

УДК 621.577.311

DOI

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ В КОММУНАЛЬНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОНАСОСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Билека Б.Д., доктор технических наук, Гаркуша Л.К.  
Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев

**Аннотация.** Наиболее эффективной технологией генерации электрической и тепловой энергии для нужд коммунальной теплоэнергетики и теплотехнологий является комбинированная выработка энергии с использованием современных когенерационных установок на основе газопоршневых двигателей и газотурбинных установок, работающих на природном газе или биогазе. Комбинированная выработка энергии на такой базе существенно снижает затраты топлива в сравнении с традиционной раздельной выработкой электроэнергии на тепловых конденсационных электростанциях или на теплоэлектроцентралях и тепловой на котельных установках. Дальнейшее заметное повышение энергоэффективности процессов генерации теплоты для рассматриваемых нужд может быть достигнуто путем включения в процесс теплонасосных установок, т.е. создание комбинированных когенерационно-теплонасосных установок. Они будут иметь наивысшую топливную экономичность в сравнении со всеми существующими в традиционной теплоэнергетике. Это обусловлено целым рядом факторов. Современные когенерационные установки (КГУ) на базе газопоршневых двигателей (ГПД) и газотурбинных установок (ГТУ) имеют электрический к.п.д. выше, чем тепловая электростанция (ТЭС) или теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) – 30...45 % и 28...35 %, соответственно. В котлах-утилизаторах более эффективно используется высокотемпературная сбросная теплота двигателей, в результате чего суммарный к.п.д. установок достигает 85...88 %. Такие установки обеспечивают децентрализацию производства электрической и тепловой энергии, поэтому на автономных КГУ существенно ниже, а иногда практически отсутствуют потери в электрических и тепловых сетях, достигающие в централизованных системах 8...12 % и 15...30%, соответственно. Немаловажным является и то, что они повышают надежность работы всего объекта, делая его независимым от внешних сетей. Включение в процесс генерации теплоты теплонасосной установки (ТНУ) вызывает заметное повышение энергоэффективности, увеличивая топливную экономичность, благодаря использованию практически даровой низкопотенциальной теплоты природного, промышленного или бытового происхождения, а также высокой эффективности преобразования в ТНУ этой теплоты в теплоту более высокого потенциала с использованием электрической энергии КГУ.

Целью работы является оценка перспектив применения комбинированных когенерационно-теплонасосных установок на базе ГПД и ГТУ для повышения энергоэффективности и энергосбережения при генерации теплоты в коммунальной теплоэнергетике и теплотехнологиях, в частности, в процессах сушки.

**Ключевые слова:** когенерационные установки, теплонасосные установки, котельные установки, тепловые электростанции, топливная экономичность.

## THE EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HEAT GENERATION PROCESSES IN MUNICIPAL HEAT-ENERGY AND DRYING TECHNOLOGIES ON THE BASIS OF COMBINED COGENERATION-HEAT PUMP TECHNOLOGIES

Bileka B.D., Doctor of Technical Sciences, Garkusha L.K.  
Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, Kiev

**Abstract.** The most effective technology for electric and heat energy generation for the needs of municipal heatpower and heat technologies is combined power generation (CPG) using modern cogeneration plants based on gas piston engines (GPE) and gas turbine plants (GTP) which work on natural gas or biogas. CPG on such a base significantly reduces fuel costs in comparison with the traditional separate generation of electric power at heat condensing power plants (HPP) or on combined heat and power (CHP) and heat at boiler.

Further noticeable increase in energy efficiency of heat generation processes for the needs under consideration can be achieved by including heat pump plants (HPPs) in the process, which is development of combined cogeneration and heat pump plants. They will have the highest fuel efficiency in comparison with all existing in the tradition-

al heat power industry. This is due to a number of factors. Modern CGP based on GPE and GTP have electric efficiency higher than HPP or CHP – 30–45% and 28–35%, respectively. In heat recovery boilers, high-temperature waste heat of engines is more efficiently used, resulting in a total efficiency of installations reaches 85–88%. Such facilities ensure decentralization of electric and heat production, therefore, on autonomous CGPs are much lower, and sometimes there are practically no losses in electric and heat networks, reaching 8–12% and 15–30% in centralized systems, respectively. Another important thing is that they increase the reliability of the entire facility, making it independent of external networks. Inclusion in the heat generation process of HPSs causes a significant increase in its energy efficiency, increasing fuel efficiency, thanks to using of almost free low-grade heat of natural, industrial or domestic origin, as well as high conversion efficiency in this HPP heat into higher-potential heat using CGP electric power.

