

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК И ПИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

*Предложен подход по оцениванию энергетической эффективности систем энергоснабжения (СЭ) на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных установок (КТНУ) и пиковых источников теплоты (ПИТ) с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных теплонасосных установок (ТНУ) разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, система энергообеспечения, когенерационно-теплонасосная установка, пиковый источник теплоты, безразмерный критерий энергетической эффективности.

### Введение

Принимая во внимание актуальность поставленной проблемы, за последние годы проведен ряд исследований эффективности применения комбинированных КТНУ в тепловых схемах источников энергоснабжения [1 – 10]. В работе [1] авторами выполнены исследования по повышению энергоэффективности источников теплоснабжения путем использования ТНУ с когенерационным приводом. В работе [2] выполнен сравнительный анализ перспективных направлений по повышению эффективности систем энергоснабжения на основе установок когенерации малой мощности, предложены тепловые схемы интегрированных систем комплексного энергоснабжения. В исследовании [3] авторами оценена экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями. В публикации [4] приведены результаты исследования схемы источника теплоэлектроснабжения (мини-ТЭЦ) с регулированием нагрузок на основе использования тепловых насосов.

В работах [5 – 6] определены энергетические преимущества и эффективные действительные режимы работы ТНУ с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных тепловых насосов и потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. В работах [7 – 8] предложены методические основы по комплексному оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных теплонасосных станций (ТНС) с электрическим и когенерационным приводами, с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии ТНС и с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. В исследованиях [8 – 9] предложены научные основы и проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. В исследовании [10] проведена оценка энергетической эффективности СЭ на основе комбинированных КТНУ, определены эффективные режимы работы СЭ на основе комбинированных КТНУ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников

приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

В работах [1 – 10] авторами не проведена оценка энергетической эффективности СЭ на основе комбинированных КТНУ и ПИТ, не определены эффективные режимы работы СЭ на основе комбинированных КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

**Целью исследования** является оценка энергетической эффективности систем энергоснабжения на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных установок и пиковых источников теплоты, определение эффективных режимов работы систем энергоснабжения на основе комбинированных КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

### Основная часть

В исследовании проведена оценка энергетической эффективности систем энергоснабжения на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных установок и пиковых источников теплоты. Исследовали эффективность систем энергоснабжения на основе парокompрессионных ТНУ малой (до 1 МВт) и большой мощностей с когенерационным приводом от газопоршневого двигателя-генератора (ГПД). Использование когенерационных установок для привода тепловых насосов позволяет избежать дополнительных потерь электроэнергии при транспортировке и предусматривает утилизацию теплоты уходящих газов после газового двигателя, что обеспечивает лучшую энергетическую эффективность. Исследуемые СЭ на основе комбинированных КТНУ и ПИТ могут полностью или частично обеспечивать собственные нужды в электрической энергии и обеспечивать потребности отопления и горячего водоснабжения потребителей. Схемы систем энергоснабжения на основе комбинированных КТНУ и ПИТ приведены в работах [1, 11].

Энергетическая эффективность указанных СЭ в значительной степени определяется оптимальным распределением нагрузки между КТНУ и ПИТ (например, водогрейным топливным котлом, электродкотлом, солнечными коллекторами и тому подобное) в составе СЭ. Это распределение характеризуется долей нагрузки КТНУ в составе СЭ  $\beta$ , которую определяют как отношение тепловой мощности КТНУ к тепловой мощности СЭ  $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЭ}$ . Для КТНУ значение тепловой мощности определяют с учетом мощности утилизационного оборудования когенерационного привода, и оно составляет  $Q_{КТНУ} = Q_{\kappa} + \Sigma Q_{ум}$ , где  $Q_{\kappa}$  – мощность конденсатора ТНУ,  $\Sigma Q_{ум}$  – мощность утилизационного оборудования когенерационного привода ТНУ.

В нашем исследовании проанализирована энергетическая эффективность системы «Источник приводной энергии КТНУ – СЭ на основе КТНУ и ПИТ – потребитель теплоты от СЭ» на примере СЭ с парокompрессионными КТНУ и ПИТ. Преимуществом такого подхода является учет потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и ПИТ с целью определения эффективных режимов работы СЭ.

Предложено проводить комплексную оценку энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ и ПИТ по комплексному безразмерному критерию энергетической эффективности:

$$K_{СЭ} = (1 - \beta) \cdot K_{ПИТ} + \beta \cdot K_{КТНУ}, \quad (1)$$

где  $K_{ПИТ}$  – безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты в составе СЭ (водогрейного топливного котла, электродкотла, солнечных коллекто-

ров и тому подобное),  $K_{КТНУ}$  – безразмерный критерий энергетической эффективности комбинированных КТНУ в составе СЭ.

Следует отметить, что комплексный безразмерный критерий энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  может быть использован также и для выбора наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ.

