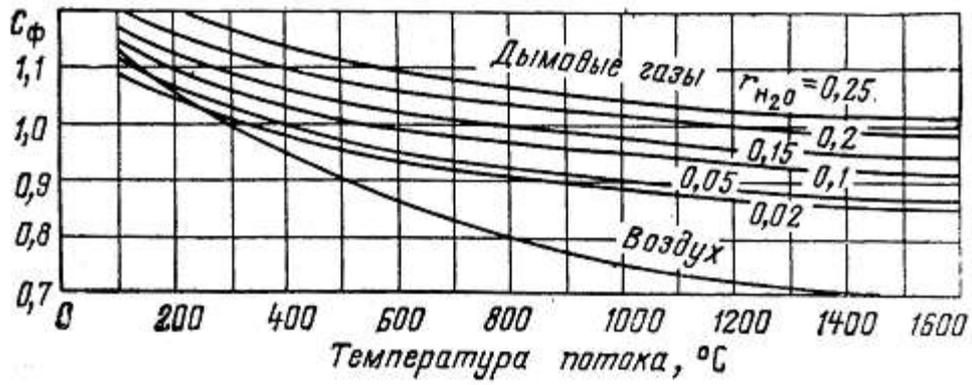


Рисунок 3.1а Поправочный коэффициент для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 3.1.

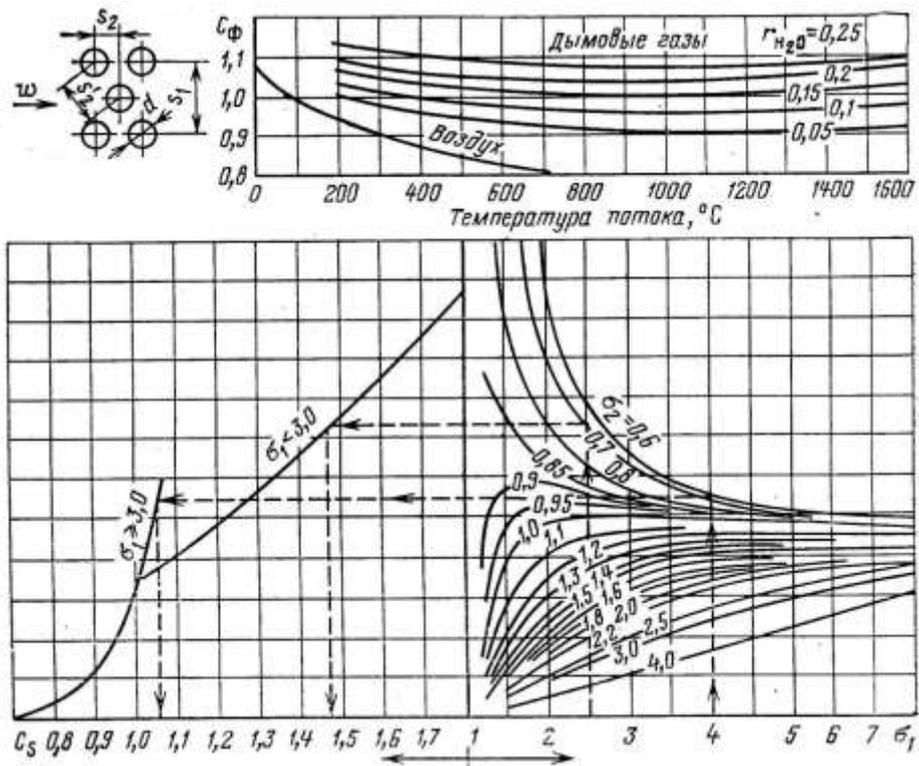


Рисунок 3.2а Поправочный коэффициент для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 3.2.