The aim of the work is to evaluate the prospects for the use of combined cogeneration and heat pump plants (CG-HPS) based on GPE and GTP to improve energy efficiency and energy saving in generating heat in municipal heat and heat engineering, in particular, in drying processes.

**Key words:** cogeneration plants, heat pump plants, boiler plants, heat power station, fuel economy.

**Обозначения**

$b$	удельный расход топлива, кг/кВт;
$\Delta \bar{B}$	относительная топливная экономичность установок;
$N_{ЭКГУ}$	электрическая мощность КГУ, кВт;
$N_{Э(ТНУ-ТЭС)}$	электрическая мощность автономной ТНУ, потребляемая от ТЭС;
ГПД	газопоршневый двигатель;
ГТУ	газотурбинная установка;
К	котел;
КВЭ	комбинированная выработка энергии;
КГ-ТНУ	комбинированная когенерационно-теплонасосная установка;
(КГ-ТНУ)-К	КГ-ТНУ- котел;
(КГ-ТНУ)-(ТЭС-ТНУ)	КГ-ТНУ теплонасосная установка-тепловая электростанция – теплонасосная установка;
КГУ-(ТЭС-К)	когенерационная установка-тепловая электростанция-котел;
ТНУ	теплонасосная установка;
ТЭС	тепловая электростанция;
ТЭЦ	теплоэлектроцентраль;
$K_{ТКГУ}$	тепловой коэффициент КГУ;
$K_{ТНУ}$	коэффициент трансформации теплоты автономной ТНУ;
$K'_{ТНУ}$	коэффициент трансформации теплоты ТНУ в составе комбинированной КГ-ТНУ;
$Q_{P_k}^H$	низшая теплотворная способность топлива котла, кДж/кг;
$Q_{P_{КГУ}}^H$	низшая теплотворная способность топлива КГУ, кДж/кг;
$\eta_K$	тепловой к.п.д. котла;
$\eta_{ЭКГУ}$	электрический к.п.д. КГУ;
$\eta_{ЭТЭС}$	электрический к.п.д. ТЭС;
$\eta_{ПТС}$	коэффициент, учитывающий потери в тепловых сетях;
$\eta_{ПЭС}$	коэффициент, учитывающий потери в электрических сетях;

**Методика оценки топливной экономичности установок.** Известно достаточно большое количество опубликованных работ, посвященных методикам оценки топливной экономичности энергетических установок, генерирующих электрическую и тепловую энергию, в частности [1,2,3]. Однако они в определенной степени сложны, требуют дополнительной информации, кроме знания стандартных параметров установок, не обладают универсальностью.

В Институте технической теплофизики НАН Украины предложена достаточно простая и универсальная методика сравнительной оценки относительной интегральной топливной экономичности энергетических установок, генерирующих теплоту и электроэнергию и, по сути, формирующей себестоимость получаемой энергии [4]. Уровень потенциалов высокотемпературных потоков сбросной теплоты ГПД и ГТУ – выхлопных газов двигателей существенно превышает уровень целевого теплоносителя для теплоснабжения и горячего водоснабжения. В ГТУ этот источник, в силу конструктивных особенностей, является практически единственным. В ГПД кроме того есть источники с более низкими температурными потенциалами. К ним относятся теплота систем охлаждения двигателя и турбоагрегата, маслоохладителя. Тепловые потоки от этих систем используются на этапах предварительного подогрева целевого теплоносителя.

Методика базируется на использовании основных уравнений балансов тепловых и электрических мощностей установок при условии выработки ими одинакового количества электрической и тепловой энергии. После соответствующих преобразований и обезразмеривания конечных выражений получаем функциональные зависимости относительной топливной экономичности сравниваемых установок, описываемые соотношениями безразмерных термодинамических параметров и показателей (к.п.д. установок, тепловых коэффициентов двигателей, коэффициентов трансформации теплоты ТНУ). При этом сравнительные базы различных установок могут отличаться.

При проведении сравнения централизованных и децентрализованных (автономных) энергетических установок в уравнения вводятся коэффициенты, учитывающие величины электрических и тепловых потерь в сетях.

