

УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И НАГРЕВАТЕЛИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ. КОНТРОЛЬ УРОВНЯ

НИКОЛАЙ ПЛЕТЕНЕВ
info@magnetrol.com

Минимизировать контролируемые потери тепловой энергии, связанные с работой нагревателя питательной воды, — одна из важных задач в энергетике. Реализация мировых тенденций в управлении потерями предприятий при помощи внедрения современных инструментов может иметь место только тогда, когда все участники этого процесса (в том числе производители оборудования) приложат необходимые усилия. В статье рассматриваются основные принципы работы экономайзеров, а также их расчетные характеристики. Материал основан на изучении влияния контроля уровня на общую эффективность установки в критериях чистого удельного расхода тепловой энергии и оптимизации затрат.

УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Удельный расход тепловой энергии (УРТЭ) — это измеряемое значение, используемое на предприятиях энергетической отрасли, определяемое количеством тепловой энергии в килоджоулях, необходимой для выработки одного киловатт-часа электроэнергии. Существует несколько разных способов определения удельного расхода тепловой энергии. Необходимо подчеркнуть, что наиболее важным значением является чистый удельный расход тепловой энергии.

Общий УРТЭ [кДж/кВт·ч] = потраченная энергия [кДж] / выработанная энергия [кВт·ч], где потраченная энергия (энергия топлива) [кДж] = расход топлива [кг] × уд. теплота сгорания [кДж/кг].

Чистый УРТЭ рассчитывается следующим образом: расход топлива [кг/ч] × уд. теплота сгорания [кДж/кг] / чистая выработанная энергия [кВт].

УРТЭ цикла турбины определяет совместную производительность турбины, конденсатора, подогревателя питающей воды и насоса и рассчитывается по той же формуле, что и общий УРТЭ.

Расчет чистого УРТЭ и УРТЭ цикла турбины позволяет определить эффективность котла.

В идеальном случае УРТЭ составляет 3600 кДж/кВт·ч [2]. Это бы означало, что вся энергия топлива перешла в электроэнергию, то есть эффективность 100%. Естественно, что этот показатель

на практике не достижим, однако чем ближе к нему действительный УРТЭ, тем эффективнее действует электростанция.

Высокий УРТЭ говорит о большем потреблении топлива, в то время как уменьшение УРТЭ указывает на то, что для производства 1 кВт энергии требуется меньше топлива. Но, помимо показателя УРТЭ, необходимо также учитывать такие факторы, как стоимость обслуживания, надежность, безопасность, выбросы, стоимость обвязки и т. д. Показательным является расчет годовых затрат на топливо при незначительном сдвиге показателя УРТЭ, так как совсем небольшое изменение в данном случае оказывает огромное влияние на затраты. Если, к примеру, планируемый показатель УРТЭ станции 13 000 кДж/кВт·ч, чем обернется действительный показатель в 13 011 кДж·ч с точки зрения увеличения годовых затрат на топливо? Умножив полученное число на разницу УРТЭ в 11 пунктов, получаем в годовом исчислении затраты на топливо в размере:

11 × 211534,09 руб. = 2326875 руб.

Следует подчеркнуть следующее:

- Увеличение планируемого УРТЭ ведет к увеличению потребления топлива.
- Уменьшение УРТЭ на 1% экономит в годовом исчислении около

13 млн руб. для завода мощностью 500 МВт.

- Уменьшение температуры питательной воды на 2,8 °С приводит к увеличению УРТЭ на 11,8 кДж/кВт·ч, что равно 2,5 млн руб. дополнительных затрат на топливо в год.
- Минимальный показатель УРТЭ эффективного предприятия с парогазовыми установками достигает 7400 кДж/кВт·ч.
- На предприятиях, использующих уголь в качестве топлива, УРТЭ составляет 9500–13000 кДж/кВт·ч.

НАГРЕВАТЕЛЬ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Поскольку нагреватель питательной воды является одним из основных компонентов для анализа чистого УРТЭ либо УРТЭ цикла турбины, знание его принципа действия и влияния инструментальной обвязки на его эффективность является крайне важным. Обычно процесс работы нагревателя состоит из шести-семи этапов.

