

УДК 621.31(03), 621.11

Б.Д. БИЛЕКА, Р.В. СЕРГИЕНКО, В.Я. КАБКОВ

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

ЭКОНОМИЧНОСТЬ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК С ГАЗОПОРШНЕВЫМИ И ГАЗОТУРБИННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Когенерационные и комбинированные когенерационно-теплонасосные технологии обеспечивают наибольший эффект в энергосбережении и экономии топлива. В статье изложена методика расчета относительной экономии топлива в когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установках в сравнении с раздельными способами производства электрической и тепловой энергии на ТЭС и в газовых котельных. На базе этого подхода получены интегральные характеристики экономичности этих установок в широком диапазоне изменения их основных теплотехнических параметров. Эти характеристики позволяют проводить анализ эффективности тепловых схем различных установок. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы также при проектировании рассматриваемых установок, в частности, при выборе энергетического оборудования.

Ключевые слова: когенерационная установка, комбинированная когенерационно-теплонасосная установка, тепловой коэффициент двигателя, газопоршневой двигатель, газотурбинный двигатель.

Введение

Наибольший эффект в энергосбережении, в экономии топлива и, в первую очередь, природного газа обеспечивают когенерационная и комбинированная когенерационно-теплонасосная технологии. Когенерационная технология позволяет существенно повысить коэффициент использования теплоты топлива (КИТТ) в производстве электроэнергии и теплоты в сравнении с раздельной их выработкой, благодаря прежде всего более эффективному использованию высокопотенциальной сбросной теплоты газопоршневых и газотурбинных двигателей (ГПД, ГТД) для выработки тепловой энергии для теплоснабжения, а также потому, что применяемые в когенерационных установках (КГУ) современные типы двигателей – ГПД и ГТД – имеют электрические КПД более высокие, чем энергетические установки (как правило, паротурбинные) тепловых электростанций (ТЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). Такие установки обеспечивают существенное снижение расхода газа на производство одного и того же количества электрической и тепловой энергии в сравнении с раздельной выработкой их на ТЭС и в котельной. Особенностью, часто оказывающей сдерживающее влияние на более широкое применение КГУ, является то, что экономический эффект от снижения потребления топлива получается в целом в энергетике всего региона. На модернизируемой котельной, где устанавливается КГУ, происходит определенное повышение расхода газа в сравнении с действующей до модернизации котельной, что

объясняется частичным перераспределением производства электроэнергии из электрогенерирующих предприятий в модернизируемые котельные.

Теплонасосные технологии позволяют включать в производство теплоты условно даровые низкопотенциальные источники теплоты водоёмов, сточных вод, атмосферного воздуха и т. д. путём повышения потенциала этой теплоты до уровня, применяемого в теплоснабжении за счёт использования преимущественно электроприводных теплонасосных установок (ТНУ), которые позволяют получать на 1 кВт затрачиваемой электрической мощности от 3 до 5 кВт тепловой мощности необходимого потенциала. Недостатком ТНУ является сильная зависимость их экономической эффективности и прежде всего производимой теплоты от тарифа на сетевую электроэнергию.

Заметно улучшить ситуацию, связанную с этим недостатком ТНУ, можно путём соединения двух рассматриваемых технологий – когенерационной и теплонасосной. Применение КГУ в комбинированной схеме позволяет получать и использовать существенно более дешёвую электроэнергию, производимую КГУ, в сравнении с сетевой, а также включать сбросную теплоту двигателя в производство суммарной тепловой мощности комбинированной установки. В результате расход газа и себестоимость полученной теплоты в комбинированной КГ-ТНУ одинаковой тепловой мощности с газовой котельной будет существенно ниже. Важным моментом является также то, что в отличие от внедрения КГУ, весь экономический эффект от внедрения ком-

бинированных КГ-ТНУ получается непосредственно на объекте, т.е. на модернизируемой котельной. Существенным положительным обстоятельством является и то, что расположение КГ-ТНУ непосредственно в котельной или рядом практически исключает потери электроэнергии в сети, что в свою очередь также снижает себестоимость производимой КГУ электроэнергии.

КГУ и комбинированные КГ-ТНУ представляют собой преимущественно децентрализованные автономные системы электро- и теплоснабжения и обеспечивают не только наиболее экономичный способ генерации электрической и тепловой энергии, но и высокую экологичность этого производства, что способствует существенному снижению выбросов вредных продуктов сгорания, прежде всего CO_2 , NO_x , CO , и уменьшению теплового загрязнения атмосферы.