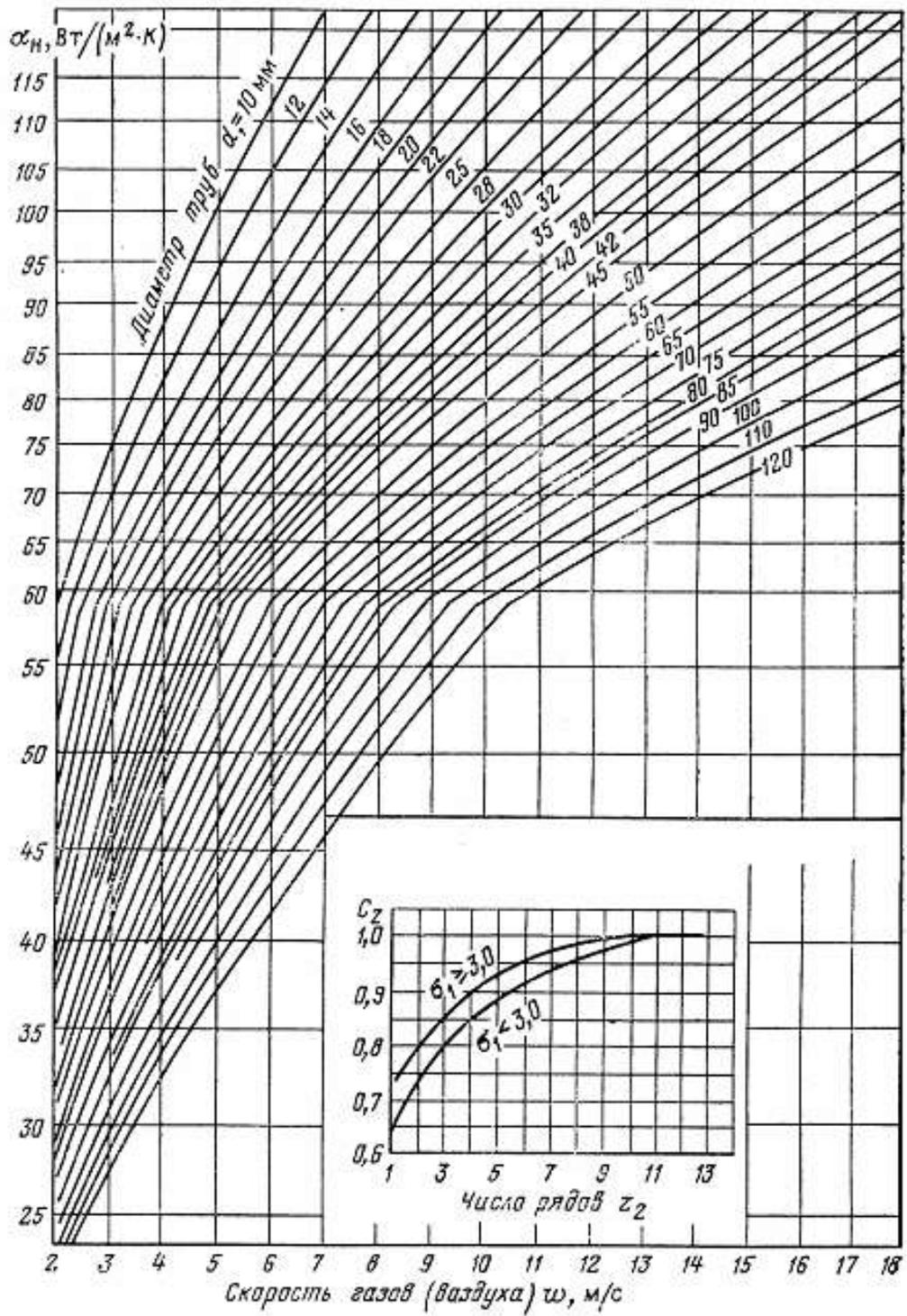


Рисунок 3.3 Коэффициент теплоотдачи конвекцией для шахматных гладкотрубных пучков при поперечном омывании
 $\alpha_k = \alpha_n C_z C_s C_\Phi$

