SCIENCE HUB REVIEW
2026
Volume 1
Issue 5
www.sciencehubreview.uz
ILMIY ELEKTRON JURNAL

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА КВа-4

Матевосян Жасмина Михайловна

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

teploenergetika21@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается обоснование технико-экономических показателей (ТЭП) водогрейного котла КВа-4 тепловой мощностью около 4 МВт, работающего на природном газе. Обычно ТЭП принимают по паспортному КПД и числу часов использования мощности, однако такой подход не учитывает, что в течение отопительного сезона котёл большую часть времени работает с неполной нагрузкой. Предложены три элемента, отличающие методику от традиционной:

– годовой КПД, усреднённый не по времени, а по выработанной теплоте;

– понятие потенциала утилизации, ограниченного теплоприёмником: возможность конденсации определяется мощностью «холодного» потребителя, а не площадью теплообменника;

– критический тариф на газ с учётом углеродной составляющей как критерий решения о модернизации.

Показано, что годовой КПД заметно ниже паспортного, что на практике реализуется лишь часть теоретического потенциала конденсации и что решение о модернизации определяется прежде всего тарифом на газ.

Ключевые слова

котёл КВа-4, технико-экономические показатели, годовой КПД, утилизация теплоты уходящих газов, приведённая стоимость тепла, критический тариф, эксергия.

Abstract

The paper addresses the justification of the technical and economic indicators of the KVa-4 gas-fired hot-water boiler (about 4 MW). Conventional estimates rely on the nameplate efficiency, although during the heating season the boiler mostly operates at part load. Three elements are proposed: an annual efficiency averaged by heat output rather than by time; a heat-sink-limited recovery potential, in which the feasibility of

flue-gas condensation is set by the capacity of a "cold" heat consumer rather than by heat-exchanger area; a critical gas tariff, including a carbon component, as a decision criterion for modernization. The annual efficiency is shown to be noticeably lower than the nameplate value, only part of the theoretical condensation potential is achievable in practice, and the modernization decision depends primarily on the gas tariff.
Keywords
KVa-4 boiler, technical and economic indicators, annual efficiency, flue-gas heat recovery, levelized cost of heat, critical tariff, exergy.

1. Введение

Значительная часть локальных отопительных котельных в Узбекистане и соседних странах построена на водогрейных котлах типа КВа. Многие из них эксплуатируются не одно десятилетие, а их показатели до сих пор оценивают по паспортным данным, то есть для номинального режима. В действительности большую часть отопительного сезона котёл работает не на полной мощности. При частичной нагрузке меняется соотношение потерь с уходящими газами, горелка чаще включается и отключается, и фактическая эффективность оказывается ниже паспортной.

Нормативные методы теплового расчёта котлов [1] и методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [2] задают общую рамку, но недостаточно учитывают три фактора, которые сегодня становятся решающими:

– изменение КПД в зависимости от режимов нагрузки в течение сезона;

– физическое ограничение глубокой утилизации в системах с высокой температурой обратной воды;

– зависимость решения о модернизации от тарифа на газ при росте цен на топливо и появлении цены на выбросы углерода.

Цель работы разработать методику обоснования ТЭП котла КВа-4, учитывающую перечисленные факторы, и проверить её на расчётном примере.

Задачи:

– сформировать исходные данные и режимы нагрузки;

– построить модель годового КПД;

– оценить возможности утилизации теплоты уходящих газов с учётом теплоприёмника;

– определить приведённую стоимость тепла и критический тариф;

– выполнить эксергетическую оценку и анализ чувствительности.

Научная новизна состоит в следующем: Годовой КПД котла предлагается усреднять не по времени, а по доле выработанной теплоты. Так различие между длительной работой на малой нагрузке и небольшой выработкой тепла отражается корректно. Для котлов, у которых температура обратной воды выше точки росы продуктов сгорания, вводится показатель «потенциал утилизации, ограниченный теплоприёмником». Он связывает возможность конденсации с тепловой мощностью холодного потребителя, а не с поверхностью теплообменника. В качестве критерия решения о модернизации предлагается критический тариф на газ, в который входит и углеродная составляющая. Решение привязывается не к одной денежной цифре, а к внешнему условию — тарифу, что делает вывод более устойчивым.

