

УДК 621.3

Глубокая утилизация тепла дымовых газов ТЭС на природном газе

Ганина О. В., Сазоненко Е. Р.

Научные руководители – ассистент РАКЕВИЧ С.И., ст. препод. ПАВЛОВСКАЯ А.А.

В поиске методов повышения эффективности энергетических предприятий и иных промышленных объектов, использующие оборудование, на котором сжигается ископаемое топливо (паровые, водогрейные котлы, технологические печи и др.), проблема не использования потенциала дымовых газов поднимается далеко не первоочередно.

Однако, основываясь на существующих методах расчёта, спроектированные десятки лет назад, и сложившиеся стандарты выбора главных показателей работы используемого оборудования, эксплуатирующие организации теряют деньги, выпуская их в прямом смысле в трубу, попутно ухудшая экологическую обстановку в глобальном масштабе.

Использование тепловой энергии дымовых газов является одним из основных методов повышения эффективности котлов ТЭС. Когда природный газ стал основным топливом на котельных, острее всего встал вопрос о грамотном и выгодном использовании тепла дымовых газов. Одной из ключевых особенностей работы с природным газом является высокое содержание водяного пара в продуктах сгорания. Соответственно, когда ТЭС работает при пониженной мощности, скорость потока дымовых газов в дымоходах меньше скорости дымовых газов при номинальной работе тепловых станций. В связи с этим происходит конденсация водяного пара, что приводит к смачиванию стенок. Увлажнение стен приводит к коррозии. Это приводит к уменьшению срока службы дымоходов, а также к снижению их надежности. Во избежание образования конденсата необходимо потратить энергию на повышение температуры выхлопных газов, что приводит к увеличению тепловых потерь котельных агрегатов.

Утилизация дымовых газов предполагает снижение температуры выхлопных газов ниже точки росы водяных паров с последующей их конденсацией. Благодаря этому конденсат после обработки способен компенсировать потери воды в энергетическом цикле котла, а сушка дымовых газов может предотвратить выпадение влаги в трубах, что положительно влияет на срок их службы, а также на их техническое обслуживание.

В начале и середине 20 века большинство котлов работали на твердом топливе (уголь, торф и др.). Говоря о сжигании такого топлива, содержание влаги в дымовых газах было небольшим и в основном зависело от влажности топлива. При глубокой утилизации тепла качество полученного конденсата не позволяет использовать его из-за присутствия оксидов серы и азота. Из-за этого до 60-х годов XX века утилизация дымовых газов не находило широкого применения.

Проблема утилизации тепла дымовых газов была вновь поднята, когда котлы на природном газе нашли широкое применение. Это связано с высоким содержанием водяных паров в продуктах сгорания этого топлива.

Отметим, что тепловую энергию, которая содержится в дымовых газах, можно разделить на две части. Первое связано с повышенной температурой дымовых газов. Это тепло используется для нагрева другой среды (вода, воздух и др.). В этом случае температура дымового газа может быть снижена до точки росы водяного пара, содержащегося в дымовом газе. Второе - скрытая теплота конденсации водяного пара. Использование такого тепла требует конденсации водяного пара, при котором выделяемое тепло нагревает среду. Эта утилизация и является глубокой.

Процесс рекуперации тепла путем охлаждения дымового газа до температуры точки росы предшествует конденсации водяного пара. Количество используемого тепла зависит от начальной температуры газов t_g . Как правило, она достаточно высокая и составляет 130 °С для теплоэлектростанций и крупных котельных, 150 °С для средних локальных котельных и 170 °С и выше для небольших газовых котлов. Конечная температура дымового газа равна температуре точки росы водяного пара.

При дальнейшем анализе обратимся к затратам и мощности. Для сравнения возьмём расчет для расхода V_0 исходного дымового газа $1 \text{ м}^3/\text{с}$, что примерно соответствует котлу мощностью $2,7 \text{ МВт}$ ($2,3 \text{ Гкал/ч}$). Максимальная теплоемкость утилизатора Q_0 за счет охлаждения дымовых газов до температуры точки росы водяного пара t_{1s} рассчитывается по уравнению теплового баланса.

$$Q_0 = V_0 \cdot c_{v,g} \cdot (t_g - t_{1s}) \quad (1)$$

где $c_{v,g}$ – объемная тепловая ёмкость дымовых газов ($\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$).

Для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2$ температура точки росы водяных паров в дымовых газах t_{1s} будет составлять $56,7^\circ\text{C}$.

Так при процессе охлаждения дымовых газов до температуры точки росы можно получить ещё 3-6% дополнительной тепловой мощности.

