

# Удельный расход тепловой энергии и нагреватели питательной воды КОНТРОЛЬ УРОВНЯ

*Николай Плетенев, инженер представительства в России и СНГ  
компании Magnetrol International*

## Задача

Минимизировать контролируемые потери тепловой энергии, связанные с работой нагревателя питательной воды, уделив особое внимание основным принципам работы экономайзеров, их расчетным характеристикам, и изучив влияние контроля уровня на общую эффективность установки в критериях чистого удельного расхода тепловой энергии (англ.: Heat Rate) и оптимизации затрат.

## Обзор

- Удельный расход тепловой энергии
- Стоймость изменения тепловой мощности
- Нагреватели питательной воды
  - основной тепловой цикл
  - контроль уровня
  - мониторинг производительности
- влияние средств измерения на ошибки и тепловую мощность
- примеры
- оптимизация измерения уровня

## Удельный расход тепловой энергии

Появление актов, регулирующих влияние на изменение климата и загрязнение воздуха обострило международное обсуждение проблем, связанных с ископаемым топливом. С учетом новых требований и необходимостью оптимизации производительности общее актуальное значение для всех энергогенерирующих предприятий приобретает определение удельного расхода тепловой энергии. Понимание важности удельного расхода тепловой энергии для бизнеса и влияния современных технологий на эффективность работы предприятия в целом имеет ключевое значения для успеха инвестиций и роста прибыли.

Удельный расход тепловой энергии (УРТЭ) - это измеряемое значение, используемое на предприятиях энергетической отрасли, определяемое количеством тепловой энергии в кДж, необходимой для выработки одного кВт\*ч электроэнергии. Существует несколько разных способов определения удельного расхода тепловой энергии. Основные расчеты приведены в уравнениях ниже. Необходимо подчеркнуть, что наиболее важным значением является чистый удельный расход тепловой энергии.

### Общий удельный расход тепловой энергии:

$УРТЭ (кДж/кВт*ч) = \text{Потраченная энергия (кДж)} / \text{Выработанная энергия (кВт*ч)}$

### Потраченная энергия:

$\text{Энергия топлива (кДж)} = \text{Расход топлива (кг)} * \text{Уд. теплота сгорания (кДж/кг)}$

### Чистый удельный расход тепловой энергии:

$\text{Расход топлива (кг/ч)} * \text{Уд. теплота сгорания (кДж/кг)} / \text{Чистая выработанная энергия (кВт)}$

В другом варианте рассчитывается УРТЭ цикла турбины, определяющая совместную производительность турбины, конденсатора, подогревателя питающей воды и насоса. Расчет чистого УРТЭ и УРТЭ цикла турбины дает возможность определить эффективность котла.

### Удельный расход тепловой энергии цикла турбины:

$УРТЭ \text{ цикла турбины (кДж / кВт*ч)} =$

$\text{Потраченная энергия (кДж)} / \text{Выработанная энергия (кВт*ч)}$



В идеальном случае УРТЭ составляет 3600 кДж/кВт\*[2]. Это бы значило, что вся энергия топлива перешла в электроэнергию, то есть 100% эффективность. 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 важности показателя УРТЭ необходимо еще учитывать такие факторы как стоимость обслуживания, надежность, безопасность, выбросы, стоимость обвязки и т.д. Рациональный выбор используемых инструментальных технологий среди спектра существующих на рынке помогает извлечь максимальную выгоду и обеспечивает возврат вложений.

### Цена изменения УРТЭ

Показательным является расчет годовых затрат на топливо при незначительном сдвиге показателя УРТЭ, так как совсем небольшое изменение в данном случае оказывает огромное и, зачастую, неожиданное влияние на затраты. Если, к примеру, планируемый показатель УРТЭ станции 13000 кДж/кВт\*ч, чем обернется действительный показатель в 13011 кДж\*ч с точки зрения увеличения годовых затрат на топливо? В следующих уравнениях вычислим влияние изменения УРТЭ на 1 кДж/кВт\*ч.

### Общие сведения по УРТЭ

- Увеличение планируемого УРТЭ ведет к увеличению потребления топлива
- Уменьшение УРТЭ на 1% экономит в годовом исчислении около 13 миллионов рублей 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 миллионам рублей дополнительных затрат на топливо в год.
- Минимальный показатель УРТЭ эффективного предприятия с парогазовыми уставновками достигает 7400 кДж/кВт\*ч
- На предприятиях, использующих уголь в качестве топлива УРТЭ составляет 9500 - 13000 кДж/кВт\*ч

Умножив полученное число на разницу УРТЭ в 11 пунктов, получаем в годовом исчислении затраты на топливо в  $11 \cdot 211534,09 \text{ руб} = 2326875 \text{ руб}$ .

