

На правах рукописи

Пашка Бямбацогт

**СИСТЕМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ  
КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЭЦ  
С ВНУТРИКВАРТАЛЬНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их  
энергетические системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Ноздренко Геннадий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Секретарев Юрий Анатольевич  
доктор технических наук, с.н.с.  
Огуречников Лев Александрович

Ведущая организация: ЗАО “ЗиО – КОТЭС”, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «23» декабря 2011 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. К.Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «    » ноября 2011 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук

Чичиндаев А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современных условиях теплофикация сохраняет эффективность по сравнению с отдельной выработкой электроэнергии (на КЭС) и тепла (в котельных) как при реконструкции действующих, так и при строительстве новых ТЭЦ.

Развитие ТЭЦ осуществляется по двум направлениям – путем строительства паротурбинных и парогазовых ТЭЦ и путем комбинирования теплофикационных систем на базе схемы последовательного нагрева сетевой воды на ТЭЦ и в местных теплоисточниках (внутриквартальных установках). В качестве таких установок в последнее время используются фреоновые компрессионные внутриквартальные тепловые насосы (КВТН).

Оценка системной эффективности технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с КВТН актуальна.

В диссертации разработанные методические подходы, методики исследования, алгоритмы, оценка системной эффективности комбинированного теплоснабжения используются в качестве практического приложения к Улан-Баторской ТЭЦ-4 энергетики Монголии.

Современное состояние энергетики Монголии характеризуется ростом выработки электроэнергии и тепла, увеличением добычи угля, возрастанием мощностей источников энергии и сетей, интенсивной электрификацией всех отраслей народного хозяйства. Следует отметить, что, несмотря на то, что Монголия располагает топливно-энергетическими ресурсами, достаточными для удовлетворения потребностей народного хозяйства в топливе и энергии, вопрос обеспечения повышения эффективности топливоиспользования является актуальным. Ситуация обострена тем, что жидкое топливо (мазут) является импортируемым сырьем и имеет цену на порядок большую, чем цена угля франко-бункер Улан-Баторской ТЭЦ-4.

Комбинированные системы теплоснабжения на базе пылеугольных ТЭЦ и внутриквартальных тепловых насосов (КВТН) позволяют обеспечить по-

вышение эффективности теплоиспользования и, что немаловажно в современных условиях для Монголии, вытеснить из энергобаланса мазут.

**Целью работы** является исследование эффективности технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами и разработка рекомендаций по выбору схем, параметров и показателей технологии комбинированного теплоснабжения ТЭЦ-КВТН.

**Задачи исследования:**

- Разработка методики оценки эксергетической и технико-экономической эффективности теплофикационных энергоблоков в составе ТЭЦ-КВТН.
- Разработка математической модели функционирования теплофикационных энергоблоков ТЭЦ в комбинированной системе теплоснабжения с КВТН.
- Разработка методики эксергетического анализа и анализ работы КВТН в составе энергоблоков ТЭЦ в комбинированной системе теплоснабжения.
- Оценка технико-экономической эффективности технологии комбинированного теплоснабжения ТЭЦ-КВТН с паротурбинными энергоблоками 50...250 МВт (в том числе – с энергоблоками Улан-Баторской ТЭЦ-4) и парогазовыми энергоблоками 250...500 МВт.
- Разработка рекомендаций по выбору схем, параметров и показателей технологии комбинированного теплоснабжения ТЭЦ-КВТН.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Разработанные с использованием дифференциального подхода методика и математическая модель эксергетического анализа многоцелевых энергоблоков электростанций, функционирующих в системе комбинированного теплоснабжения.

2. Новый технико-экономический КПД и разработанная на основе дифференциального подхода в эксергетическом методе анализа и объедине-

ния технико-экономической и эксергетической методологии методика и математическая модель анализа технико-экономической эффективности теплофикационных энергоблоков с комбинированной системой теплоснабжения и КВТН.

3. Разработанная на базе теории подобия методика и алгоритм для многовариантных компьютерных расчетов термодинамических параметров фреонов и фреоновых циклов КВТН в составе комбинированного теплоснабжения с учетом температурных графиков, графиков тепловых нагрузок и оценкой погрешности расчетов эксергетических и технико-экономических функций цели.

4. Показано на основе исследований, что эксергетический КПД КВТН на различных фреонах составляет более 50%. Обоснована необходимость разработки новых фреоновых компрессоров, так как работа КВТН должна быть согласована с температурным графиком и графиком тепловых нагрузок ТЭЦ, работающей в системе комбинированного энергоснабжения, и с температурным графиком внутриквартальной сетевой воды.

5. На примере эксергетического анализа ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения и фреоновыми КВТН показано, что такие ТЭЦ-КВТН являются термодинамически более эффективными (в 1,5...2,5 раза) по отпуску теплоэксергии по сравнению с традиционными ТЭЦ, что обусловлено относительно низкими значениями (0,1...0,15) эксергетических КПД собственно пиковых водогрейных котлов. Эксергетический КПД ТЭЦ-КВТН с турбинами Т-50...Т-250 находится на уровне 0,12...0,15, с ПГУ-250...500 - 0,18...0,20, а для традиционной системы ТЭЦ-ПВК - 0,05...0,07.

6. Показано, что технико-экономический КПД по отпуску теплоэксергии для ТЭЦ-КВТН в комбинированной системе теплоснабжения составляет 0,03...0,06, что выше практически в два раза эффективности традиционных систем теплоснабжения от ТЭЦ.

7. Выполнены многовариантные расчеты эксергетической и технико-экономической эффективности для Улан-Баторской (УБ) ТЭЦ-4 при перево-

де в режим работы с КВТН в комбинированной системе теплоснабжения и показано, что эксергетическая эффективность УБ ТЭЦ-4 повышается почти в 1,5 раза по сравнению с традиционной схемой теплоснабжения: эксергетический КПД по отпуску теплоэксергии при работе КВТН на R-134А составляет 0,129; экономический критерий эффективности УБ ТЭЦ-4 с КВТН, характеризующий относительную эффективность эксплуатации инвестиций, находится на уровне 1,5; а дисконтированный срок окупаемости (рассчитанный по ЧДД) – менее трех лет.