При цене на нагреватель питательной воды в несколько десятков миллионов рублей его действительная стоимость определяется расчетом окупаемости инвестиций.

Преимуществом нагревателей питательной воды является использование энергии конденсации (выделяемой при переходе из состояния насыщенного пара в состояние насыщенной жидкости) для подогрева котловой воды. Это уменьшает расход топлива, используемого для

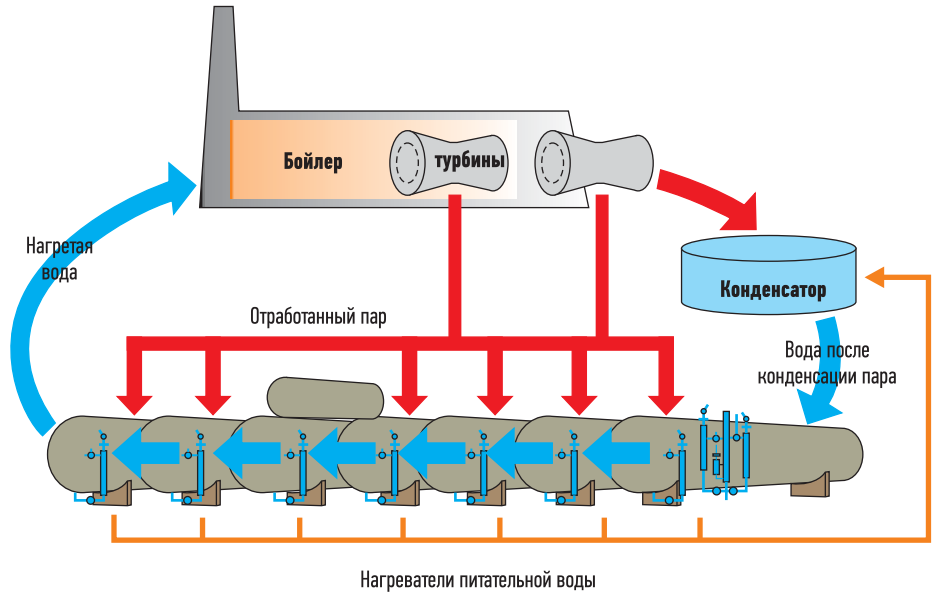
поддержания необходимой температуры воды.

На рис. 1 показан стандартный нагреватель питательной воды высокого давления (кожухотрубный теплообменник). Он позволяет проходить питательной воде в трубе сквозь пар, поступающий из турбины в кожух, без прямого контакта. Этот способ подогрева воды более эффективен, чем использование горячих газов при единственном источнике энергии от сжигания топлива.

Нагреватели низкого давления имеют схожую конструкцию, но с меньшей зоной пароохлаждения. Три основные зоны нагревателя — это зона пароохлаждения, зона конденсации и зона охлаждения дренажа. Питательная вода котла подается в трубу на вход нагревателя, а отработанный пар направляется в кожух с другого входа. В зоне пароохлаждения перегретый пар охлаждается до состояния насыщенного пара. В зоне конденсации пароводяная смесь отдает энергию, подогревая проходящую по трубам питательную воду. Зона охлаждения дренажа служит для забора оставшейся энергии из внешней воды.

Пароводяной цикл для паротурбинных установок может изменяться в зависимости от климатических условий и наличия блоков подогрева. Тем не менее принципиальная схема (рис. 2) показывает то, как встраивается каскадная система нагревателей питательной воды в общий процесс. Более детально входы и выходы нагревателей отмечены на рис. 1 и 3.

Описывать процесс удобно, начиная с конденсатора, куда стекается дренаж из нагревателей. Оттуда, снова пройдя каскад нагревателей, вода поступает в систему турбины низкого давления. В то же время



отработанный пар из турбин низкого, среднего и высокого давления также поступает в соответствующие нагреватели, где происходит описанный выше процесс теплопередачи. Поддержание точного и надежного контроля уровня воды на каждой стадии крайне важно для достижения требуемой температуры воды на выходе из нагревателей перед подачей в экономайзер. Как было сказано выше, падение температуры на 2–3 °С выливается в 2,5 млн руб. дополнительных затрат на топливо в год (для установки 500 МВт).