### Изменение годовых затрат на топливо = ИУРТЭ / КПД котла \* СТ \* КИУМ \* ОРМ \* В

Где:

- ИУРТЭ** изменение УРТЭ (чистый УРТЭ либо УРТЭ цикла турбины)  
**КПД** коэф. полезного действия котла = 0,88  
**СТ** стоимость топлива на 1000000 кДж = 50 руб. \*  
**КИУМ** коэф. использования установленной мощности = 0,85  
**ОРМ** Общая располагаемая мощность = 500000 кВт  
**В** время 8760 ч (время работы установки в течение года)

#### Годовые затраты на топливо:

$(1 \text{ кДж/кВт}^* \text{ч} / 0,88) \cdot (50 / 1000000 \text{ кДж}) \cdot (0,85) \cdot (500000 \text{ кВт}) \cdot (8760 \text{ ч}) = 211534,09 \text{ руб}$  (в год при увеличении УРТЭ на 1 кДж/кВт\*ч)

\* средняя цена

## 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 6-7 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.

Кожухотрубный теплообменник (рис.1) 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.

На рис.1 изображен стандартный нагреватель питательной воды высокого давления (кожухотрубный теплообменник); 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.

Ключевым моментом в эффективной работе нагревателя является передача энергии в зоне конденсации. Необходимо передать как можно больше энергии питательной воде, при этом не допуская перегрев и последующее разрушение важных частей и инструментов нагревателя.