Содержание влаги в дымовых газах колеблется от 150 до 108 г на килограмм сухих газов. Изначальная влажность дымовых газов d_1 определяют составом топлива, коэффициентом избытка воздуха и начальной влажностью воздуха. Обычно это значение известно.

Когда дымовые газы охлаждаются ниже температуры точки росы, начинается процесс конденсации водяного пара. Также необходимо иметь запас в несколько градусов, чтобы предотвратить образование корки льда. Теоретически возможное количество конденсированной влаги D_k будет рассчитываться как разность между начальным содержанием влаги d_1 и при 0°C d_0 .

Из расчёта состава газов получают объёмный и массовый расходы сухих дымовых газов G_s и паров G_w (кг/с).

Массовый расход остаточного водяного пар в выходящих дымовых газах:

$$G_p = G_s \cdot d_0 \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Используемая тепловая мощность при конденсации водяного пара вычисляется из уравнения теплового баланса. При составлении теплового баланса принимаем отсутствие потери тепла за счёт повышенной температуры конденсата:

$$Q_k = \Delta Q_s + Q_w - Q_p \quad (3)$$

Теплота, получаемая за счет понижения температуры сухих дымовых газов:

$$\Delta Q_s = G_s \cdot c_{p,s} \cdot (t_{1s} - t_0) \quad (4)$$

где $c_{p,s}$ – теплоемкость сухих дымовых газов.

Теплота исходных водяных паров:

$$Q_w = G_w \cdot h_1'' \quad (5)$$

где h_1'' – энтальпия насыщенного водяного пара при температуре t_{1s} .

Теплота остаточного водяного пара в газах:

$$Q_p = G_p \cdot h_0'' \quad (6)$$

где h_0'' – энтальпия насыщенных водяных паров при температуре t_0 .

Подстановка выражений (2, 4, 5, 6) в выражение (3) дает:

$$Q_k = G_s \cdot c_{p,s} \cdot (t_{1s} - t_0) + G_w \cdot h_1'' - G_s \cdot d_0 \cdot h_0'' \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Так максимальная теоретическая тепловая мощность теплообменника составляет от 472 до 365 кВт (зависит от коэффициента избытка воздуха). Это даёт дополнительную полезную мощность и составляет 13-17% мощности котла. Общая полезная мощность - это сумма мощности, полученная при охлаждении дымовых газов до температуры конденсации. Добавочная тепловая мощность котельной установки может составлять от 13 до 21%.



Рисунок 1 – Теоретический потенциал утилизации тепла дымовых газов котельных установок на природном газе

На практике блоки рекуперации тепла не могут конденсировать весь водяной пар. Для оценки глубины процесса практичнее использовать два коэффициента: коэффициент сушки дымовых газов K_0 и коэффициент утилизации тепла K_T .

Коэффициент отвода дымовых газов K_0 - это отношение расхода конденсата к его максимальному извлекаемому значению. При $K_0 = 0$ процесс конденсации не протекает, а при $K_0 = 1$ происходит максимально возможная конденсация водяного пара. В этом случае определяющим фактором является конечная температура дымовых газов, равная температуре точки росы остаточного водяного пара. Он определяет конечное содержание влаги, мощность конденсатора и его конечный расчёт. Коэффициент глубины рекуперации тепла K_T представляет собой отношение фактической мощности теплообменника к максимально возможной.

Из существующих технологий утилизации газов широко используются контактные и поверхностные теплообменники.

В контактных теплообменниках на распыляемой воде происходит конденсация водяных паров, содержащихся в дымовых газах. Выделяющееся тепло нагревает воду, которая используется в дальнейшем процессе. Корпус контактных теплообменников обычно представляет собой цилиндр большого диаметра и содержит в своей верхней части насадки для распыления холодной воды. Выхлопные газы поступают снизу в противотоке.

Различают три типа контактных теплообменных аппаратов:

- без насадки (конденсация протекает на капельках распыляемой воды);
- с пассивной насадкой (процесс конденсации происходит на поверхности насадки);
- с активной насадкой (происходит отвод тепла водой дополнительного контура);

Главным плюсом данного типа теплообменников является их простота конструкции, а также высокий уровень тепловой эффективности.

На данный момент разработка контактных теплообменников с активным соплом наиболее популярна. Используя теплообменники этого типа, можно охлаждать газы до температуры, которые соответствуют значению коэффициента дренажа $K_0 = 0,6$.

В странах Северной Европы технология «конденсатора» для утилизации тепла дымовых газов нашла широкое применение. Это даёт возможность повысить температуру нагреваемой воды с помощью дутья и повысить температуру точки росы дымовых газов.

Основными недостатками контактных теплообменников являются ограничение температуры нагрева воды и низкий коэффициент осушения, не превышающий $K_0 = 0,7$.