В исследованиях [5, 10] был предложен безразмерный критерий энергетической эффективности парокompрессионных ТНУ с когенерационным приводом. Он получен на основе уравнения энергетического баланса для системы «Источник приводной энергии ТНУ – ТНУ – потребитель теплоты от ТНУ» с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных ТНУ и с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. С учетом такого подхода безразмерный критерий энергетической эффективности комбинированных КТНУ, согласно [5, 10], будет иметь вид:

$$K_{КТНУ} = Q_{КТНУ} / Q_m = \eta_{ЭД} \cdot \eta_{ЭП} \cdot \varphi^{КТНУ} \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

где  $Q_m$  – мощность, затраченная газопоршневым двигателем-генератором для выработки электрической энергии для привода ТНУ,  $\eta_{ЭД}$  – эффективный КПД газопоршневого двигателя;  $\eta_{ЭП}$  – КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем из [5],  $\varphi^{КТНУ}$  – действительный коэффициент преобразования КТНУ из исследования [10],  $\eta_{mn}$  – КПД теплового потока, который учитывает потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТНУ.

При условии  $K_{КТНУ} = 1$  комбинированная КТНУ передает к СЭ такую же тепловую мощность, которая была затрачена для выработки электроэнергии для привода ТНУ. Чем больше значение этого показателя, тем более эффективной и конкурентоспособной будет СЭ с КТНУ.

На рис. 1 показана область энергоэффективной работы КТНУ малых мощностей, полученная на основе исследования [10] и определенная по безразмерному критерию энергетической эффективности КТНУ  $K_{КТНУ}$  в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ  $\varphi_\delta$  и эффективного КПД ГПД  $\eta_{ЭД}$ . В исследовании, согласно [5, 10], учтено значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем  $\eta_{ЭП} = 0,8$ .

Как уже отмечалось, эффективные режимы работы КТНУ соответствуют условию  $K_{КТНУ} > 1$ . Полученные высокие значения безразмерного критерия энергетической эффективности для СЭ на основе КТНУ малых мощностей (см. рис. 1) свидетельствуют о высокой энергетической эффективности таких комбинированных систем энергоснабжения.

На рис. 2 показана область энергоэффективной работы КТНУ больших мощностей, полученная на основе исследования [10] и определенная по безразмерному критерию энергетической эффективности КТНУ  $K_{КТНУ}$  в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ  $\varphi_\delta$  и эффективного КПД ГПД  $\eta_{ЭД}$ . В исследовании, согласно [5], учтено значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем  $\eta_{ЭП} = 0,9$ .

Эффективные режимы работы КТНУ больших мощностей соответствуют условию  $K_{КТНУ} > 1$ . Как и в предыдущем случае, полученные высокие значения безразмерного критерия энергетической эффективности для СЭ на основе КТНУ больших мощностей свидетельствуют о высокой энергетической эффективности таких комбинированных систем энергоснабжения.

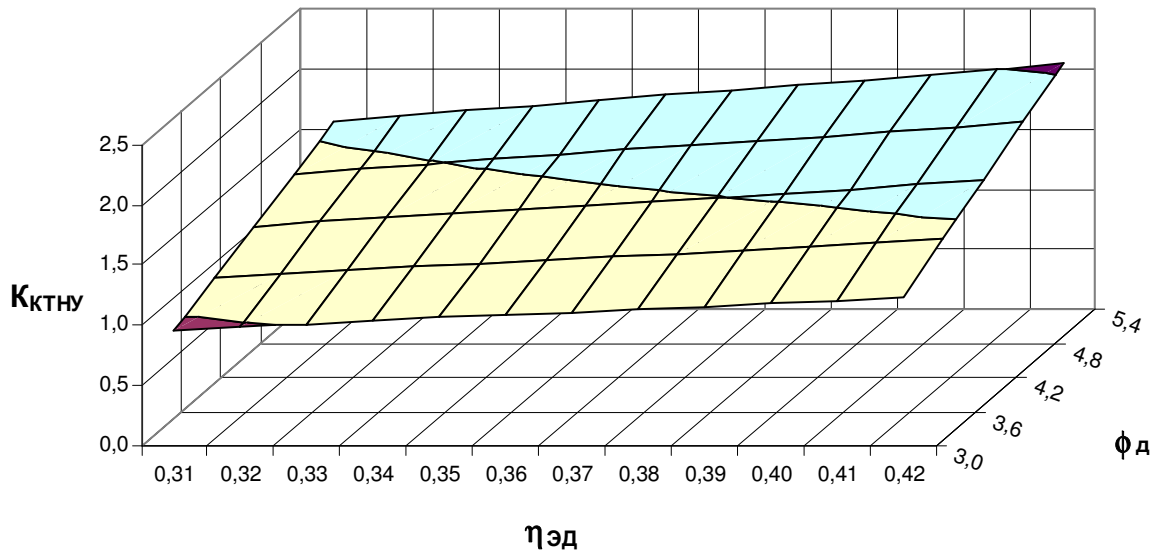


Рис. 1. Область энергоэффективной работы КТНУ малых мощностей по безразмерному критерию энергетической эффективности КТНУ в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ и эффективного КПД ГПД