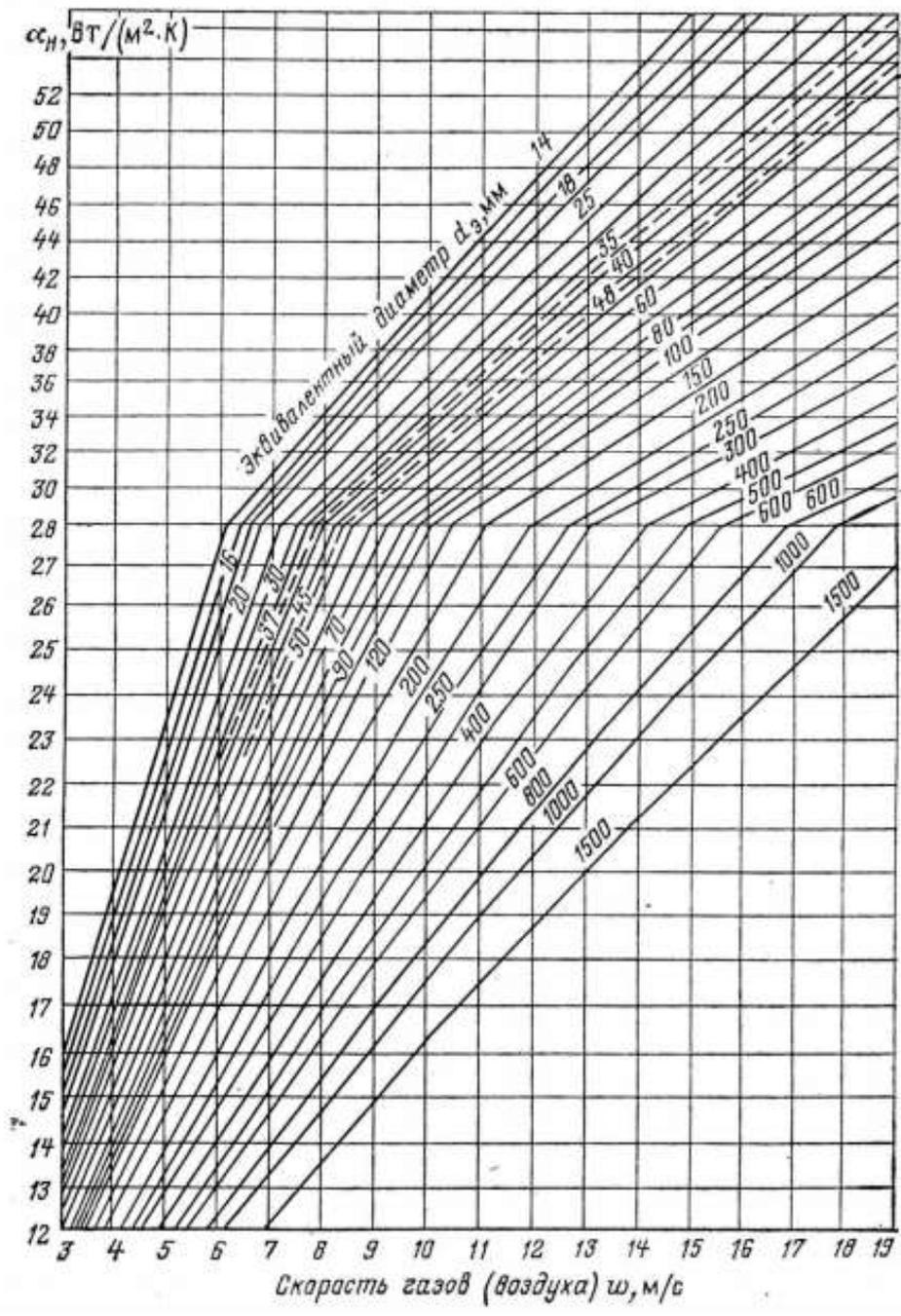


Рисунок 3.4 Коэффициент теплоотдачи конвекцией при продольном омывании $\alpha_k = \alpha_n \text{ Cl CФ}$.

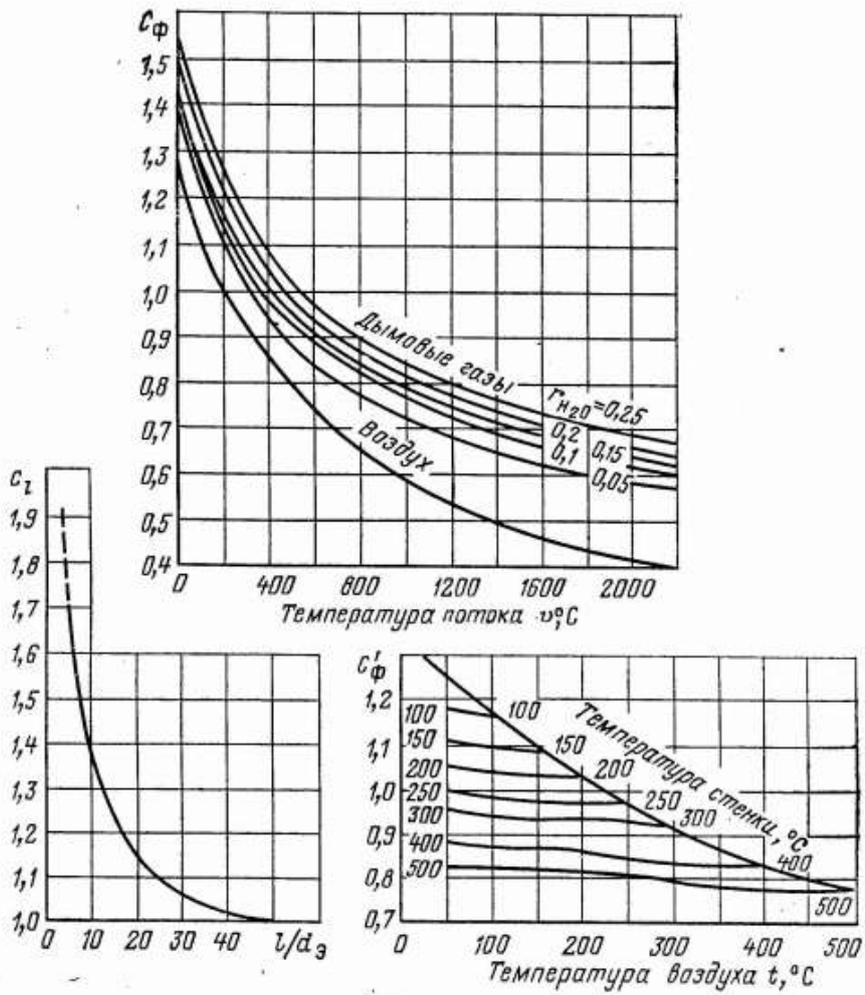
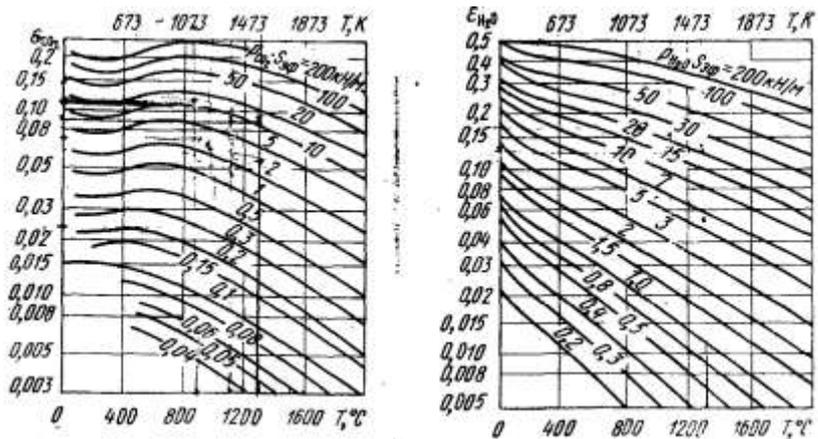


