

Полное использование теплоты сгорания

Dipl.-Ing. Matthias Raisch, LOOS INTERNATIONAL

Конкурентные преимущества при полном использовании теплоты сгорания

Использование существующей надежной и проверенной технологии полного использования теплоты сгорания позволяет операторам паровых и водогрейных котельных установок уменьшить их эксплуатационные затраты и внести дополнитель-

ный вклад в уменьшение содержания CO_2 , а также в климатоохранные мероприятия. Постоянное использование технологий утилизации теплоты сгорания амортизирует дополнительные затраты за период менее 2 лет.

1. Теплота сгорания нетто, теплота сгорания брутто и теплота конденсации

Теплота сгорания нетто («низшая теплота сгорания топлива»; H_u или H_i) это энергия, которая выделяется при полном сгорании, когда продукты сгорания при постоянном давлении охлаждаются до базовой температуры. При этом образующийся при сгорании водяной пар остается в процессе газообразным. Таким образом, теплота сгорания показывает только количество физической теплоты, содержащейся в продуктах сгорания, а не количество скрытой в водяном паре теплоты.

Коэффициент полезного действия рассчитывается на базе теплоты сгорания топлива. Ранее большое внимание уделялось тому, чтобы водяные пары в продуктах сгорания оставались в газообразном состоянии при более высоких температурах для того, чтобы предотвратить конденсацию водяных паров и коррозию котла или тракта продуктов сгорания, так же как и дымовой трубы.

Высшая теплота сгорания топлива («высшая теплота сгорания»; H_o или H_g) - это энергия, которая выделяется при полном сгорании, когда продукты сгорания при постоянном давлении охлаждаются до базовой температуры. Высшая теплота сгорания топлива содержит дополнительную энергию, которая высвобождается при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, т. е. теплоту конденсации.

2. Базовые принципы полного использования теплоты сгорания топлива.

В наши дни теплота водяных паров продуктов сгорания может быть использована в технологии. Коррозионно-устойчивые материалы в теплообменниках, а также нечувствительные к влаге тракты продуктов сгорания и дымовые трубы, способствуют длительной эксплуатации без повреждений. Для полного использования теплоты сгорания необходимо не только отводить физическое тепло от продуктов сгорания, но и теплоту конденсации, связанную

водяными парами.

3. Достоинства топливного цикла в развитии технологии полного использования теплоты сгорания

Использование тяжелых жидких топлив в Европе в последние годы постоянно падало (например, в Германии использование тяжелого жидкого топлива в качестве топлива запрещено с 1986 г. немецкими правилами защиты воздушного бассейна для горелок мощностью менее 5 мВт). 25% всех корпусных котлов до 20 МВт, установленных в Германии за последние 2 года, оснащены горелочными устройствами на природном газе, 40% оснащены комбинированными горелками на природном газе и легком дизельном топливе, причем газ является для них основным топливом, и 35% котлов горелками на легком дизельном топливе.

Активная защита окружающей среды и технологические решения по увеличению полноты использования теплоты сгорания топлива сегодня

Топливо	Теплота сгорания нетто (Нн) [КВтч/м³/кг]	Теплота сгорания брутто (Нб) [КВтч /м³/кг]	Соотношение Нб/Нн [%]	Точка росы продукта сгорания [°С]	Конденсат теор. [Кг/ кВтч]	Значение рН [-]
Природный газ "Н"	10,35	11,46	110,7	55,6	0,16	2,8 - 4,9
Природный газ "L"	8,83	9,78	110,8	55,1	0,16	2,8 - 4,9
Пропан	25,89	28,12	108,6	51,4	0,13	2,8 - 4,9
Бутан	34,39	37,24	108,3	50,7	0,12	2,8 - 4,9
Жидкое топливо EL*	11,90	12,72	106,9	47,0	0,10	1,8 - 3,7**

Таблица 1: Характеристики различных видов топлива

* топливо EL "экстра легкое": максимальное содержание серы в топливе 0,2 % по весу
Жидкое топливо с низким содержанием серы: макс. содержание серы в топливе 50 ppm = 0,005 % по весу

** Значение рН конденсата малосернистого жидкого топлива: 2,3 - 4,5

являются основными причинами увеличения доли использования природного газа.

Когда сравниваются характеристики привычных топлив, значимых для использования теплоты сгорания топлива, природный газ обеспечивает самую высокую эксплуатационную емкость (смотрите таблицу 1).

Природный газ имеет:

- самое высокое содержание влаги в продуктах сгорания
- самую высокую точку росы продуктов сгорания
- самое высокое значение рН конденсата продуктов сгорания

По сравнению с жидким топливом типа EL, больше тепла конденсации можно получить при более высоком уровне температур конденсации, т.е. конденсация продуктов сгорания начинается при более высокой температуре продуктов сгорания. Топочные газы, образующиеся при сгорании, почти не содержат сажи и серы. Таким образом, необходимы лишь незначительные расходы для очистки загрязненных поверхностей нагрева для того, чтобы поддержать эффективность и избежать отказов при работе. Так как значение рН конденсата продуктов сгорания также выше по сравнению с жидким топливом типа EL, то меньшие расходы требуются и на удаление конденсата продуктов сгорания.

