

**О. П. Остапенко, к. т. н., доц.**

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ**

*Предложен подход по комплексному оцениванию энергетической эффективности парокомпрессионных теплонасосных станций (ТНС) с электрическим приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии ТНС, а также с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.*

**Ключевые слова:** комплексная оценка, энергетическая эффективность, теплонасосная станция, безразмерный критерий энергетической эффективности, электрический привод.

### **Введение**

В свете энергетического кризиса в Украине чрезвычайно актуальной становится задача эффективного потребления энергоресурсов и внедрения новейших энергосберегающих технологий [1 – 2]. Одной из таких технологий является использование парокомпрессионных теплонасосных установок (ТНУ) с электрическим приводом, это будет способствовать экономии топливно-энергетических ресурсов и защите окружающей среды. Внедрение теплонасосных станций, в которых тепловой насос объединен с пиковым источником теплоты, обеспечит большой энерго-, ресурсосберегающий и экономический эффект. Этим обусловлена актуальность исследований энергетической эффективности теплонасосных станций.

Вопросам исследования энергетической эффективности парокомпрессионных ТНС за последние годы посвящен ряд публикаций [1 – 12]. В работе [1] автором выполнены исследования по повышению эффективности и выбору рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и теплоснабжения по затрате условного топлива. В [2] проведен термодинамический и эксергетический анализ эффективности парокомпрессионного цикла теплонасосной станции теплоснабжения. Авторами в исследовании [3] проанализирована термодинамическая эффективность теплонасосных станций теплоснабжения. В исследовании [4] предложен новый подход к оценке эффективности тепловых насосов. Термодинамический анализ разных типов ТНУ проведен в исследовании [5]. Однако в исследованиях [1 – 5] не учтены потери энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ от электростанций разных типов. В работе [6] определены эффективные действительные режимы работы ТНУ с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния источников приводной энергии парокомпрессионных тепловых насосов и потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. Энергетические преимущества применения парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами проанализированы в исследовании [7].

В публикациях [8, 9] определены энергетические и экономические предпосылки эффективной интеграции ТНС в системы теплоснабжения промышленных предприятий и предприятий муниципальной энергетики в Украине. В работе [10] оценена энергетическая, экологическая и экономическая эффективность ТНС с разными видами привода компрессора на естественных и промышленных источниках низкотемпературной теплоты с учетом переменных режимов работы систем теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности ТНУ. Результаты исследований энергетической эффективности ТНС с разными источниками теплоты при условии переменных режимов работы приведены в работе [11]. В работе [12]

оценена энергоэкологическая эффективность ТНС с разными видами привода компрессора на естественных и промышленных источниках низкотемпературной теплоты при условии переменных режимов работы систем теплоснабжения.

В работах [1 – 12] авторами не проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с электрическим приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

**Целью исследования** является разработка методических основ и проведение комплексной оценки энергетической эффективности парокompрессионных теплонасосных станций с электрическим приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

### Основная часть

В исследовании проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с ТНУ малой (до 1 МВт) и большой мощностей с электрическим приводом. Исследование проводили для случаев использования в электроприводных ТНУ электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине. Схемы указанных ТНС приведены в работе [8].

Энергетическая эффективность ТНС в значительной степени определяется оптимальным распределением нагрузки между теплонасосной установкой и пиковым источником теплоты (например, водогрейным топливным котлом, электрокотлом, солнечными коллекторами и тому подобное) в составе ТНС. Это распределение характеризуется долей нагрузки ТНУ в составе ТНС  $\beta$ , которая определяется как отношение тепловой мощности ТНУ к мощности ТНС  $\beta = Q_{\text{ТНУ}}/Q_{\text{ТНС}}$ .

На основе анализа результатов проведенных исследований [10 – 12] определены оптимальные значения показателя  $\beta$  для ТНС с электроприводом на разных источниках теплоты при переменных режимах работы тепловой сети. Каждому из этих режимов соответствует определенное значение тепловых мощностей ТНС, ТНУ и доли нагрузки ТНУ  $\beta$ . Результаты исследований энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом для условий переменных режимов работы для разных источников низкотемпературной теплоты приведены в работе [11].

В нашем исследовании проанализирована энергетическая эффективность системы «Источник приводной энергии ТНС – ТНС – потребитель теплоты от ТНС» на примере парокompрессионных тепловых насосов с электрическим приводом. Преимуществом такого подхода является учёт потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ и пиковому источнику теплоты с целью определения эффективных режимов работы ТНС с электрическим приводом.

Предложено проводить комплексную оценку энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с электрическим приводом по комплексному безразмерному критерию энергетической эффективности ТНС:

$$K_{\text{ТНС}} = (1 - \beta) \cdot K_{\text{ПИТ}} + \beta \cdot K_{\text{ТНУ}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ПИТ}}$  – безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты в составе ТНС (водогрейного топливного котла, электрокотла, солнечных коллекторов и тому подобное),  $K_{\text{ТНУ}}$  – безразмерный критерий энергетической эффективности парокompрессионной ТНУ с электрическим приводом в составе ТНС.

Безразмерный критерий энергетической эффективности парокompрессионных ТНУ с Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

электрическим приводом предложен в исследовании [6]. 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.

Для парокompрессионных ТНУ с электрическим приводом безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид [6]:

$$K_{ТНУ} = Q_{ТНУ} / Q_T = \eta_{эл} \cdot \varphi \cdot \eta_{ТП}, \quad (2)$$

где  $Q_T$  – мощность, затраченная на электростанции для выработки электрической энергии для привода ТНУ,  $\eta_{эл}$  – общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии из [6],  $\varphi$  – коэффициент преобразования парокompрессионных ТНУ,  $\eta_{ТП}$  – КПД теплового потока, который учитывает потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТНУ.

Значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ с электроприводом, согласно [6], может быть определено:

$$\eta_{эл} = \eta_{ЭС} \cdot \eta_{ЛЭП} \cdot \eta_{ЭП}, \quad (3)$$

где  $\eta_{ЭС}$  – усредненное значение КПД электростанций в Украине или альтернативных источников электрической энергии для ТНУ (на базе парогазовых установок (ПГУ), газотурбинных установок (ГТУ), солнечных электростанций термодинамического цикла (СЭС), ветроэнергетических электростанций (ВЭС)) из исследования [6];  $\eta_{ЛЭП}$  – КПД распределительных электрических сетей в Украине из [6],  $\eta_{ЭП}$  – КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем из [6].

При условии  $K_{ТНУ} = 1$  теплонасосная установка передает к потребителю такую же тепловую мощность, которая была затрачена для выработки электроэнергии для привода ТНУ. Чем большее значение этого показателя, тем более эффективным и конкурентоспособным будет тепловой насос.

В исследовании [6] предложен метод определения областей эффективного использования парокompрессионных ТНУ с электрическим приводом по безразмерному показателю энергетической эффективности ТНУ  $K_{ТНУ}$  с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных ТНУ и учётом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ.

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – электрокотла – в составе ТНС  $K_{ПНТ}$  может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии – электрический котел – потребитель теплоты от ТНС» с учетом влияния источников энергии для пикового источника теплоты (электрокотла) и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к электрокотлу.

Для электрокотла как пикового источника теплоты для ТНС безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид:

$$K_{ПНТ} = Q_{ЭК} / Q_T = \eta_{эл}^k \cdot \eta_{ЭК}, \quad (4)$$

где  $Q_{ЭК}$  – тепловая мощность водогрейного электрокотла, которая может быть определена как:  $Q_{ЭК} = Q_{ТНС} - Q_{ТНУ}$ ;  $Q_T$  – мощность, затраченная на электростанции для выработки электрической энергии,  $\eta_{эл}^k$  – общий КПД генерирования и снабжения электрической энергии к электрокотлу, который определяют по формуле:  $\eta_{эл}^k = \eta_{ЭС} \cdot \eta_{ЛЭП}$ ,  $\eta_{ЭК}$  – КПД электрического

котла.

Тогда безразмерный критерий энергетической эффективности электродвигателя как пикового источника теплоты для ТНС будем определять:

$$K_{\text{ПИТ}} = \eta_{\text{ЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \eta_{\text{ЭК}} \cdot \quad (5)$$

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – водогрейного топливного котла – в составе ТНС  $K_{\text{ПИТ}}$  может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источники электрической энергии и топлива – топливный котел – потребитель теплоты от ТНС» 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).

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

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

где  $Q_{\text{ТК}}$  – тепловая мощность водогрейного топливного котла, которая может быть определена как:  $Q_{\text{ТК}} = Q_{\text{ТНС}} - Q_{\text{ТНУ}}$ ;  $Q_{\text{Т}}$  – мощность, затраченная для выработки тепловой энергии от сжигания топлива в котле,  $\eta_{\text{ТК}}$  – КПД водогрейного топливного котла или топливной котельной (для ТНС больших мощностей).

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

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

Предложенный комплексный подход по оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с электрическим приводом имеет ряд преимуществ:

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных электроприводных ТНС с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- учитывает режимы работы парокompрессионных ТНУ;

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

- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных ТНС с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНС;

- учитывает энергетическую эффективность парокompрессионных ТНС разных уровней мощностей с электрическим приводом;

- учитывает влияние пиковых источников теплоты парокompрессионных ТНС 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 электроприводных ТНС можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида парокompрессионных ТНС;

— предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности парокомпрессионных ТНС с разными хладагентами и схемными решениями ТНУ;

— позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов парокомпрессионных ТНС с электрическим приводом.

Применение предложенных методических основ по комплексному оцениванию энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом продемонстрируем на конкретных примерах.

На рис. 1 – 3 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом. Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом  $K_{ТНС}$  для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС со значениями доли нагрузки ТНУ в диапазоне  $\beta = 0,1 \dots 1,0$ . Значения безразмерного критерия энергетической эффективности парокомпрессионных ТНУ с электрическим приводом  $K_{ТНУ}$ , согласно исследованию [6], определены для значений действительного коэффициента преобразования ТНУ в диапазоне  $\varphi_d = 0,6 \dots 6,0$ . Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена электрическая котельная с  $\eta_{ЭК} = 0,95$ . Согласно [6], учтено значение КПД распределительных электрических сетей в Украине  $\eta_{ЛЭП} = 0,875$ .

На рис. 1 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине  $\eta_{ЭС} = 0,383$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,268$ .

На рис. 2 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,385$ .

На рис. 3 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии от ГТУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение КПД ГТУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,231$ .