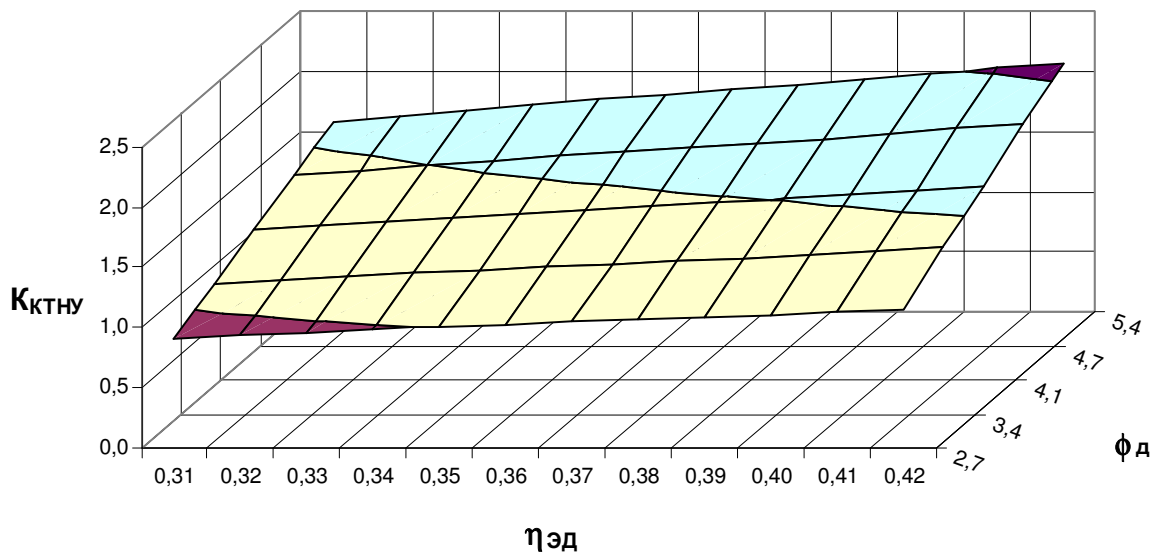


Рис. 2. Область энергоэффективной работы КТНУ больших мощностей по безразмерному критерию энергетической эффективности КТНУ в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ и эффективного КПД ГПД

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – электрокотла – в составе СЭ  $K_{ПИПТ}$  может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии – электрический котел – потребитель

теплоты от СЭ» с учетом влияния источников энергии для пикового источника теплоты (электрокотла) и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к электрокотлу.

В общем случае для электрокотла как пикового источника теплоты для СЭ безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид:

$$K_{\text{ПИТ}} = Q_{\text{ЭК}} / Q_m = \eta_{\text{ЭЛ}}^{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭК}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ЭК}}$  – тепловая мощность водогрейного электрокотла, которая может быть определена как:  $Q_{\text{ЭК}} = Q_{\text{СЭ}} - Q_{\text{КТНУ}}$ ;  $Q_m$  – мощность, затраченная электростанцией для выработки электрической энергии;  $\eta_{\text{ЭЛ}}^{\text{к}}$  – общий КПД генерирования и снабжения электрической энергии к электрокотлу, определяют по формуле:  $\eta_{\text{ЭЛ}}^{\text{к}} = \eta_{\text{ЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}}$ , где  $\eta_{\text{ЭС}}$  – усредненное значение КПД электростанций в Украине или альтернативных источников электрической энергии для ТНУ (на основе парогазовых установок (ПГУ), газотурбинных установок (ГТУ), солнечных электростанций термодинамического цикла (СЭС), ветроэнергетических электростанций (ВЭС)), из исследования [5];  $\eta_{\text{ЛЭП}}$  – КПД распределительных электрических сетей в Украине из [5];  $\eta_{\text{ЭК}}$  – КПД электрического котла.

Для случаев применения СЭ с пиковым электрокотлом общий КПД генерирования и снабжения электрической энергии к электрокотлу можно определить как  $\eta_{\text{ЭЛ}}^{\text{к}} = \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{ЭП}}$  в случае использования электроэнергии от КТНУ или по указанной выше формуле для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы на основе традиционных или альтернативных источников электрической энергии. Тогда безразмерный критерий энергетической эффективности электрокотла как пикового источника теплоты для СЭ для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы определяем:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ЭС}} = \eta_{\text{ЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \eta_{\text{ЭК}}. \quad (4)$$

В случае использования в электрическом котле электроэнергии от КТНУ безразмерный критерий энергетической эффективности электрокотла как пикового источника теплоты для СЭ будем определять:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ЭК}} = \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{ЭП}} \cdot \eta_{\text{ЭК}} = \eta_{\text{ЭЛ}}^{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ЭК}}. \quad (5)$$

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – водогрейного топливного котла – в составе СЭ  $K_{\text{ПИТ}}$  может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источники электрической энергии и топлива – топливный котел – потребитель теплоты от СЭ» с учетом влияния источников энергии для пикового источника теплоты (топливного котла) и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к котлу (котельной). В этом случае потребление электрической энергии пиковым источником теплоты в СЭ – топливным котлом – непосредственно не связано с процессом генерирования теплоты в котле, а доля потребления электрической энергии на собственные нужды является незначительной, поэтому существенно не влияет на значение показателя  $K_{\text{ПИТ}}$ .