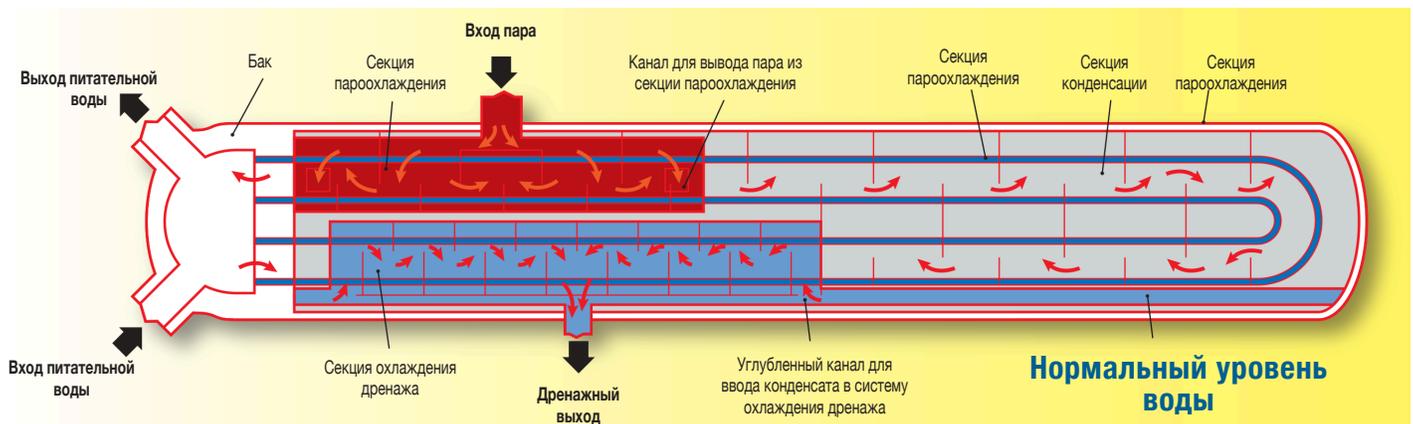


Рисунок 1. Нагреватель питательной воды низкого давления

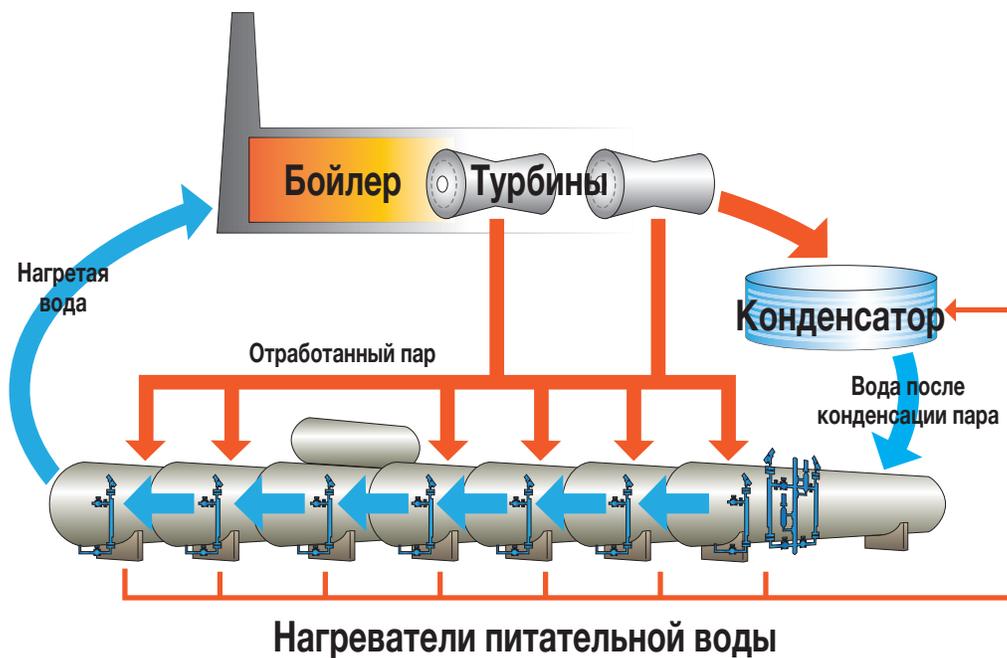


Рисунок 2. Расположение нагревателей питательной воды

### Основной тепловой цикл

Пароводяной цикл для паротурбинных установок может изменяться в зависимости от климатических условий и наличия блоков подогрева. Тем не менее, принципиальная схема (рис.2) отображает то, как встраивается каскадная система нагревателей питательной воды в общий процесс. Более детально входы и выходы нагревателей отмечены на рисунках 1 и 3 (стр.5)

Описывать процесс удобно, начиная с конденсатора, куда стекает 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 поступает так же 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 упомянуто выше, падение температуры на 2-3 °С выливается в 2,5 миллиона дополнительных затрат на топливо в год (установка 500 МВт).

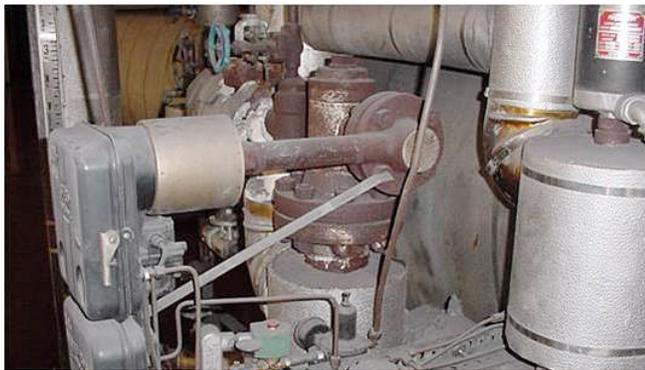
### Контроль уровня в нагревателях питательной воды

Действительно, очень важный аспект работы нагревателя - это надежное измерение уровня при разных рабочих условиях. Точный контроль уровня позволяет быть уверенным, что установка работает в эффективном режиме с оптимальной теплопередачей, а так же

защищает части и инструменты нагревателя от износа.

Использование старых приборов наряду с применением не надежных в конкретных условиях технологий, ограничивает возможность операторов контролировать потери. Другими словами, исключает управление и контроль за расчетным уровнем с высокой степенью надежности. Часто складывается ситуация, когда в условиях дефицита приборов контроля, закрывают глаза на погрешность измерения уровня в 5-10 сантиметров относительного расчетного значения, пытаясь сэкономить на обновлении измерительного оборудования.

При работе нагревателя питательной воды с большим или меньшим уровнем, относительного расчетного значения, неизбежно влияние на производительность и, особенно, на удельный расход тепловой энергии. Необходимость дополнительного топлива и высокая загрузка котла для восстановления энергетических потерь мгновенно отражается на финансовых затратах. Так же, если уровень приближается к критическому значению, активация системы защитного сброса в обход нагревателя невозможна при недостоверном измерении, что приводит к необходимости принятия мер в полевых условиях вручную.