КОНТРОЛЬ УРОВНЯ В НАГРЕВАТЕЛЯХ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Важнейший аспект работы нагревателя — это надежное измерение уровня в разных рабочих условиях. Точный контроль уровня позволя-

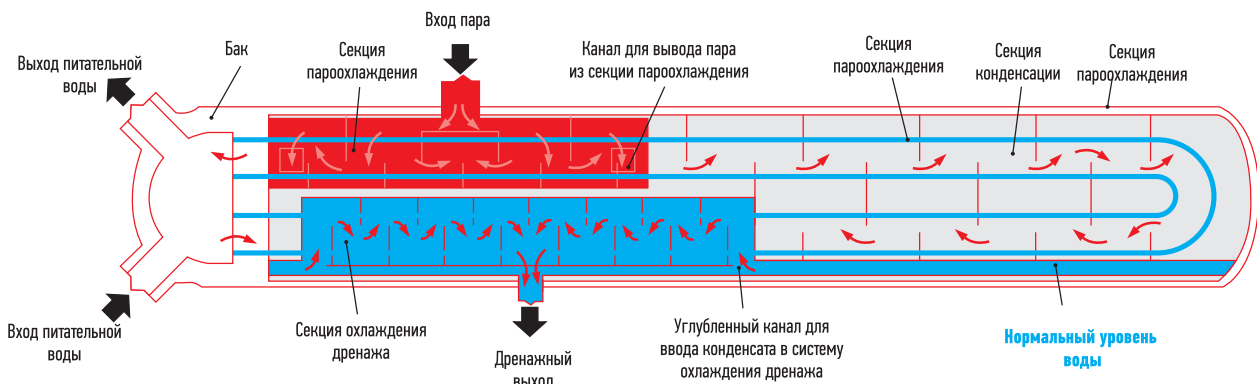
ет быть уверенным, что установка работает в эффективном режиме с оптимальной теплопередачей, а части и инструменты нагревателя защищены от износа.

Использование старых приборов, наряду с применением ненадежных в конкретных условиях технологий, ограничивает возможность операторов контролировать потери, т. е., исключает управление и контроль расчетного уровня с высокой степенью надежности. Кроме того, нередко встречается ситуация, когда, в условиях дефицита приборов контроля, закрывают глаза на погрешность измерения уровня в 5–10 см относительно расчетного значения.

При работе нагревателя питательной воды с большим или меньшим уровнем относительно расчетного значения, неизбежно влияние на производительность и, особенно,

РИС. 1. ▲ Нагреватель питательной воды низкого давления

РИС. 2. ▼ Расположение нагревателей питательной воды



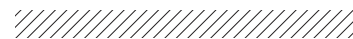
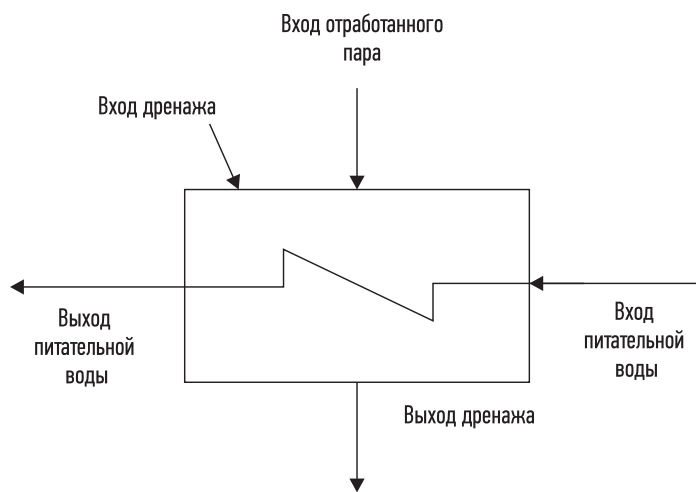


РИС. 3. ►
Принципиальная схема
действия нагревателя
питательной воды



на УРТЭ. Необходимость дополнительного топлива и высокая загрузка котла для восстановления энергетических потерь мгновенно отражаются на финансовых затратах. Также, если уровень приближается к критическому значению, при недостоверном измерении невозможна активация системы защитного сброса в обход нагревателя, что приводит к необходимости принятия мер в полевых условиях вручную.