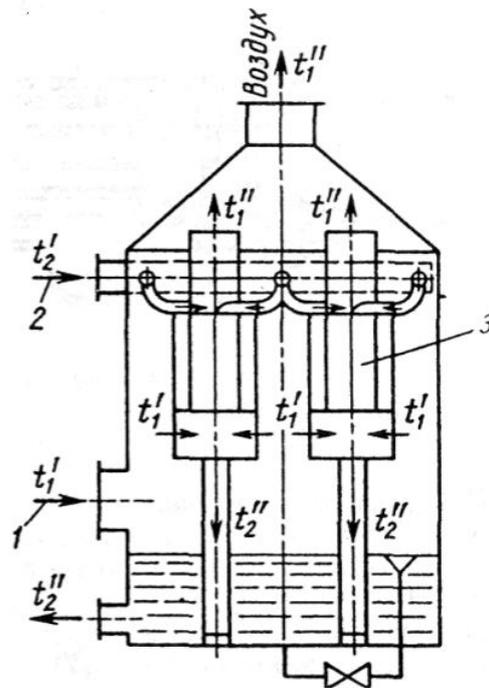


Рисунок 2 – Контактный теплообменный аппарат
1-дымовые газы; 2-вода; 3-теплообменные элементы

Поверхностные теплообменники производят теплообмен и конденсацию водяного пара на двух разных средах. Обычно холодная вода используется в качестве теплоносителя, который используется для питания сети. Конструкция поверхностных теплообменников представляет собой газоход со встроенным пучком из горизонтальных труб.

Основной трудностью при проектировании поверхностных утилизаторов является определение коэффициента тепловой передачи от влажных газов к стенке поверхности при конденсации водяных паров. До настоящего времени не был разработан универсальный метод для расчёта коэффициента тепловой передачи от влажных газов к стенке поверхности теплопередачи. Все широко известные в настоящее время методы основаны на экспериментальных данных и предлагают достаточно узкие значения изменений физических параметров среды. Поэтому при использовании того или иного метода требуется тщательный анализ.

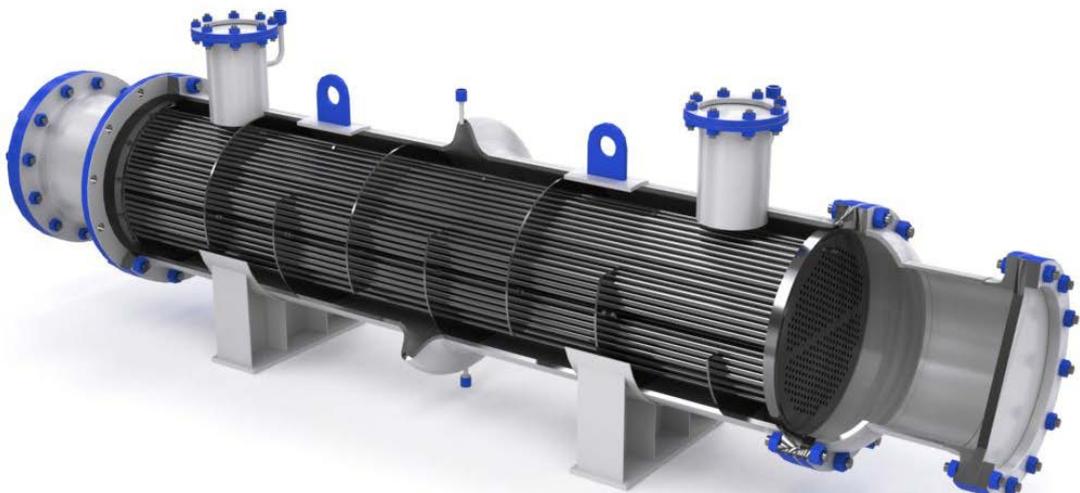


Рисунок 3 – Поверхностный теплообменный аппарат

Для повышения эффективности процесса утилизации тепла газов в качестве ключевого элемента системы зачастую используются инновационные решения на базе тепловых насосов. В некоторых отраслях промышленности (биоэнергетике) такие решения применяются на большинстве вводимых в эксплуатацию котельных установках. Дополнительная экономия начальных энергоресурсов в этом случае достигается благодаря использованию альтернативных электрических машин для сжатия пара, но более надежных абсорбционных тепловых насосов с бромидом лития, которые требуют для работы не электричество, а тепло (часто это может быть неиспользованные отходы тепла, которые присутствуют в избытке практически на любом предприятии). Такое тепло от внешнего источника нагрева активирует внутренний цикл АБТН, который позволяет преобразовать имеющийся температурный потенциал дымовых газов и перенести его в более нагретые среды.