4. Доказана возможность использования топлив с низким содержанием серы для использования теплоты сгорания топлива

Поскольку растет рынок жидких топлив с низким содержанием серы, растут и требования к системам утили-

зации теплоты сгорания этих топлив.

Низкое содержание серы в топливе (максимум 50 ppm=0,005% по весу перед 0,2% по весу серы при использовании жидкого топлива типа EL) обеспечивает сгорание без образования сажи, без углеводородного остатка. Таким образом, теплота конденсации продуктов сгорания также может быть утилизирована при сжигании жидких топлив с низким содержанием серы.

Испытания на испытательном стенде LOOS продемонстрировали то, что использование жидкого топлива с низким содержанием серы может быть осуществлено по аналогии с утилизацией теплоты сгорания нефтяных горючих газов, если придерживаться принятых интервалов между очистками теплообменника.

Десульфуризация, как дополнительный этап процесса, приводит к удорожанию топлива с низким содержанием серы. Однако, повышение цен на топливо более чем компенсируется увеличением кпд и связанной с этим экономией топлива (плюс тот факт, что с 2009 года уровень цен будет установлен в соответствии с серосодержанием топлива, что приведет к привилегированным ценам, сравнимым с ценами на топливо типа EL).

Технология учета теплоты сгорания не может быть рекомендована для топлив типа EL в связи с очень частой очисткой загрязненных поверхностей нагрева, а поддержание безотказной и эффективной работы котла будет последующим дорогостоящим мероприятием.

Для котлов, оборудованных двухтопливными горелками для попеременного сжигания природного газа и жидкого топлива типа EL (например, в связи с отсекающими контактами по газу, где оператор должен обеспечить бесперебойную работу котла на топливе EL, резервном топливе в случае суровых морозов), используется конденсационный теплообменник с байпасом по продуктам сгорания.

5. Полное использование теплоты сгорания увеличивает кпд, рассчитанный относительно теплоты сгорания нетто Н_н, выше 100%

Для полного использования теплоты сгорания топлива, образующиеся при сжигании продукты сгорания,

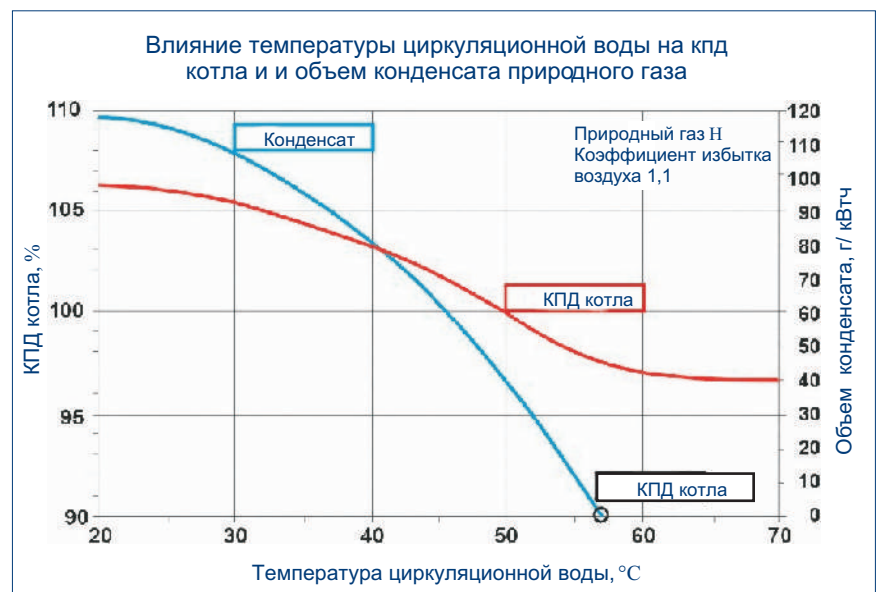


Таблица 2: Влияние температуры циркуляционной воды на кпд котла и объем конденсата природного газа (газ Рурского бассейна)

должны быть сконденсированы путем охлаждения ниже температуры точки росы. При использовании этого топливного потенциала, поверхности нагрева и выходные элементы конструкции, соприкасающиеся с влажными продуктами сгорания, должны быть выполнены из коррозионно стойкой нержавеющей стали.

Топочные газы должны быть охлаждены ниже точки росы соответствующими теплообменниками и циркуляционной водой с минимальной температурой.

Таблица 2 показывает влияние точки

росы продуктов сгорания и температуры обратной воды на количество сконденсированных водяных паров и достигаемый КПД котла.

На рисунке 1 в качестве примера, показана кривая КПД, которая демонстрирует возможности полного использования теплоты сгорания.

Эксплуатационное и хозяйственное использование для получения горячей воды и пара может быть значительно расширено при полной утилизации теплоты сгорания. В сравнении с традиционными системами с использованием теплообменников

для продуктов сгорания, полное использование теплоты сгорания позволяет уменьшить потребление топлива (то есть стоимость топлива) и выбросы вредных веществ более чем на 10%. Кроме того, полное использование теплоты сгорания относится к климато-охраным мероприятиям и обеспечивает возможность уменьшения выбросов CO₂.

