



## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

### О применении электродкотлов в энергетических комплексах малой энергетики\*

Директор Л. Б., доктор техн. наук, Иванин О. А., аспирант

**Объединенный институт высоких температур РАН, Москва**

Представлены результаты анализа влияния основных характеристик генерирующих установок в составе когенерационного энергетического комплекса на выбор оптимальной схемы покрытия пиковых отопительных нагрузок. Приведен сравнительный анализ эффективности газового и электрического котлов. Рассмотрены особенности электрических котлов различных типов, имеющихся на отечественном рынке. Даны рекомендации по выбору типа пикового электродкотла в составе автономного энергетического комплекса.

**Ключевые слова:** малая энергетика, энергетический комплекс, когенерация, когенерационная установка на базе двигателя внутреннего сгорания, пиковый водогрейный котел, электродкотлы, энергоэффективность, экономия топлива.

Основное направление развития средств малой распределенной энергетики — создание автономных или эксплуатируемых в составе локальной сети когенерационных энергетических комплексов, обеспечивающих электрическую и тепловую нагрузку потребителей [1]. В состав таких комплексов могут входить электрогенерирующие и теплогенерирующие установки, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), когенерационные установки, накопители тепловой и электрической энергии, а также электрические котлы различных типов.

Хотя электродкотлы широко применяются для отопления, очевидно, что выработка тепловой энергии котельными установками, работающими на углеводородном топливе, значительно эффективнее, чем электродкотлами. Коэффициент полезного действия современных отопительных котлов превышает 90 %, в то время как эффективность использования энергии первичного углеводородного топлива при производстве тепловой энергии в электродкотлах с учетом среднего КПД выработки электроэнергии составляет около 30 %. Таким образом, тепловая энергия, произведенная в традиционных отопительных котлах, с учетом только затраченного топлива (основной составляющей себестоимости энергии) в

3 раза дешевле, чем выработанная в электродкотлах.

Но это не столь очевидно, если электродкотел работает в составе энергетического комплекса. В [2, 3] показано, что включение электродкотлов в энергокомплексы, имеющие в своем составе электрогенерирующие установки на основе ВИЭ, может быть весьма эффективным как по энергетическим, так и по экономическим показателям. Это связано с ограниченными возможностями управления мощностью установок на основе ВИЭ, таких, как ветроэнергетические и фотоэлектрические установки. При их эксплуатации возможна ситуация, когда вырабатываемая электрическая мощность превышает требуемую нагрузку потребителя, а тепловая нагрузка может превысить располагаемую тепловую мощность. В этом случае электродкотел позволяет эффективно конвертировать излишки электроэнергии для покрытия тепловой нагрузки.

Аналогичная ситуация наблюдается в энергетических комплексах с когенерационными установками (КГУ) на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Тепловая мощность КГУ связана с ее электрической мощностью однозначной зависимостью [4], и при работе энергокомплекса с приоритетом покрытия тепловой нагрузки при несогласованных переменных графиках энергетических нагрузок потребителя КГУ может производить излишки электроэнергии. В электродкот-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-08-01107а.

ле они могут эффективно конвертироваться в тепловую энергию, обеспечивая при этом более экономичный режим работы КГУ. Целесообразность использования электрокотла существенно повышается, если в схему включен тепловой аккумулятор (тогда электрокотел может работать при отсутствии дефицита тепловой мощности).

В [5 – 8] описаны подходы к определению оптимальной конфигурации энергокомплекса, позволяющие при заданных графиках электрической и тепловой нагрузки потребителя с использованием эффективных алгоритмов многопараметрической оптимизации выбирать оптимальные состав комплекса и режимы его эксплуатации. Большое количество параметров оптимизации, сложный математический аппарат затрудняют детальный анализ влияния отдельных параметров энергокомплекса и потребителя энергии (характеристик установок, капитальных затрат, цен на топливо, графиков нагрузок и др.) на стоимостные показатели и общую эффективность работы энергокомплекса.

Выбор оптимального варианта схемы когенерационного энергокомплекса на базе ДВС определяется энергетическими нагрузками потребителя и основными характеристиками оборудования: зависимостями КПД и отношения тепловой мощности когенерационной установки к электрической от относительной электрической мощности, КПД водогрейного котла и электрокотла.