Обновление средств контроля уровня в нагревателях питательной воды позволяет лучше контролировать потери и значительно уменьшает стоимость обслуживания. Буйковые уровнемеры с торсионной трубкой (на рисунке) одни из самых распространенных в отрасли легко заменяются современными средствами контроля.

Если уровень воды в нагревателе выше расчетного, то зона активной конденсации уменьшается, в результате чего трубки, которые должны забирать энергию конденсации пара, нагревают конденсат. Ситуация ухудшается тем, что появляется риск попадания воды из нагревателя в турбину. Несмотря на то, что от подобного сценария защищают сигнализаторы безопасного уровня, влияние на эффективность достаточно для беспокойства.

С другой стороны, подвергая трубки постоянному высокотемпературному воздействию и вызывая тем самым их 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. В результате траты на восстановление поврежденной секции и незапланированный останов. Другой проблемой, связанной с низким уровнем воды, является парообразование в трубках с водой, что снижает теплопередачу и увеличивает УРТЭ.

Дизайн самого нагревателя (горизонтальный либо вертикальный), а так же секции охлаждения дренажа (заборная трубка либо полноразмерный забор) влияет на выбор технологии измерения уровня. В горизонтальных нагревателях и с полноразмерным забором дренажа легче контролировать уровень, так как требуется больший объем для изменения уровня. В вопросе выбора инструментов так же нужно учитывать человеческий фактор.

## Мониторинг производительности нагревателя питательной воды

Точный контроль уровня воды в нагревателе является фундаментальной основой в выборе предпочтительного дизайна. Как всегда, надлежащее функционирование установки может быть подтверждено только системой обратной связи.

Базовыми контролируемыми параметрами отдельного нагревателя являются прирост температуры питательной воды, терминальная разность температур (ТРТ) и показатель охлаждения дренажа (ПОД).

- **Прирост температуры питательной воды** (англ.: feedwater temperature rise) - 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.
- **Терминальная разность температур (ТРТ)** (англ.: terminal temperature difference) обеспечивает показания производительности с точки зрения теплообмена в нагревателе, и определяется как разница температур насыщения отработанного пара и питательной воды на выходе нагревателя. Рост ТРТ свидетельствует об ухудшении теплообмена, а снижение ТРТ, наоборот, говорит об улучшении. Типичное значение ТРТ для нагревателя высокого давления с секцией парохлаждения 2 - 3 °С и около 0 °С без секции парохлаждения. Для нагревателей низкого давления ТРТ составляет около 3 °С. Для расчета значений ТРТ используются таблицы свойств пара с точными показаниями измеренного давления.
- **Показатель охлаждения дренажа (ПОД)** (англ.: drain cooler approach) - 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. Наоборот, уменьшение ПОД говорит о росте уровня. Типичное значение ПОД составляет 5,5 °С.

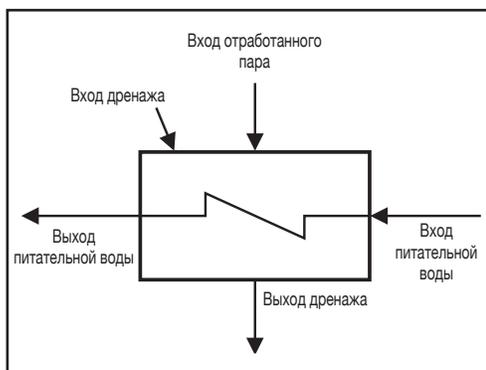


Рисунок 3. Принципиальная схема действия нагревателя питательной воды

## **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 недостоверного измерения уровня, приводящих к недостаточной температуре воды на выходе нагревателя. Проблемы могут варьироваться от простой неточности или несовпадении 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). Далее приведены 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 расхождения в показаниях нескольких уровнемеров. Недостаточный отклик на быстрое изменение уровня может быть обусловлен фундаментальными принципами измерения.
- **Технология измерений** не подходит 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 проявляется при выходе из строя нагревателя по причине ненадежного измерения и передаче 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. Возможные последствия низкой температуры питательной воды приведены ниже:

- **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 отработавшего пара
  - Скачки давления
  - Срабатывание защиты от попадания воды в турбину - остановка процесса, затраты на обслуживание и запуск

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

## Примеры

В примерах разобраны два варианта работы нагревателя питательной воды. Первый вариант 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 указывает на 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 лет. К тому же, в примерах не учитываются затраты на выбросы, на обслуживание котлов и турбин, на останов процесса и прочие, упомянутые выше факторы.