**Методы исследования:** методология системных исследований в энергетике, математическое и компьютерное моделирование ТЭЦ, методы эксергетического анализа.

**Практическая значимость работы.** Разработанная методика, методический подход, математическая модель, алгоритмы, программы расчета и разработанные рекомендации позволяют получать необходимую информацию для разработки комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами.

В диссертации изложены определяющие принципы при исследовании эффективности ТЭЦ-КВТН. Главным является комплексное рассмотрение комбинированного теплоснабжения как системы, состоящей из основного источника (ТЭЦ), тепловых сетей, КВТН и потребителя.

**Личный вклад автора.** Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены автором.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в Улан-Баторской энергосистеме, на УБ ТЭЦ-4 и в учебном процессе НГТУ.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на конференции; II Всероссийской конференции «ИННОВАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА» (НГТУ, Новосибирск, 2010); Всероссийской научной конференции молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» (НГТУ,

Новосибирск, 2010); Первом международном научно-техническом конгрессе (Красноярск, 2010); IV Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (ТПУ, Томск, 2011), Международной конференции «Knowledge based industry-2011», Монголия, 2011.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них: 1 статья в журнале, входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 – в сборниках научных трудов, 5 – в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 122 страницы основного текста, 27 рисунков, 23 таблицы.

**Достоверность** результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием методики технико-экономических и эксергетических системных исследований, фундаментальных закономерностей технической термодинамики, теплопередачи, использованием фактических режимных и параметрических характеристик энергетического оборудования Улан-Баторской ТЭЦ-4.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, определена научная новизна и практическая ценность работы, аннотируются основные положения работы.

В **первой главе** проведен обзор энергетического хозяйства Монголии и показано, что пылеугольные ТЭЦ являются фактором энергобезопасности страны. Показано, что развитие ТЭЦ может осуществляться как по традиционному направлению, так и путем создания комбинированных теплофикационных систем. Отмечен вклад в развитие теплофикации и централизованного теплоснабжения ряда известных ученых. При этом для комбинированных теплофикационных систем на базе ТЭЦ-КВТН (внутриквартальных тепловых

насосов) к настоящему времени в технической литературе ещё не было уделено достаточного внимания в направлении системных проработок и оценки их эксергетической и технико-экономической эффективности. Сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** разработаны основы методических подходов к исследованию и методик эксергетического анализа комбинированных систем теплоснабжения ТЭЦ-КВТН.

Оценку технико-экономической эффективности функционирования ТЭЦ-КВТН целесообразно определять по общему интегральному эффекту как разность между общим интегральным результатом от производственной деятельности объекта и общими интегральными затратами.

Определяющим технико-экономическим параметром являются среднегодовые затраты  $Z$ , а критерий технико-экономической эффективности имеет вид:

$$\eta_Z = \frac{\sum_{\tau} C_E E}{\sum_{\tau} Z}, \quad (1)$$

где  $C_E$  – получаемая плата за эксергию, в данном  $\tau$ -ом году, руб/(кВт·ч);  $E$  – отпущенная в  $\tau$ -ом году потребителю эксергия (электроэнергия и теплоэксергия), кВт·ч/год.

Очевидно, что критерий эффективности (по сути отражающий интегральный эффект) должен быть больше единицы:  $\eta_Z > 1$ .

Для сравнительного анализа ТЭЦ-КВТН термодинамические свойства фреонов определяются на основе единого методического подхода, сочетающего методики термодинамического подобия, построения уравнений состояния реального газа, термодинамического анализа фреоновых циклов и новой информации о термодинамических свойствах фреонов, что в немалой степени обусловлено необходимостью при математическом моделировании функционирования ТЭЦ-КВТН увязывать расходно-термодинамические параметры процессов с конструктивно-компоновочными параметрами.

За основу принято уравнение состояния реального газа Мартина-Хоу-Алтунина:

$$p = \sum_{i=1}^{n=5} \frac{F_i(T)}{(\nu - b)^i}, \quad (2)$$

где  $F_i(T)$  – коэффициенты уравнения;  $\nu$  – удельный объем;  $b = \frac{\nu_{кр}}{8z_{кр}}$ ;

$z_{кр} = P_{кр} \nu_{кр} / (R \cdot T_{кр})$ ;  $P_{кр}, \nu_{кр}, T_{кр}$  – давление, удельный объем и температура в критической точке;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Эксергетический анализ функционирования ТЭЦ-КВТН алгоритмически включает: нахождение на основе материального баланса массовых частей потоков на входе в систему, из которых образованы выходящие потоки; представление эксергии каждого выходящего из системы потока вещества, а также эксергии соответствующих массовых частей на входе в систему и внутри системы; установление эксергии различных видов энергии на входе, внутри и выходе из системы; определение полезных эффектов (т.е. какие виды эксергии увеличились и какие новые вещества образовались при работе рассматриваемой системы), а также затрат (какие виды эксергии уменьшились и какие вещества превратились в другие); расчёт эксергетического КПД.

При использовании дифференциального подхода в эксергетическом методе анализа и объединения технико-экономической и эксергетической методологии предложен новый технико-экономический КПД и разработана методика и математическая модель анализа технико-экономической эффективности теплофикационных энергоблоков с комбинированной системой теплоснабжения и КВТН.

Предлагаемый подход заключается в следующем. Во-первых, это – условное разбиение комбинированной системы теплоснабжения ТЭЦ-КВТН (работающей по комбинированному термодинамическому циклу, рис.1) на несколько функционирующих частей и представление в виде эксергетической структурной схемы (рис.1).