Для топливного котла как пикового источника теплоты для СЭ безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ТК}} = Q_{\text{ТК}} / Q_{\text{мон}} = \eta_{\text{ТК}}, \quad (6)$$

где  $Q_{\text{ТК}}$  – тепловая мощность водогрейного топливного котла, которую можно определить как:  $Q_{\text{ТК}} = Q_{\text{СЭ}} - Q_{\text{КТНУ}}$ ;  $Q_{\text{мон}}$  – мощность, затраченная для выработки тепловой энергии от сжигания топлива в котле;  $\eta_{\text{ТК}}$  – КПД водогрейного топливного котла или топливной ко-

тельной (для СЭ больших мощностей).

Для случаев использования альтернативных пиковых источников теплоты в СЭ (например, солнечных коллекторов для СЭ небольшой мощности) значение безразмерного критерия энергетической эффективности пикового источника теплоты для СЭ  $K_{ПИТ}$  будет равным КПД альтернативного пикового источника теплоты  $\eta_{АПИТ}$  или КПД дополнительной системы с альтернативным пиковым источником теплоты  $\eta_{АПИТ}^c$ .

Следует отметить, что комплексный безразмерный критерий энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  из формулы (1) может быть использован также и для выбора наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ и эффективных режимов работы СЭ.

Предложенный подход по оцениванию энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ и ПИТ имеет ряд преимуществ:

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы СЭ, пиковых источников теплоты СЭ, источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;
- позволяет оценивать влияние переменных режимов работы КТНУ с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;
- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и СЭ;
- учитывает энергетическую эффективность СЭ на основе КТНУ разных уровней мощности;
- учитывает переменные режимы работы СЭ для теплоснабжения на протяжении года с изменением распределения нагрузки между парокompрессионными КТНУ и пиковым источником теплоты в СЭ;
- учитывает режимы работы и энергетическую эффективность парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности;
- учитывает влияние пиковых источников теплоты для СЭ и вида потребляемой ими энергии с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;
- в результате комплексного подхода к оцениванию энергетической эффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ;
- предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности СЭ на основе парокompрессионных КТНУ с разными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями;
- позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов СЭ на основе КТНУ и ПИТ.

Применение предложенных подходов по оцениванию энергетической эффективности систем энергоснабжения на основе КТНУ и ПИТ продемонстрируем на конкретных примерах.

На рис. 3 – 7 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ и ПИТ. Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  при условии изменения доли нагрузки КТНУ в диапазоне  $\beta = 0,1 \dots 1,0$ . Исследование проведено для режимов энергоэффективной работы КТНУ с  $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ .

На рис. 3 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым источ-

ником теплоты (электрическим котлом) из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [5], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине  $\eta_{ЭС} = 0,383$  и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине  $\eta_{ЛЭП} = 0,875$ . Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с  $\eta_{ЭК} = 0,95$ . Следует отметить, что в случае изменения КПД электрической котельной в диапазоне  $\eta_{ЭК} = 0,9 \dots 0,95$  значения безразмерного критерия энергетической эффективности электрокотла для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы будет составлять  $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302 \dots 0,318$ . Для исследованных режимов работы СЭ значения комплексного безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ составляют  $K_{СЭ} = 0,396 \dots 1,92$  при условии  $\beta = 0,1 \dots 0,9$  и  $K_{СЭ} = 2,1$  при условии  $\beta = 1$ .