6. Системы полного использования теплоты сгорания

Конденсационные котлы и газовые котлы сравнительно малых мощностей обычно полностью выполняются из нержавеющей стали. В связи с техническими особенностями и высокой стоимостью водогрейные котлы больших мощностей для обогрева многоквартирных зданий и комплексов не изготавливаются из нержавеющей стали.

Для полного использования теплоты сгорания они оснащаются специальными теплообменниками отработанных газов из нержавеющей стали, интегрированными в котлы или отдельностоящими (рис. 2 и 3).

В результате использования двухстадийного принципа сохранения тепла продуктов сгорания (см. главу 9), паровые котельные установки не оборудуются интегрированными экономайзерами, они выполняются как отдельно-стоящие экономайзеры из нержавеющей стали далее по ходу продуктов сгорания на газовой стороне (рис. 3).

Отдельно стоящий экономайзер хорошо подходит для дооснащения. Водогрейный котёл на рис. 3 сконструирован как трехходовой жаротрубный дымогарный котел с задней поворотной камерой продуктов сгорания полностью омываемой водой. Благодаря хорошей функциональности кругового дизайна, развитые конвективные поверхности нагрева могут быть включены далее по тракту после развитых радиационных поверхностей нагрева во втором и третьем ходах продуктов сгорания. Это уже приводит к стандартному использованию более чем 95% тепла уходящих газов, без завихрителей в дымогарных трубах и без подключенных далее по тракту поверхностей нагрева.

7. Области применения утилизации теплоты сгорания в водогрейных установках

Еще несколько лет назад использование утилизации теплоты сгорания было сфокусировано на сравнительно

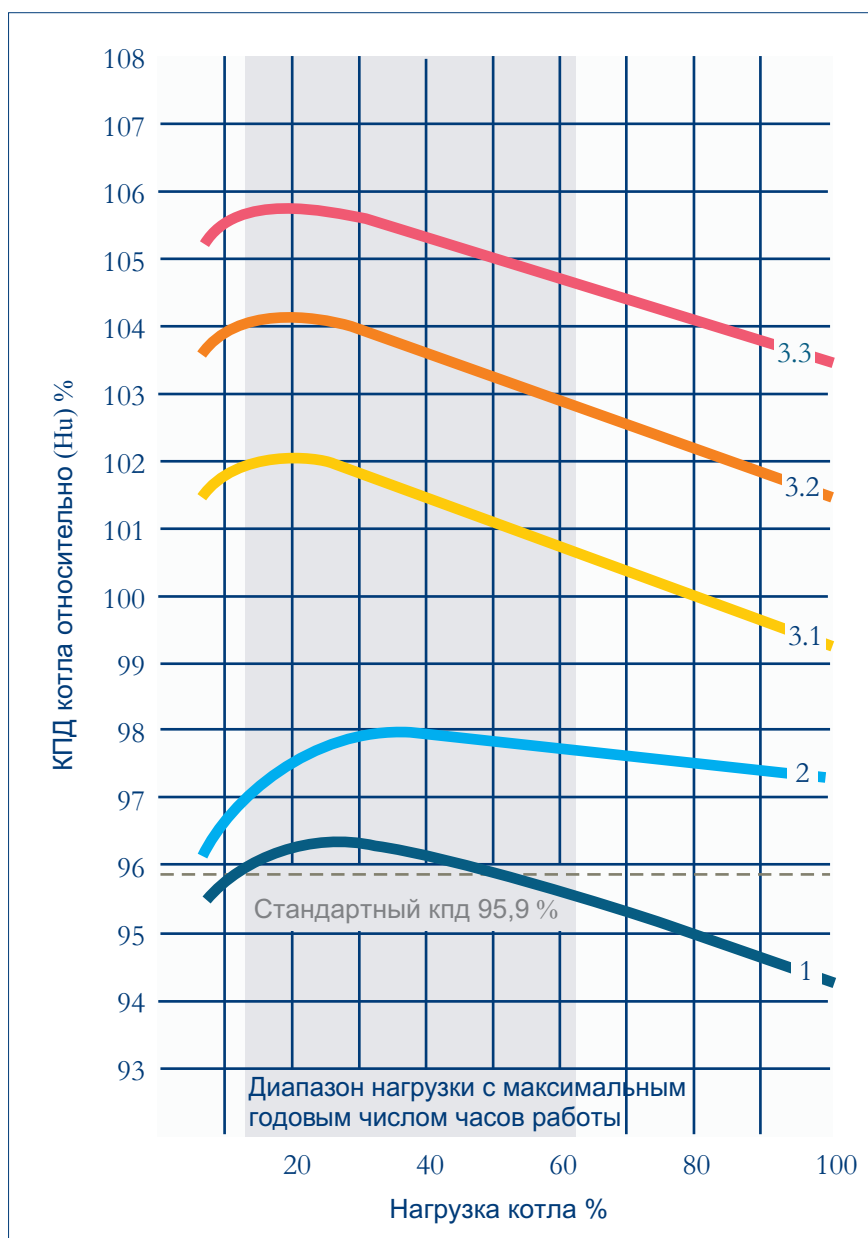


Рисунок 1: Кривые изменения КПД для полного использования теплоты сгорания (пример водогрейный котёл с газовой горелкой)