При проведении сравнительного анализа установок должны быть известны или заданы не только величины коэффициентов полезного действия двигателей, но и их тепловые коэффициенты, а также коэффициенты трансформации теплоты ТНУ. Однако в проектировочных задачах при выборе двигателя КГУ при задании величины к.п.д., величина его теплового коэффициента, выражающего отношение тепловой и электрической мощности двигателя, неизвестна. В тоже время эти величины физически детерминированы и их соотношение не может изменяться произвольно. Путем статистической обработки достаточно большого количества характеристик двигателей КГУ–ГПД и ГТУ была получена эмпирическая зависимость тепловых коэффициентов двигателей от электрических к.п.д. Она представлена следующим выражением:

$$K_{T_{КГУ}} = 0,362 \cdot \eta_{Э_{КГУ}}^{-1,25} \quad (1)$$

В работе представлены результаты анализа топливной экономичности ряда нескольких наиболее распространенных в теплоэнергетике способов генерации тепловой и электрической энергии в сравнении с её генерацией на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных технологий, поскольку электрической базой комбинированных установок являются когенерационные установки, вносящие свой вклад в повышение энергоэффективности, их характеристики представляют самостоятельный интерес. Поэтому анализ топливной экономичности КГУ в первую очередь был проведен путем сравнения с альтернативной, раздельной выработкой электроэнергии на ТЭС, а теплоты в котельной.

**Сравнение КГУ с раздельной выработкой энергии.** Относительная интегральная топливная экономичность КГУ в сравнении с раздельной выработкой электроэнергии и теплоты на ТЭС и в котельной установке при использовании газового топлива может быть представлена следующей зависимостью:

$$\bar{\Delta} B_{КГУ-(ТЭС-К)} = 1 - \frac{b_{КГУ}}{b_{ТЭС} + b_K} = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{Э_{КГУ}} \cdot K_{T_{КГУ}}}{\eta_K} + \frac{\eta_{Э_{КГУ}}}{\eta_{Э_{ТЭС}}}} \quad (2)$$

или с учетом зависимости (1)

$$\bar{\Delta} B_{КГУ} = 1 - \frac{1}{\frac{0,362 \cdot \eta_{Э_{КГУ}}^{-0,25}}{\eta_K} + \frac{\eta_{Э_{КГУ}}}{\eta_{Э_{ТЭС}}}} \quad (3)$$

Условием существования топливной экономии сравниваемых технологий является соблюдение неравенства:

$$\left( \frac{0,362 \cdot \eta_{Э_{КГУ}}^{-0,25}}{\eta_K} + \frac{\eta_{Э_{КГУ}}}{\eta_{Э_{ТЭС}}} \right) > 1. \quad (4)$$

Некоторые результаты расчетов относительной топливной экономичности рассматриваемых технологий представлены на рис. 1.

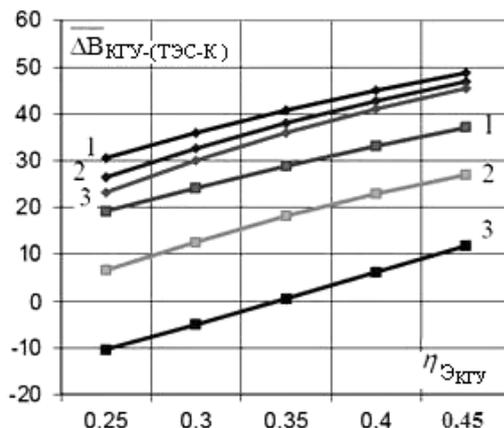


Рис. 1. Залежність відносної економії палива КГУ при генерації енергії в порівнянні з котельною установкою при різних величинах к.п.д. котла ( $\eta_k$ ) і ТЭС при різних величинах електричного к.п.д. ТЭС ( $\eta_{ТЭС}$ ) від величини електричного к.п.д. двигателя КГУ ( $\eta_{ЭКГУ}$ ).

$$\diamond - \eta_{ТЭС} = 0,33; \quad \square - \eta_{ТЭС} = 0,45$$

$$1 - \eta_k = 0,75; \quad 2 - \eta_k = 0,85; \quad 3 - \eta_k = 0,94$$

В розрахунках КГУ не учитувались електричні та теплові втрати в мережах, оскільки в обох випадках розглядався випадок транспорту вироблюваної енергії через зовнішні мережі, т.е. випадок централізованої доставки енергії і, відповідно, однакових втрат.

При децентралізованій схемі доставки енергії КГУ і централізованій роз'їмній від ТЭС і котельної необхідно враховувати мережні втрати електроенергії та теплоти. Таким чином, вираження для розрахунку відносної паливної економії для цього випадку матиме вигляд:

$$\bar{\Delta B}_{КГУ} = 1 - \frac{1}{\frac{0,362 \cdot \eta_{ЭКГУ}^{-0,25}}{\eta_k \cdot \eta_{ТЭС}} + \frac{\eta_{ЭКГУ}}{\eta_{ТЭС} \cdot \eta_{ТЭС}}} \quad (5)$$