Когенерационная установка (мини-ТЭЦ) обеспечивает, как правило, электрическую нагрузку потребителя, а вырабатываемая при этом тепловая энергия может быть как избыточной относительно запросов потребителя, так и недостаточной. В первом случае излишки теплоты могут аккумулироваться в тепловом аккумуляторе, во втором — дефицит тепловой энергии может быть компенсирован или за счет водогрейного котла, работающего на традиционном углеводородном топливе, или за счет электрокотла. Ниже приведен сравнительный анализ эффективности работы электрического и газового котлов в составе энергетического комплекса.

Эффективность использования топлива энергетическим комплексом, или коэффициент использования топлива (КИТ), определим как отношение выработанной энергии (электрической и/или тепловой) к теплосодержанию израсходованного топлива:

$$\varepsilon = \frac{E+W}{gQ_H^P}, \quad (1)$$

где  $E$  и  $W$  — электрическая и тепловая энергия, выработанная энергокомплексом;  $g$  — количество израсходованного топлива;  $Q_H^P$  — низшая теплота сгорания топлива.

Рассматривалась эффективность использования топлива для двух схем: КГУ + газовый котел и КГУ + электрокотел. Электрическая нагрузка варьировалась от 15 до 100 % номинальной электрической мощности КГУ, тепловая — от 0 до 100 % номинальной тепловой мощности, соответствующей номинальной электрической мощности КГУ. Нижнее ограничение электрической нагрузки обусловлено параметрами холостого хода ДВС.

Значение КИТ энергокомплекса на отрезке времени, на котором электрическую и тепловую нагрузки можно считать постоянными, для схемы с газовым котлом определяется из выражения

$$\varepsilon_{ГК} = \frac{(Q_{П} + N_{П})}{(Q_{КГУ} + N_{КГУ})/\varepsilon_{КГУ} + (Q_{П} - Q_{КГУ})/\eta_{ГК}}, \quad (2)$$

где  $N_{П}$  и  $Q_{П}$  — электрическая и тепловая нагрузки потребителя;  $N_{КГУ}$  и  $Q_{КГУ}$  — электрическая и тепловая мощности, вырабатываемые когенерационной установкой в данном режиме ( $N_{КГУ} = N_{П}$ );  $\varepsilon_{КГУ}$  — КИТ когенерационной установки при данных значениях  $N_{КГУ}$  и  $Q_{КГУ}$ ;  $\eta_{ГК}$  — КПД газового котла.

Если используется схема с электрическим котлом, то вся тепловая энергия для обеспечения нагрузки потребителя вырабатывается когенерационной установкой. Электрическую мощность КГУ в такой схеме можно представить в виде двух составляющих:

$$N_{КГУ} = N_{П} + N_{ЭК}, \quad (3)$$

где  $N_{П}$  — часть мощности КГУ, идущая на покрытие электрической нагрузки;  $N_{ЭК}$  — часть мощности КГУ, преобразованная в теплоту в электрокотле.

Вырабатываемая КГУ тепловая мощность в сумме с тепловой мощностью электрокотла должна полностью покрывать тепловую нагрузку потребителя:

$$Q_{П} = Q_{КГУ} + N_{ЭК}\eta_{ЭК}, \quad (4)$$

где  $\eta_{ЭК}$  — КПД электрокотла.

В свою очередь коэффициент использования топлива для схемы с электрокотлом  $\varepsilon_{ЭК}$

будет равен КИТ когенерационной установки и определяться из выражения

$$\varepsilon_{\text{ЭК}} = \varepsilon_{\text{КГУ}} = \eta_{\text{КГУ}} \left( 1 + \frac{Q_{\text{КГУ}}}{N_{\text{КГУ}}} \right), \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{КГУ}}$  — КПД когенерационной установки.

Расчеты проводили для когенерационного энергокомплекса на базе дизельного двигателя ЯМЗ 8401 (Ярославского моторного завода), конвертированного для работы на природном газе. Зависимость КИТ от относительной электрической мощности установки приведена на рис. 1. График построен по экспериментальным данным [9]. Из него следует, что КИТ когенерационной газопоршневой энергоустановки тем выше, чем ближе ее электрическая мощность к номинальному значению. При этом при нагрузках менее 20 % номинальной эффективность использования топлива снижается на 12 – 15 %.