- 1 Котел без экономайзера 70/50 °С
- 2 Котел с экономайзером для неконденсационного режима
- 3 Котел с экономайзером для полного использования теплоты сгорания
 - 3.1 Температура воды на входе 50 °С
 - 3.2 Температура воды на входе 40 °С
 - 3.3 Температура воды на входе 30 °С

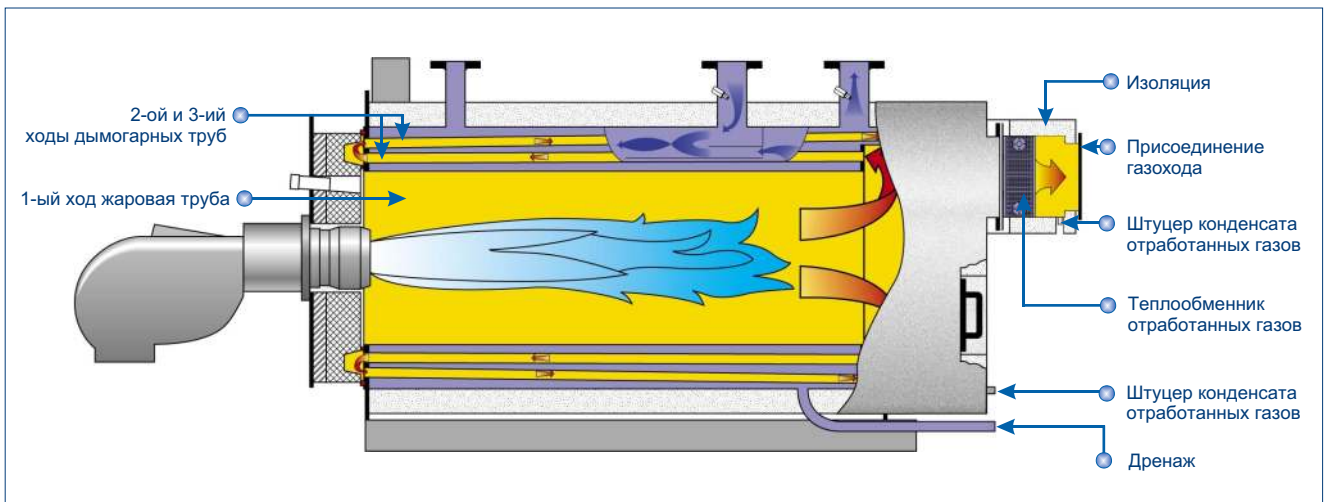


Рисунок 2: Разрез отопительного котла UNIMAT с интегрированным теплообменником отработанных газов

но небольших котлах, на газовых котлах для центрального отопления и производстве технической воды для небольших квартир и жилых домов. Тем временем полное использование теплоты сгорания газа внедрилось и в больших системах.

Сейчас системы утилизации тепла на жидком топливе растут в популярности на установках небольшой мощности (благодаря доступности жидких топлив с небольшим содержанием серы). Полное использование теплоты сгорания на жидком топливе также будет применяться в широком диапазоне рабочих режимов, это только вопрос времени.

Достижимая величина использования теплоты сгорания зависит от системы нагрева и существующих рабочих температур. Системы нагрева с прямой циркуляцией нагреваемой воды через котел и нагревательные элементы являются базовыми входными условиями. К тому же, контроллер котла должен следовать за атмосферным контроллером для переменного контроля котловой воды. Вновь проектируемые нагревательные системы устанавливаемые на полу и низкотемпературные нагревательные элементы с большими поверхностями нагрева хорошо подходят для конденсационных котлов и к конденсационным режимам на протяжении всего года. Поскольку многие давно эксплуатируемые системы оборудованы нагревательными элементами с развитыми поверхностями нагрева и вырабатывают соответствующую тепловую мощность на пониженных рабочих температурах, то в большую часть отопительного сезона они также пригодны для использования в конденсационных котлах. Полное использование теплоты сгорания также дает результат в диапазоне низкотемпературных нагревательных систем для различных климати-

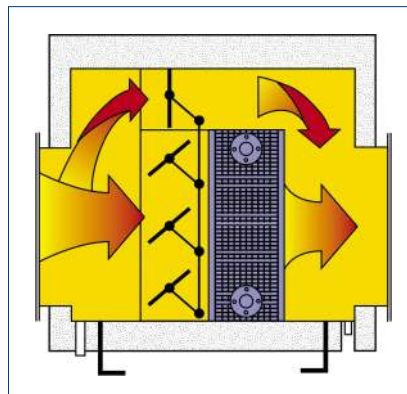


Рисунок 3: Отдельно стоящий экономайзер. Используется и для модернизации существующих установок.