Оскільки величини транспортних втрат в теплових і електричних мережах можуть досягати 8...12% і 15...30% відповідно, то величини коефіцієнтів, враховують втрати в них, відповідно складають 0,92...0,88 і 0,85...0,7. Вовне очевидно, що це забезпечить ще більшу економію палива в децентралізованих системах теплоснабження з КГУ. Можна побачити, що для розглянутих випадків величини відносної паливної економії систем електротеплоснабження на базі КГУ в порівнянні з ТЭС і котельною будуть знаходитися на рівні від 8...12 до 30...50%. Найбільш високий рівень економії палива буде спостерігатися при заміні старих котельних з к.п.д. котлів 0,75...0,85. Але і при заміні більш досконалих котлів з рівнем к.п.д. 0,94 на КГУ можлива економія палива при електричному к.п.д. ТЭС 0,33 складе 4...12%.

**Сравнение комбинированной КГ-ТНУ и котельной установки.** Сравнение по топливной экономичности двух видов генерации теплоты на базе комбинированной когенерационно-теплонасосной установки и котла, использующих газовое топливо, при условии выработки КГ-ТНУ конечного продукта только в виде теплоты может быть проведено с использованием зависимости:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-К} = 1 - \frac{b_{КГ-ТНУ}}{b_K} = 1 - \frac{\eta_K}{\eta_{ЭКГУ} \cdot (K_{ТКГУ} + K_{ТНУ})} = 1 - \frac{\eta_K}{\eta_{ЭКГУ} \cdot (0,362 \cdot \eta_{ЭКГУ}^{-1,25} + K_{ТНУ})} \quad (6)$$

Положительный эффект в экономии топлива будет существовать только при соблюдении неравенства вида:

$$\eta_{ЭКГУ} \cdot (0,362 \cdot \eta_{ЭКГУ}^{-1,25} + K_{ТНУ}) > \eta_K \quad (7)$$

При сравнении с котельной установкой, работающей на другом виде топлива, чем КГУ, выражение для определения топливной экономичности в эквиваленте теплотворной способности топлива КГУ будет иметь вид:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-К} = 1 - \frac{\eta_K}{\eta_{\text{КГУ}} \cdot (0,362 \cdot \eta_{\text{КГУ}}^{-1,25} + K_{\text{ТНУ}})} \cdot \frac{Q_{H_K}^P}{Q_{H_{КГ-ТНУ}}^P} \quad (8)$$

Расчеты относительной топливной экономичности КГ–ТНУ в сравнении с газовой котельной установкой приведены на рис. 2 в виде зависимостей экономичности от электрического к.п.д. КГУ при диапазоне изменения его 0,25...0,428 при фиксированных величинах КТНУ, равных 1,5; 3,5; 5. Кривые построены для расчетных вариантов сравнений при к.п.д. котельных установок, равных 0,75; 0,85; 0,95.

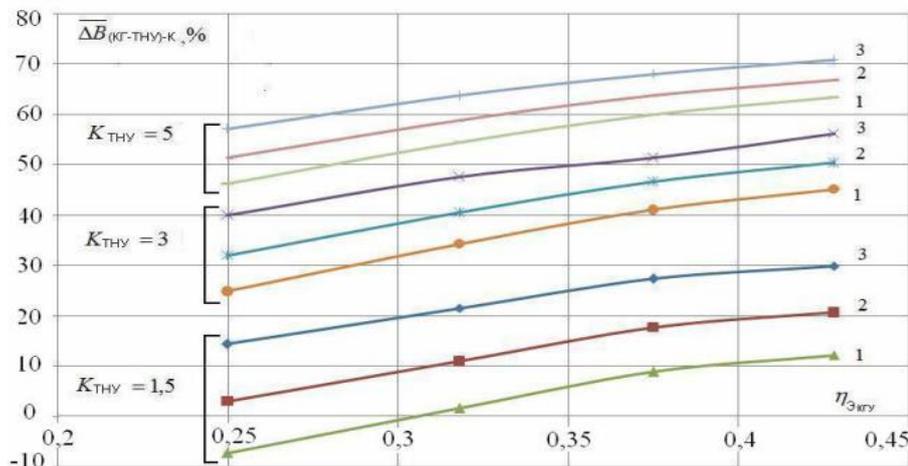


Рис. 2. Залежність відносної економії палива КГ–ТНУ при генерації теплоти в порівнянні з котельною установкою від величини електричного к.п.д. двигателя КГУ при різних величинах теплового к.п.д. котла ( $\eta_K$ ) і коефіцієнта теплової трансформації ( $K_{\text{ТНУ}}$ ).