Значение КПД электродвигателя принимали равным 100 % для всего диапазона изменения мощности. Эффективность использования природного газа для двух рассматриваемых схем рассчитывали по выражениям (2) – (5) при четырех значениях КПД газового котла: 80, 85, 90, 95 %.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. По оси ординат отложена разница между коэффициентами использования топлива для схем с электродвигателем и газовым котлом. Пики на графиках соответствуют областям, в которых более эффективен электродвигатель, провалы — областям, в которых более эффективен газовый котел. Совокупность точек, где тепловая нагрузка потребителя ниже тепловой мощности КГУ (пиковый котел не требуется) либо электрическая мощность ниже или равна 15 % номинальной, образуют нулевую поверхность. Анализ результатов расчетов показывает, что при  $\eta_{\text{ГК}} \geq 90$  % (см. рис. 2, а, б) эффективнее использование газового котла, а при  $\eta_{\text{ГК}} < 90$  % — электрического (рис. 2, в, г).

Несмотря на то что КПД современных газовых котлов в номинальном режиме близок к 100 %, в реальных условиях эксплуатации при переменных нагрузках его эффективность значительно ниже. Кроме того, при сильно неравномерных графиках тепловых нагрузок потребителя (прежде всего ЖКХ) неминуемы частые пуски и остановки котла, что в связи с относительно большой инерционностью также снижает суммарную эффективность энергокомплекса. Следует отметить,



Рис. 1. Зависимость коэффициента использования топлива КГУ от относительной электрической мощности

что в качестве критерия эффективности при расчетах принимали коэффициент использования топлива. С учетом капитальных и эксплуатационных затрат, которые для газовых котлов, как правило, значительно больше, чем для электрических, экономическая эффективность электродвигателей будет еще выше. Их дополнительные преимущества заключаются в относительной простоте реализации интеллектуальных систем автоматического управления энергокомплексом.

По способу преобразования электрической энергии в тепловую электродвигатели подразделяются на три типа: электродные, на основе ТЭН и индукционные. Все они обладают высоким КПД (до 98 %), отличаются компактностью и простотой управления по сравнению с котлами на ископаемом топливе аналогичной мощности. На российском рынке электродвигатели представлены широким модельным рядом, мощность их варьируется от нескольких до сотен киловатт. Каждый тип имеет свои особенности, которые могут стать решающими при выборе конкретного агрегата.

**Электродные котлы** работают по принципу прямого преобразования электрической энергии в тепловую энергию теплоносителя, т. е. теплоноситель нагревается непосредственно пропускаемым через него электрическим током [10]. Мощность котлов регулируется изменением электрического тока. На практике это осуществляется за счет изменения расстояния между электродами либо введением в пространство между электродами пластин из диэлектрика. Такой способ регулирования позволяет плавно менять мощность котла.

В связи с тем, что мощность электродных котлов рассчитана на определенное удельное сопротивление теплоносителя, необходима предварительная водоподготовка: удаление