Рядом авторов предпринимались попытки описать общий интегральный эффект эффективности применения когенерационных и когенерационно-теплоснабжающих технологий с учетом влияния основных параметров КГУ и КГ-ТНУ и сравниваемых с ними способов раздельного производства электрической и тепловой энергии на ТЭС и в газовых котельных [1 – 3]. Однако надо признать, что общего описания интегрального эффекта от применения рассматриваемых технологий в этих работах все же не получено.

Результаты исследований

Подход, предлагаемый нами, основан на выборе в качестве одного из главных параметров относительной экономии топлива при производстве энергии рассматриваемыми технологиями, как отношение разностей между расходами топлива КГУ и КГ-ТНУ и раздельным способом генерации энергии и газовой котельной соответственно, к расходам топлива при производстве одного и того же количества энергии сравниваемыми способами. При этом используются известные уравнения энергетического и теплового баланса когенерационного и раздельного производства энергии, а также комбинированных КГ-ТНУ и газовых котлов с выражением зависимостей через КПД двигателей КГУ, паротурбинной установки ТЭС, котла котельной, а также теплового коэффициента двигателя КГУ и коэффициента тепловой трансформации или теплового коэффициента ТНУ. Введение тепловых коэффициентов КГУ и ТНУ позволяет упростить выражения для расчетов основных параметров установок и проведение сравнительного анализа различных установок и их тепловых схем. Тепловой коэффициент двигателя КГУ представляет собой отношение полученных в КГУ

тепловой и электрической мощностей или соответствующих КПД:

$$K_{\text{ТКГУ}} = \frac{N_{\text{ТКГУ}}}{N_{\text{ЭКГУ}}} = \frac{\eta_{\text{ТКГУ}}}{\eta_{\text{ЭКГУ}}}.$$

Тепловой коэффициент ТНУ (коэффициент тепловой трансформации) определяет отношение полученной в ТНУ тепловой мощности к затраченной электрической мощности, т.е.

$$K_{\text{ТТНУ}} = \frac{N_{\text{ТТНУ}}}{N_{\text{ЭТНУ}}}.$$

Тепловые коэффициенты КГУ и ТНУ - по сути стандартные теплотехнические параметры установок, определяемые по параметрам, приводимым в рабочих характеристиках этих установок. Они отражают для КГУ степень совершенства использования сбросной теплоты двигателя, а для ТНУ – эффективность преобразования используемой электроэнергии в тепловую энергию.

Тепловой коэффициент ГГУ в составе КГУ практически определяется тепловой мощностью, полученной в котле-утилизаторе (К-У) от выхлопных газов, а тепловой коэффициент КПД – интегральной тепловой мощностью различных потенциалов, получаемых в К-У, от системы охлаждения двигателя и воздуха в турбоагрегате для генерации горячего водоснабжения (ГВС), а в ряде случаев и теплоснабжения (ТС). Тепловая мощность, отводимая в системе маслоохладителя, практически может быть использована только в случае производства ГВС.

Используя основные мощностные энергетические уравнения и введенные тепловые коэффициенты, проведя соответствующие преобразования, получим выражение для определения относительной экономии газа модульной КГУ с К-У в сравнении с раздельной выработкой электрической и тепловой энергии на ТЭС и в котельной такой же электрической и тепловой мощностей:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta B}_{\text{КГУ}} &= \frac{B_{\text{К}} + B_{\text{ЭТЭС}} - B_{\text{КГУ}}}{B_{\text{К}} + B_{\text{ЭТЭС}}} = \\ &= \frac{\frac{K_{\text{ТКГУ}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{1}{\eta_{\text{ЭТЭС}}} - \frac{1}{\eta_{\text{ЭКГУ}}}}{\frac{K_{\text{ТКГУ}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{1}{\eta_{\text{ЭТЭС}}}} = \\ &= \frac{\frac{\eta_{\text{ТКГУ}}}{\eta_{\text{ЭКГУ}} \cdot \eta_{\text{К}}} + \frac{1}{\eta_{\text{ЭТЭС}}} - \frac{1}{\eta_{\text{ЭКГУ}}}}{\frac{\eta_{\text{ТКГУ}}}{\eta_{\text{ЭКГУ}} \cdot \eta_{\text{К}}} + \frac{1}{\eta_{\text{ЭТЭС}}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\overline{\Delta B}_{\text{КГУ}}$ – относительная экономия расхода газа;
 $B_{\text{КГУ}}$ – расход газа КГУ;

B_K – расход газа на замещаемую котельную установку;

$B_{ЭТЭС}$ – расход газа на производство электроэнергии на ТЭС;

$K_{ТКГУ}$ – тепловой коэффициент двигателя КГУ;

η_K – КПД замещаемой котельной установки;

$\eta_{ЭТЭС}$ – электрический КПД ТЭС;

$\eta_{ЭКГУ}$ – электрический КПД двигателя КГУ;

$\eta_{ТКГУ}$ – тепловой КПД двигателя КГУ.