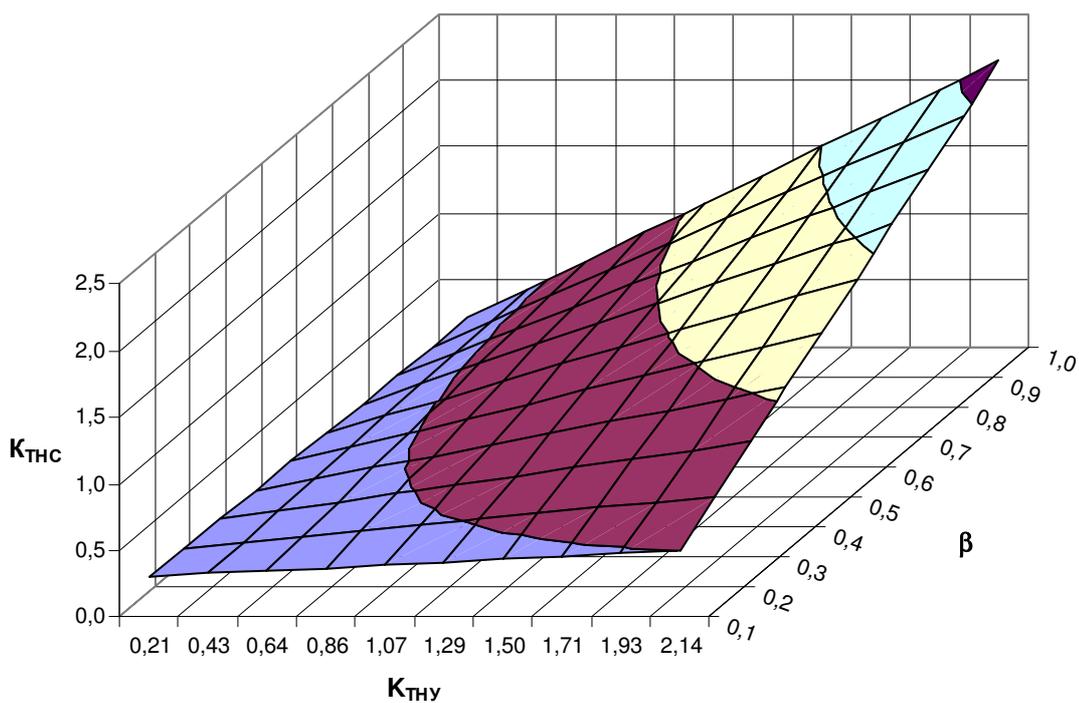


Рис. 1. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины

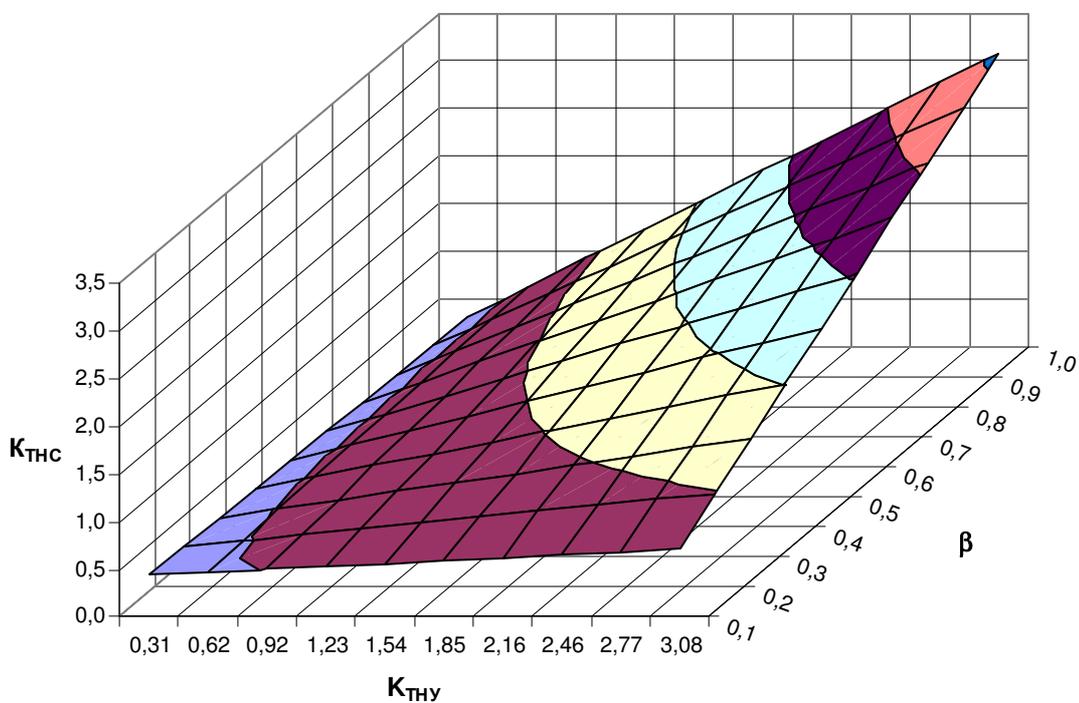


Рис. 2. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ПГУ

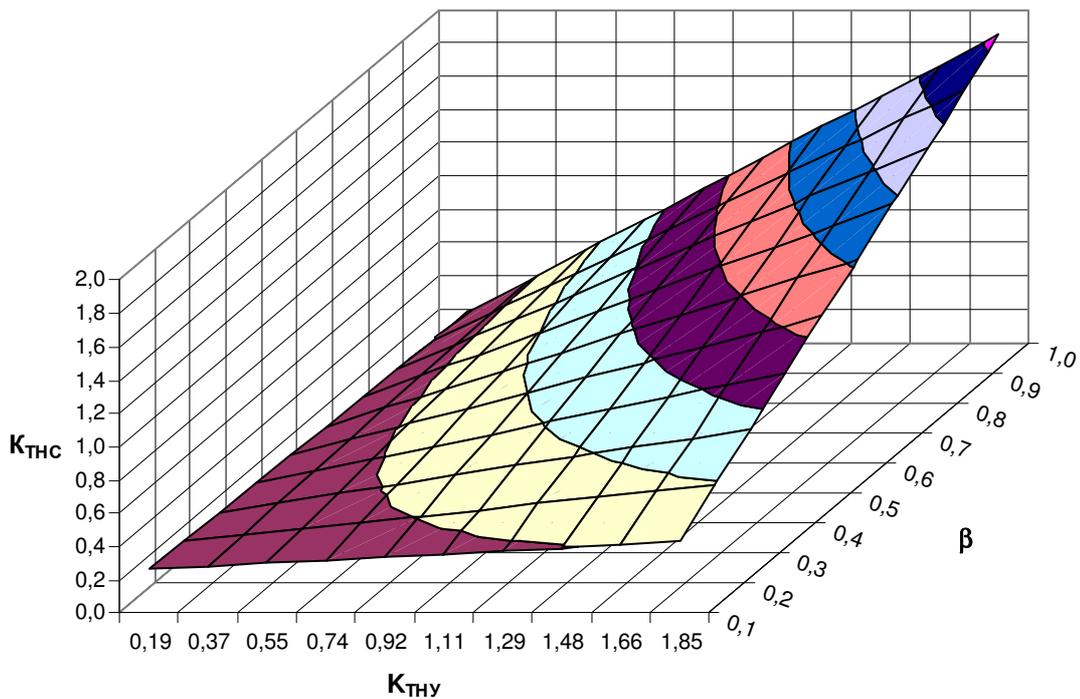


Рис. 3. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ГТУ

На рис. 4 – 6 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом. Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом  $K_{ТНС}$  для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС со значениями доли нагрузки ТНУ в диапазоне  $\beta = 0,1 \dots 1,0$ . Значения безразмерного критерия энергетической эффективности парокompрессионных ТНУ с электрическим приводом  $K_{ТНУ}$ , согласно исследованию [6], определены для значений действительного коэффициента преобразования ТНУ в диапазоне  $\varphi_d = 0,68 \dots 6,75$ . Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена водогрейная топливная котельная с  $\eta_{TK} = 0,85$ . Согласно [6], учтено значение КПД распределительных электрических сетей в Украине  $\eta_{лэл} = 0,875$ .

На рис. 4 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине  $\eta_{эс} = 0,383$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ большой мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,301$ .

На рис. 5 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ  $\eta_{эс} = \eta_{пгу} = 0,55$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ большей мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,433$ .

На рис. 6 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом при условии потребления электроэнергии от ГТУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение КПД ГТУ  $\eta_{эс} = \eta_{гту} = 0,33$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к

ТНУ большей мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,26$ .