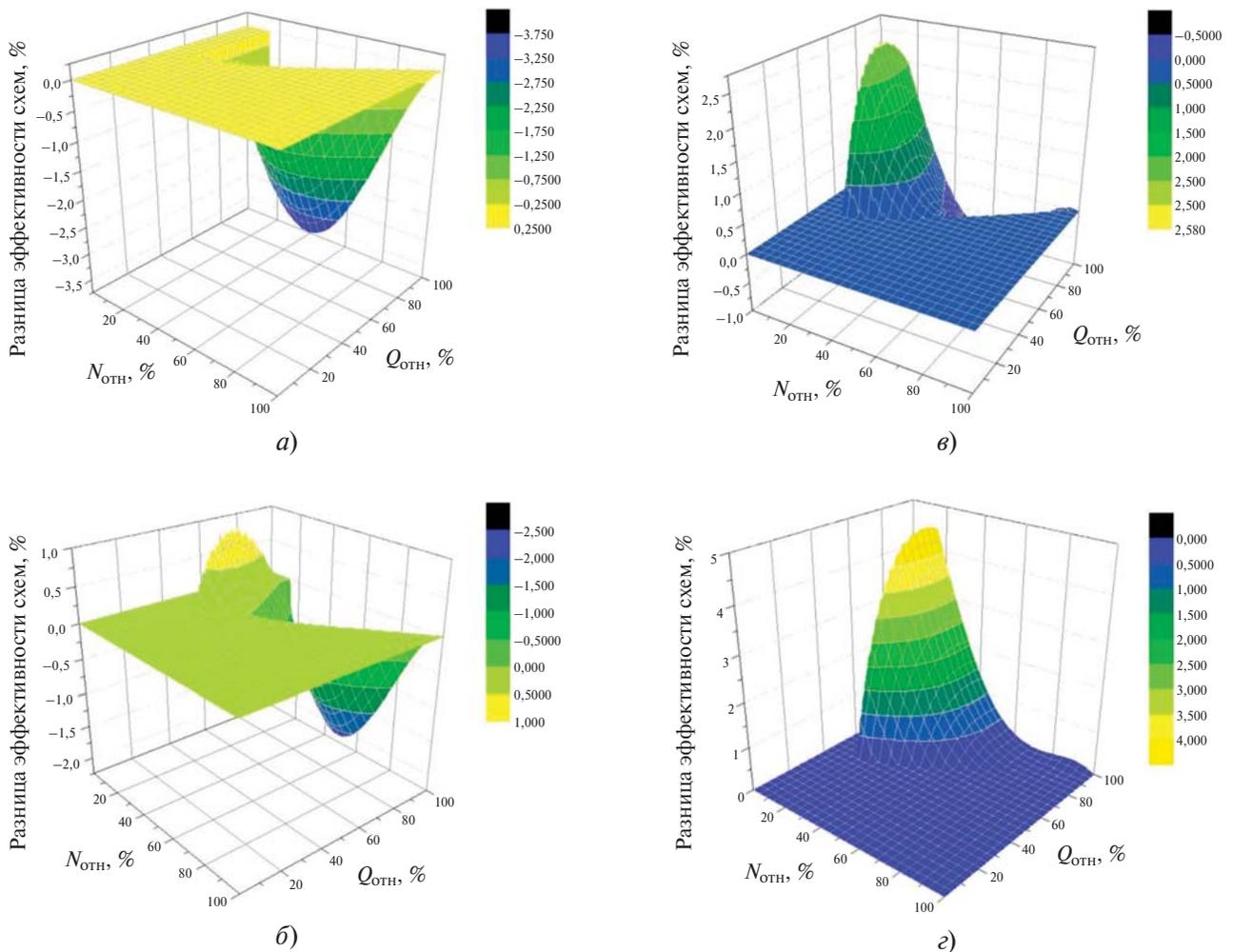


Рис. 2. Сравнение эффективности использования топлива для двух схем энергокомплекса:

*a* —  $\eta_{ГК} = 95\%$ ; *б* —  $\eta_{ГК} = 90\%$ ; *в* —  $\eta_{ГК} = 85\%$ ; *г* —  $\eta_{ГК} = 80\%$ ;  $N_{отн} = N_{КГУ}/N_{КГУ}^{ном}$ ;  $Q_{отн} = Q_{КГУ}/Q_{КГУ}^{ном}$ ;  $N_{КГУ}^{ном}$  — номинальная электрическая мощность КГУ;  $Q_{КГУ}^{ном}$  — тепловая мощность КГУ при  $N_{КГУ} = N_{КГУ}^{ном}$

или введение примесей для изменения удельного сопротивления теплоносителя. Несмотря на то, что при работе от источника переменного тока электролиз практически отсутствует, в процессе работы котла электроды загрязняются, поэтому их необходимо регулярно чистить. Кроме того, под воздействием электрического тока химический состав теплоносителя может изменяться, в частности, могут образовываться опасные для человека вещества [11].

В электрокотлах на основе ТЭН теплота передается теплоносителю от нагревательного элемента (ТЭН), через который пропускается ток. По конструкции ТЭН могут быть трубчатыми или цельнометаллическими. Трубчатые ТЭН заполнены теплопроводящей диэлектрической жидкостью, внутри которой находится токопроводящий элемент. При прохождении через него тока элемент нагревается, и диэлектрическая жидкость передает

теплоту на трубчатую металлическую оболочку. Таким образом, в котлах с трубчатыми ТЭН исключается контакт теплоносителя с токопроводящими элементами, и качество водоподготовки при эксплуатации этих котлов не играет такой важной роли, как при эксплуатации электродных котлов.

Регулирование мощности в данных котлах осуществляется ступенчато путем включения/отключения отдельных ТЭН. К их недостаткам можно отнести наличие контакта теплоносителя с металлической нагревательной поверхностью, что приводит к образованию накипи на поверхности, а также большую (по сравнению с другими электрокотлами) пожароопасность из-за высоких температур поверхности ТЭН.