1–  $\eta_K = 0,94$ ; 2–  $\eta_K = 0,85$ ; 3 –  $\eta_K = 0,75$

Можно видеть более высокую эффективность генерации теплоты у КГ–ТНУ по сравнению с котельными установками даже при невысоких величинах  $K_{\text{ТНУ}}$ . Так, при величине его равной 1,5 для котлов с к.п.д. в диапазоне от 0,95 до 0,75, топливная экономичность будет изменяться от 2 до 32 %, при  $K_{\text{ТНУ}}$  равном 3,5 – такое возрастание экономичности составит уже 33...62 %. Это наглядно подтверждает перспективность модернизации котельных не только с котлами, имеющими невысокие тепловые к.п.д., но и с более эффективными современными котлами

**4. Сравнение комбинированной КГ-ТНУ с электродкотлом, потребляющим сетевую электроэнергию.** Сравнение этих двух видов генерации теплоты по относительной топливной экономичности можно провести по полученной зависимости следующего вида:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-К_s} = 1 - \frac{b_{(КГ-ТНУ)-К_s}}{b_{K_s}} = 1 - \frac{\eta_{K_s}}{\eta_{\text{КГУ}} (K_{\text{ТКГУ}} + K_{\text{ТНУ}})} = 1 - \frac{\eta_{K_s}}{\eta_{\text{КГУ}} \cdot (0,362 \cdot \eta_{\text{КГУ}}^{-1,25} + K_{\text{ТНУ}})} \quad (9)$$

$\eta_{K_s} = \eta_{\text{ЭТЭС}} \cdot \eta_{K_T} \cdot \eta_{\text{ПЭС}}$ , где  $\eta_{K_s}$  – электрический к.п.д. электродкотла;  $\eta_{\text{ЭТЭС}}$  – электрический к.п.д. ТЭС;  $\eta_{K_T}$  – тепловой к.п.д. электродкотла с учетом его тепловых потерь;  $\eta_{\text{ПЭС}}$  – коэффициент, учитывающий электрические потери в сетях. С учетом этого зависимость будет иметь вид:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-К_s} = 1 - \frac{\eta_{\text{ЭТЭС}} \cdot \eta_{K_T} \cdot \eta_{\text{ПЭС}}}{\eta_{\text{КГУ}} (K_{\text{ТКГУ}} + K_{\text{ТНУ}})} = 1 - \frac{\eta_{\text{ЭТЭС}} \cdot \eta_{K_T} \cdot \eta_{\text{ПЭС}}}{\eta_{\text{КГУ}} \cdot (0,362 \cdot \eta_{\text{КГУ}}^{-1,25} + K_{\text{ТНУ}})} \quad (10)$$

Економія палива буде наблюдатися при умові утримання наступного нерівності:

$$\eta_{\text{КГУ}} \cdot (0,362 \cdot \eta_{\text{КГУ}}^{-1,25} + K_{\text{ТНУ}}) > \eta_{\text{ЭТЭС}} \cdot \eta_{K_T} \cdot \eta_{\text{ПЭС}} \quad (11)$$

Результаты расчетов относительной топливной экономичности комбинированной КГ-ТНУ и электродкотла, использующего сетевую электроэнергию от ТЭС, представлены на рисунке 3 в виде зависимостей изменения относительной топливной экономичности КГ-ТНУ от величины электрического КПД двигателя КГУ в диапазоне изменения последних от 0,25 до 0,428.

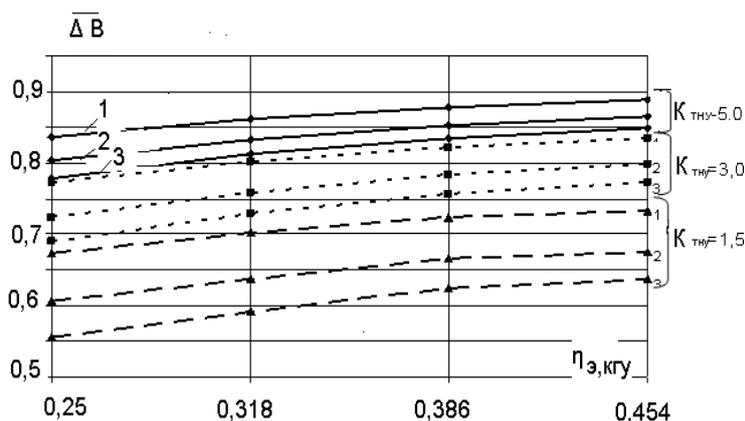


Рис. 3. Относительная топливная экономичность комбинированной КГ-ТНУ и электрокотла, использующего сетевую электроэнергию от ТЭС.