Рисунок 3.4а Поправочные коэффициенты для расчета коэффициента теплоотдачи к рис. 3.4.



Рисунки 3.5, 3.6 Номограммы для определения степени черноты CO_2 и H_2O

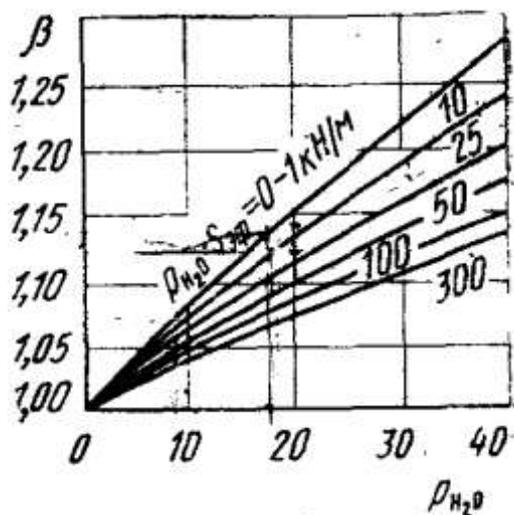


Рисунок 3.7 Номограмма для определения поправочного коэффициента β

4 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Исходные данные.

Выполнить тепловой расчет котла-утилизатора, установленного за мартеновской печью емкостью 600 т. Объем дымовых газов перед котлом $V_{до} = 23,6$ м³/с, температура дыма на входе в котел $t_d^H = 650^\circ\text{C}$. Состав дымовых газов перед котлом: 12% - CO_2 ; 10,5% - H_2O ; 5,5% - O_2 ; 72% - N_2 . Подсос воздуха в газоходах котла составляет $V_{под} = 0,05V_{до}$, температура подсасываемого воздуха $t_{под} = 30^\circ\text{C}$. Давление пара после пароперегревателя $P_{п.е.} = 1800$ кПа, температура $t_{п.е.} = 376^\circ\text{C}$. Коэффициент сохранения тепла считаем равным $\phi = 0,95$, процент продувки $\beta_n = 8\%$.

Принимаем, что котел-утилизатор работает без подключения испарительного охлаждения и без предвключенной испарительной секции.

Согласно табл.2.7 выбираем для установки за печью котел-утилизатор типа КУ-80-3.

Для упрощения расчета принимаем расчетное количество дымовых газов, проходящих через котел, равным:

$$V_{до} = V_{до} + \frac{V_{под}}{2} = 23,6 + \frac{0,05 \times 23,6}{2} = 24,2 \text{ м}^3/\text{с}$$

4.1 Расчет пароперегревателя

Принимаем температуру дымовых газов за пароперегревателем равной $t_{\text{д}}^{\text{к}}=600^{\circ}\text{C}$. Учитывая, что температура дыма перед котлом равна $t_{\text{д}}^{\text{н}}=650^{\circ}\text{C}$, температура перегретого пара $t_{\text{п.е.}}=376^{\circ}\text{C}$, а температура пара в барабане при давлении 1800 кПа равна $t' = 209^{\circ}\text{C}$, по формуле (3.13) для противоточной схемы движения находим среднелогарифмическую разность температур:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(650 - 376) - (600 - 209)}{\ln \frac{650-376}{600-209}} = 331^{\circ}\text{C}$$