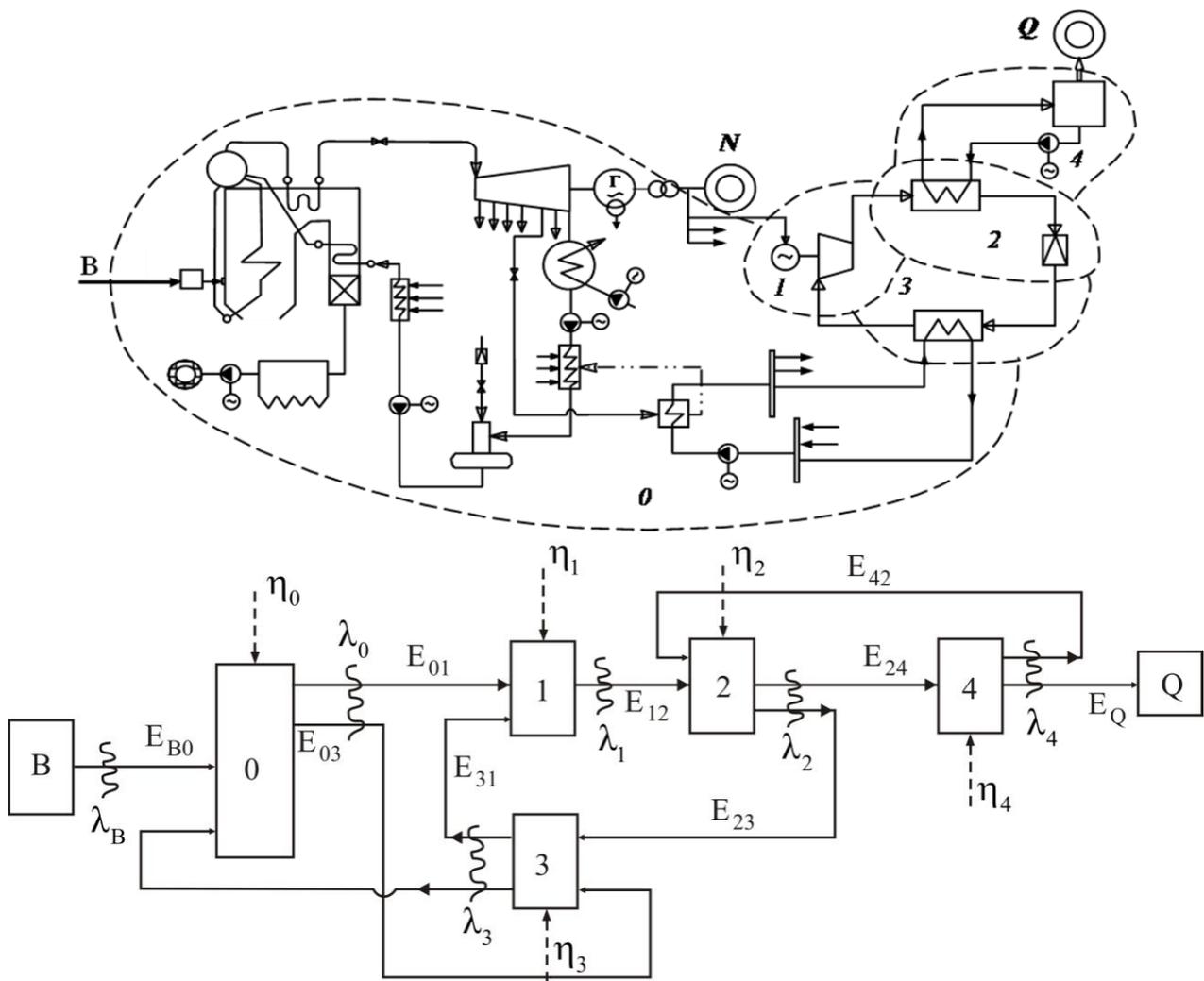


Рис. 1. Принципиальная тепловая и эксергетическая структурная схемы комбинированной системы теплоснабжения ТЭС-КВТН:  
 0, 1, 2, 3, 4 -подсистемы комбинированной системы теплоснабжения;  $Q$  - теплопотребитель;  $E_{ij}$  - эксергетические потоки;  $\lambda_i$  -множители Лагранжа (удельные эксергетические расходы топлива).

Во-вторых – математическое описание (моделирование) функционирования и использование этой модели при расчетах. В-третьих – определение и анализ эксергетических показателей эффективности.

Теплофикационный энергоблок ТЭС с КВТН, соответствующий тепловой схеме на рис.1, работает по комбинированному циклу, представленному на рис.2.

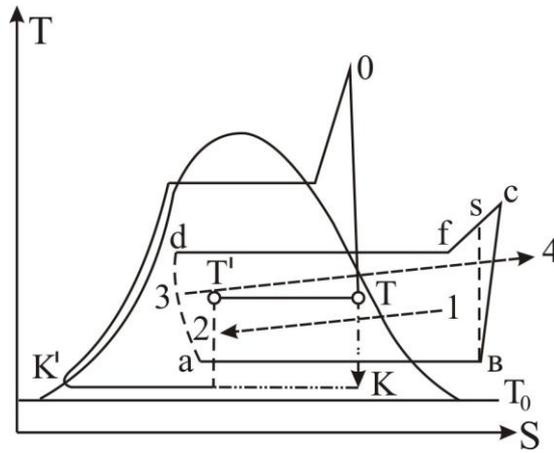


Рис.2. Комбинированный цикл ТЭЦ с КВТН на фреоне R-134А:

а, в, с, d– цикл фреонового КВТН; f, d – конденсация фреона; 3, 4 – подогрев внутриквартальной сетевой воды в конденсаторе КВТН; 0, К, К', 0 – цикл теплофикационного энергоблока; Т, Т' – конденсация пара теплофикационного отбора; 1, 2 – охлаждение стационарной сетевой воды в испарителе фреонового КВТН.