1 –  $\eta_{э,ТЭС} = 0,33$ ; 2 -  $\eta_{э,ТЭС} = 0,40$ ; 3 –  $\eta_{э,ТЭС} = 0,45$

При этом рассматривались варианты КГ-ТНУ, в которых величины коэффициентов трансформации теплоты ТН изменялись от 1,5 до 5. Расчеты проведены при сравнении с ТЭС, электрический КПД которых изменялся в пределах от 0,33, характерных для большинства ТЭС Украины, до 0,45. Величина электрических потерь в сетях принята равной 12 %

Можно видеть, что даже при невысоких величинах коэффициента тепловой трансформации в КГ-ТНУ, порядка 1,5, экономия топлива находится на уровне 0,67...0,73, а при коэффициенте трансформации, равном 5, она достигает 0,84...0,89. Возрастание КПД ТЭС сравнительно слабо влияет на изменение экономии топлива, несколько снижая ее, что позволяет сделать вывод о серьезных и стабильных преимуществах КГ-ТНУ в генерации теплоты.

**5. Сравнение комбинированной КГ-ТНУ с автономной ТНУ, потребляющей сетевую электроэнергию.** Выбор путей использования ТНУ при генерации теплоты в системах теплоснабжения имеет важное значение в повышении их энергоэффективности. Одной из таких задач является оценка эффективности применения комбинированных КГ-ТНУ вместо автономных ТНУ, потребляющих сетевую электроэнергию ТЭС или ТЭЦ.

Относительная топливная экономичность КГ-ТНУ в сравнении с автономной ТНУ, работающей на сетевой энергии ТЭС при одинаковой тепловой мощности определяется зависимостью:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-(ТНУ-ТЭС)} = 1 - \frac{b_{КГ-ТНУ}}{b_{ТНУ-ТЭС}} = 1 - \frac{\bar{N} \cdot \eta_{э,ТЭС} \cdot \eta_{ПЭС}}{\eta_{э,КГУ}} \quad (12)$$

Можно показать, что величина относительной электрической мощности КГ-ТНУ зависит от теплотехнических параметров установок следующим образом

$$\bar{N} = \frac{N_{э,КГУ}}{N_{э,(ТНУ-ТЭС)}} = \frac{K_{ТНУ}}{K_{Т,КГУ} + K'_{ТНУ}} \quad (13)$$

При этом при выбранных параметрах КГУ и заданной величине  $K_{ТНУ}$  автономной ТНУ, экономичность комбинированной КГ-ТНУ определяется следующей зависимостью:

$$\bar{\Delta B}_{(КГ-ТНУ)-(ТНУ-ТЭС)} = 1 - \frac{K_{ТНУ}}{K_{Т,КГУ} + K'_{ТНУ}} \cdot \frac{\eta_{э,ТЭС} \cdot \eta_{ПЭС}}{\eta_{э,КГУ}} = 1 - \frac{K_{ТНУ} \cdot \eta_{э,ТЭС} \cdot \eta_{ПЭС}}{0,362 \eta_{э,КГУ}^{-0,25} + K'_{ТНУ} \cdot \eta_{э,КГУ}} \quad (14)$$

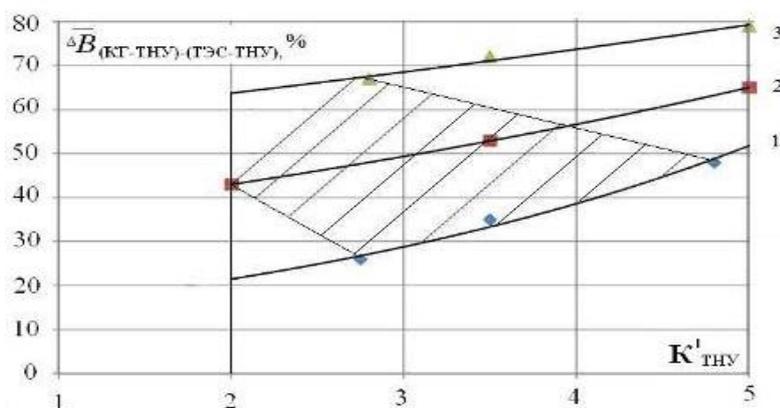
Выбор параметров рассматриваемых установок, проведение сравнений их характеристик следует проводить с учетом зависимостей 9,10,11.