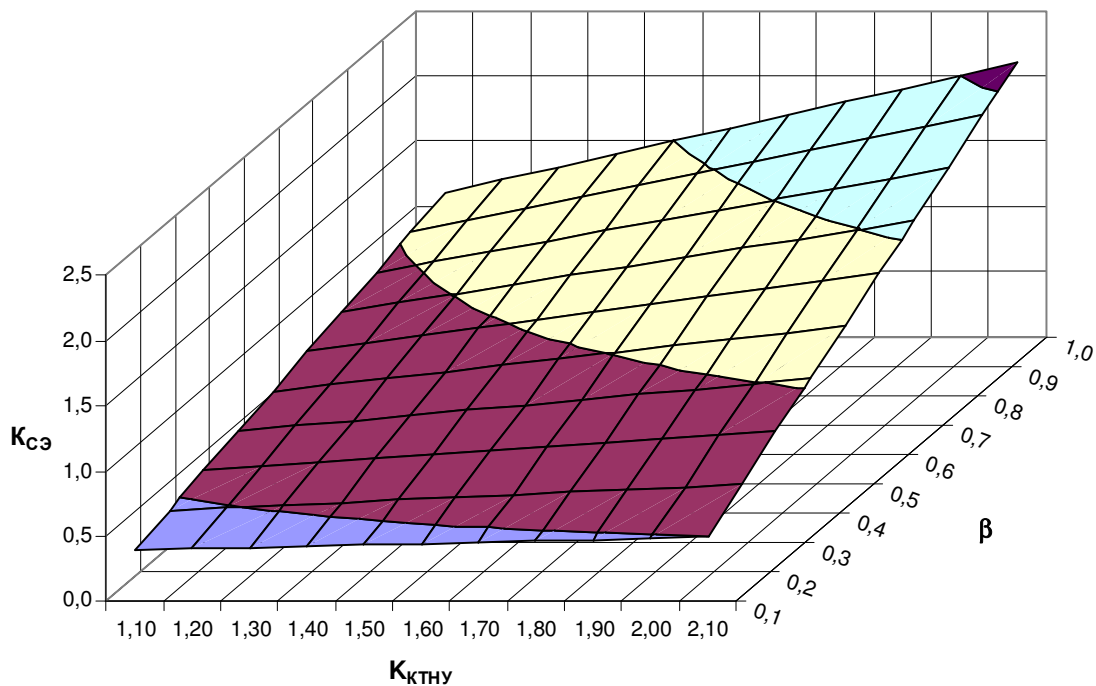


Рис. 3. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым электрокотлом из энергосистемы Украины

На рис. 4 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ малой мощности при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ с потреблением электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от КТНУ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД  $\eta_{ЭД} = 0,31$  и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем  $\eta_{ЭЛ} = 0,8$ . Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с  $\eta_{ЭК} = 0,9$ . Значение безразмерного критерия энергетической эффективности электрокотла для случаев потребления электрической энергии от КТНУ будет составлять  $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,223$ . Для исследованных режимов работы СЭ значения комплексного безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ составляют  $K_{СЭ} = 0,31 \dots 1,46$  при условии  $\beta = 0,1 \dots 0,9$  и  $K_{СЭ} = 1,6$  при условии  $\beta = 1$

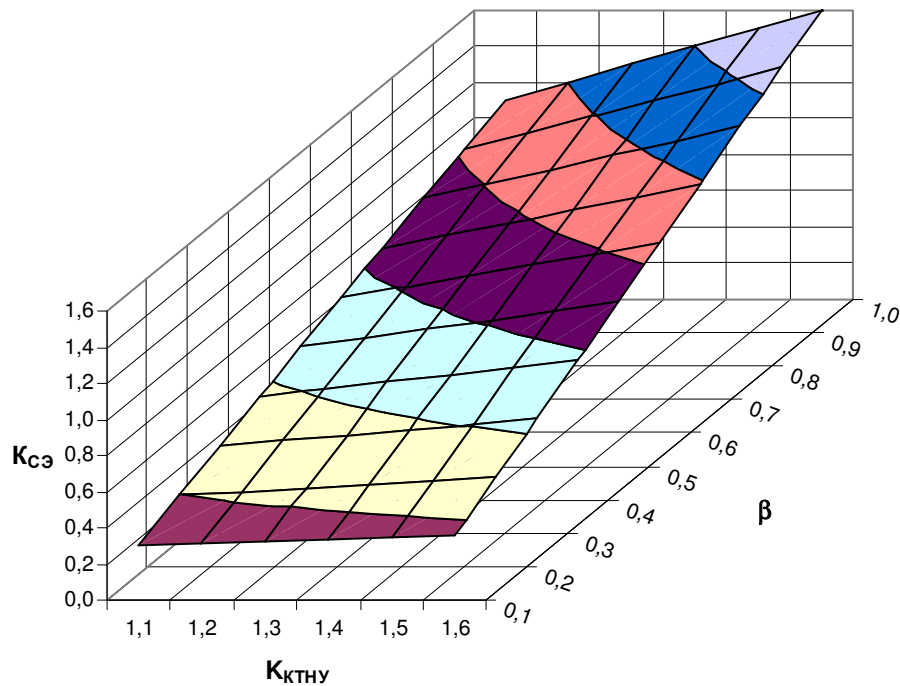


Рис. 4. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ малой мощности при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ и потреблением электроэнергии пиковым электродвигателем от КТНУ

На рис. 5 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ малой мощности при условиях максимальной эффективности ГПД и ПДТ с потреблением электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от КТНУ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД  $\eta_{эд} = 0,42$  и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем  $\eta_{эл} = 0,8$ . Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с  $\eta_{ЭК} = 0,95$ . Значение безразмерного критерия энергетической эффективности электродвигателя для случаев потребления электрической энергии от КТНУ будет составлять  $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,319$ . Для исследованных режимов работы СЭ значения комплексного безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ составляют  $K_{CЭ} = 0,39 \dots 1,92$  при условии  $\beta = 0,1 \dots 0,9$  и  $K_{CЭ} = 2,1$  при условии  $\beta = 1$ .