Объект исследования и исходные данные

КВа-4 - автоматизированный водогрейный котёл с газомазутной горелкой. Его номинальная тепловая мощность составляет около 4 МВт (примерно 3,4 Гкал/ч). В расчёте принят температурный график сетевой воды 95/70 °С, топливо - природный газ, коэффициент избытка воздуха в пределах нормативных значений.

Тип использованных данных представлен в таблице 1. Указанные параметры типовые и должны быть уточнены по паспорту конкретного котла и результатам режимно-наладочных испытаний.

Таблица 1 – Основные исходные данные для расчёта

Параметр	Значение / пояснение
Номинальная тепловая мощность	около 4 МВт
Температурный график сетевой воды	95/70 °С
Топливо	природный газ
Номинальный КПД	по паспорту (на низшую теплоту сгорания)
Температура уходящих газов	высокая на номинале, меняется при снижении нагрузки
Отопительный сезон	типичная продолжительность для климата Ташкента
Распределение нагрузки	по суточным ведомостям или показаниям счётчика
Экономические параметры	действующий тариф, смета, ставка дисконтирования

Нагрузки отопительного сезона разбиваются на несколько ступеней (например, малая, средняя, повышенная и близкая к номинальной). Для каждой ступени определяются доля времени работы котла и его КПД. Наиболее надёжный источник этих данных режимно-наладочные испытания и показания газового счётчика.

Методика

На частичной нагрузке котёл работает долго, а теплоты вырабатывает мало, поэтому усреднение КПД по времени даёт искажённый результат. Годовой КПД следует определять как среднее гармоническое, взвешенное по доле выработанной теплоты:

$$\eta год = 1 / \Sigma (wi / \eta i), \quad (1)$$

где wi - доля теплоты, выработанной на i-й ступени, в годовой выработке (определяется произведением времени и нагрузки); ηi - КПД на этой ступени.

Практический смысл подхода в том, что расход топлива оценивается по ηгод, а не по паспортному КПД. Как правило, ηгод оказывается ниже паспортного значения, а значит, расчёт по паспорту занижает расход топлива, и часть потенциала экономии остаётся скрытой.

Глубокое охлаждение продуктов сгорания природного газа с конденсацией водяных паров способно заметно повысить КПД котла. Однако при графике 95/70 °С температура обратной воды (70 °С) выше точки росы водяных паров в газах (около 58–59 °С). Поэтому на основном контуре конденсации нет, а экономайзер на обратной линии может охладить газы лишь до температуры выше точки росы.

Конденсационная ступень возможна только при наличии «холодного» теплоприёмника: подпиточной воды, воды для горячего водоснабжения либо подогрева воздуха на горение. Поэтому предлагается двухступенчатая схема:

– ступень 1 - поверхностный экономайзер на линии обратной воды, охлаждение газов до температуры выше точки росы;

– ступень 2 - конденсационный теплообменник на подпиточной воде и воде для ГВС, охлаждение газов заметно ниже точки росы.

Прирост КПД на первой ступени находится из простого теплового баланса по разности температур газов, их объёму и теплоёмкости. На второй ступени прирост ограничен мощностью теплоприёмника: теплота, отбираемая при конденсации, не может превышать ту, которую способен принять потребитель. Поэтому, хотя теоретический потенциал конденсации велик, на практике реализуется лишь его часть.

Новизна подхода в том, что размеры утилизатора выбирают не от поверхности, как обычно, а сначала по мощности теплоприёмника, и только затем рассчитывают поверхность. Это позволяет избежать избыточных капиталовложений.

Приведённая стоимость тепла (LCOH) определяется как сумма годовой капитальной составляющей, затрат на топливо, электроэнергию, эксплуатацию и персонал, делённая на годовую выработку теплоты:

$$LCOH = (K \cdot CRF + Стопл + Сэл + Сэкспл + Сперс) / Qгод, \quad (2)$$

где K - капитальные затраты; CRF - коэффициент возврата капитала.

В качестве критерия решения о модернизации вводится критический тариф p* - такая цена газа, при которой годовая экономия топлива равна дополнительным годовым затратам на модернизацию:

$$p^* = (Кмод \cdot CRFмод + \Delta Сэл + \Delta Сэкспл) / \Delta B - cCO_2 \cdot e, \quad (3)$$

где ΔB - годовая экономия газа; cCO_2 - цена углерода; e - удельный выброс CO2 при сжигании газа (по методике МГЭИК [4]).