Преимущество комбинированных КГ-ТНУ в топливной экономичности в сравнении с автономными ТНУ будет проявляться при соблюдении следующего неравенства

$$\bar{N} \cdot \eta_{\text{ТЭС}} \cdot \eta_{\text{ПЭС}} < \eta_{\text{КГУ}} \quad (15)$$

Из этого условия видно, что выбор соотношения электрических мощностей, затрачиваемых на привод ТН в комбинированной КГ–ТНУ и автономной ТНУ, играет важную роль как при определении рабочих характеристик установок, так и при проведении сравнительного анализа наравне с термодинамическими параметрами и тепловыми характеристиками установок. Некоторые результаты расчетов величин коэффициентов тепловой трансформации, а также относительной топливной экономичности КГ–ТНУ и автономной ТНУ представлены на рисунке 4. Расчеты проведены в следующих диапазонах изменения основных параметров: отношение электрических мощностей ТНУ в составе КГ–ТНУ и автономной ТНУ от 0,3 до 0,7; тепловых коэффициентов КГУ от 1 до 2; величин КТНУ автономных ТНУ от 2 до 5, а в составе комбинированных установок от 1,5 до 6; величин электрических к.п.д. ТЭС от 0,3 до 0,4, а КГУ от 0,25 до 0,428.

Результаты расчетов относительной экономии топлива комбинированной КГ–ТНУ при изменении  $K'_{\text{ТНУ}}$  комбинированной установки для 3-х значений  $\bar{N}$  представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Залежність відносної топливної економічності КГ–ТНУ в порівнянні з автономною ТНУ, що споживає електроенергію ТЭС, від величини коефіцієнта трансформації теплоти ТНУ в складі КГ–ТНУ при різних величинах відносних електричних потужностей ( $\bar{N}$ ) для  $\eta_{\text{ТЭС}} = 0,33$ . 1 –  $\bar{N} = 0,7$ ; 2 –  $\bar{N} = 0,5$ ; 3 –  $\bar{N} = 0,3$

Изменение зависимости относительной экономии топлива определяется особенностями изменения соотношений величин коэффициентов трансформации теплоты тепловых насосов, величин электрических к.п.д. КГУ и ТЭС и теплового коэффициента двигателя КГУ и имеет сложный характер. Заштрихованная область соответствует области реально возможных изменений коэффициентов трансформации тепловых насосов. Диапазон изменения относительной топливной экономичности, расположенный между кривыми относительных электрических нагрузок 0,3 и 0,7, лежит в пределах от 25...49 % до 65...68 %. Зависимость построена для варианта работы ТЭС с электрическим к.п.д. – 0,33.

Наиболее высокий уровень экономичности наблюдается на участке кривой при относительной мощности ТН КГ–ТНУ, равной 0,3. Однако он достаточно узок по изменению диапазона  $K'_{\text{ТНУ}}$ . Далее с ростом  $\bar{N}$  экономичность снижается. Такой характер изменения объясняется тем, что при меньших значениях  $\bar{N}$  и фиксированной величине  $K'_{\text{ТНУ}}$ , возрастает доля теплоты, вырабатываемой ТН комбинированной установки с более высоким  $K'_{\text{ТНУ}}$ , и, следовательно, с большей эффективностью. По мере возрастания  $K'_{\text{ТНУ}}$  при постоянной величине  $\bar{N}$  возрастает доля теплоты, более эффективно вырабатываемой ТН КГ–ТНУ, а доля сбросной теплоты двигателя в данном случае, являющейся менее эффективной, снижается, что отражается на росте топливной экономичности комбинированной КГ–ТНУ.

Большие возможности повышения энергоэффективности теплотехнологий может обеспечить применение комбинированных когенерационно-теплонасосных установок [5,6]. Это касается, прежде всего, таких высокоэнергозатратных технологических процессов, как сушка продуктов агропромышленного сектора, а также непродовольственных материалов [7].

Основным видом промышленного сушильного оборудования являются сушильные установки конвективного типа, в которых в качестве сушильного агента используется атмосферный воздух.

Генерация теплоты в сушильных установках такого типа осуществляется преимущественно двумя видами теплогенераторов. К первым можно отнести паровые воздухоподогреватели на базе парового котла и

паровоздушного калорифера. Ко вторым относятся воздухоподогреватели с различными типами топочных устройств, использующих различные виды топлива – газ, жидкое, твердое.

Котельные установки, применяемые в сушильных комплексах, имеют тепловой к.п.д. на уровне 0,7...0,8. Коэффициент полезного действия воздухонагревателей с топочными устройствами находятся в пределах 0,6...0,7, что свидетельствует о невысокой энергетической и эксергетической эффективности процессов генерации теплоты в этих устройствах в сравнении с комбинированной выработкой энергии на базе КГ–ТНУ. Несмотря на некоторую приближенность в сравнительной оценке тепловой экономичности рассматриваемых типов теплогенераторов с котельной установкой, для её проведения можно воспользоваться рассмотренной выше методикой сравнения котла с КГ–ТНУ.