Если уровень воды в нагревателе выше расчетного, то зона активной конденсации уменьшается, в результате чего трубки, которые должны забирать энергию конденсации пара, нагревают конденсат. Ситуа-

ция ухудшается тем, что появляется риск попадания воды из нагревателя в турбину. С другой стороны, трубки подвергаются постоянному высокотемпературному воздействию, что вызывает преждевременный износ. В результате работы с низким уровнем жидкости в нагревателе горячий пар в серьезном количестве может достигать секции охлаждения дренажа, доводя местный конденсат до кипения. Итогом может стать незапланированный останов. Другой проблемой, связанной с низким уровнем воды, является парообразование в трубках с водой, что снижает теплопередачу и увеличивает УРТЭ.

Особенности конструкции самого нагревателя (горизонтальный либо вертикальный), а также секции охлаждения дренажа (заборная трубка либо полноразмерный забор) влияют на выбор технологии измерения уровня. К примеру, в горизонтальных нагревателях и с полноразмерным забором дренажа легче контролировать уровень.

Обновление средств контроля уровня в нагревателях питательной воды позволяет лучше контролировать потери и значительно уменьшает стоимость обслуживания. Причем буйковые уровнемеры с торсионной трубкой, одни из самых распространенных в отрасли, легко заменяются современными средствами контроля.

МОНИТОРИНГ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Базовыми контролируемыми параметрами отдельного нагревателя являются прирост температуры питательной воды (Feedwater Temperature Rise), терминальная разность температур (Terminal Temperature Difference) и показатель охлаждения дренажа (Drain Cooler Approach).

Прирост температуры питательной воды — это разница температур на выходе и входе нагревателя. Работающий в правильном режиме нагреватель должен обеспечивать расчетное значение при условии, что средства контроля уровня подходят для выполнения этой задачи.

ТАБЛИЦА 1. СВОЙСТВА НАСЫЩЕННОГО ПАРА (ФРАГМЕНТ)

| Абсолютное давление, бар | Температура пара, °С | Уд. объем пара, м ³ /кг | Плотность пара, кг/м ³ | Теплота жидкости, ккал/кг | Скрытая теплота парообразования, ккал/кг | Полная теплота пара |
|--------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|---------------------|
| 0,010 | 7,0 | 129,20 | 0,007739 | 7,0 | 593,5 | 600,5 |
| 0,050 | 32,9 | 28,19 | 0,03547 | 32,9 | 578,9 | 611,8 |
| 0,10 | 45,8 | 14,67 | 0,06814 | 45,8 | 571,8 | 617,6 |
| 0,50 | 81,3 | 3,240 | 0,3086 | 81,3 | 550,7 | 632,0 |
| 1,00 | 99,6 | 1,694 | 0,5904 | 99,7 | 539,3 | 639,0 |
| 5,0 | 151,8 | 0,3747 | 2,669 | 152,8 | 503,4 | 656,2 |
| 10 | 179,9 | 0,1943 | 5,147 | 182,1 | 481,0 | 663,1 |
| 15 | 198,3 | 0,1317 | 7,596 | 201,7 | 464,7 | 666,4 |
| 20 | 212,4 | 0,09954 | 10,05 | 217,0 | 451,1 | 668,1 |
| 25 | 223,9 | 0,07991 | 12,51 | 229,7 | 439,3 | 669,0 |
| 50 | 263,9 | 0,03943 | 25,36 | 275,7 | 391,7 | 667,4 |
| 100 | 311,0 | 0,01804 | 55,43 | 336,3 | 315,2 | 651,5 |
| 150 | 342,1 | 0,01034 | 96,71 | 384,7 | 239,9 | 624,6 |
| 200 | 365,7 | 0,005877 | 170,2 | 436,2 | 141,4 | 577,6 |

Примечание: 1 ккал = 4,186 кДж; 1 кДж = 0,24 ккал; 1 бар = 0,102 МПа.