ческих зон. Многие здания были впоследствии покрыты тепловой изоляцией, поэтому они могут отапливаться низкотемпературными теплоносителями. Большую часть года система полного использования теплоты сгорания может работать с температурами обратного потока.

Водогрейные котлы высокого давления для технологических процессов или систем с большой протяженностью теплотрасс первичного отопительного контура, для нагревательных подстанций зданий и присоединенных вторичных контуров для отопления зданий в большинстве своем работают с температурой обратного потока более 100°C, что значительно превышает точку росы продуктов сгорания. Поэтому технология теплоты сгорания не может быть применена. Однако при использовании экономайзеров для "сухой" работы КПД котла доходит до 98%. В этом случае использование технологии теплоты сгорания возможно только в системах с низкотемпературным вторичным контуром.

8. Гидравлическая обшивка теплообменников водогрейных котлов, в которых достигается точка росы

Максимальная утилизация теплоты сгорания достигается когда температуры обратного потока предельно низки. Обратная вода сети с минимальными температурами (ниже точки росы продуктов сгорания соответствующего топлива) проходит через конденсационный теплообменник и вызывает конденсацию в поверхностях нагрева теплообменника. Продукты сгорания охлаждаются, низкотемпературный теплоноситель нагревается и снова поступает в водяную систему.

Перед входом в котел узел поддержания температуры воды обратного потока смешивает обратную воду сети, подаваемую в котел, с прямым потоком воды до достижения минимально необходимой температуры на входе в котел 50°C (смотрите рисунок 4). Специальный инжектор в верхней части котла обеспечивает эффективное смешение и проток через котел. Соотношение горения установленных котлов, в том числе с модулируемыми горелками, может быть использовано в полной мере. Это приводит к увеличению срока эксплуатации горелки с низкими температурами продуктов сгорания и оптимальным использованием теплоты сгорания в диапазоне низких нагрузок горелки. Поддержание температуры обратного потока предотвращает падение температур котловой воды ниже температуры точки росы продуктов сгорания топлива, что может вызвать коррозию котла.