Математическое описание (моделирование) функционирования ТЭЦ-КВТН и определение эксергетических показателей эффективности алгоритмически включают следующие процедуры: формирование уравнений связи в соответствии со структурной схемой при каждом  $\lambda_i$  (рис.1); формирование функции Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 L = & 0,123E_B + \lambda_B(-E_B - E_0\eta_0^{-1}F_{BO}) + \lambda_0(-E_0 + E_1\eta_1^{-1}F_{01} + \\
 & + E_3\eta_3^{-1}F_{03}) + \lambda_1(-E_1 + E_2\eta_2^{-1}F_{12}) + \lambda_2(-E_2 + E_4\eta_4^{-1} + E_3\eta_3^{-1}F_{23}) + \\
 & + \lambda_3(-E_3 + E_0\eta_0^{-1}F_{30} + E_1\eta_1^{-1}F_{31}) + \lambda_4(-E_4 + E_2\eta_2^{-1}F_{42} + E_Q);
 \end{aligned} \quad (3)$$

определение эксергетических потоков через эксергетическую производительность функционирующих частей (с учетом эксергетических КПД функционирующих частей  $\eta_i$ ); формирование системы уравнений:

$$\frac{\partial L}{\partial E_i} = 0 \quad \forall i=0, 1, \dots, 5; \quad (4)$$

решение системы уравнений и определение эксергетического КПД комбинированной системы теплоснабжения ТЭЦ-КВТН по отпуску теплоэксергии:

$$\eta_Q = \frac{\lambda_B}{\lambda_4} = \eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_4 \varepsilon_S, \quad (5)$$

где эксергетический структурный коэффициент  $\varepsilon_S = \frac{1}{F_{BO} F_{12}} \left( 1 - \frac{F_{30}}{\eta_0 \eta_3} \right) \left( 1 - \frac{F_{42}}{\eta_2 \eta_4} \right)$ .

Технико-экономическая эффективность ТЭЦ-КВТН по сравнению с (5) учитывает  $\Pi_T$  – цену условного топлива ТЭЦ, руб/т у.т.,  $Z_i$  – затраты в подсистеме, руб/год, и определяется как

$$\Omega_Q = \frac{\lambda_B}{\lambda_4} = \eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_\Omega, \quad (6)$$

где эксерго-экономический коэффициент

$$\varepsilon_\Omega = \frac{1}{\frac{\eta_4}{F_{12}} + \frac{1}{0.123 \cdot \Pi_T \cdot 10^{-3} + Z'_B} \left\{ \frac{\eta_0 \eta_4}{F_{BO} F_{12}} \left[ Z'_0 + Z'_1 \eta_1 \left( 1 - \frac{F_{30}}{\eta_0 \eta_3} \right) + \frac{F_{30}}{\eta_0} Z'_3 \right] + \right.}; \quad (7)$$

$$\left. + \eta_0 \eta_1 \eta_4 \varepsilon_S \left[ Z'_2 + Z'_4 \left( \frac{F_{42}}{\eta_2} + \eta_4 \right) \right] \right\}}$$

коэффициенты относительных приростов затрат в подсистеме

$$Z'_1 = k_1 \frac{1}{\tau_{КВТН}} \sigma_K; \quad Z'_2 = k_2 \frac{1}{\tau_{КВТН}} \sigma_K; \quad (8)$$

$$Z'_3 = k_3 \frac{1}{\tau_{КВТН}} \sigma_K; \quad Z'_4 = k_4 \frac{1}{\tau_{КВТН}} \sigma_K;$$

$k_1, k_2 = k_3, k_4$  – удельные капиталовложения в компрессорную, конденсаторную, испарительную часть и тепловой центральный пункт, руб/кВт;  $\tau_{КВТН}$  – число часов использования установленной эксергетической мощности КВТН, ч/год;  $\sigma_K$  – отчисления от капиталовложений, 1/год.

В третьей главе выполнен эксергетический анализ ТЭЦ-КВТН на основе результатов многовариантных расчетов.

Каждая серия расчетов включала: многовариантные расчеты при заранее заданных сочетаниях значений параметров ТЭЦ-КВТН; вариации значений исследуемых параметров в технически допустимых пределах при заданных

значениях остальных параметров; многовариантные сравнительные расчеты эксергетических потерь в КВТН на фреонах R-134A, R-12, R-12B2, R-31-10.

Указанный объем разнохарактерных расчетов позволил более подробно учесть инженерную специфику сравниваемых вариантов, определить основные закономерности влияния параметров на эффективность ТЭЦ-КВТН и оценить ее снижение для различных изменений параметров по тем или иным инженерным соображениям.

Эксергетические потери  $\Delta E$  и потоки эксергии  $E_{ij}$  в КВТН на фреоне в составе комбинированной системы теплоснабжения показаны на рис.3.