Относительное увеличение расхода газа КГУ по сравнению с замещаемой ей котельной такой же тепловой мощности можно определить из выражения:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta B}'_{КГУ} &= \frac{B_{КГУ} - B_K}{B_K} = \\ &= \frac{\eta_K}{K_{ТКГУ} \cdot \eta_{ЭКГУ}} - 1 = \frac{\eta_K}{\eta_{ТКГУ}} - 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя аналогичный подход, получим зависимость для расчета относительной экономии газа комбинированной КГ-ТНУ, заменяющей котельную установку такой же тепловой мощности:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta B}_{КГ-ТНУ} &= \frac{B_K - B_{КГ-ТНУ}}{B_K} = \\ &= 1 - \frac{\eta_K}{\eta_{ЭКГУ} (K_{ТКГУ} + K_{ТНУ})} = \\ &= 1 - \frac{\eta_K}{\eta_{ТКГУ} + \eta_{ЭКГУ} \cdot K_{ТНУ}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\overline{\Delta B}_{КГ-ТНУ}$ – относительная экономия расхода газа КГ-ТНУ;

$B_{КГ-ТНУ}$ – расход газа КГ-ТНУ;

$K_{ТНУ}$ – тепловой коэффициент ТНУ (коэффициент трансформации теплоты).

Полученные выражения для определения относительной экономии газа при установке КГУ в модернизируемой котельной в сравнении с раздельной выработкой электрической и тепловой энергии на ТЭС и в котельной и при замене котла комбинированной когенерационно-теплонасосной установкой были рассчитаны в диапазоне возможных изменений определяющих параметров этих установок: тепловых коэффициентов двигателей КГУ от 1,25 до 3,5; тепловых коэффициентов ТНУ от 3 до 4,5; электрических КПД двигателей КГУ от 0,33 до 0,45; тепловых КПД котлов от 0,75 до 0,92; электрических КПД ТЭС от 0,3 до 0,4.

Графическая интерпретация некоторых из полученных результатов представлена в виде трех- и

двумерных зависимостей изменения относительной экономии газа от названных выше параметров для когенерационной установки на рис. 1 и 2, для комбинированной когенерационно-теплонасосной установки на рис. 3 и 4.

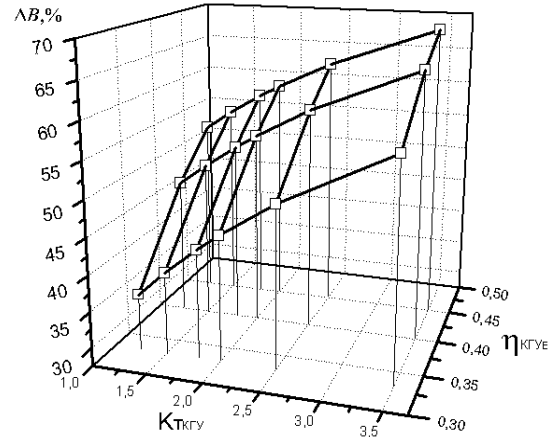


Рис. 1. Относительная экономия газа в когенерационной установке в сравнении с раздельной выработкой энергии на ТЭС и котельной в зависимости от электрического КПД КГУ и теплового коэффициента двигателя при КПД котла 0,92

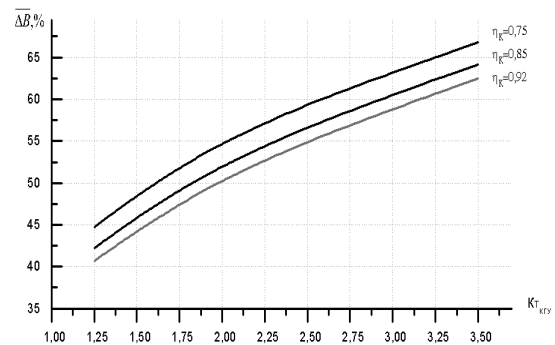


Рис. 2. Зависимость относительной экономии газа КГУ от теплового коэффициента двигателя при КПД ТЭС 0,35 и электрическом КПД КГУ 0,4

Можно видеть, что область изменения экономии газа при применении КГУ в рассматриваемом реально возможном диапазоне изменения основных параметров установок может находиться в пределах от 35 до 70%. Более сильное влияние на изменение экономии газа по сравнению с электрическим КПД КГУ оказывает изменение теплового коэффициента двигателя.