Если принять среднее значение величины теплового к.п.д. теплогенераторов сушилок равным 0,7, то, в диапазоне изменения электрических к.п.д. двигателя КГУ от 0,25 до 0,428, а коэффициента трансформации теплоты ТН от 1,5 до 5, относительная топливная экономичность сушилок при замене существующих теплогенераторов на комбинированные КГ–ТНУ в соответствии с зависимостью (5), возрастет от 0,18...0,34 до 0,6...0,73. Это свидетельствует о высоких возможностях снижения расхода топлива на генерацию теплоты в сушильных технологиях при использовании комбинированных КГ–ТНУ. Еще одним преимуществом, снижающим энергозатратность процессов сушки продуктов, требующих охлаждения его в конце процесса, в частности в зерносушилках, является возможность использования для этого сбросной теплоты греющего теплоносителя испарителя ТН (воздуха или воды). Возможности и реализация такого подхода повышения энергоэффективности процесса сушки были показаны в [8] и на проекте модернизации зерновой сушилки шахтного типа производительностью 13,5 т/час на базе КГУ с ГПД электрической и тепловой мощностью 315 и 430 кВт и теплового насоса мощностью 840 кВт [9]. Для досушки и охлаждения зерна используется охлажденный в испарителе воздух, который после выхода из сушилки подается в конденсатор и после нагрева поступает в зону досушки. Таким образом, сбросная теплота испарителя и конденсатора ТН включается в общий тепловой баланс процесса. В целом такой подход позволяет снизить энергозатраты процесса сушки не менее чем в 1,5...2 раза, а энергозатраты на удаление 1 кг влаги довести до 2200...3000 кДж/кг.

#### Выводы

1. Полученные количественные оценки относительной топливной экономичности комбинированных когенерационно-теплонасосных установок в сравнении с традиционными способами генерации теплоты с использованием котельных установок, электроджетов и автономных теплонасосных установок, потребляющих сетевую электроэнергию, подтверждает более высокую энергоэффективность комбинированных установок, перспективность и целесообразность их применения в коммунальной теплоэнергетике и теплотехнологиях.

2. Предложенная методика сравнительной оценки относительной интегральной топливной экономичности энергетических установок может быть использована как при проведении сравнительного анализа существующих установок, так и при проведении проектировочных расчетов на этапе предварительного выбора тепловых схем и рабочих параметров установок.

#### References

1. Klimenko, V.I., Mazur, A.I., Sigal, A.I. (2011) Kogeneratsionnyie sistemyi s teplovyimi dvigatelyami. Spravochnoe posobie, Chast 2, Gazoburbinnyye kogeneratsionnyie tehnologii, Kiev IPTs ALKOM NAN Ukrainyi, 788.
2. Dubovskiy, S.V. (2014) Energoekonomichnyy analiz spoluchennykh sistem generatsiyi elektrichnoyi energiyi i teploti. Naukova dumka.182.
3. Tsatsaronis, G., Winhold, M. (1995) Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plant *Energy*. 16(1). 81-94.
4. Bileka, B.D., Sergienko, R.V., Kabkov, V.Ya. (2010). Ekonomichnost kogeneratsionnykh i kombinirovannykh kogeneratsionno-teplonasosnykh ustanovok s gazoporshnevyimi i gazoturbinnymi dvigatelyami. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologii. Vyipusk*, 7(74). 25-29.
5. Snezhkin, Yu.F., Shavrin, V.S., Chalaev, D.M., Shapar, R.A. (2008). Primenenie teplonasosnykh tehnologiy v energetike. *Ekotehnologiya i resursosberezhenie*. 3. 11-15.
6. Snezhkin, Yu.F. (2015). Energooschadnyie teplonasosnyie tehnologii dlya sistem teplopostachannyya zhitlovo-komunalnogo gospodarstva i promislivosti. *Visnik NAN Ukrainy*. 7. 23-30.
7. Snezhkin, Yu.F., Shapar, R.A. (2009) Analiz faktorov povysheniya effektivnosti protsessy sushki termolabilnykh materialov. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 31(7). 110-112.
8. Kliopova, I., Stanicki, J. (2006) Application Energy waste utilization techniques in Lithuanian. *Environ.res., engineering and management*. 1(35). 32-42.
9. Snezhkin, Yu.F., Ulanov, M.M. (2016) Virobnitstvo ta kompleksne vikoristannya energiyi kogeneratsiyniyh ustanovok v zernosusharniyh kompleksah. *Hranenie i pererabotka zerna*. 2. 20-32.

Отримано в редакцію 04.04.2019

Received 04.04.2019

Прийнято до друку 16.06.2019

Approved 16.06.2019