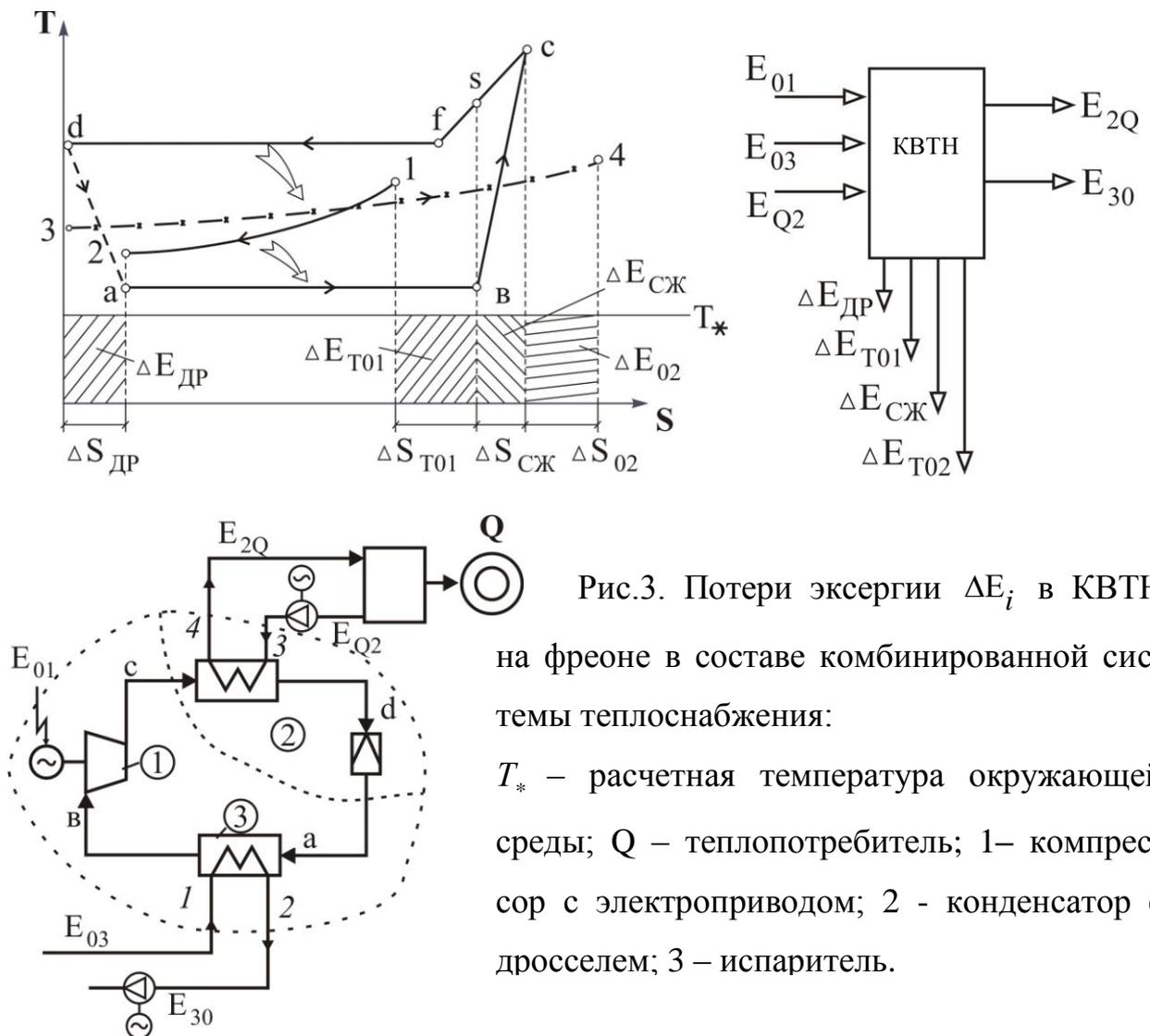


Рис.3. Потери эксергии  $\Delta E_i$  в КВТН на фреоне в составе комбинированной системы теплоснабжения:

$T_*$  – расчетная температура окружающей среды; Q – теплопотребитель; 1– компрессор с электроприводом; 2 - конденсатор с дросселем; 3 – испаритель.

Для каждого расчетного варианта выполнены с совместной увязкой: расчеты тепловых схем теплофикационных энергоблоков ТЭЦ и КВТН, расчет теплофикационной нагрузки для комбинированной системы теплоснаб-

жения с КВТН, расчет расходно-термодинамических и конструктивных параметров КВТН, стоимостные расчеты ТЭЦ-КВТН. Основные расчеты были выполнены для мощностного ряда теплофикационных энергоблоков с турбинами типа Т-50/60, Т-110/120, Т-175/210, Т-180/210, Т-250/300.

Выполнена оценка погрешности расчетов и показано, что поскольку отдельные погрешности являются независимыми и носят случайный характер, возникает эффект их взаимной компенсации, что обуславливает результирующую погрешность расчета эксергетических и технико-экономических функций цели на уровне 0,1%.

На рис.4 приведены эксергетические КПД по отпуску теплоэксергии для комбинированных систем теплоснабжения с КВТН на фреонах R-134А и R-12В2 и традиционных систем теплоснабжения ТЭЦ-ПВК.

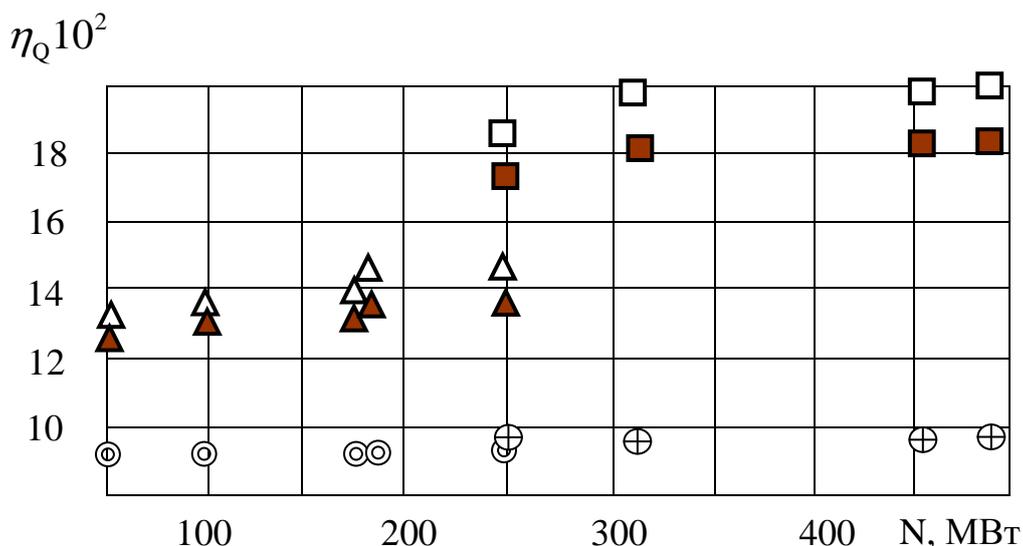


Рис.4. Эксергетические КПД по отпуску теплоэксергии:

паротурбинная и парогазовая (бинарная) ТЭЦ с КВТН на фреонах R-134А, R-12В2, соответственно,  $\Delta$ ,  $\square$  и  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ; традиционная паротурбинная и парогазовая ТЭЦ с пиковым водогрейным котлом (ПВК), соответственно  $\odot$ ,  $\oplus$ ; N – мощность энергоблоков ТЭЦ.