Применение комбинированных КГ-ТНУ (рис. 3, 4) позволяет снизить расход газа по сравнению с газовой котельной такой же тепловой мощности на 40...63%. При этом на изменение экономии более сильное влияние оказывают тепловой коэффициент ТНУ и электрический КПД двигателя.

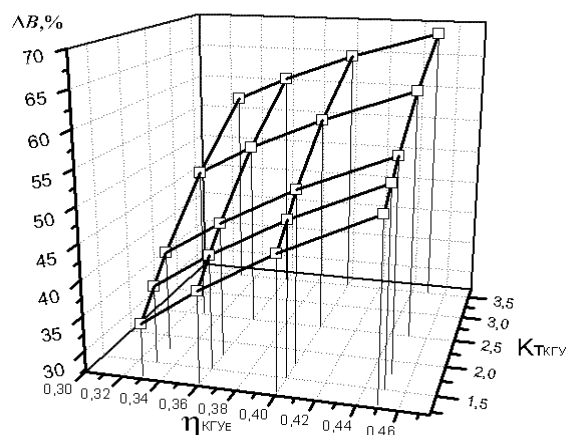


Рис. 3. Относительная экономия газа в комбинированной когенерационно-теплоснабжающей установке в сравнении с котельной в зависимости от электрического КПД КГУ и теплового коэффициента двигателя при значении теплового коэффициента ТНУ 3 и КПД котла 0,92

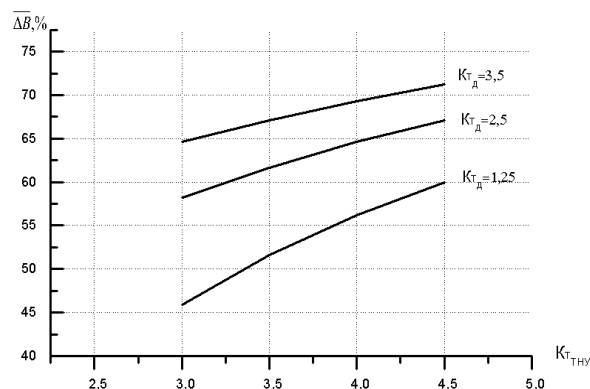


Рис. 4. Зависимость относительной экономии газа КГ-ТНУ от теплового коэффициента ТНУ при КПД котла 0,92 и электрическом КПД КГУ 0,4

Следует напомнить, что сравнительная база оценки относительной экономии этих двух технологий различная. Для когенерационных установок абсолютная экономия расхода газа относится к сумме расходов газа, затрачиваемых при раздельном производстве в котельной и на ТЭС при производстве одного и того же количества тепловой и электрической энергии. Для комбинированных КГ-ТНУ абсолютная экономия газа относится к расходу в газовой котельной одинаковой тепловой мощности с КГ-ТНУ.

Надо также отметить, что при пользовании полученными зависимостями или графиками необходимо учитывать, что выбор теплового коэффициента двигателя и его электрического КПД не может осуществляться произвольно, поскольку они связаны физически.

На рис. 5 представлена графическая зависимость тепловых коэффициентов ГТД и ГПД от их электрических КПД, построенная по результатам обработки рабочих характеристик более 50 двигателей.

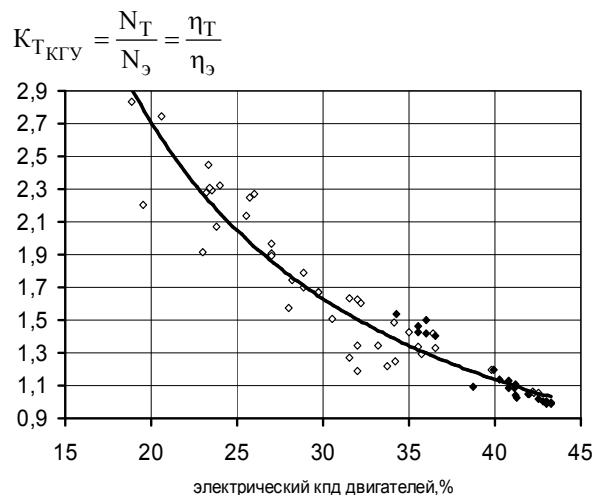


Рис. 5. Зависимость тепловых коэффициентов двигателей КГУ от электрического КПД двигателей (◇, ◆ - тепловые коэффициенты ГТУ и ГПД)

Можно видеть, что общая кривая удовлетворительно описывает характеристики ГПД и ГТУ, но для ГПД характерен диапазон изменения по КПД примерно 0,35...0,45, а по $K_{ТКГУ}$ 1,0...1,5.