Терминальная разность температур (ТРТ) обеспечивает показания производительности с точки зрения теплообмена в нагревателе и определяется как разница температур насыщенного пара и питательной воды на выходе нагревателя. Рост ТРТ свидетельствует об ухудшении теплообмена, а снижение ТРТ — наоборот, об улучшении.

Типичное значение ТРТ для нагревателя высокого давления с секцией пароохлаждения — 2–3 °С, и около 0 °С без секции пароохлаждения. Для нагревателей низкого давления ТРТ составляет около 3 °С. Для расчета значений ТРТ используются таблицы свойств пара с точными показаниями измеренного давления (например, табл. 1).

Показатель охлаждения дренажа (ПОД) — это метод определения уровня воды в нагревателе на основе разницы температур между водой на выходе секции охлаждения дренажа и входе нагревателя. Увеличение этой разницы говорит о падении уровня, а уменьшение ПОД — о его росте. Типичное значение ПОД составляет 5,5 °С.

ВЛИЯНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОШИБКИ И ТЕПЛОВУЮ МОЩНОСТЬ

Несмотря на то, что существует большое количество физических факторов, влияющих на работу нагревателя, в данной главе внимание будет заострено на проблемах недоверного измерения уровня, приводящих к недостаточной температуре воды на выходе нагревателя. Проблемы могут варьироваться от простой неточности или несовпадения результатов измерений нескольких приборов, оставляющих открытым вопрос о «реальном» уровне, до случаев выхода установок из строя. Независимо от серьезности проблемы нужно понимать, что плохой контроль уровня воды в нагревателе имеет цепной эффект, влияющий на работу котла и турбины (увеличение УРТЭ). Рассмотрим два основных источника инструментальных ошибок:

- Дрифт (механический или электронный) связан со старением оборудования, движущимися частями, особенностями дизайна (торсионные трубки/буйки). Поверка (калибровка) во время планового останова призвана повысить точность измерений и нивелировать расхожде-

ния в показаниях нескольких уровнемеров. Недостаточный отклик на быстрое изменение уровня может быть обусловлен фундаментальными принципами измерения.

- Технология измерений не подходит к рабочим условиям процесса. Например, имеют место скачки плотности или диэлектрической проницаемости измеряемой среды при изменении давления или температуры. Некоторые технологии не могут обеспечить одинаково точное измерение при пусковых и рабочих температурах без использования поправочных коэффициентов (преобразователи перепада давления, магнитострикционные уровнемеры, емкостные уровнемеры, торсионные трубки/буйки).

Температура питательной воды ниже ожидаемой обусловлена выходом из строя нагревателя по причине ненадежного измерения и передачей данных о слишком высоком или низком уровне. Если имеет место высокий уровень измеряемой воды в нагревателе, то оператор должен наблюдать падение температуры питательной воды на выходе, уменьшение ПОД и увеличение ТРТ. В случае наблюдения обратных тенденций уровень измеряемой воды в нагревателе уменьшается. В обоих сценариях риск повреждения нагревателя увеличивается, меняется теплопередача, питательная вода не подогревается до необходимой температуры.

Рассмотрим возможные последствия низкой температуры питательной воды:

- Дополнительная нагрузка на котел для поднятия температуры (уровень измеряемой воды ниже/выше или нагреватель вышел из строя):
 - увеличение расхода топлива и выбросов;
 - увеличение температуры газа в печи — перегрев, преждевременный износ элементов конструкции;
 - поток сквозь турбины растет на 10%;
 - попадание пара в секцию охлаждения дренажа;
 - перегрев трубок.
- Активация аварийных стоков для уменьшения уровня (высокий уровень измеряемой воды):
 - потери в эффективности;
 - потенциальная угроза попадания воды в систему подачи отработанного пара;

- скачки давления;
- срабатывание защиты от попадания воды в турбину — остановка процесса, затраты на обслуживание и запуск.

Применение надежных надежных технологий измерения уровня снижает риски возникновения инструментальных ошибок, обеспечивает обратную связь с процессом, позволяет контролировать потери, позволяет избежать цепного эффекта распространения неисправностей на предприятиях.