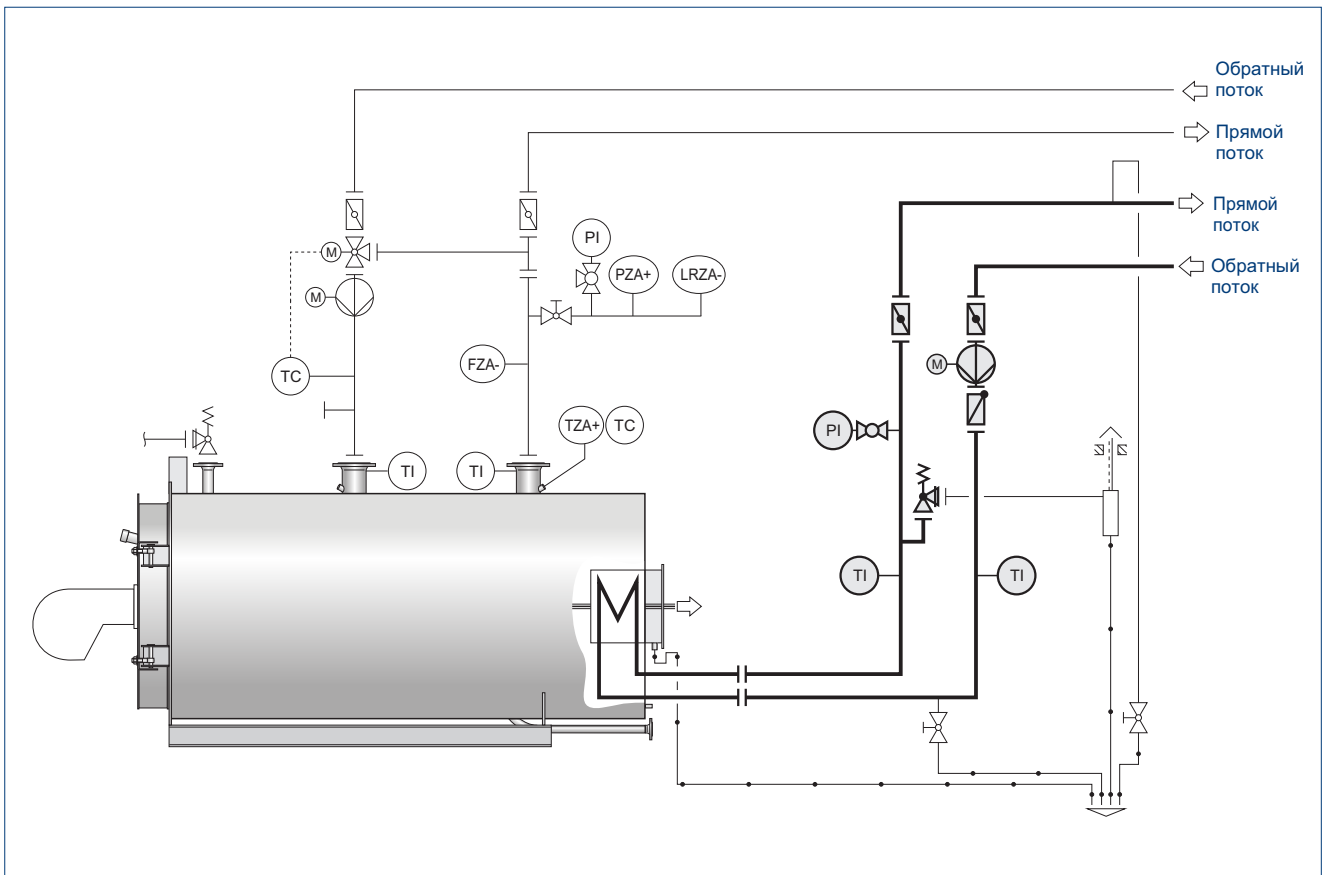


Рисунок 4: Гидравлический контур для оптимального полного использования теплоты сгорания

9. Области применения технологии полного использования теплоты сгорания в паровых котельных установках

Паровые котлы с температурой теплоносителя большей частью между 150 и 200°C получают питательную воду после деаэрации с температурой между 85 и 105°C. В связи с физикой процесса температура продуктов сгорания паровых котлов находится в диапазоне между 230 и 280°C. Экономайзеры используются для нагрева питательной воды с целью уменьшения потерь тепла с продуктами сгорания. В ходе этого процесса продукты сгорания охлаждаются до температуры приблизительно 130°C, которая находится в "сухом" диапазоне температур, выше точки росы.

Полное использование теплоты продуктов сгорания невозможно с этой энергетической концепцией. При использовании второй стадии теплообмена для низкотемпературных потребителей утилизация теплоты сгорания также возможна с паровыми котлами высокого давления (смотрите рисунок 5). Этот конденсатор продуктов сгорания выполнен из коррозионно стойкой нержавеющей ста-

ли, так же как и все остальные элементы тракта продуктов сгорания ниже по ходу газов сгорания и дренажные трубопроводы.

По контрасту с системами отопления зданий с четкой определенной схемой и температурами обратного потока, в промышленности используется множество различных разновидностей систем конденсации пара и отопления. Таким образом различные энергосберегающие и теплообменные схемы конкурируют друг с другом. Для поиска наиболее экономичного решения необходим всесторонний анализ поставщиков систем утилизации тепла и тепловых потребителей в совокупности с общей внешней оценкой. Тесное сотрудничество между представителями эксплуатации, проектировщиками и производителями котлов необходимо для поиска максимально эффективных критериев среди большого количества возможностей.

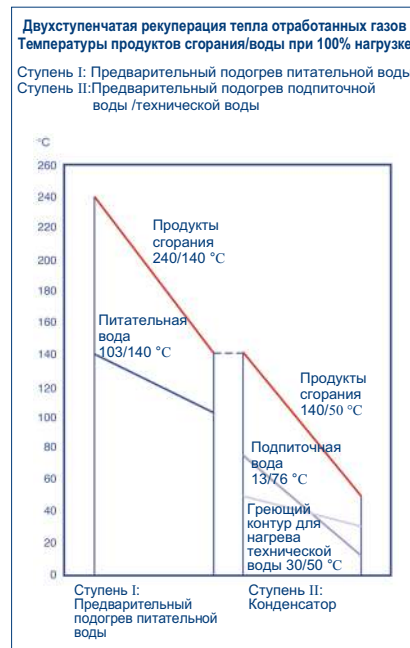


Рисунок 5: Температуры продуктов сгорания/ воды при двухступенчатой рекуперации тепла отработанных газов

10. Обшивка теплообменников паровых котельных установок, работающих по схеме утилизации теплоты сгорания

Рекуператоры пароснабжающих систем максимально работают на конденсацию, поскольку этот конденсат вновь подается в котел вместе с питательной водой. Однако существуют системы, которые не