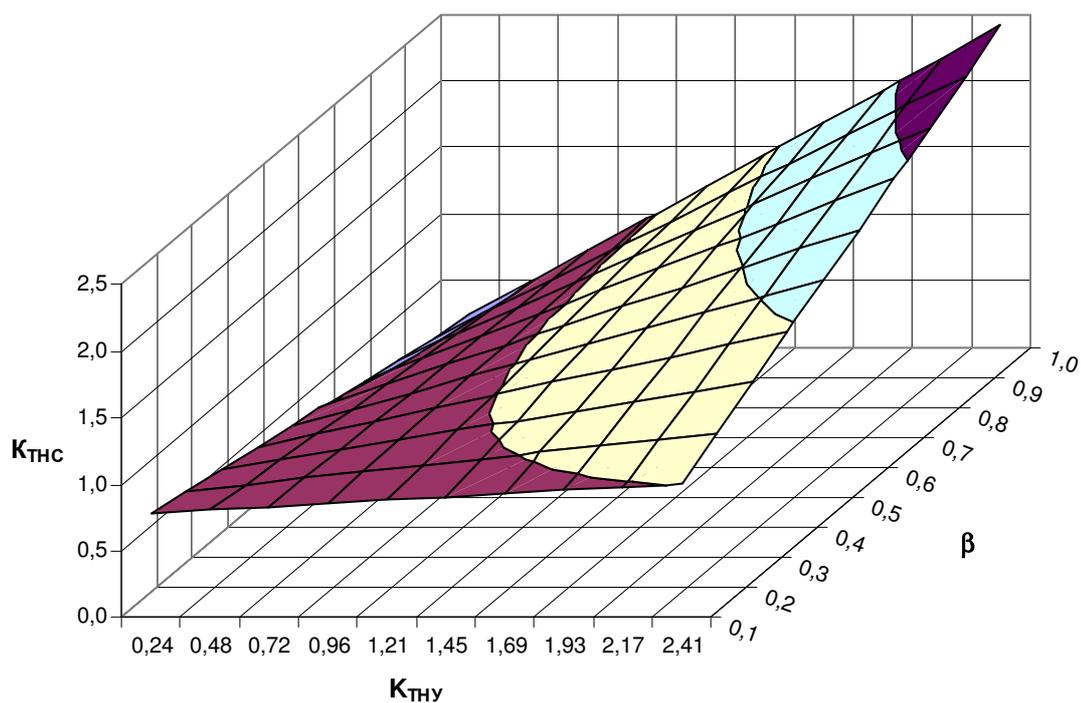


Рис. 4. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины

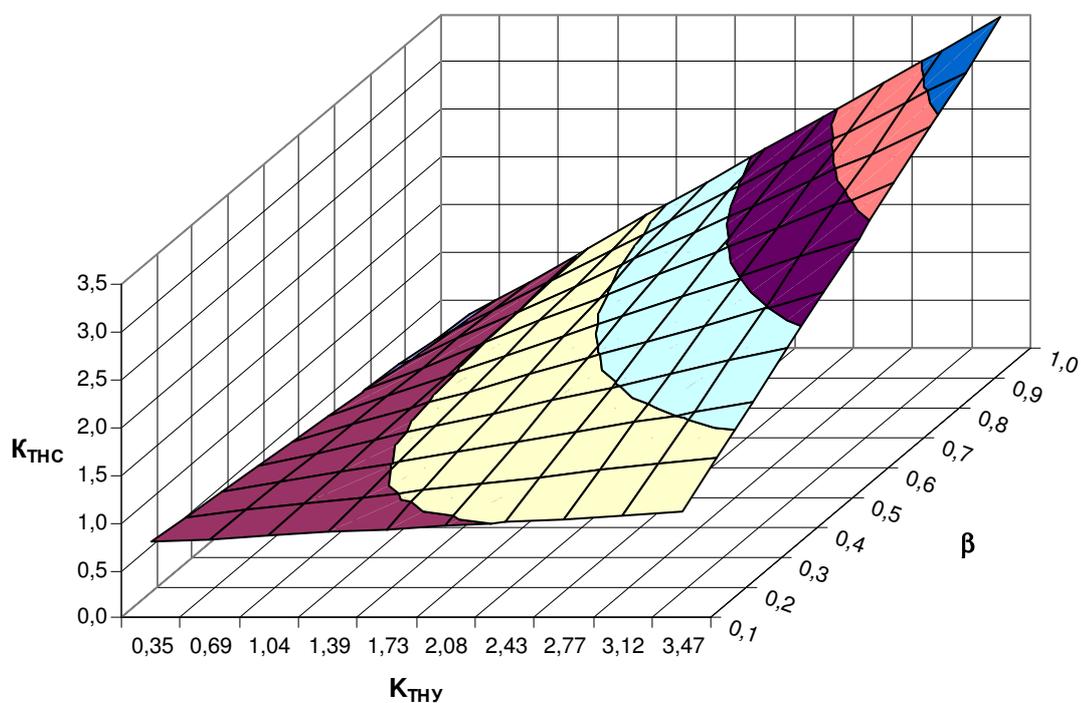


Рис. 5. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ПГУ

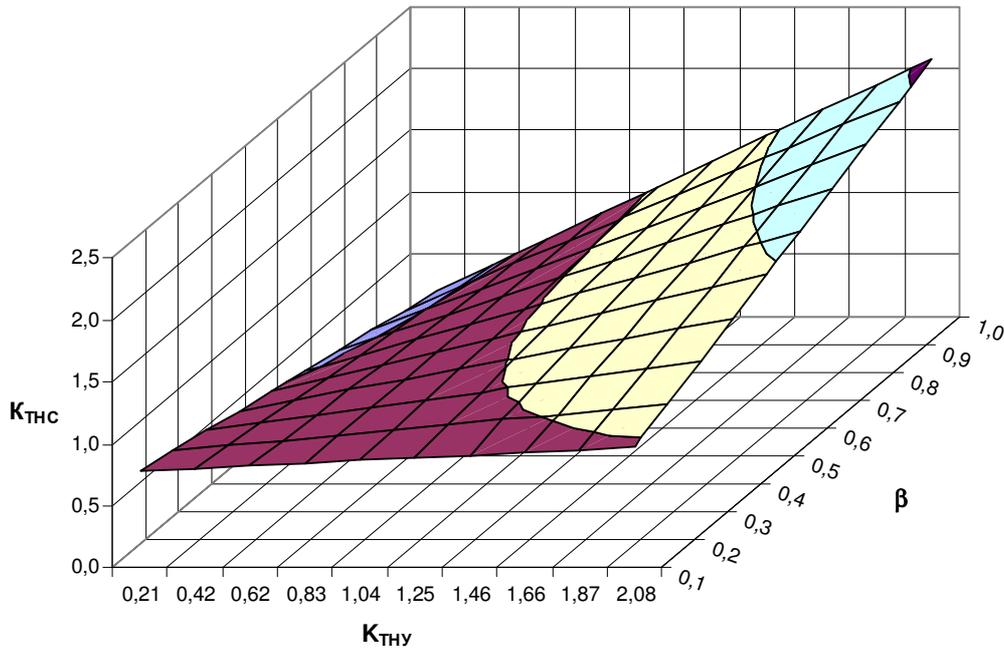


Рис. 6. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для случаев переменной нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ГТУ

На основе анализа результатов проведенных исследований [10 – 12] определены оптимальные значения показателя  $\beta$  для ТНС на разных источниках теплоты с разными видами привода компрессора ТНУ при переменных режимах работы тепловой сети.

На рис. 7 – 9 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$ . Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом  $K_{TNC}$  для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС. Исследование проведено для случаев сезонной переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ в диапазоне  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  [10 – 12], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения. Значения критерия энергетической эффективности ТНУ с электроприводом  $K_{TNU}$  соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования ТНУ в пределах  $\varphi_d = 0,6 \dots 6,0$ . Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена электрическая котельная с  $\eta_{ЭК} = 0,95$ . Согласно [6], учтено значение КПД распределительных электрических сетей в Украине  $\eta_{ЛЭП} = 0,875$ .

На рис. 7 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине  $\eta_{ЭС} = 0,383$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,268$ .

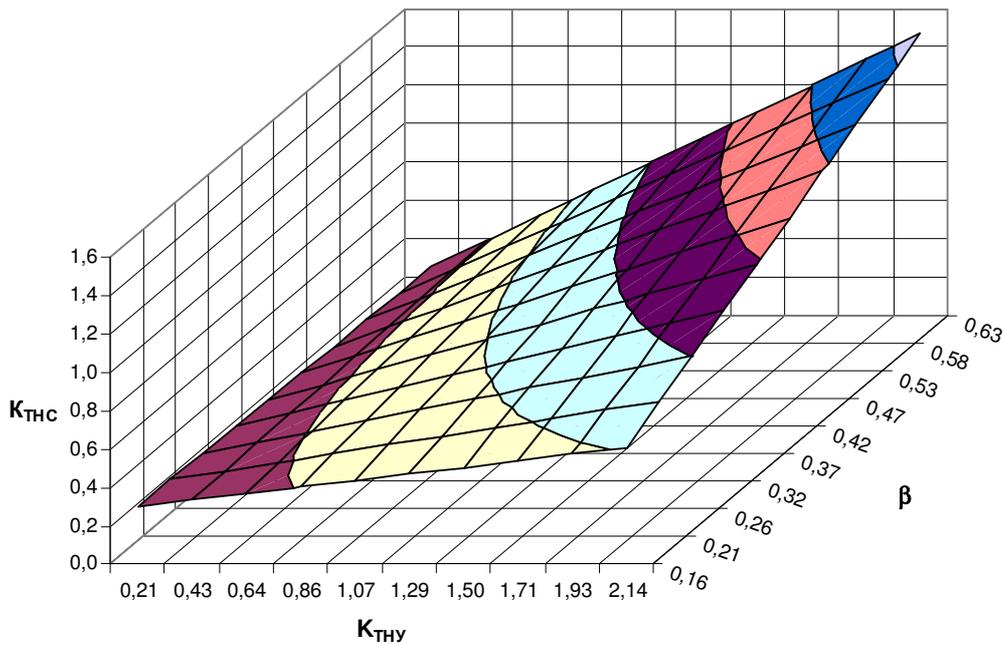


Рис. 7. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины

На рис. 8 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,385$ .