Если фактический тариф выше p*, модернизация выгодна, если ниже нет. Такой критерий показывает границу принятия решения, а не просто денежный итог, и не требует пересчёта при каждом изменении тарифной политики.

Эксергетический КПД водогрейного котла определяется выражением

$$\varepsilon = \eta \cdot (1 - T0 / Tср) / \varphi, \quad (4)$$

где Tср - логарифмическая средняя температура сетевой воды; T0 - средняя температура наружного воздуха в отопительный период; φ - отношение эксергии топлива к его низшей теплоте сгорания [3]. В низкотемпературном отопительном контуре множитель Карно невелик, поэтому эксергетический КПД оказывается в несколько раз ниже энергетического.

Результаты и обсуждение

Расчёт с взвешиванием по теплоте на ступенях частичной нагрузки показывает, что годовой КПД на один–два процентных пункта ниже паспортного (в условном примере - 89,9 % против 91,5 %). Разница выглядит небольшой, но за год она превращается в десятки тысяч кубометров газа перерасхода. Поэтому опора на паспортный КПД систематически занижает реальный потенциал экономии.

Двухступенчатая утилизация повышает годовой КПД примерно на 4–5 процентных пунктов. Важнее другое: основная часть прироста приходится на первую, неконденсационную ступень, тогда как конденсационная реализует лишь около четверти теоретических возможностей. Ограничивает её не площадь теплообменника, а небольшая мощность «холодного» потребителя. Чтобы расширить конденсационную ступень, нужно либо найти новых низкотемпературных потребителей, либо снизить температурный график сети.

В структуре приведённой стоимости тепла преобладают затраты на топливо. Поэтому экономический эффект модернизации в основном определяется тарифом на газ. При тарифе порядка 0,15 USD/м³ в условном примере модернизация почти не меняет LCOH, то есть находится вблизи границы окупаемости. Ниже этого уровня проект убыточен, выше - приносит прибыль. Если учесть цену углерода, критический тариф заметно снижается, и проект оправдывается даже при более низких тарифах.

Анализ чувствительности подтверждает, что результат зависит от тарифа сильнее, чем от величины затрат: с ростом тарифа чистая приведённая стоимость (NPV) растёт практически линейно, а срок окупаемости сокращается. Напротив, при субсидируемом низком тарифе утилизатор экономически не оправдывается, даже если техническое решение корректно.

Эксергетический КПД составляет примерно пятую часть энергетического. Это общая особенность низкотемпературных отопительных систем: значительная доля эксергии топлива теряется при горении и теплопередаче. Модернизация котла повышает эксергетический КПД лишь незначительно, а главный резерв снижение

температурного графика сети. При более низком графике обратная вода опускается под точку росы, и конденсация становится возможной уже на основном контуре.

Практические рекомендации

При обосновании ТЭП котла использовать годовой КПД, взвешенный по теплоте, а не паспортный. При проектировании утилизатора сначала определять мощность холодного потребителя, а затем рассчитывать поверхность теплообменника. В экономической оценке применять критический тариф и учитывать углеродную составляющую. По возможности снижать температурный график сети: тогда конденсация станет возможной и на основном контуре. Для поверхностей, контактирующих с конденсатом, выбирать коррозионностойкие материалы и предусматривать нейтрализацию конденсата.

Заключение

Предложена методика обоснования ТЭП котла КВа-4: годовой КПД, взвешенный по нагрузке, потенциал утилизации, ограниченный теплоприёмником, и критический тариф с учётом углерода. Показано, что годовой КПД ниже паспортного, а расчёт по паспорту скрывает часть возможной экономии топлива. Конденсационная ступень утилизации реализует лишь часть теоретических возможностей, поскольку её ограничивает мощность теплоприёмника. Модернизация экономически оправдана только при тарифе на газ выше критического; цена углерода этот порог снижает. Эксергетический КПД низкотемпературной системы невысок, поэтому перспективным направлением остаётся снижение температурного графика сети.

Список литературы

1. Тепловой расчёт котлов (нормативный метод). – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

2. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). – М.: Экономика, 2000. – 421 с.

3. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – 542 p.

4. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. – Hayama: IGES, 2006.

5. Бузников Е. Ф., Роддатис К. Ф., Берзиньш Э. Я. Производственные и отопительные котельные. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 248 с.