Температура продуктов сгорания /формула (2.10)/:

$$\bar{t}_{\text{д}} = \frac{(376 + 209)}{2} + 331 = 623^{\circ}\text{C}$$

Объемный расход дымов газа через пароперегреватель:

$$V_{\text{д}} = V_{\text{до}} \times \frac{\bar{t}_{\text{д}} + 273}{273} = 24,2 \times \frac{623 + 273}{273} = 79,5 \text{ м}^3/\text{с}$$

А средняя скорость:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{V_{\text{д}}}{f_{\text{д}}} = \frac{79,5}{6,34} = 12,5 \text{ м/с}$$

Значение живого сечения прохода для дыма $f_{\text{д}}$ заимствовано из табл. 2.7. По номограмме на рис. 3. 1 (11) находим коэффициенты теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к шахматному пучку труб $\alpha_0=90 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Используя данные табл. 2.7 находим $S_1/d = 86/32 = 2,68$; $S_2/d = 70/32 = 2,19$ и число продольных рядов $z_2=8$. Тогда по (3.15):

$$C_z = 0,95; C_s = 1,08 \text{ и } C = 1,0 \text{ и тогда:}$$

$$\alpha^{\text{конв}} = 90 \times 0,95 \times 1,08 \times 1,0 = 92,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$$

Так как $(S_1 + S_2)/d = (86 + 70)/32 = 4,75 < 7$, то эффективную толщину газового слоя находим по формуле, заимствованной из табл.10 [11]:

$$S_{\text{эф.}} = \left(1,87 \times \frac{S_1 + S_2}{d} - 4,1 \right) \times d = \left(1,87 \times \frac{156}{32} - 4,1 \right) \times 0,032 = 0,161 \text{ м}$$

Произведение парциального давления на эффективную толщину газового слоя /длина луча/:

$$P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф.}} = 98,1 \times 0,12 \times 0,161 = 1,98 \text{ кПа} \times \text{м}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф.}} = 98,1 \times 0,105 \times 0,161 = 1,66 \text{ кПа} \times \text{м}$$

По номограммам на рис. 3.5, 3.6 [5] находим степень черноты газов при $\bar{t}_d = 623^\circ\text{C}$.

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,061; \varepsilon'_{H_2O} = 0,038; \beta = 1,08$$

$$\varepsilon_d = 0,061 + 1,08 \times 0,038 = 0,102.$$

$$\text{И по формуле /2.14a/ } A_d^{CT} = 0,112.$$

Энтальпию дымовых газов при температуре $t_d^k = 600^\circ\text{C}$ находим по приложению таблиц 3.4:

$$CO_2 \quad \dots \quad 0,12 \times 1236,76 = 148,2$$

$$H_2O \quad \dots \quad 0,105 \times 964,68 = 101,2$$

$$O_2 \quad \dots \quad 0,055 \times 851,64 = 47,3$$

$$N_2 \quad \dots \quad 0,72 \times 805,06 = 590,0$$

$$i_d^k = 886,7 \text{ кДж/м}^3$$

По формуле 3.8 ориентировочно определяем значение количества тепла, переданного в пароперегревателе:

$$Q'_c = [24,2 \times (942 - 886,7) \times 10^3] = 1350 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Площадь поверхности пароперегревателя $F = 87 \text{ м}^2$ берем из табл.2.7.

Средняя температура стенок труб равна (формула 4.7):

$$\bar{t}_{CT} = 0,5 \times (376 + 209) + 0,005 \times \frac{1350 \times 10^3}{87} = 369,5^\circ\text{C}$$

По формуле (3.14) с учетом формулы (3.14а) находим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha^{\text{изл}} = \frac{5,7 \times 0,9}{(623 - 369,5)} \times \left[0,102 \times \left(\frac{623 + 273}{100} \right)^4 - 0,112 \times \left(\frac{369,5 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 10,8 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Здесь $\varepsilon_{CT,\text{эф}} = 0,5 \times (1 + \varepsilon_{CT}) = 0,5 \times (1 + 0,8) = 0,9$ - эффективная степень черноты.

Суммарный коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha_\Sigma = \alpha^{\text{конв}} + \alpha^{\text{изл}} = 92,3 + 10,8 = 103,1 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Средний коэффициент теплопередачи определяем по формуле (3.11):

$$\bar{K} = \frac{103,1}{1 + 0,005 \times 103,1} = 68,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Количество тепла, воспринятое поверхностью пароперегревателя от 1 м^3 дыма равно (формула 3.9):

$$Q_c = \frac{87 \times 68,3 \times 331}{24,2} = 81,0 \times 10^3 \text{ Дж/м}^3 = 81 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия дымовых газов на выходе из пароперегревателя (формула 3.12):

$$i_d^k = 942,0 - \frac{81,0}{0,90} + 39,6 = 891,6 \text{ кДж/м}^3$$

Где $i_{\text{под}} = 39,6 \text{ кДж/м}^3$ - энтальпия подсосанного воздуха.