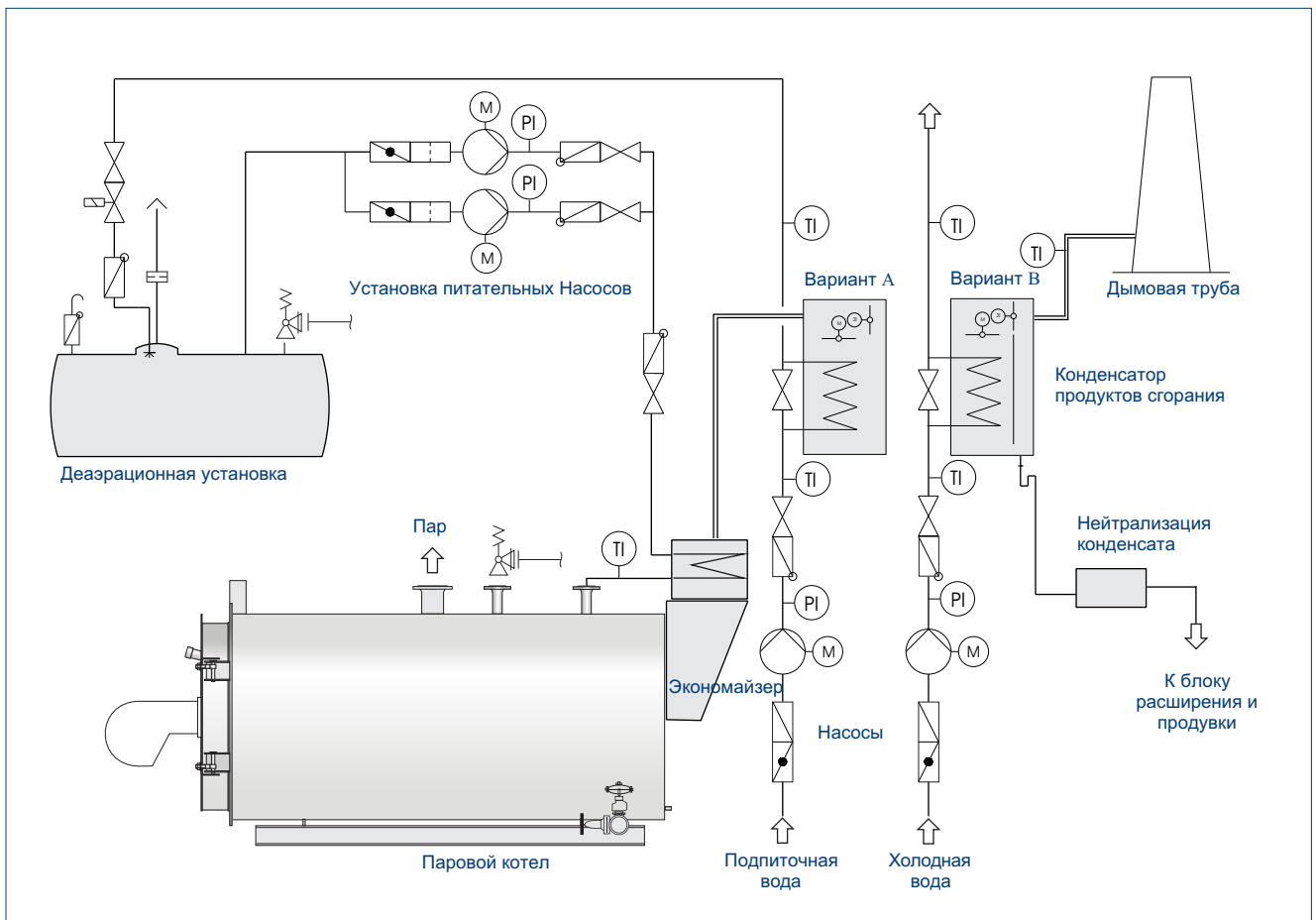


Рисунок 6: Блок-схема паровой котельной установки высокого давления с двумя ступенями теплообмена продуктов сгорания (экономайзер/конденсатор продуктов сгорания)

возвращают конденсат отработанного пара (например, при производстве пенопласта, в системах увлажнения воздуха, при производстве хлеба) или возвращают конденсат насыщенный инородными включениями, который невозможно повторно использовать. К тому же существуют потери от обессоливания, продувки, повторного испарения и утечек. При этом потери сильно меняются по объему. Потери могут составлять более половины произведенного пара и должны быть восполнены подпиточной водой. После водоподготовки подпиточная вода в основном подается с максимальной температурой 15°C, что отлично подходит для предварительного подогрева в конденсаторе продуктов сгорания. Низкие температуры воды на входе способствуют конденсации продуктов сгорания по всему объему и максимальной утилизации теплоты сгорания. Этот метод обеспечивает высокий фактор синхронизма между наличием тепла утилизации и потребностью в этом тепле (смотрите рисунок 6 вариант А).

Многие промышленные предприятия испытывают высокие потребности в технической воде.

Это, в частности, касается пищевых производств. В этих случаях мягкая техническая вода может быть предварительно подогрета в конденсаторе продуктов сгорания. Температура воды после подогрева находится в диапазоне 50-70°C. Дальнейший нагрев технической воды до более высоких температур на выходе возможен посредством расположенных далее по тракту теплообменников, нагреваемых паром (смотрите рисунок 6, вариант В).

На рисунке 7 показан пример теплового баланса парового котла высокого давления с интегрированным теплообменником для предварительного подогрева питательной воды и далее по тракту конденсатор продуктов сгорания для предварительного подогрева технической или подпиточной воды с высоким фактором синхронизма. Конвективные и радиационные потери тепла котла, экономайзера и трубопроводов также, как часть тепла конденсации продуктов сгорания, не могут быть использованы по чисто физическим причинам (связано с размерами поверхностей нагрева) и остаются составляющими тепловых потерь.