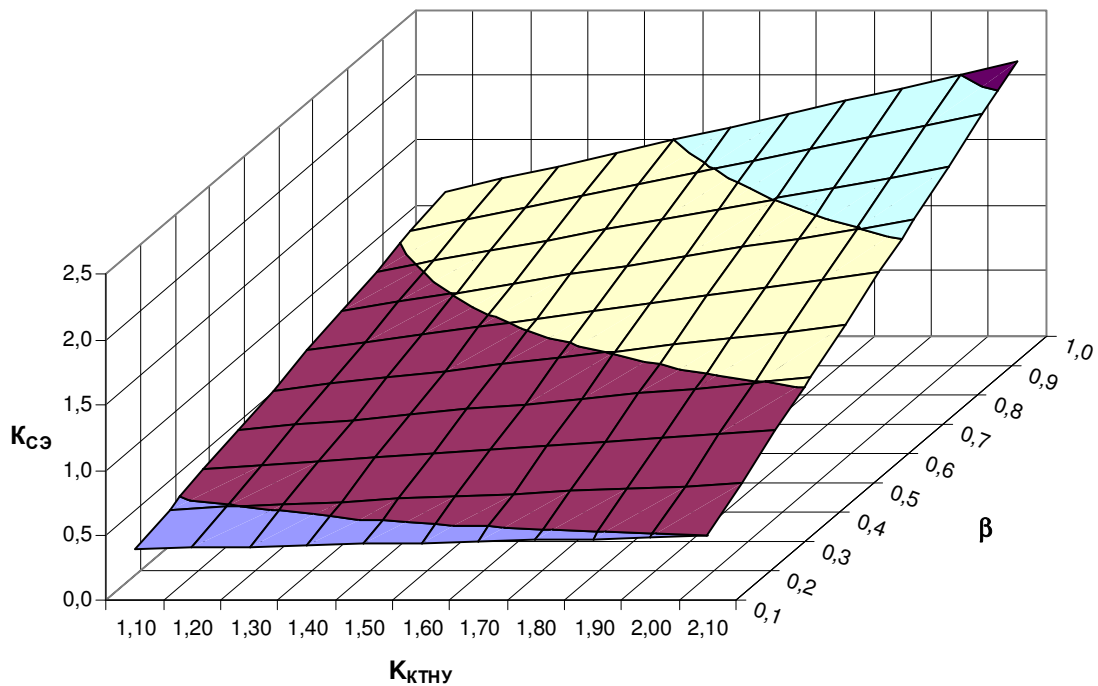


Рис. 5. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ малой мощности при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ и потреблением электроэнергии электрокотлом от КТНУ

На рис. 6 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условии минимальной эффективности пикового водогрейного топливного котла. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности водогрейного топливного котла будет составлять  $K_{ПИТ}^{TK} = \eta_{TK} = 0,8$ . Для исследованных режимов работы СЭ значения комплексного безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ составляют  $K_{СЭ} = 0,83 \dots 1,97$  при условии  $\beta = 0,1 \dots 0,9$  и  $K_{СЭ} = 2,1$  при условии  $\beta = 1$ .

На рис. 7 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условии максимальной эффективности пикового водогрейного топливного котла. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности водогрейного топливного котла будет составлять  $K_{ПИТ}^{TK} = \eta_{TK} = 0,9$ . Для исследованных режимов работы СЭ значения комплексного безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ составляют  $K_{СЭ} = 0,92 \dots 1,98$  при условии  $\beta = 0,1 \dots 0,9$  и  $K_{СЭ} = 2,1$  при условии  $\beta = 1$ .

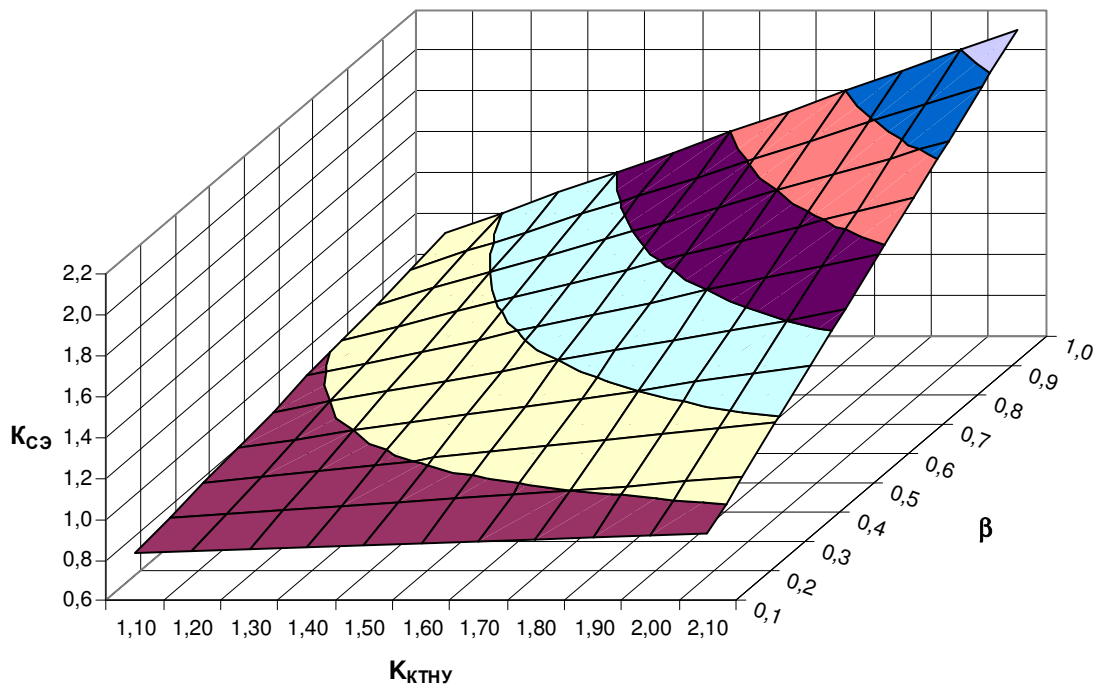


Рис. 6. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условии минимальной эффективности пикового топливного котла

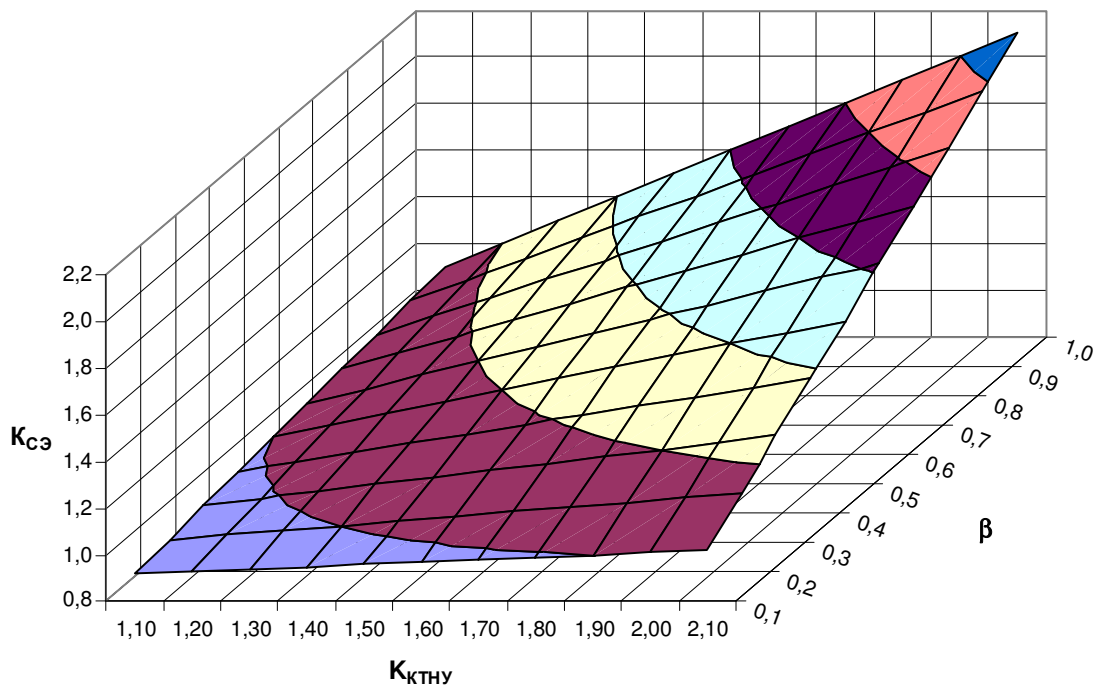


Рис. 7. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условии максимальной эффективности пикового топливного котла

Сравнивая результаты исследований, показанные на рис. 3 – 7, можно сделать вывод, что для СЭ на основе КТНУ и ПИТ для значений доли нагрузки КТНУ  $\beta > 0,7$  эффективность и вид пикового источника теплоты незначительно влияют на энергетическую эффективность СЭ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ. Для других режимов работы СЭ их энергетическую эффективность и конкурентоспособность в значительной степени

будут определять вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ.

Определено, что значения безразмерного показателя энергетической эффективности ПИТ в составе СЭ составляют:  $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302...0,318$  для электродвигателя при условии использования электроэнергии из энергосистемы;  $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,223...0,319$  для электродвигателя для СЭ малых мощностей при условии использования электроэнергии от КТНУ;  $K_{ПИТ}^{ТК} = 0,8...0,9$  для пикового топливного котла в составе СЭ.

Сравнивая результаты исследований, показанные на рис. 3 – 7, можно сделать вывод, что использование топливного котла как пикового источника теплоты в СЭ является более эффективным, чем использование пикового электродвигателя с разными вариантами источников электроэнергии, что подтверждено большими значениями безразмерного критерия энергетической эффективности пикового источника теплоты в составе СЭ  $K_{ПИТ}$  и безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  для разных режимов работы.