Таким образом, $i_{600} < i_{\text{под}} < i_{650}$ и температура дыма на выходе из пароперегревателя равна:

$$\begin{aligned} t_d^k - t_d^h + \frac{i_d^k - i_d^{600}}{i_d^{650} - i_d^{600}} \times (650 - 600) \\ = 600 + \frac{891,6 - 886,7}{942,0 - 886,7} \times 50 = 603,8^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Т.е., практически совпадает со значением температуры уходящих газов, принятых вначале расчета ($t_d^k = 600^\circ\text{C}$).

4.2 Расчет испарительных секций

Температуру газов в конце секции примем равной $t_r = 300^\circ\text{C}$. Теперь можно определить величину среднелогарифмической разности температур (формула 3.13):

$$\Delta \bar{T} = \frac{(603,8 - 209) - (300 - 209)}{\ln\left(\frac{603,8 - 209}{300 - 209}\right)} = 237^\circ\text{C}$$

Температура газового потока равна $t_d = 209 + 237 = 446^\circ\text{C}$.

Находим объемный расход дымовых газов:

$$V_d = 24,2 \times \frac{(446 + 273)}{273} = 63,6 \text{ м}^3/\text{с}$$

И среднюю скорость движения дымовых газов:

$$\omega_d = \frac{63,6}{6,34} = 10 \text{ м/с}$$

По номограмме на рис. 3. 4 находим значение коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha_0 = 80 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ и коэффициентов $C_z = 1,0$; $C_s = 1,08$ и $C_l = 0,99$ и затем:

$$\alpha^{\text{конв}} = 80 \times 1,0 \times 1,08 \times 0,99 = 85,6 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

При $S_{\text{эф.}} = 0,161 \text{ м}$; $P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф.}} = 1,89 \text{ кПа} \times \text{м}$; $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф.}} = 1,66 \text{ кПа} \times \text{м}$ и $t_{\text{д}} = 446^\circ\text{C}$ по номограммам на рис. 3.5, 3.6, 3.7 находим:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,06; \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05; \beta = 1,08$$

$$\varepsilon_{\text{д}} = 0,06 + 1,08 \times 0,05 = 0,114.$$

А по формуле (3.14а) $A_{\text{д}}^{\text{ст}} = 0,118$.

Среднюю температуру труб находим по формуле (3.7):

$$\bar{t}_{\text{ст}} = 209 + 0,005 \times \frac{11280 \times 10^3}{684} = 291^\circ\text{C}$$

Где по формуле (3.8) ориентировочно найдено:

$$Q'_{\text{с}} = [24,2 \times (890,6 - 420,3) \times 10^3] = 11280 \times 10^3 \text{ Вт}$$

При температуре $t_{\text{г}} = 300^\circ\text{C}$ энтальпия дымовых газов равна:

$$\text{CO}_2 \quad \dots \quad 0,12 \times 564,24 = 67,5$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad \dots \quad 0,105 \times 461,36 = 48,4$$

$$\text{O}_2 \quad \dots \quad 0,055 \times 407,48 = 22,4$$

$$\text{N}_2 \quad \dots \quad 0,72 \times 392,41 = 282,0$$

$$i_{\text{д}}^{300} = 420,3 \text{ кДж/м}^3$$

Коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha^{\text{изл}} = \frac{5,7 \times 0,9}{(446 - 291)} \times \left[0,114 \times \left(\frac{446 + 273}{100} \right)^4 - 0,118 \times \left(\frac{291 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 6,05 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

$$\alpha_{\Sigma} = 85,6 + 6,05 = 91,65 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Средний коэффициент теплопередачи равен (формула 3.11):

$$\bar{K} = \frac{91,65}{1 + 0,005 \times 91,65} = 64,5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Количество тепла, воспринятое поверхностью испарительных секций от 1 м^3 дыма /формула /2.9//:

$$Q_{\text{с}} = \frac{684 \times 64,5 \times 237}{24,2} = 433 \text{ кДж/м}^3$$

Здесь $F=684$ заимствовано из табл. 2.7.