На рис. 9 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии от ГТУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение КПД ГТУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ малой мощности с электроприводом  $\eta_{ЭЛ} = 0,231$ .

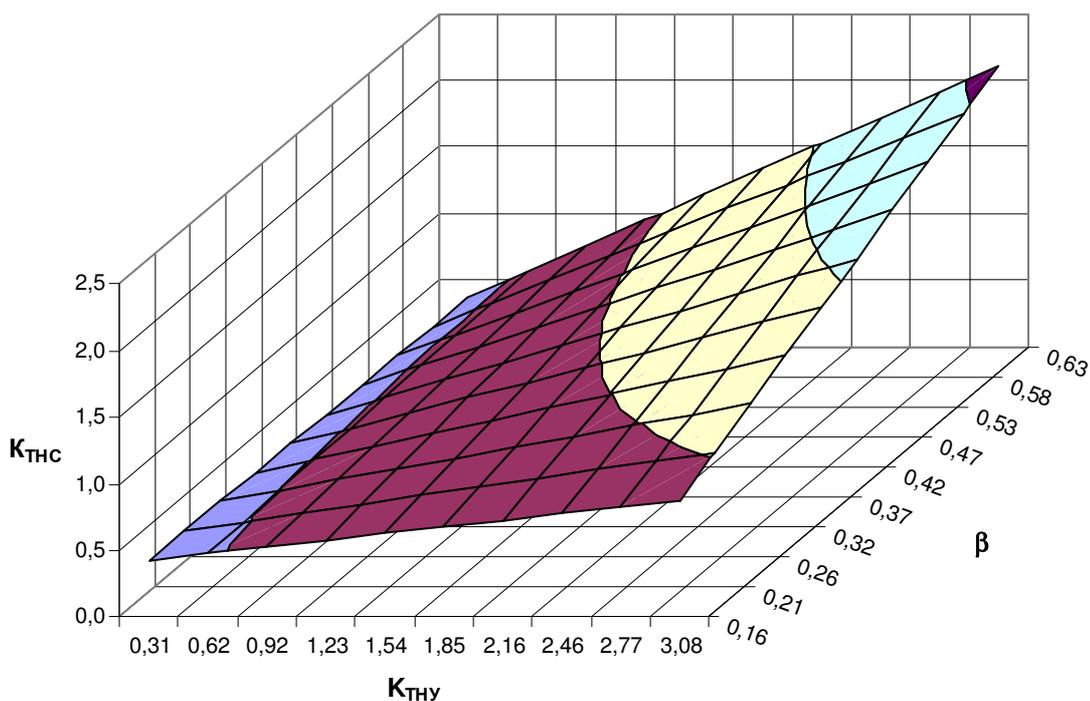


Рис. 8. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ПГУ

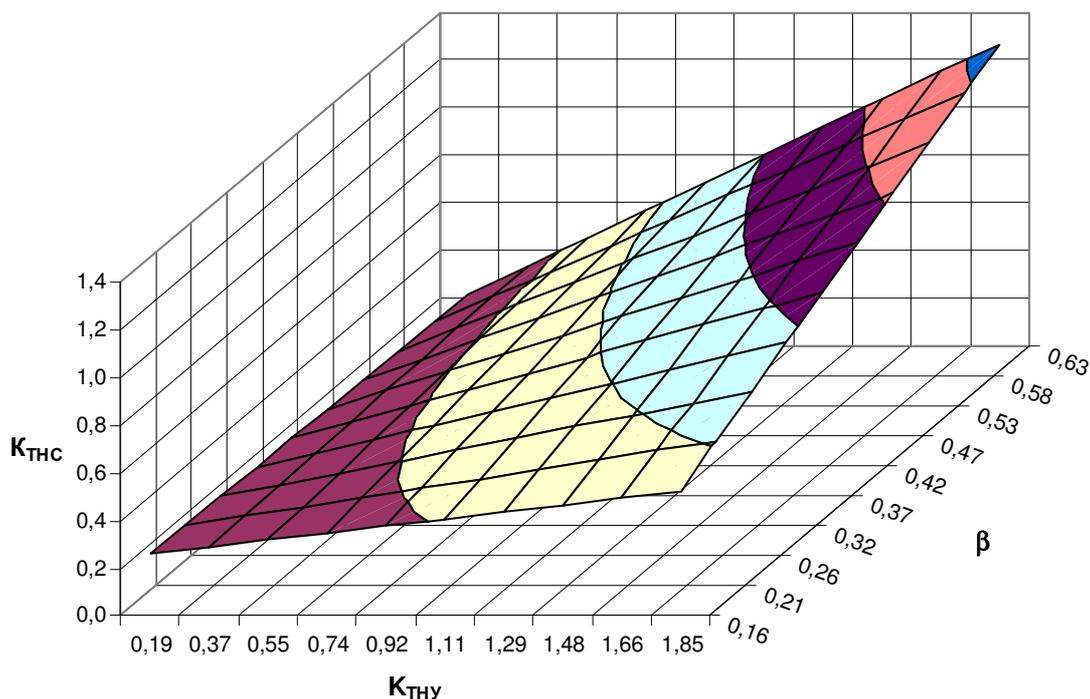


Рис. 9. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ГТУ

На рис. 10 – 12 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$ . Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с электрическим приводом  $K_{THC}$  для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС.