**Индукционные котлы** — это устройства для нагрева воды индукционными токами, которые возбуждаются в металле нагревательного элемента переменным магнитным полем

[12]. По сути, они представляют собой трансформаторы, состоящие из первичной обмотки (электромагнитной катушки) и специальной вторичной обмотки в виде труб (нагревательных элементов). В такой системе нет подвижных элементов, минимум соединений и уплотнений, поэтому срок службы аппарата определяется сроком службы электромагнитной катушки и может достигать 30 лет. Качество водоподготовки не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики индукционного котла.

Сравнивая электроды трех основных типов, следует выделить преимущества и недостатки каждого типа:

электродные котлы наиболее сложны в эксплуатации и требуют наличия системы водоподготовки, но они самые дешевые, их конструкция позволяет плавно регулировать мощность;

котлы с ТЭН относительно дешевы и просты в эксплуатации, однако они наиболее пожароопасны (вследствие высокой температуры ТЭН) и наименее надежны (из-за большого числа электрических контактов и уплотнений и частого выхода ТЭН из строя); их шаг регулирования мощности определяется мощностью одного ТЭН;

индукционные котлы — самые дорогие, однако они весьма надежны из-за простоты конструкции и обладают самым длительным сроком эксплуатации (до 30 лет); плавное регулирование мощности возможно только с помощью тиристорной системы, что еще больше удорожает установку.

В отличие от ситуации, когда электроды питаются от централизованной сети и поддержание заданной температуры теплоносителя в системе теплоснабжения осуществляется с помощью тепловой автоматики, включающей или выключающей электронагреватель, эффективная эксплуатация электродов в составе автономного энергетического комплекса требует плавной регулировки мощности. Несмотря на относительно высокую стоимость, в схемах автономных энергетических комплексов на основе ДВС предпочтительно применение индукционных электродов. Высокая стоимость частично компенсируется надежностью, снижением эксплуатационных расходов, отсутствием необходимости водоподготовки и возможностью реализации относительно простой и дешевой системы автоматического управления всем энергокомплексом.

Проведенный анализ показал, что применение электродов в составе автономных когенерационных энергетических комплексов в ряде случаев вполне оправданно и имеет определенные преимущества перед традиционными схемами с пиковыми водогрейными котлами. Учитывая значительный средний срок эксплуатации основного энергетического оборудования и специфику системы управления энергетическим комплексом в режимах автономной работы, в его состав предпочтительно включать электроды индукционного типа.

### Список литературы

1. **Котлер В. Р.** Мини-ТЭЦ: зарубежный опыт. — Теплоэнергетика, 2006, № 8.
2. **Бутузов В. А., Брянцева Е. В., Бутузов В. В.** Комбинированное теплоснабжение объектов с использованием солнечной энергии. — Промышленная энергетика, 2006, № 12.
3. **Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang.** — Applied Energy, 2010, No 87.
4. **Валиулин С. Н., Фролов М. В.** Эффективность применения электрического котла в составе когенерационной дизель-электрической установки. — Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология, 2010, № 1.
5. **Анализ эффективности схем энергетических комплексов малой распределенной энергетики / Л. Б. Директор, В. М. Зайченко, И. Л. Майков, О. А. Иванов.** — Промышленная энергетика, 2014, № 2.
6. **Amanda D. Smith, Pedro J. Mago, Nelson Fumo.** Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types. — Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2013, vol. 1.
7. **Multi-period MINLP model for optimizing operation and structural changes to CHP plants in district heating networks with long-term thermal storage / Tor-Martin Tveit, Tuula Savola, Alemayehu Gebremedhin, Carl-Johan Fogelholm.** — Energy Conversion and Management, 2009, vol. 50.
8. **Оптимизация структуры энергетических комплексов на основе имитационного моделирования / В. Н. Толмачев, С. Н. Кирюхин, М. А. Журавский, А. Р. Сибгатуллин.** — Газовая промышленность, 2013, № 11.
9. **Теплоутилизационный блок мини-ТЭЦ на базе ДВС / А. В. Джулий, Л. Б. Директор, В. М. Зайченко, А. В. Марков.** — Теплоэнергетика, 2010, № 1.
10. **Фокин В. М.** Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения: Монография. — М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2006.
11. **http://www.wirbel-rus.ru/news/275/**
12. **Оболенский Н. В., Миронов Е. Б.** Преимущества и принцип действия индукционных водонагревателей. — Вестник НГИЭИ, 2011, т. 2, № 6.

director@oivtran.ru