Из рисунка видно, что эксергетические КПД по отпуску теплоэксергии для комбинированных систем теплоснабжения с КВТН на базе паротурбинных ТЭЦ примерно в два раза, а на базе парогазовых ТЭЦ почти в три раза выше, чем для традиционных систем ТЭЦ-ПВК. Вместе с тем можно отме-

туть, что в комбинированных системах теплоснабжения функционирование КВТН на фреоне R-134A эффективнее, чем на R-12.

При сравнении ТЭЦ-КВТН с традиционной схемой энергоснабжения (ТЭЦ-ПВК) приняты температуры прямой и обратной сетевой воды по температурному графику  $T_{пс1} = 360$  К,  $T_{пс2} = 383$  К,  $T_{ос} = 320$  К (при средней расчетной температуре окружающего воздуха –  $16^{\circ}\text{C}$  для работы ПВК), температура у потребителя  $T_Q = 353$  К, расчетная температура окружающей среды  $T_* = 310$  К, равная температуре конденсации в конденсаторах энергоблоков ТЭЦ, КПД ПВК (по энергобалансу котла)  $\eta_{пвк}=0,85$ ; в соответствии с температурными графиками и продолжительностью стояния температур число часов использования установленной эксергетической мощности ПВК составило  $\tau_{пвк} = 1400$  ч/год;  $k_1 = 4 \cdot 10^3$  руб/кВт,  $k_2 = 3 \cdot 10^3$  руб/кВт;  $Z'_1 = k_1 \frac{1}{\tau_{пвк}} \sigma_K$ ;  $Z'_2 = k_2 \frac{1}{\tau_{пвк}} \sigma_K$ .

На рис. 5 приведены значения эксерго-экономических КПД для комбинированных систем теплоснабжения с КВТН на фреонах R-134A и R-12B2 и традиционных систем теплоснабжения ТЭЦ-ПВК.

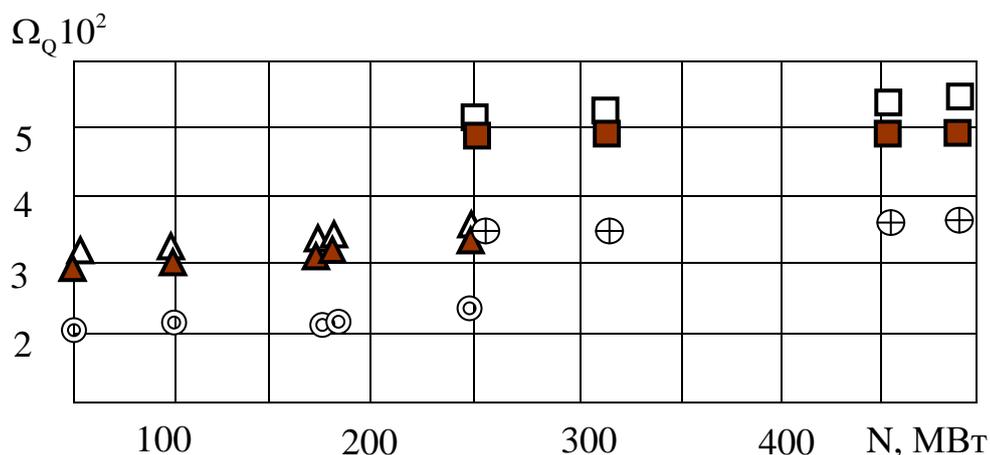


Рис. 5. Эксерго-экономические КПД по отпуску теплоэксергии для комбинированных систем теплоснабжения с КВТН: паротурбинная и парогазовая (бинарная) ТЭЦ с КВТН на фреонах R-134A, R-12B2, соответственно, ▲, □ и ▲, ■; традиционная паротурбинная и парогазовая ТЭЦ с пиковым водогрейным котлом (ПВК), соответственно, ⊙, ⊕.

Из этих данных видно, что комбинированная система ТЭЦ-КВТН в 1,5...2,0 раза эффективнее традиционных ТЭЦ-ПВК. Эксергетический КПД  $\eta_Q$  для комбинированной системы ТЭЦ-КВТН с теплофикационными паротурбинными энергоблоками на базе турбин Т-50...Т-175 находятся на уровне 0,12...0,14, а для традиционной системы ТЭЦ-ПВК 0,05...0,07. Для ТЭЦ-КВТН с энергоблоками на базе турбин Т-180, Т-250 введение промперегрева и закритических параметров пара приводит к увеличению  $\eta_Q$  до 0,15, а переход к бинарным парогазовым энергоблокам в системе ТЭЦ-КВТН позволяет получить  $\eta_Q = 0,18...0,20$ .

На рис.6 приведены значения эксергетического технико-экономического КПД при изменении цены условного топлива.

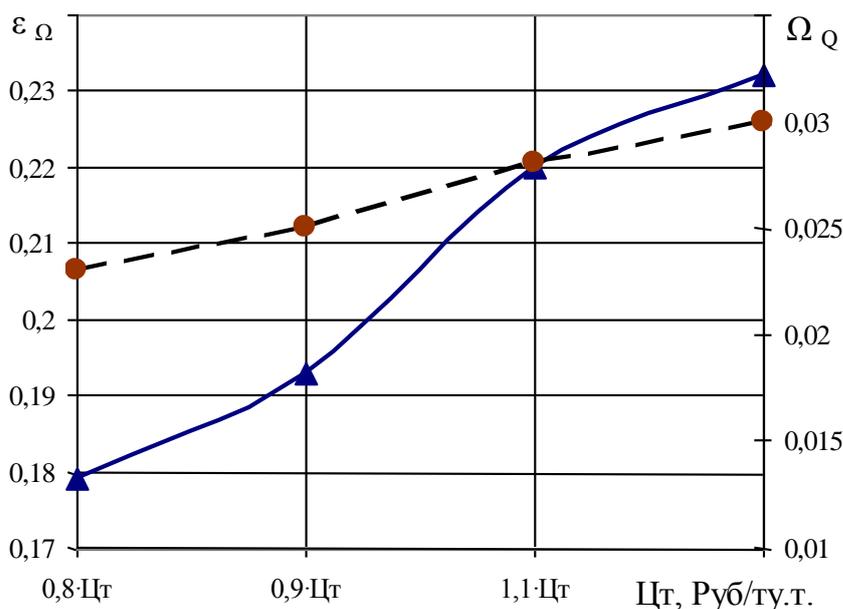


Рис.6. Эксергетический технико-экономический КПД по отпуску теплоэксергии на паротурбинной ТЭЦ с КВТН на фреоне R-134A при изменении цены топлива:  $\varepsilon_{\Omega}$  - ▲;  $\Omega_Q$  - ●.