Энтальпия дымовых газов при выходе из испарительных секций равна (формула 3.12):

$$i_{\Gamma} = 890,6 - \frac{433}{0,90} + 39,6 = 448,2 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия дымовых газов при температуре $t_{\text{д}} = 400^{\circ}\text{C}$ равна:

$$\text{CO}_2 \dots 0,12 \times 777,44 = 93,29$$

$$\text{H}_2\text{O} \dots 0,105 \times 623,69 = 65,49$$

$$\text{O}_2 \dots 0,055 \times 551,85 = 30,35$$

$$\text{N}_2 \dots 0,72 \times 526,89 = 379,36$$

$$i_{\text{д}}^{400} = 568,49 \text{ кДж/м}^3$$

Находим истинную температуру дыма на выходе из испарительных секций:

$$t_{\Gamma} = 300 + \frac{448,2 - 420,3}{568,49 - 420,3} \times 100 = 312^{\circ}\text{C}$$

Расхождение между принятой и полученной величиной составляет:

$$\delta = \frac{312 - 300}{300} \times 100 = 4\%$$

Что находится в пределах допустимого $\delta \leq 3 \div 5\%$.

4.3 Расчет экономайзера

Принимая температуру газов после экономайзера равной $t_{\Gamma} = 230^{\circ}\text{C}$, найдем среднелогарифмическую разность температур по формуле (3.13):

$$\Delta \bar{T} = \frac{(318 - 209) - (230 - 100)}{\ln \left(\frac{318 - 209}{230 - 100} \right)} = 126^{\circ}\text{C}$$

При температуре газового потока $\bar{t}_{\text{д}} = 0,5 \times (209 + 100 + 126) = 280^{\circ}\text{C}$ объемный расход газов:

$$V_{\text{д}} = 24,2 \times \frac{(280 + 273)}{273} = 49,1 \text{ м}^3/\text{с}$$

А средняя скорость дыма:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{49,1}{6,34} = 7,72 \text{ м/с}$$

По номограмме на рис. III 13-(б) находим значения $\alpha_0 = 68 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $C_z = 1,0$; $C_s = 1,08$ и $C_l = 1,0$ и затем:

$$\alpha^{\text{КОНВ}} = 68 \times 1,0 \times 1,08 \times 1,0 = 73,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$$

При $P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф.}} = 1,89 \text{ кПа} \times \text{м}$; $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф.}} = 1,66 \text{ кПа} \times \text{м}$ и $\bar{t}_{\text{д}} = 280^{\circ}\text{C}$ по графикам на рис. 3.5, 3.6, 3.7 находим:

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,058; \varepsilon'_{H_2O} = 0,065; \beta = 1,08$$

$$\varepsilon_d = 0,058 + 1,08 \times 0,065 = 0,13.$$

А по формуле /2.14а/ $A_d^{CT} = 0,135$.

Средняя температура стенок труб экономайзера (формула 3.7):

$$\bar{t}_{CT} = 0,5 \times (209 + 100) + 0,005 \times \frac{3060 \times 10^3}{370} = 195^\circ\text{C}$$

Где ориентировочно (формула 3.8):

$$Q'_c = [24,2 \times (448,2 - 321,3) \times 10^3] = 3060 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Энтальпия дымовых газов при $t_r = 230^\circ\text{C}$ равна:

$$CO_2 \dots 0,12 \times 422,0 = 50,4$$

$$H_2O \dots 0,105 \times 351,4 = 36,9$$

$$O_2 \dots 0,055 \times 309,2 = 17,0$$

$$N_2 \dots 0,72 \times 301,0 = 217,0$$

$$i_d^{230} = 321,3 \text{ кДж/м}^3$$

Коэффициент теплоотдачи излучением равен:

$$\alpha^{изл} = \frac{5,7 \times 0,9}{(280 - 195)} \times \left[0,13 \times \left(\frac{280 + 273}{100} \right)^4 - 0,135 \times \left(\frac{195 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 3,2 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

$$\alpha_\Sigma = 73,5 + 3,2 = 76,7 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Средний коэффициент теплопередачи равен (формула 3.11):

$$\bar{K} = \frac{76,7}{1 + 0,005 \times 76,7} = 55,4 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Количество тепла, воспринятое поверхностью экономайзера от 1 м^3 дыма (формула 3.9):

$$Q_c = \frac{370 \times 55,4 \times 126}{24,2} = 119 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия дымовых газов на выходе из экономайзера равна (формула 3.1):

$$i_r = 448,2 - \frac{119}{0,90} + 39,6 = 355,8 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия дымовых газов при температуре $t_d = 300^\circ\text{C}$ равна $i_d^{300} = 420,3 \text{ кДж/м}^3$, при $t_d = 200^\circ\text{C}$ - $i_d^{200} = 285 \text{ кДж/м}^3$.