ПРИМЕРЫ

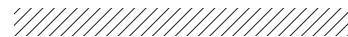
В приведенных примерах рассмотрены два варианта работы нагревателя питательной воды. Первый описывает годовые затраты на топливо при отклонении от расчетного значения температуры питательной воды для угольной электростанции мощностью 500 МВт. Несмотря на то, что эта конкретная ситуация не является критической и не приводит к отключению нагревателя, она указывает на некоторые компромиссы в вопросах обеспечения измерений, на которые идут компании. Второй пример демонстрирует ежедневный риск в работе установок и дополнительные затраты при использовании ненадежных либо устаревших приборов. В обоих примерах инвестиции на обновление средств измерения возвращаются в течение 1–1,5 года. В примерах не учитываются затраты на выбросы, обслуживание котлов и турбин, останов процесса и проч.

Пример 1. Отклонение от расчетного значения температуры питательной воды для угольной электростанции 500 МВт

Расчетное значение на выходе — +225,8 °С; действительное значение — +214,1 °С. Разница температур составляет 11,7 °С. При падении температуры на 11,7 °С УРТЭ возрастает на 49,3 кДж/кВт·ч, и годовые затраты составляют 10 428 630,64 руб. В таблице 2 приведены рабочие параметры.

ТАБЛИЦА 2. РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ

| Прирост температуры, °С | расчетный | 55,6 |
|-------------------------|----------------|------|
| | действительный | 35,5 |
| ПОД, °С | расчетный | 5,5 |
| | действительный | 1,7 |
| ТРТ, °С | расчетная | 5,5 |
| | действительная | 10,8 |

**ТАБЛИЦА 3. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

| | |
|--|-----------|
| Стоимость вывода из обслуживания на неделю нагревателя высокого давления, руб. | 1 112 000 |
| Два запуска после срабатывания систем защиты, руб. | 1 067 500 |
| Стоимость невыпущенной в результате указанных событий энергии, руб. | 2 500 000 |

Из-за инструментальной ошибки измеряемый уровень воды в нагревателе ниже действительного значения.

Пример 2. Экономическое обоснование замены устаревших уровнемеров из-за постоянного отключения нагревателей высокого давления

Нагреватель питательной воды заменен в 2002 г.; оригинальное оборудование (1996 г.) используется повторно. Ненадежные приборы приводят к биениям показания уровня воды в нагревателе. В целях защиты произведено подключение в обход нагревателей высокого давления. Существует риск автономного отключения блока.

В таблице 3 приведены экономические расчеты.

Срок возврата инвестиций составляет полтора года.

СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНЕМЕРЫ MAGNETROL

Magnetrol — глобальная компания, которая еще в 1932 г. начала предлагать механические сигнализаторы для котлов. С течением времени накопленный опыт в энергетике позволил фирме предлагать уровнемеры и сигнализаторы практически для любых применений и для разных предприятий отрасли во всем мире.

Одной из передовых разработок компании является волноводный радарный уровнемер ECLIPSE. Magnetrol первой представила миру

эту технологию, собрав воедино уникальные качества прибора, позволяющие работать, в том числе, и в энергетической отрасли. Независимо от условий процесса уровнемеры ECLIPSE обеспечивают точное и надежное наблюдение за работой нагревателей питательной воды, деаэраторов и прочих резервуаров с горячими средами без необходимости калибровки.

В 2001 г. компания Orion Instruments стала подразделением Magnetrol, что ускорило процесс обновления линейки магнитных указателей уровня. Революционным шагом стал выпуск уровнемера AURORA — прибора, совмещающего в одной камере магнитный указатель и радарный уровнемер. На данный момент уровнемер AURORA широко применяется в энергетической отрасли. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Heat Rate Improvement Guidelines for Existing Fossil Plants // EPRI. Palo Alto, CA. 1986.
2. Heat Rate Improvement Reference Manual // EPRI. Palo Alto, CA. 1998.
3. Heat Rate Awareness. Seminar Notes. General Physics Corp. Amherst, NY. December, 2009.