Из рисунка видно, что комбинированная система теплоснабжения на базе ТЭЦ с КВТН является перспективной технологией и при повышении стоимости топлива.

В четвертой главе основная часть расчётов выполнена для ТЭЦ–540 (8 котлов Е-420-140, 3 турбины ПТ-80 и 3 турбины Т-100) УБ ТЭЦ-4, входящей в Центральную (Улан-Баторскую) энергосистему. Для эквивалентных энергоблоков с турбинами ПТ-80-130 и с Т-110-130 УБ ТЭЦ-4 выполнен расчет эксергетической эффективности по отпуску электроэнергии и теплоэнергии для УБ ТЭЦ-4 и показано, что соответствующие эксергетические КПД эквивалентных энергоблоков составили: для турбин Т-110-130: 0,34 и 0,22; для турбин ПТ-80-130 при отключенном П-отборе: 0,34 и 0,22, при включенном П-отборе: 0,41 и 0,38.

В табл. 1 приведены результаты расчетов  $\eta_1, \dots, \eta_4$  и  $\eta_Q$  – эксергетической эффективности УБ ТЭЦ-4. Из таблицы видно, что эксергетическая эффективность комбинированной системы теплоснабжения на базе УБ ТЭЦ  $\eta_Q = 0,129$ , то есть почти в два раза больше, чем для традиционной системы теплоснабжения с пиковыми водогрейными котлами.

Таблица 1

Результаты расчетов эксергетической эффективности УБ ТЭЦ-4

$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$F_{12}$	$F_{BO}$	$F_{30}$	$F_{42}$	$\varepsilon_s$	$\eta_Q$
0,991	0,877	0,869	0,956	0,785	0,932	0,068	0,215	0,45	0,129

По аналогии с эксергетической эффективностью предложено оценивать технико-экономическую эффективность УБ ТЭЦ-КВТН.

На основе многовариантных расчетов определено:  $Z'_B = 0,03$  руб/кВт·ч;  $C_T = 1500$  руб/т у.т.;  $Z'_O = 1,23$  руб/кВт·ч (для ПТ-80-130),  $Z'_O = 1,18$  руб/кВт·ч (для турбин Т-110-130). Результаты расчетов приведены в табл.2.

Таблица 2

Эксергетический технико-экономический КПД УБ ТЭЦ-4-КВТН

тип фреона	$\varepsilon_s$	$\eta_Q$	$\varepsilon_Q$	$\Omega_Q$
R-31-10	0,552	0,123	0,206	0,025
R-134A	0,45	0,129	0,207	0,027

Рассчитанное значение экономического критерия эффективности для УБ ТЭЦ-4 с КВТН на R-134A при  $C_E = 1,8$  руб/кВт·ч,  $Z'_o = 1,23$  руб/кВт·ч (для турбин ПТ-80-130),  $Z'_o = 1,18$  руб/кВт·ч (для турбин Т-110-130) и среднегодовой эксергетической производительности 3600 млн. кВт·ч/год

$$\eta_Z = \frac{\sum_{\tau} C_E E}{\sum_{\tau} Z} = 1,5 > 1 \quad (9)$$

и характеризует относительную эффективность эксплуатации инвестиций, а  $\sum_{\tau} C_E E$  и  $Z$  определяются как значения составляющих интегрального эффекта за весь срок жизни  $\tau$ , где  $E$  – отпуск эксергии в  $\tau$ -й год, кВт·ч/год (электроэнергии 3000 млн. кВт·ч/год и теплоэксергии 600 млн. кВт·ч/год).

Значения ЧДД вычислены по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{\tau=1}^{15} \frac{C_E E_{\tau} - C_N N_{\tau}^{\text{КВТН}}}{(1 + E_H)^{\tau}} - \sum_t^2 \frac{K_{\text{КВТН}}}{(1 + E_H)^t} \quad (10)$$

Здесь:  $C_E = 1,8$  руб/кВт·ч – цена продажи теплоэксергии от ТЭЦ-КВТН;  $C_N = 1,5$  руб/кВт·ч – цена эксплуатационных издержек, отнесенных к потребляемой КВТН электроэнергии как электроэнергии на собственные нужды системы ТЭЦ-КВТН;  $E_T = 600$  млн. кВт·ч/год – годовой отпуск теплоэксергии;  $N_{\tau}^{\text{КВТН}} = 230$  млн. кВт·ч/год – годовое потребление электроэнергии КВТН;  $K_{\text{КВТН}} = 1500$  млн. руб – капиталовложения в КВТН (при удельных капиталовложениях 13000 руб/кВт, рассчитанных по удельным капиталовложениям в функционирующие части КВТН:  $k_1 = 8 \cdot 10^3$  руб/кВт,  $k_2 = k_3 = 6 \cdot 10^3$  руб/кВт,  $k_4 = 3 \cdot 10^3$  руб/кВт (см.гл.3));  $E_H = 0,1$  – ставка дисконтирования;  $\tau = 2$  годам (сроку освоения капиталовложений при вводе КВТН в комбинированную систему теплоснабжения);  $\tau = 15$  годам (остаточному сроку наработки на ресурс энергоблоков УБ ТЭЦ-4).

Значения ЧДД, млн. руб, по годам  $\tau = 1, 2, 3$ , соответственно: -13,8; -12,8; +552.