Для ГТУ характерна левая часть кривой с изменением КПД от 20 до 36% и $K_{ТКГУ}$ от 1,2 до 2,9.

Вывод

Полученные зависимости для определения экономичности когенерационных и комбинированных когенерационно-теплоснабжающих установок, учитывающие влияние основных теплотехнических параметров установок, позволяют осуществлять объективный сравнительный анализ существующих КГУ и КГ-ТНУ и использовать их на стадии проектирования объекта при выборе основного энергетического оборудования.

Литература

1. Андриященко А.И. Эффективность применения тепловых насосов на ГТУ-ТЭС / А.И. Андриященко, Д.В. Новиков // Проблемы энергетики. – 2004. – № 11-12. – С. 17-25.
2. Дубинин Р.А. Сравнение энергоэффективности когенерационных ГТУ различных типов / Р.А. Дубинин, А.Б. Дубинин, А.М. Чертыков // Материалы XXV международной конференции «Комплексное реше-

ние проблем энергосбережения в промышленной и коммунальной энергетике. Ялта, 2009. – С. 17-19.
3. Клименко В.Н. Когенерационные системы с

тепловыми двигателями. Ч. 1 / В.Н. Клименко, А.П. Мазур, П.П. Сабашук // К. ИПЦ АЛКОН НАН Украины. – 2008. – С. 560.

Поступила в редакцию 31.05.2010

Рецензент: член-корр. НАН Украины, проф., зав. отдела ВТТГД, А.А. Халатов, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина.

ЕКОНОМІЧНІСТЬ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ І КОМБІНОВАНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК З ГАЗОПОРШНЕВИМИ І ГАЗОТУРБІННИМИ ДВИГУНАМИ

Б.Д. Білека, Р.В. Сергієнко, В.Я. Кабков

Когенераційні і комбіновані когенераційно-теплонасосні технології забезпечать найбільший ефект в енергозбереженні та економії палива. В статті викладено методіку розрахунку відносної економії палива в когенераційних і комбінованих когенераційно-теплонасосних установках порівняно з роздільними способами виробництва електричної і теплової енергії на ТЕС і в газових котельнях. На базі цього підходу отримані інтегральні характеристики економічності цих установок в широкому діапазоні змін їх основних теплотехнічних параметрів. Ці характеристики дозволяють проводити аналіз ефективності теплових схем різних установок. Результати, представлені в статті, також можуть бути використані при проектуванні установок, а саме при виборі енергетичного обладнання.

Ключові слова: когенераційна установка, комбінована когенераційно-теплонасосна установка, тепловий коефіцієнт двигуна, газопоршневий двигун, газотурбінний двигун.

EFFICIENCY OF COGENERATION AND COMBINED COGENERATION-HEAT PUMP PLANTS WITH GAS PISTON AND GAS TURBINE ENGINES

B.D. Bileka, R.V. Sergienko, V.J. Kabkov

Cogeneration and combined cogeneration-heat pump technologies provide the greatest effect in energy saving and fuel economy. The methodology of calculation of the relative fuel economy of cogeneration and combined cogeneration-heat pump installations in comparison with separate modes of production of electricity and thermal energy at the power station and gas-fired boiler is presented in the paper. Based on this approach the integral characteristics of the efficiency of these plants in a wide range of key thermal parameters were obtained. These characteristics make it possible to analyze the effectiveness when the thermal schemes of different plants are compared. The results presented in this article may be used in the design of the cogeneration plants, in particular, with choosing the power equipment.

Key words: cogeneration plant, combined cogeneration-heat pump plant, heat coefficient of engine, gas piston engine, gas turbine engine.

Білека Борис Дмитриевич – д-р техн. наук, заведуючий відделом технологій комбінованої вироботки енергії Інститута технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Сергієнко Роман Владимирович – аспірант, інженер І категорії віддела технологій комбінованої вироботки енергії Інститута технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Кабков Виктор Яковлевич – научний сотрудник віддела технологій комбінованої вироботки енергії Інститута технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua.