

**О. П. Остапенко, к. т. н., доц.**

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОНАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ И ПИКОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

*Предложен подход по оцениванию энергоэффективности систем энергоснабжения (СЭ) с когенерационно-теплонасосными установками (КТНУ) и пиковыми источниками теплоты (ПИТ) в системах теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ 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:** энергоэффективность, система энергоснабжения, когенерационно-теплонасосная установка, пиковый источник теплоты, система теплоснабжения, безразмерный критерий энергетической эффективности.

### **Введение**

Анализ энергоэффективности применения комбинированных КТНУ в тепловых схемах источников энергоснабжения проведен в ряде публикаций [1 – 11]. В работе [1] проведено исследование по повышению энергоэффективности источников теплоснабжения с использованием ТНУ с когенерационным приводом. В работе [2] проведен сравнительный анализ направлений повышения эффективности систем энергоснабжения на базе установок когенерации малой мощности и предложены тепловые схемы систем комплексного энергоснабжения. В исследовании [3] оценена экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями. В работе [4] исследованы схемы источников теплоэлектроснабжения (мини-ТЭЦ) с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов. В исследованиях [5 – 6] оценены энергетические преимущества и определены 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 энергоэффективности 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 энергоэффективности 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 энергоэффективности СЭ на основе комбинированных КТНУ, 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. В работе [11] оценена энергоэффективность СЭ на основе комбинированных КТНУ и ПИТ, определены эффективные режимы работы этих СЭ с учетом комплексно-

го 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 – 11] авторами не проведена оценка энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ, не определены энергоэффективные режимы работы СЭ с 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 энергоэффективности систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ, определение энергоэффективных режимов работы СЭ с 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 энергоэффективности систем энергоснабжения с комбинированными когенерационно-теплонасосными установками и пиковыми источниками теплоты для систем теплоснабжения. Исследовали энергоэффективность систем энергоснабжения с парокompрессионными ТНУ малой (до 1 МВт) и большой мощностей с когенерационным приводом от газопоршневого двигателя-генератора (ГПД). Использование когенерационных установок для привода тепловых насосов обеспечивает лучшую энергетическую эффективность, поскольку позволяет избежать дополнительных потерь электроэнергии при транспортировке и предусматривает утилизацию теплоты уходящих газов после газового двигателя. Исследуемые СЭ с комбинированными КТНУ и ПИТ могут полностью или частично обеспечивать собственные нужды в электрической энергии и обеспечивать потребности отопления и горячего водоснабжения потребителей. Схемы систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ приведены в работах [1, 12].

Оптимальное распределение нагрузки между КТНУ и ПИТ (например, водогрейным топливным котлом, электродкотлом, солнечными коллекторами и т. п.) в составе СЭ в значительной степени определяет энергетическую эффективность указанных СЭ. Такое распределение характеризуется долей нагрузки КТНУ в составе СЭ  $\beta$ , которую определяют как отношение тепловой мощности КТНУ к тепловой мощности СЭ  $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЭ}$ . Значение тепловой мощности КТНУ определяют с учетом мощности утилизационного оборудования когенерационного привода, оно составляет  $Q_{КТНУ} = Q_k + \Sigma Q_{ум}$ , где  $Q_k$  – мощность конденсатора ТНУ,  $\Sigma Q_{ум}$  – мощность утилизационного оборудования когенерационного привода ТНУ. Оптимальные значения показателя  $\beta$  для СЭ с различными источниками теплоты для КТНУ при переменных режимах работы тепловой сети были определены на основе анализа результатов проведенных исследований [13 – 15].

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

В работе [11] предложено проводить комплексную оценку энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ по комплексному безразмерному критерию энергоэффективности:

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

где  $K_{\text{пнт}}$  – безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты в составе СЭ (водогрейного топливного котла (ТК), электрокотла (ЭК), солнечных коллекторов и т. п.),  $K_{\text{ктну}}$  – безразмерный критерий энергоэффективности комбинированных КТНУ в составе СЭ.

В исследованиях [5, 10 – 11] предложен безразмерный критерий энергоэффективности пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом  $K_{\text{ктну}}$ . Он получен на основе уравнения энергетического баланса для системы «Источник приводной энергии ТНУ – ТНУ – потребитель теплоты от ТНУ» с учетом влияния источников приводной энергии пароконденсационных ТНУ и с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. При условии  $K_{\text{ктну}} = 1$  комбинированная КТНУ передает к СЭ такую же тепловую мощность, какая была затрачена для выработки электроэнергии для привода ТНУ. Чем больше значение этого показателя, тем более эффективной и конкурентоспособной будет СЭ с КТНУ.

В исследовании [11] определены области энергоэффективной работы КТНУ разных уровней мощности, которые были получены на основе исследования [10] и определены по безразмерному критерию энергоэффективности КТНУ  $K_{\text{ктну}}$  в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ  $\varphi_{\text{д}}$  и эффективного КПД ГПД  $\eta_{\text{эд}}$ . Как уже отмечалось, энергоэффективные режимы работы КТНУ соответствуют условию  $K_{\text{ктну}} > 1$ . Полученные в [11] высокие значения безразмерного критерия энергоэффективности для СЭ с КТНУ свидетельствуют о высокой энергетической эффективности таких комбинированных систем энергоснабжения.

Безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты – электрокотла – в составе СЭ  $K_{\text{пнт}}$ , согласно [11], получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии – электрический котел – потребитель теплоты от СЭ» с учетом влияния источников энергии для пикового электрокотла и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к электрокотлу. В исследовании [11] проведена оценка энергоэффективности пикового электрокотла в СЭ в случае использования электроэнергии от КТНУ и для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы на основе традиционных или альтернативных источников электрической энергии на базе парогазовых установок, газотурбинных установок, солнечных электростанций термодинамического цикла, ветроэнергетических электростанций.

Безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты – водогрейного топливного котла – в составе СЭ  $K_{\text{пнт}}$ , согласно [11], 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 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  $K_{\text{пнт}}$ .

В исследовании [11] отмечено, что 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  $K_{\text{пнт}}$  будет равным КПД альтернативного пикового источника теплоты  $\eta_{\text{апнт}}$  или КПД дополнительной системы с альтернативным пиковым источником теплоты  $\eta_{\text{апнт}}^{\text{с}}$ .

Следует отметить, что комплексный безразмерный критерий энергоэффективности СЭ

$K_{СЭ}$  из формулы (1) может быть использован для выбора наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ и эффективных режимов работы СЭ.

В исследовании [11] определено, что для случаев  $K_{КТНУ} < K_{ПИТ}$  значение безразмерного критерия энергоэффективности СЭ  $K_{СЭ}$  будет уменьшаться с увеличением доли нагрузки КТНУ  $\beta$ . Для других случаев значение безразмерного критерия энергоэффективности СЭ  $K_{СЭ}$  будет возрастать с увеличением доли нагрузки ТНУ  $\beta$ .

Более детально методические основы по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ изложены в исследовании [11].

Предложенный подход по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения имеет ряд преимуществ:

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

- 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;

- 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 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 энергоэффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного ПИТ для определенного вида СЭ при работе в системах теплоснабжения;

- предложенные в [11] методические основы и приведенные в этой статье результаты исследований могут быть использованы для оценивания энергоэффективности СЭ на основе парокompрессионных КТНУ с различными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями;

- позволяет комплексно оценивать энергоэффективность значительного количества вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения.

Применение предложенных подходов по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ продемонстрируем на конкретных примерах.

На рис. 1 – 6 показаны результаты оценки энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для оптимальных значений доли нагрузки КТНУ  $\beta$ . Здесь продемонстрированы значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для случаев переменной нагрузки КТНУ в составе СЭ. Исследование проведено для случаев сезонной переменной нагрузки КТНУ в составе СЭ для оптимальных значений доли нагрузки КТНУ в диапазоне  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  [12 – 15], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения. Исследование проведено для режимов энергоэффективной работы КТНУ с  $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ . Значения критерия энергоэффективности КТНУ  $K_{КТНУ}$  соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования КТНУ в пределах  $\varphi_{\partial} = 3,0 \dots 5,4$  для КТНУ малых мощностей и  $\varphi_{\partial} = 2,7 \dots 5,4$  для КТНУ больших мощностей, согласно [11].

На рис. 1 показаны значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым источником 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 энергоэффективности электрокотла для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы будет составлять  $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302 \dots 0,318$ . Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют  $K_{СЭ} = 0,44 \dots 1,44$  при условии  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  и могут составлять  $K_{СЭ} = 2,1$  [11] при условии  $\beta = 1$ .

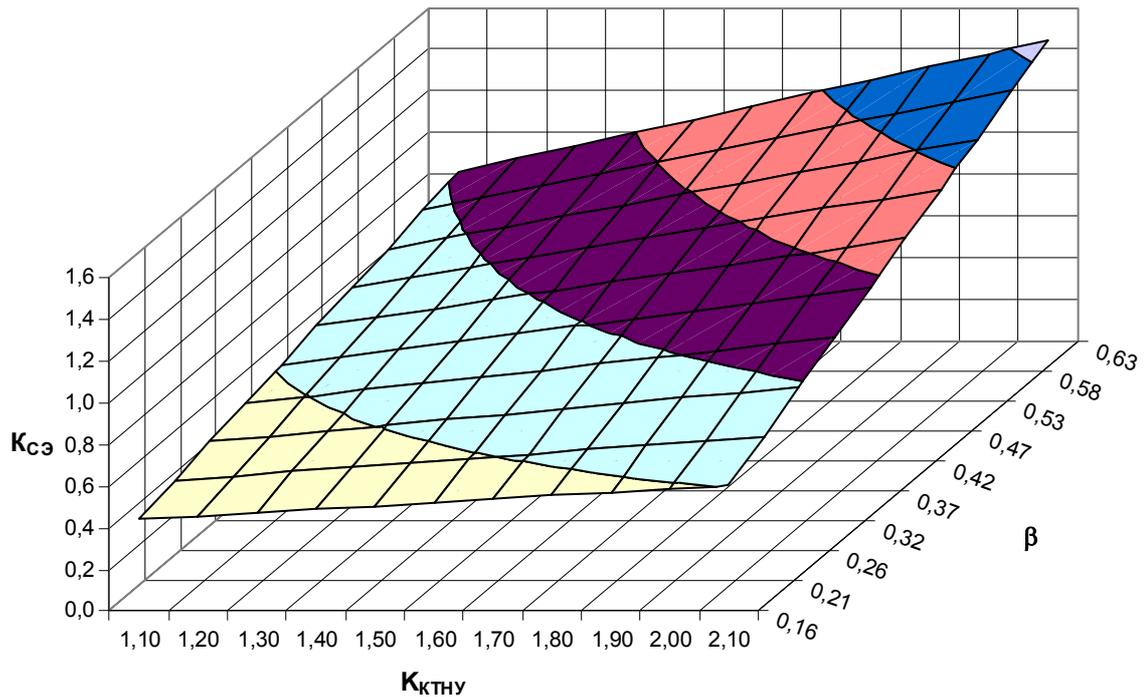


Рис. 1. Значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым электрокотлом из энергосистемы Украины

При условиях  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  (или  $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$ ) [11] из предложенных в этом исследовании зависимостей могут быть определены области энергоэффективной работы исследуемых СЭ. В случае выполнения вышеуказанных условий исследуемые СЭ с КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения. На рис. 2 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины при работе в системах теплоснабжения.

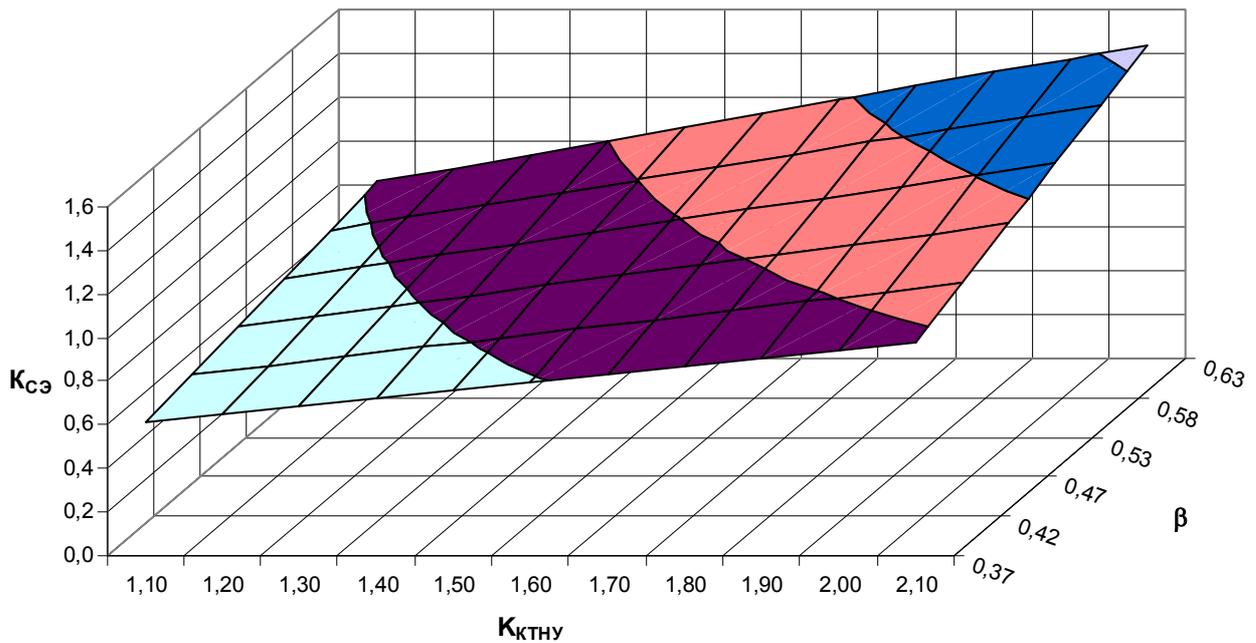


Рис. 2. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины

На рис. 3 показаны значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ 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 для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют  $K_{сэ} = 0,36 \dots 1,09$  при условии  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  и могут составлять  $K_{сэ} = 2,1$  [11] при условии  $\beta = 1$ .

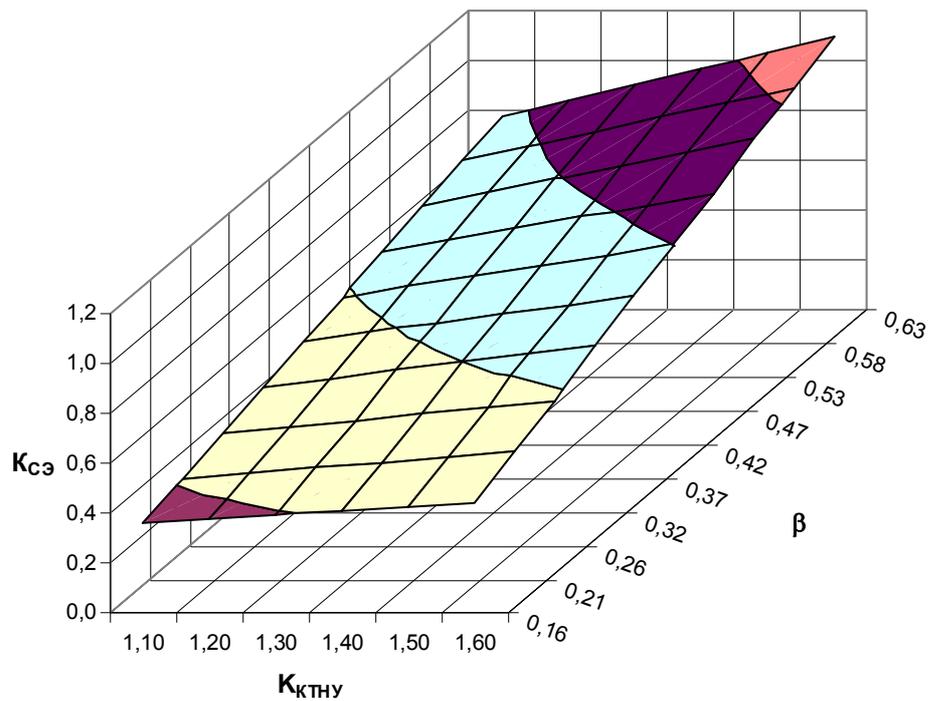


Рис. 3. Значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ малой мощности при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ и потреблением электроэнергии пиковым электрокотлом от КТНУ

На рис. 4 показаны значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ малой мощности при условиях максимальной 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  $\eta_{эд} = 0,42$  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 электрокотла для случаев потребления электрической энергии от КТНУ будет составлять  $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,319$ . Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют  $K_{CЭ} = 0,444 \dots 1,441$  при условии  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  и могут составлять  $K_{CЭ} = 2,1$  [11] при условии  $\beta = 1$ . Следует отметить, что полученные значения показателя энергоэффективности СЭ на рис. 4 мало отличаются от значений показателя энергоэффективности для СЭ с КТНУ малой мощности и потреблением электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины, что приведено на рис. 1.

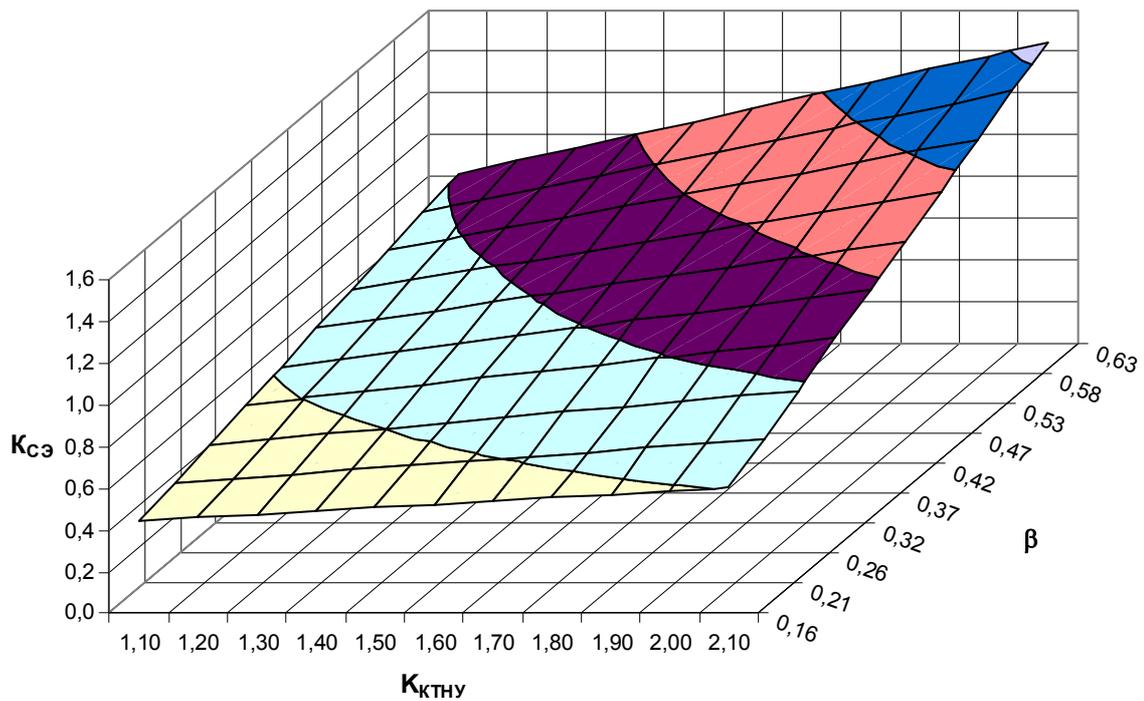


Рис. 4. Значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ малой мощности при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ и потреблением электроэнергии электродкотлом от КТНУ

На рис. 5 показаны значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условиях 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 для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют  $K_{CЭ} = 0,848 \dots 1,619$  при условии  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  и могут составлять  $K_{CЭ} = 2,1$  [11] при условии  $\beta = 1$ .

Как видно из рис. 5, при условиях  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{CЭ} > \eta_{TK}$  [11] зависимость, показанная на рис. 5, определяет область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и пиковым топливным котлом при условиях его минимальной эффективности. Эта СЭ может быть рекомендована как высокоэффективная система энергоснабжения, поскольку ее эффективность в два раза превышает энергоэффективность топливного котла. Такие СЭ могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

На рис. 6 показаны значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условиях 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 для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют  $K_{CЭ} = 0,932 \dots 1,656$  при условии  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  и могут составлять  $K_{CЭ} = 2,1$  [11] при условии  $\beta = 1$ .

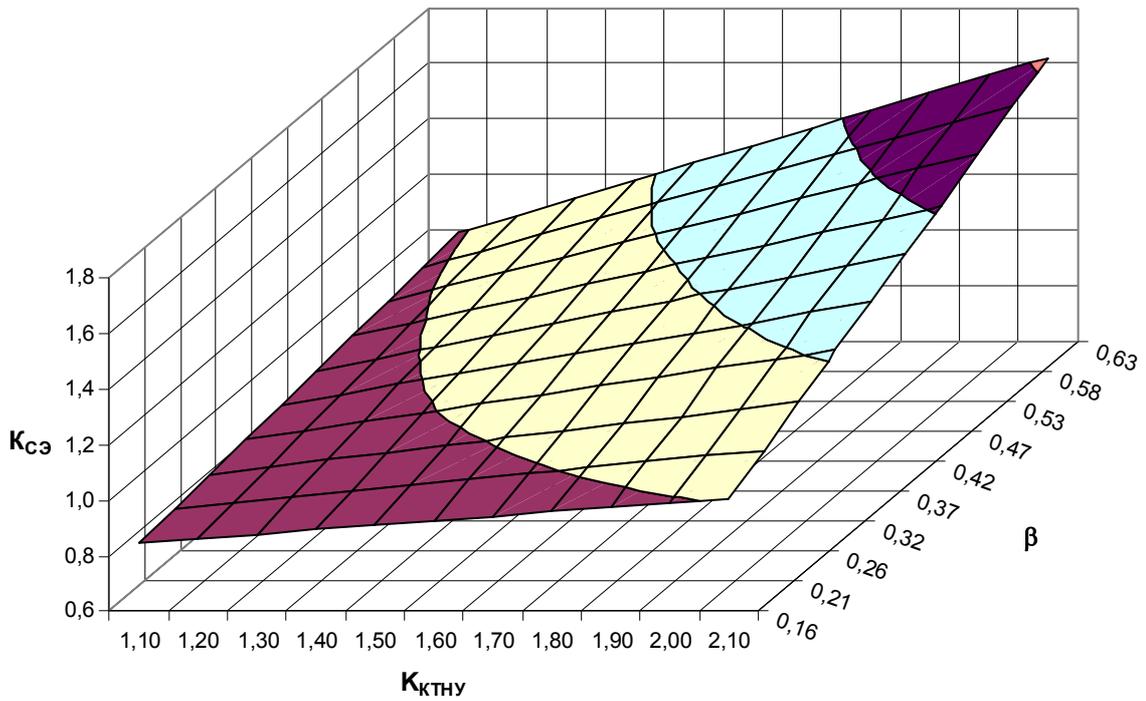


Рис. 5. Значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условиях минимальной эффективности пикового топливного котла

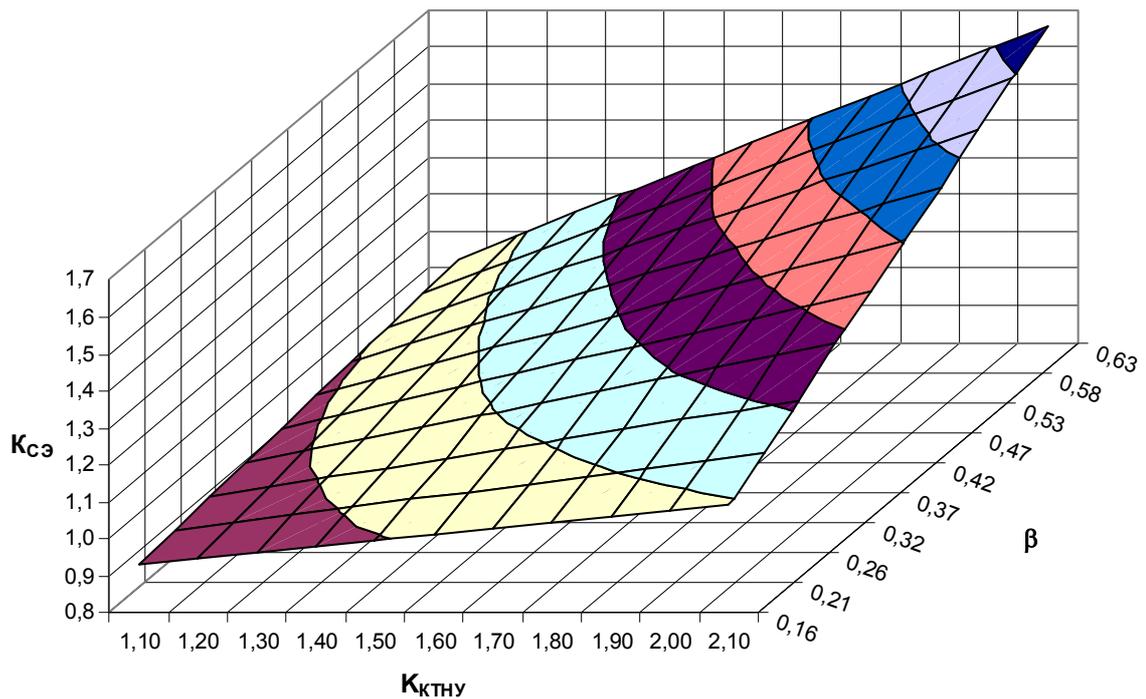


Рис. 6. Значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ для режимов энергоэффективной работы КТНУ при условиях максимальной эффективности пикового топливного котла

Как и в предыдущем случае, при условиях  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  [11] зависимость, показанная на рис. 6, определяет область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и пиковым топливным котлом при условиях его максимальной эффективности. Эта СЭ может быть рекомендована как высокоэффективная система энергоснабжения, поскольку ее эффективность почти в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективного топливного котла.

Такие СЭ могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

В исследовании [11] определено, что для СЭ с КТНУ и ПИТ для значений доли нагрузки КТНУ  $\beta < 0,7$  энергоэффективность и конкурентоспособность СЭ в значительной степени определяют вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ. Это условие соответствует оптимальным значениям доли нагрузки КТНУ в диапазоне  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  для работы систем теплоснабжения, поэтому вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ в СЭ в значительной степени будут определять энергоэффективность СЭ для систем теплоснабжения.

В исследовании [11] определены значения безразмерного показателя энергоэффективности ПИТ для СЭ, которые составляют [11]:  $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302 \dots 0,318$  для электрокотла при условии использования электроэнергии из энергосистемы;  $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,223 \dots 0,319$  для электрокотла для СЭ малых мощностей при условии использования электроэнергии от КТНУ;  $K_{ПИТ}^{ТК} = 0,8 \dots 0,9$  для пикового топливного котла в составе СЭ. На основе анализа этих показателей можно сделать вывод, что использование топливного котла как пикового источника теплоты в СЭ для систем теплоснабжения является более эффективным, чем использование пикового электрокотла с разными вариантами источников электроэнергии.

Как видно из рис. 2, предложенные в исследовании СЭ с КТНУ и пиковыми электрокотлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять  $\beta > 0,4$ . В случае выполнения этого условия современные высокоэффективные электрические и топливные котлы будут уступать по энергоэффективности указанным СЭ.

На основе анализа результатов исследований (рис. 1 – 6) определено, что энергоэффективность СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов для работы в системах теплоснабжения.

Определено, что при условиях  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  (или  $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$ ) [11] из предложенных в этом исследовании зависимостей (см. рис. 1 – 6) могут быть определены области энергоэффективной работы исследуемых СЭ для систем теплоснабжения. В случае выполнения вышеуказанных условий исследуемые СЭ с КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

Предложенные подходы по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ позволяют определить энергоэффективные режимы работы СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

С целью оценки энергоэффективности разных вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 5 – 11, 13 – 15].

### Выводы

Разработаны методические основы и проведена оценка энергоэффективности систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ при условиях оптимальных режимов работы КТНУ для систем теплоснабжения, определены энергоэффективные режимы работы СЭ с 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 энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения имеет ряд преимуществ:

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

- 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;

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

- в результате комплексного подхода к оцениванию энергоэффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного ПИТ для определенного вида СЭ при работе в системах теплоснабжения;

- предложенные в [11] методические основы и приведенные в настоящей статье результаты исследований могут быть использованы для оценивания энергоэффективности СЭ на основе парокompрессионных КТНУ с различными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями;

- позволяет комплексно оценивать энергоэффективность значительного количества вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения.

На основе анализа результатов исследований определено, что при энергоэффективных режимах работы КТНУ и оптимальных значениях доли нагрузки КТНУ  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  в СЭ вид и эффективность ПИТ в значительной степени определяют энергоэффективность СЭ для систем теплоснабжения.

Предложенные в исследовании СЭ с КТНУ и пиковыми электродкотлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять  $\beta > 0,4$ . При этом условия современные высокоэффективные электрические и топливные котлы будут уступать по энергоэффективности указанным СЭ. Определено, что энергоэффективность СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов для работы в системах теплоснабжения.

Определено, что при условиях  $K_{КТНУ} > 1$  и  $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$  (или  $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$ ) из предложенных в этом исследовании зависимостей (см. рис. 1 – 6) могут быть определены области энергоэффективной работы исследуемых СЭ для систем теплоснабжения. При этих условиях исследуемые СЭ с КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

Предложенные подходы по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ позволяют определить энергоэффективные 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.

С целью оценки энергоэффективности разных вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 5 – 11, 13 – 15].

## 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. Енергетична ефективність систем энергозабеспечения на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
12. Остапенко О. П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.
13. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Бакум, А. В. Ющишина // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/371/369>.
14. Енергетична ефективність теплонасосних станцій з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко, О. В. Бакум // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/381/379>.
15. Енергоекологічна ефективність теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, І. О. Валігура, А. Д. Коваленко. // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 2. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/363/361>.

**Остапенко Ольга Павловна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: [ostapenko1208@gmail.com](mailto:ostapenko1208@gmail.com).

Винницкий национальный технический университет.