Таким образом, перевод УБ ТЭЦ-4 в режим комбинированного теплоснабжения с КВТН на фреоне R-134A является эффективным: дисконтированный срок окупаемости проекта составляет менее трех лет.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, содержится решение задачи системной эффективности технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами, имеющей существенное значение для теплоэнергетики (и в частности, для монгольской энергетики).

1. Разработана с использованием дифференциального подхода методика и математическая модель эксергетического анализа многоцелевых энергоблоков электростанций, функционирующих в системе комбинированного теплоснабжения.

2. При использовании дифференциального подхода в эксергетическом методе анализа и объединения технико-экономической и эксергетической методологии предложен новый технико-экономический КПД и разработана методика и математическая модель анализа технико-экономической эффективности теплофикационных энергоблоков с комбинированной системой теплоснабжения и КВТН.

3. Разработана на базе теории подобия методика и алгоритм для многовариантных компьютерных расчетов термодинамических параметров фреонов и фреоновых циклов КВТН в составе комбинированного теплоснабжения с учетом температурных графиков и графиков тепловых нагрузок. Выполнена оценка погрешности расчетов и показано, что поскольку отдельные погрешности являются независимыми и носят случайный характер, возникает эффект их взаимной компенсации, что обуславливает результирующую погрешность расчета эксергетических и технико-экономических функций цели на уровне 0,1% .

4. Выполнен эксергетический анализ циклов КВТН в составе комбинированного теплоснабжения и показано, что эксергетический КПД КВТН на различных фреонах составляет более 50%. Обоснована необходимость разработки новых фреоновых компрессоров, так как работа КВТН должна быть согласована с температурным графиком и графиком тепловых нагрузок ТЭЦ, работающей в системе комбинированного энергоснабжения, и с температурным графиком внутриквартальной сетевой воды.

5. На примере эксергетического анализа ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения и фреоновыми КВТН показано, что такие ТЭЦ-КВТН являются термодинамически более эффективными (в 1,5...2,5 раза) по отпуску теплоэксергии по сравнению с традиционными ТЭЦ, что обусловлено относительно низкими значениями (0,1...0,15) эксергетических КПД собственно пиковых водогрейных котлов. Эксергетический КПД ТЭЦ-КВТН с турбинами Т-50...Т-250 находится на уровне 0,12...0,15, с ПГУ-250...500 - 0,18...0,20, а для традиционной системы ТЭЦ-ПВК - 0,05...0,07.

6. Показано, что технико-экономический КПД по отпуску теплоэксергии для ТЭЦ-КВТН в комбинированной системе теплоснабжения составляет 0,03...0,06, что выше практически в два раза эффективности традиционных систем теплоснабжения от ТЭЦ.

7. Выполнены многовариантные расчеты эксергетической и технико-экономической эффективности для УБ ТЭЦ-4 при переводе в режим работы с КВТН в комбинированной системе теплоснабжения и показано, что эксергетическая эффективность УБ ТЭЦ-4 повышается почти в 1,5 раза по сравнению с традиционной схемой теплоснабжения: эксергетический КПД по отпуску теплоэксергии при работе КВТН на R-134A составляет 0,129, экономический критерий эффективности УБ ТЭЦ-4 с КВТН, характеризующий относительную эффективность эксплуатации инвестиций, находится на уровне 1,5, а дисконтированный срок окупаемости (рассчитанный по ЧДД) – менее трех лет.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ноздренко Г.В., Григорьева О.К., Пашка Бямбацогт. Эксергетический анализ и эффективность комбинированной системы теплоснабжения с термотрансформаторами на фреоне // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. / под ред. Акад. РАН В. Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Вып. 15. С. 102–108.
2. Ноздренко Г.В., Григорьева О.К., Пашка Бямбацогт. Эксергетический анализ систем комбинированного теплоснабжения с термотрансформаторами на низкокипящих веществах и новыми циклами // Энергетика в глобальном мире: первого международный научно–технический конгресс. Красноярск, 2010. Ч. 3. С. 108–109.
3. Эффективность ТЭЦ с газосетевым подогревателем и комбинированной системой теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами / Бямбацогт Пашка [и др.]. // Научный вестник НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. № 1(42). С. 181–186.  
*(журнал, рекомендованный ВАК).*
4. Эффективность парогазовой ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения и фреоновыми трансформаторами / Пашка Бямбацогт [и др.]. // Инновационная энергетика: материалы второй научно-практической конференции с международным участием: Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. С. 73–75.
5. Пашка Бямбацогт. ДЦС-тай хослон ажиллах дулааны эх үүсгүүр түүний үр ашгийн эксергийн шинжилгээ // эрчим хүч & engineering. Улаанбаатар: МУШУТИС, 2010. № 10. С. 42–44. [Эффективность комбинированного теплоснабжения ТЭЦ с КВТН].
6. Пашка Бямбацогт. Эффективность комбинированных систем теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами // Наука. Технологии. Инновации: материалы докладов всероссийской научной конференции молодых ученых: в 4 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Ч. 2. С. 23–25.
7. Эксергетический анализ ТЭЦ с ГСП и комбинированной системой тепло-

снабжения с фреоновыми термотрансформаторами / Бямбацогт Пашка [и др.]. // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. / под ред. Акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. Вып. 16. С. 108–118.

8. Пашка Бямбацогт. Системная эффективность комбинированного теплоснабжения на ТЭЦ с КВТН // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов, IV Всероссийская научно - практическая конференция. Томск, 2011. С. 189–194.

9. Pashka Vyambatsogt, Nozdrenko G.V. Efficiency of exergy method in combined system of heat supply thermal power station with district heat pump // international conference. Knowledge based industry-2011. Ulan Bator, Mongolia, 2011. P. 483–487. [Эффективность эксергетических методов комбинированного теплоснабжения на ТЭЦ с КВТН].

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс (383) 346-08-57  
формат 60 X 84/16 объем 1,5 п.л. тираж 90 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_ подписано в печать 17.11.11 г.