Рисунок 7: Тепловой баланс парового котла, работающего в соответствии с технологией утилизации теплоты сгорания

11. Утилизация теплоты сгорания и система газоходов котла

Все тракты продуктов сгорания, находящиеся в контакте с конденсирующимися продуктами сгорания, должны быть нечувствительны к воздействию воды и продуктов сгорания, и выполняться из коррозионностойких материалов. Части корпуса конденсатора продуктов сгорания, также как и газоходы, и дымовые трубы, при возможности подвергнутся коррозии, должны выполняться из нержавеющей стали. Благодаря утилизации теплоты сгорания, температуры продуктов сгорания сильно уменьшаются до приблизительно 50°C. Стволы дымовых труб стандартного исполнения не имеют достаточной мощности для обычного вывода газов с отрицательным давлением в тракте продуктов сгорания. Поэтому тракт продуктов сгорания, включая дымовую трубу, должен проектироваться для работы с повышенным давлением со стороны продуктов сгорания для того, чтобы способствовать уменьшению поперечного сечения. Горелка или дутьевой вентилятор системы сгорания котла соответственно должны быть подобраны так, чтобы скомпенсировать все сопротивления со стороны продуктов сгорания вплоть до дымовой трубы. Это требует целевого планирования, мониторинга и координации проекта.

12. Дренаживание и нейтрализация конденсата

Конденсатор продуктов сгорания, газоходы и дымовая труба должны быть оснащены системой дренажей для отвода конденсата. Теоретические объемы конденсата можно взять из таблицы. 1. Действительные объемы конденсата зависят от температуры конденсации и в большинстве своем находятся в диапазоне от 40 до 60% от теоретического значения согласно таблице 1. Если принять значение водородного показателя pH для жидкостей за базу, то значение pH конденсата продуктов сгорания при сжигании природного газа будет находиться в диапазоне между 2.8 и 4.9, а значение pH конденсата продуктов сгорания при сжигании жидких топлив с низким содержанием серы - в диапазоне между 1.8 и 3.7. Температура конденсата при этом находится на уровне 20-55°C. Для сбросов в государственные сточные каналы необходимо изучить муниципальные нормативы по сточным водам. Немецкая Технологическая Ассоциация Сточных Вод (ATV) выпустила технический бюллетень, согласно которому для систем сжигания

с утилизацией теплоты сгорания с единичной мощностью более 200 кВт рекомендуются установки нейтрализации и адгезии до значения $pH > 6$. Причем отдельные государства и объединения используют совершенно разные методы. Для нейтрализации небольшие предприятия используют сменные доломитовые наполнители (блоки с гранулятом), а большие заводы пользуются контейнерами с дозирующими устройствами для каустической соды (устройства жидкой нейтрализации) которые соответственно поднимают значение pH.

13. Оценка экономической эффективности

Для определения стоимости сэкономленного топлива и периода амортизации в каждом отдельном случае необходимо проводить расчет в соответствии с установленными методами. Общий расчет не дает достаточно полного понимания этого вопроса. При сравнении инвестиций в обычный водогрейный котел и в водогрейный котел с интегрированным конденсационным экономайзером необходимо принять в расчет следующие аспекты:

Затраты на интегрированный экономайзер из нержавеющей стали, на двухтопливные горелки с байпасом и на гидравлическое соединение.

Затраты на дренаживание конденсата и нейтрализацию для установки выше 200 кВт.

В случае необходимости затраты на дренажные системы из нержавеющей стали при сжигании газа, однако в большинстве случаев дымовая труба также выполняется из нержавеющей стали.

Обычно дополнительные затраты на горелочное устройство не возникают. Увеличение сопротивлений со стороны продуктов сгорания компенсируется уменьшением расхода продуктов сгорания в связи с экономией топлива.

Принимая во внимание эти факты, дополнительные инвестиции около 20000 Евро для водогрейного котла мощностью 2,5 МВт с интегрированным конденсатором продуктов сгорания значительны при сравнении с обычным водогрейным котлом (соответственно без дымовой трубы). Эти затраты окупятся после приблизительно 4200 часов работы на средней нагрузке 60%. Эти расчеты показывают увеличение КПД на 7,5 % для установок с утилизацией теплоты сгорания, усредненная стоимость природного газа принята 40 центов/м³.

14. Возможности технологии утилизации теплоты сгорания

Местные поставщики тепла с прямым подключением ко всем тепловым потребителям имеют большие возможности для утилизации теплоты сгорания, которые до сих пор широко не развивались. Большинство исследований экономической эффективности и применимости конденсации продуктов сгорания в существующих локальных нагревательных установках обычно приводят к заключению о том, что необходимое количество тепла в течение большей части отопительного сезона подается в диапазоне низких температур. Во многих случаях применение технологии утилизации теплоты сгорания будет возможным. Поставщики тепла могут повысить свою конкурентоспособность и внести дополнительный вклад в охрану окружающей среды.

Уровень знаний позволяет использовать технологию утилизации теплоты сгорания для паровых котлов высокого давления. Существует надежная и проверенная технология. Расширенное применение в промышленности возможно при тщательном изучении проектировщиком тепловых потребителей и когда большое внимание уделяется передовому способу обогрева с низкотемпературными отопительными контурами. Измененные концепции обогрева смогут продвинуть применение технологии полного использования теплоты сгорания в широком спектре промышленных поставщиков пара.

В связи с экономией топлива появляется возможность дополнительных инвестиций как в водогрейные, так и в паровые котельные установки. Низкий уровень выбросов вредных веществ уменьшает негативное влияние на окружающую среду. Уменьшение выбросов CO₂ вносит вклад в климатоохранные технологии.