### 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	- 11,7 °С
<b>При падении температуры на 11,7 °С</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• УРТЭ растет на 49,3 кДж/кВт·ч</li><li>• Годовые затраты 10 428 630,64 руб</li></ul>	

### Рабочие параметры

Расчетный прирост температуры	55,6 °С
Действительный прирост температуры	35,5 °С
Расчетный ПОД	5,5 °С
Действительный ПОД	1,7 °С
Расчетная ТРТ	5,5 °С
Действительная ТРТ	10,8 °С

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 году; оригинальное оборудования (1966 года) испо льзуется повторно.**

**Ненадежные приборы приводят к биениям показания уровня воды в нагревателе**

- В целях защиты подключение в обход нагревателей высокого давления
- Риск автономного отключения блока

### Экономическое обоснование

Стоимость вывода из обслуживания нагревателя высокого давления на неделю	1 112 000 руб
2 запуска после срабатывания систем защиты турбины	1 067 500 руб
Стоимость невыпущенной энергии после данных событий	2 500 000 руб
<b>Срок возврата инвестиций: 1.5 года</b>	

## Оптимизация измерения уровня

Реализация мировых тенденций в управлении потерями предприятий при помощи внедрения современных инструментов для повышения эффективности может иметь место только тогда, когда все участники этого процесса (в том числе производители оборудования) приложат необходимые усилия. Это позволяет развивать индустрию. Уже стали историей времена, когда бесконтрольно сжигалось топливо, и предоставляемые решения не подвергались комплексному анализу.

Magnetrol® - это глобальная компания, которая в 1932 году начала предлагать механические сигнализаторы для котлов. С течением времени, наш опыт в энергетике дал возможность предлагать уровнемеры и сигнализаторы практически для любых применений для разных предприятий отрасли во всем мире.

Наша предприимчивость и инновационный дух живут и по сей день. Мы предлагаем современные, улучшенные средства контроля. Мы расширили линейку наших приборов и технологий, отвечая требованиям разнообразных и самых тяжелых применений.

Нашей передовой разработкой является волноводный радарный уровнемер ECLIPSE. Компания Magnetrol первой представила миру эту технологию, собрав воедино уникальные качества прибора, позволяющие работать в том числе и в энергетической отрасли. Не зависимо 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 году компания Orion Instruments® стала подразделением Magnetrol, что ускорило процесс обновления линейки наших магнитных указателей уровня. За короткое время мы совершили революционный шаг на рынке с выпуском уровнемера AURORA® - прибора, совмещающего в одной камере магнитный указатель и радарный уровнемер. На данный момент, уровнемер AURORA имеет большое применение в энергетической отрасли.

Наш подход - неизменная приверженность к качеству и безопасности, непрерывное улучшение технологий и продуктов, что подкрепило наш успех в прошлом, обеспечивает его в настоящем, и будет основной для успеха в энергетической отрасли в будущем.

## Обратитесь в Magnetrol за подробной информацией:

Тел./Факс: +7 (812) 320 70 87

E-mail: [info@magnetrol.ru](mailto:info@magnetrol.ru)

[www.magnetrol.ru](http://www.magnetrol.ru)

### Ссылки:

1. *Heat Rate Improvement Guidelines for Existing Fossil Plants*, EPRI, Palo Alto, CA; 1986 CS-4554
2. *Heat Rate Improvement Reference Manual*, EPRI, Palo Alto, CA; 1998 TR-109546
3. *Heat Rate Awareness, Seminar Notes*, General Physics Corp, Amherst, NY; December 2009



Штаб - квартира корпорации  
5300 Belmont Road • Downers Grove, Illinois 60515-4499 USA • Рел: 630-969-4000 • Такс: 630-969-9489 • [magnetrol.com](http://magnetrol.com) • [info@magnetrol.com](mailto:info@magnetrol.com)  
Штаб - квартира в Европе

Heikensstraat 6 • 9240 Zele, Belgium • Тел: 052 45.11.11 • Факс: 052 45.09.93  
Magnetrol и логотип Magnetrol, Orion instruments, Aurora®, Eclipse® - товарные знаки компании Magnetrol International