Предложенные в исследовании СЭ на основе КТНУ и пиковых электродвигателей будут эффективнее современных высокоэффективных электрических и топливных котлов, если доля нагрузки КТНУ в СЭ составляет  $\beta > 0,4$ .

На основе анализа результатов исследований (рис. 6 – 7) определено, что для СЭ на основе КТНУ и пиковых топливных котлов фиксируют большие значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  для всех исследованных режимов работы по сравнению с другими вариантами СЭ и современными высокоэффективными электрическими и топливными котлами. Энергетическая эффективность этих СЭ почти в два раза превышает эффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов (см. рис. 6 – 7).

Определено, что для случаев  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  (или  $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$ ) предложенные в данной статье СЭ на основе КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам.

На основе предложенных подходов по оцениванию энергетической эффективности СЭ с КТНУ и ПИТ, а также указанных выше условий определены эффективные режимы работы СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Для проведения оценки энергетической эффективности разных вариантов СЭ на основе КТНУ и ПИТ, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 5 – 10].

### Выводы

Разработаны методические основы и проведена оценка энергетической эффективности систем энергоснабжения на основе комбинированных КТНУ и ПИТ, определены эффективные режимы работы систем энергоснабжения на основе комбинированных КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Предложенный подход по оцениванию энергетической эффективности СЭ на основе КТНУ и ПИТ имеет ряд преимуществ:

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы СЭ, пиковых источников теплоты СЭ, источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ с уче-

том потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- позволяет оценивать влияние переменных режимов работы КТНУ с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и СЭ;

- учитывает энергетическую эффективность СЭ на основе КТНУ разных уровней мощности;

- учитывает переменные режимы работы СЭ для теплоснабжения на протяжении года с изменением распределения нагрузки между парокompрессионными КТНУ и пиковым источником теплоты в СЭ;

- учитывает режимы работы и энергетическую эффективность парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности;

- учитывает влияние пиковых источников теплоты для СЭ и вида потребляемой ими энергии с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;

- в результате комплексного подхода к оцениванию энергетической эффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ;

- предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности СЭ на основе парокompрессионных КТНУ с разными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями;

- позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов СЭ на основе КТНУ и ПИТ.

На основе анализа результатов исследований определено, что для СЭ на основе КТНУ и ПИТ для значений доли нагрузки КТНУ  $\beta > 0,7$  эффективность и вид пикового источника теплоты незначительно влияют на энергетическую эффективность СЭ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ. Для других режимов работы СЭ их энергетическую эффективность и конкурентоспособность в значительной степени будут определять вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ. Предложенные в исследовании СЭ на основе КТНУ и пиковых электродкотлов будут эффективнее современных высокоэффективных электрических и топливных котлов, если доля нагрузки КТНУ в СЭ составляет  $\beta > 0,4$ .

Определено, что для СЭ на основе КТНУ и пиковых топливных котлов фиксируют большие значения безразмерного критерия энергетической эффективности СЭ  $K_{СЭ}$  для всех исследованных режимов работы по сравнению с другими вариантами СЭ и современными высокоэффективными электрическими и топливными котлами. Энергетическая эффективность этих СЭ почти в два раза превышает эффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов.

Для случаев  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  (или  $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$ ) предложенные в данной статье СЭ на основе КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергообеспечения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам.

На основе предложенных подходов по оцениванию энергетической эффективности СЭ с КТНУ и ПИТ, а также указанных выше условий определены эффективные режимы работы СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Для проведения оценки энергетической эффективности разных вариантов СЭ на основе КТНУ и ПИТ, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 5 – 10].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.
2. Баласанян Г. А. Эффективность перспективных интегрированных систем энергозабеспечения на базе установок когенерации малой мощности (теоретичні основи, аналіз, оптимізація) : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Г. А. Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.
3. Билека Б. Д. Экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями / Б. Д. Билека, Р. В. Сергиенко, В. Я. Кабков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №7 (74). – С. 25 – 29.
4. Сафьянц С. М. Исследование схемы источника теплоэлектроснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов / С. М. Сафьянц, Н. В. Колесниченко, Т. Е. Веретенникова // *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 79 – 85.
5. Енергетична ефективність парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2014. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419>.
6. Енергетичні переваги застосування парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/437/435>.
7. Остапенко О. П. Методичні основи комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з електричним та когенераційним приводом / О. П. Остапенко // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2015. – Вип. 47. – Т. 2. – С. 157 – 162.
8. Ostapenko O. P. Scientific basis of evaluation energy efficiency of heat pump plants: monograph / O. P. Ostapenko. – Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 62 p.
9. Комплексна оцінка енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з когенераційним приводом [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/2/2>.
10. Енергетична ефективність систем энергозабеспечения на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/454/452>.
11. Остапенко О. П. Холодильная техника та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.

**Остапенко Ольга Павловна** – к. т. н., доц., доцент кафедри теплоенергетики, [ostapenko1208@gmail.com](mailto:ostapenko1208@gmail.com).

Винницкий национальный технический университет.