Исследование проведено для случаев сезонной переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ в диапазоне  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  [10 – 12], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения. Значения критерия энергетической эффективности ТНУ с электроприводом  $K_{ТНУ}$  соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования ТНУ в пределах  $\varphi_d = 0,68 \dots 6,75$ . Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена водогрейная топливная котельная с  $\eta_{ТК} = 0,85$ . Согласно [6], учтено значение КПД распределительных электрических сетей в Украине  $\eta_{ЛЭП} = 0,875$ .

На рис. 10 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине  $\eta_{ЭС} = 0,383$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ большей мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,301$ .

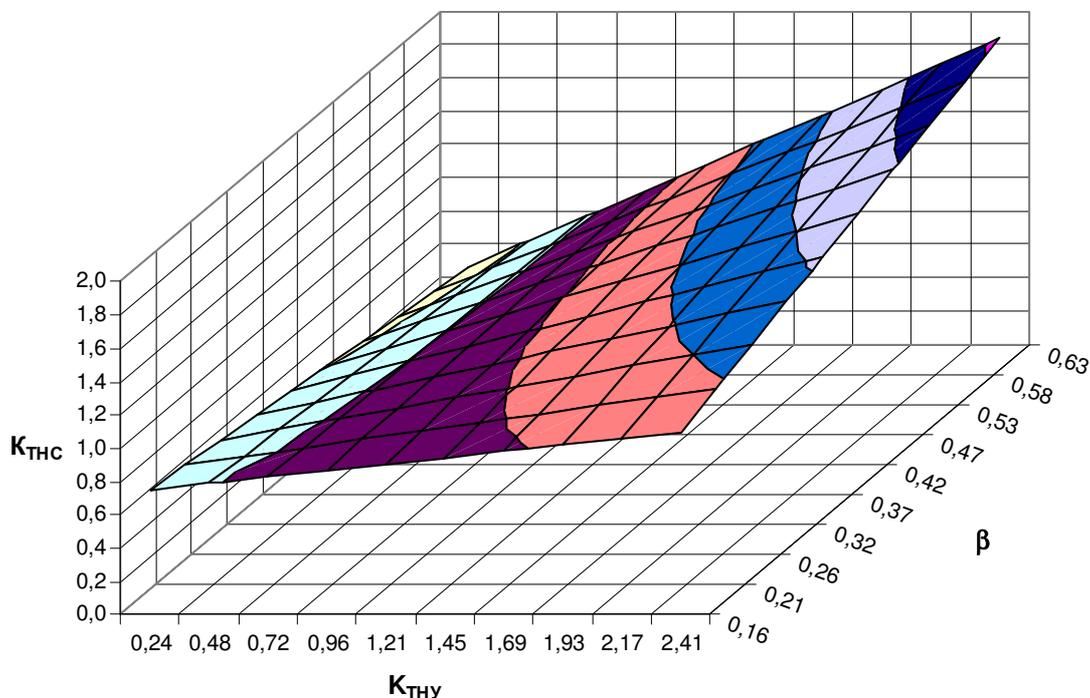


Рис. 10. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии из энергосистемы Украины

На рис. 11 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  и значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ большей мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,433$ .

На рис. 12 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ  $\beta$  при условии потребления электроэнергии от ГТУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение КПД ГТУ  $\eta_{ЭС} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  и значение общего КПД генерирования,

снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ большей мощности с электроприводом  $\eta_{эл} = 0,26$ .