Тогда истинная температура дымовых газов на выходе из экономайзера:

$$t_r = 200 + \frac{355,8 - 285}{420,3 - 285} \times 100 = 251,8^\circ\text{C}$$

Расхождение между принятой и полученной температурами составляет:

$$\delta = \frac{251,8 - 230}{230} \times 100 = 9,4\%$$

Поскольку расхождение между принятой и полученной значениями температур превышает 5%, расчет водяного экономайзера следует повторить, приняв в качестве расчетной температуры уходящих газов значение:

$$t_r = 230 + 251,8/2 = 241^\circ\text{C}$$

В результате повторного расчета получаем значение температуры дымовых газов на выходе из экономайзера, равное $t_r = 245^\circ\text{C}$

4.4 Расчет паропроизводительности котла

По приложению табл. 3.4 найдем энтальпию дымовых газов при температурах:

$$t_d^H = 650^\circ\text{C/на входе/ и } t_d^K = t_r = 245^\circ\text{C/на выходе/.$$

$$t_d^H = 650^\circ\text{C:}$$

$$\text{CO}_2 \quad 0,12 \times 1306,0 = 156,9$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 0,105 \times 1058,0 = 111,0$$

$$\text{O}_2 \quad 0,055 \times 925,0 = 51,0$$

$$\text{N}_2 \quad 0,72 \times 865,0 = 623,0$$

$$i_d^{230} = 942,0 \text{ кДж/м}^3, \quad t_d^K = 245^\circ\text{C:}$$

$$\text{CO}_2 \quad 0,12 \times 462,0 = 55,5$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 0,105 \times 381,4 = 40,0$$

$$\text{O}_2 \quad 0,055 \times 337,3 = 18,5$$

$$\text{N}_2 \quad 0,72 \times 322,4 = 232,0$$

$$i_d^{230} = 346,0 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия подсосанного воздуха равна $i_{\text{под}} = 39,6 \text{ кДж/м}^3$.

Количество тепла, отданное дымовыми газами в котле (формула 3.4):

$$Q = 24,2 \times (942 - 346 + 39,6) = 15400 \text{ кВт}$$

Количество тепла, воспринятое в котле 1 кг воды, находим по формуле (3.5):

$$\Delta i = 3198,0 - 421,0 + 37,8 = 2814,8 \text{ кДж/кг}$$

Здесь $i_{п.е.} = 3198,0$ кДж/кг - энтальпия перегретого пара;

$i_{п.в.} = 421,0$ кДж/кг - энтальпия питательной воды при $t_{п.в.} = 100^\circ\text{C}$;

$i_{\text{прод}} = 0,01 \times 8 \times (890,0 - 421,0) = 37,8$ кДж/кг - количество тепла продувки, определяемое по формуле (3.6).

$i'_н = 890,0$ кДж/кг - энтальпия кипящей воды.

Все значения энтальпий пара и воды заимствованы из таблиц водяного пара.

Производительность котла определяем по формуле (3.3):

$$P = 15400/2814,8 = 5,47 \text{ кг/с}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика определения выхода и экономической эффективности использования побочных (вторичных) энергетических ресурсов. – М.: ГКНТ СССР, АН СССР, Госплан СССР, 1972. – 40 с.

2. Вяткин М.А. Вторичные энергетические ресурсы промышленности. – М.: Всесоюз. заоч. политех. ин-т, 1986. – 44 с.

3. Лотош В.Е. Технологии основных производств в природопользовании, 3 изд. – Екатеринбург: изд-во УрГУПС, 2002. – 553 с.

4. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – Киев: Выща шк., 1988. – 328 с.

5. Schüphaus K. Cleaning of coke-oven gas for use as fuel // Steel Times. – 1997. – 225. – № 5. – P. 186, 188.

6. Комплексное использование сырья и отходов / Б.М.Равич, В.П.Окладников, В.Н.Лыгач, М.А.Менковский. – М.: Химия, 1988. – 288 с.

7. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии. Справ.: В 2 т. / Под ред. Л.А.Смирнова. – М.: Экономика, 1986. – Т.2. – 344 с.

8. Вторичные теплоэнергоресурсы и охрана окружающей среды / В.В.Харитонов, В.А.Голубев,

В.М.Овчинников, В.Л.Лиходиевский. – Минск: Высшая школа, 1988. – 171 с.

9. Новгородский Е.Е., Диттбернер Е.В. Снижение CO₂-эмиссий в промышленности // Изв. Акад. пром. экологии. – 2002. – № 4. – С. 56-58.

10. Лотош В.Е. Утилизация вторичных энергетических ресурсов.–lotosh.1gb.ru.

11. Мастрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей, т.2, М.: Металлургия, 1986, 376с.

12. Лукашов Ю.М., Ежов В.С., Ежова Т.В. Тепловой расчет котельных агрегатов с использованием ЭВМ. Методическое пособие. Курск. 1994, 128с.