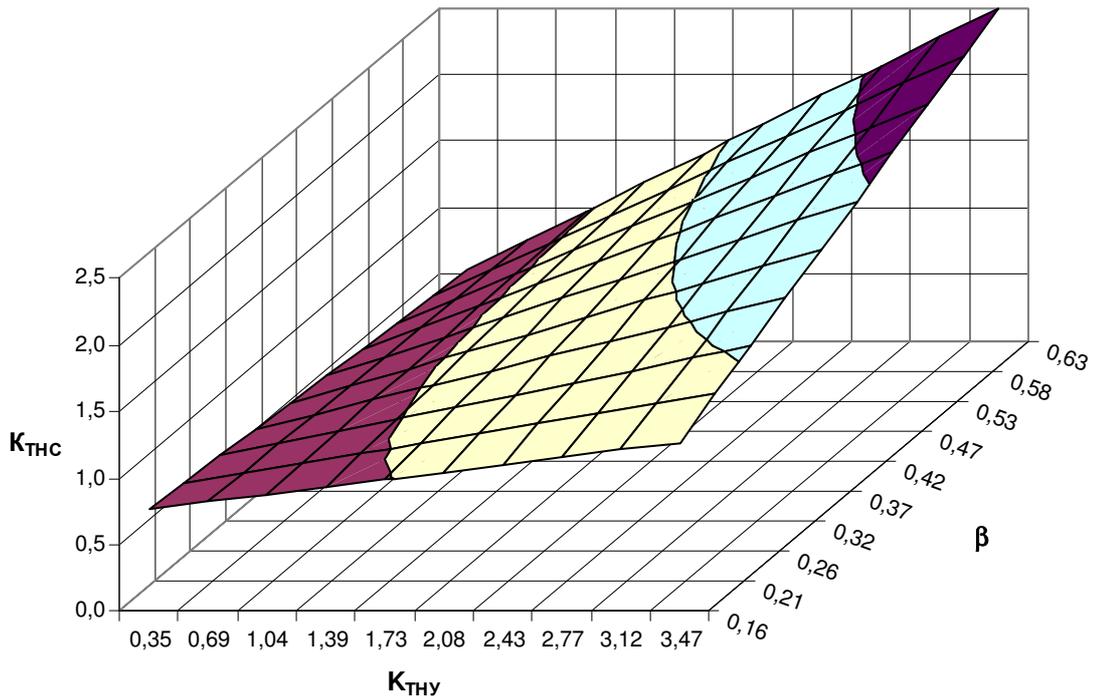


Рис. 11. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ПГУ

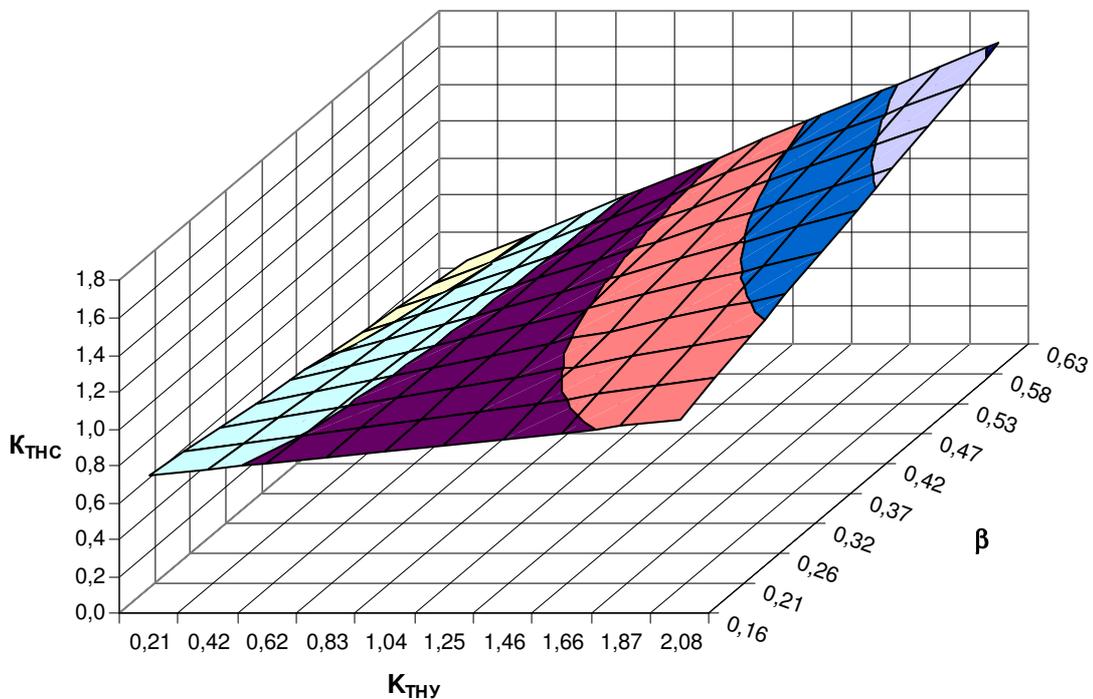


Рис. 12. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с электрическим приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии от ГТУ

Для проведения комплексной оценки энергетической эффективности разных вариантов ТНС с электрическим приводом, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты из исследований [6 – 12].

### Выводы

Предложен подход по комплексному оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных теплонасосных станций с электрическим приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии ТНС, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Разработаны методические основы и проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с электрическим приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Предложенный комплексный подход по оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с электрическим приводом имеет ряд преимуществ:

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных электроприводных ТНС с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- учитывает режимы работы парокompрессионных ТНУ;

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

- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных ТНС с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНС;

- учитывает энергетическую эффективность парокompрессионных ТНС разных уровней мощностей с электрическим приводом;

- учитывает влияние пиковых источников теплоты парокompрессионных ТНС 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 электроприводных ТНС можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида парокompрессионных ТНС;

- предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с разными хладагентами и схемными решениями ТНУ;

- позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов парокompрессионных ТНС с электрическим приводом.

Для проведения комплексной оценки энергетической эффективности разных вариантов ТНС с электрическим приводом, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [6 – 12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореферат дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.03 спец. 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» / А. В. Исанова. – Воронеж, 2011. – 18 с.

2. Денисова А. Є. Аналіз парокompресійного циклу теплонасосних станцій тепlopостачання / А. Є. Денисова. Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

ва., В. Ю. Бірюк // Тр. Одес. политехн. ун-та., 2012. – Вып. 1 (38). – С. 125 – 128.

3. Безродний М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Притула // Вісник ВПІ. – 2013. – № 3. – С. 39 – 45.

4. Ильин Р. А. Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов / Р. А. Ильин, А. К. Ильин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 83 – 87.

5. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... докт. техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.

6. Энергетическая эффективность парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко // Научные труды ВНТУ. – № 4. – 2014. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5563>.

7. Энергетические преимущества применения парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко. // Научные труды ВНТУ. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3976/5777>.

8. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

9. Остапенко О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2011. – № 2. – С. 132 – 139.

10. Энергетический, экологический и экономический аспекты эффективности теплонасосных станций на природных и промышленных источниках теплоты [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, Е. В. Бакум, А. В. Ющишина // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 3. Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3040/4627>.

11. Энергетическая эффективность теплонасосных станций с разными источниками теплоты при переменных режимах работы [Электронный ресурс] / Остапенко О. П., Шевченко О. В., Бакум Е. В. // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 4. Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5067>.

12. Энергоэкологическая эффективность теплонасосных станций на природных и промышленных источниках теплоты при переменных режимах работы [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, И. А. Валигура, А. Д. Коваленко. // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 2. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3033/4606>.

**Остапенко Ольга Павловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, [olgaost@rambler.ru](mailto:olgaost@rambler.ru).

Винницкий национальный технический университет.