

УДК 658.264:621.577 (Технические науки)

UDC 658.264:621.577

**АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С
ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ТОЧКИ
ЗРЕНИЯ**

**ANALYSIS OF SOLAR HEAT-PUMP
EXERGIC ECONOMIC POINT OF VIEW**

Кириченко Анна Сергеевна, аспирант
energyksau@mail.ru
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Kiricenko Anna Sergeevna, postgraduate,
energyksau@mail.ru
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье рассматривается универсальность эксергетического метода, позволяющего оценивать запасы и потери всех видов энергии, входящих в баланс любой энерготехнологической системы при посредстве единого критерия эффективности.

The versatility of exergic method allowing to value stocks and losses of all types of energy including into balance of any energetic-technological system by means of single criteria of efficiency is considered in the article

Ключевые слова: ЭКСЕРГИЯ,
ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД,
ОПТИМИЗАЦИЯ, КРИТЕРИЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ, ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ КПД,
СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ УСТАНОВКА,
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Keywords: EXERGIA, EXERGETIC ECONOMIC
METHOD, OPTIMIZATION, EFFECTIVENESS
CRITERION, EXERGETIC CE, SOLAR HEAT
PUMPING INSTALLATION, ENERGETIC
SYSTEM

Цель данной статьи - показать эффективность эксергоэкономического анализа энергетической системы на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Для достижения данной цели была поставлена задача: провести эксергоэкономический анализ энергетической системы – солнечно-теплонасосной системы, показав ее сильные и слабые стороны.

Актуальным веянием в энергетике, теплотехнике и теплотехнологии, химической технологии и ряде других областей является новый метод термодинамического анализа – эксергетический. [1-3]

Для эксергетического метода учитывается не только количество, но и качество потоков эксергии, входящих в энергетический баланс любой энерготехнологической системы, что ставит этот метод на первое место по своей объективности по сравнению с ранее применявшимися методами термодинамического анализа.

Используя метод математического моделирования к решению задачи анализа и оптимизации можно получить эксергетический баланс наиболее сложной гелиоустановки – солнечно-теплонасосной системы с сезонными аккумуляторами (СТНССА), для которой характерно большое количество внутренних и внешних связей.

В солнечно-теплонасосных системах с сезонным аккумулярованием в качестве источника энергии совместно с солнцем во многих случаях выступает электроэнергия, поэтому объективная термодинамическая оценка таких систем представляется крайне важной.

Универсальность эксергетического метода связана с тем, что использование эксергии как критерия эффективности позволяет оценивать запасы и потоки энергии всех видов, входящих в баланс любой энерготехнологической системы, посредством единого критерия эффективности. Этому методу присуща также простота и наглядность способов анализа и расчета.

Связь между эксергетическими и технико-экономическими характеристиками систем является весьма важной особенностью эксергетического метода. Экономические исследования на базе эксергии охватывают широкий круг вопросов от установки тарифов на энергию до цен на машины и механизмы. Данный метод, в отличие от технико-экономического, получил название термоэкономического.

Эксергоэкономический метод оптимизации получил развитие и признание в последней четверти XX века. Данный метод позволяет дать как энергетическую, так и экономическую оценку рассматриваемых систем в их взаимозависимости [4-6].

Для эксергоэкономики характерна специфическая терминология. [2,7]

Под топливом понимается любой эксергетический поток, входящий в компонент.

Продукт — поток, который направляется из рассматриваемого компонента, в следующий, для которого он будет являться топливом.

Деструкция энергии — дополнительная имеющаяся работа (полученная или затраченная) для производства дополнительного эффекта по сравнению с теоретическим.

Потери эксергии — определяются по условиям взаимодействия компонента (системы) с окружающей средой.

Использование эксергии, в ее связи с экономикой, позволяет осуществить выбор критерия эффективности при оценке и оптимизации СТНССА [5-7].

Использование эксергии и эксергетических функций (потерь эксергии, эксергетических КПД, степени термодинамического совершенства) позволяет создать единую теорию обобщенных методов математического моделирования в задачах синтеза и оптимизации СТНССА. [2]

Уравнения эксергетического баланса выражают принципы убывания эксергии изолированной системы при протекании в ней необратимых процессов и основаны на совместном использовании первого и второго законов термодинамики.

Процесс оптимизация любой энерготехнологической системы означает выбор структуры и параметров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих ресурсных и технических ограничениях, обеспечение защиты окружающей среды, создание условий эксплуатационной надежности и уменьшения стоимости ремонта [8,9]. При общей постановке задача оптимизации решается следующим образом [10,11], рассмотрим следующую энергетическую систему, которая состоит из n элементов различных m параметров. Система однородна и расположена линейно. Задача оптимизации заключается в таком распределении греющих потоков $C=(C_1+C_2+\dots+C_n)$,

чтобы суммарные термознергетические затраты в системе были минимальными:

$$\sum Z_i = \sum_{\Sigma}^{\min}, \quad (1)$$

где Z_i — термозлектрические затраты на i -м компоненте системы.

При этом множество возможных термозлектрических затрат в системе [2,7]

$$Z\{Zi_p^{(p)}\}, p=1, 2, \dots, k; i_p = 1, 2, \dots, [n - (p - 1)], \quad (2)$$

Множество $Z\{Zi_p^{(p)}\}$ можно разбить на k подмножеств. На каждом промежуточном этапе p необходимо выбрать такой поток C_i для которого:

$$Zi_p^{(p)} \in Z\{Zi_p^{(p)}\}. \quad (3)$$

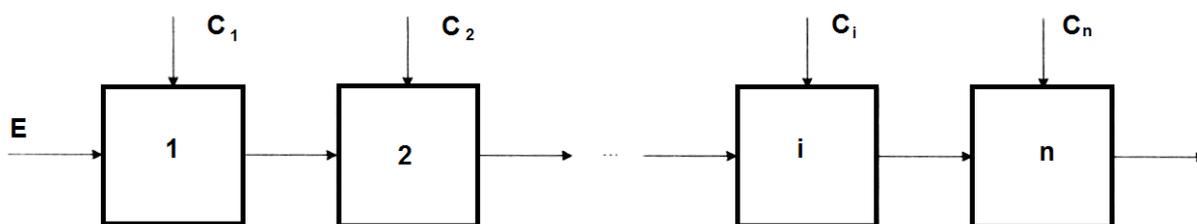


Рис. 1. Линейная энергетическая схема

Для выполнения условий оптимизации необходимо найти такой путь потоков совместимости

$$\bar{C} = (C_0^{(0)}, C_1^{(1)}, \dots, C_p^{(p)}, C_{[n-(p-1)]}^{(k)}), \quad (4)$$

для которого

$$Zi_p^{(p)} = Z_{\min}^{(p)}; i_p = 1, 2, \dots, [n - (p - 1)], \quad (5)$$

где $Z_{\min}^{(p)}$ — минимальные термознергетические затраты для этапа p .

Для нахождения оптимального варианта используется алгоритм Беллмана—Калаба, в основу которого положен анализ матриц смежности.

Эксергетическая оценка проводится на уровне компонентов системы, с использованием следующих критериев для K -компонента:

$E_{D.K.}$ — абсолютная деструкция эксергии

$$E_{D.K.} = E_{F.K} - E_{P.K} - E_{L.K}; \quad (6)$$

ϵ_K — эксергетическая эффективность

$$\epsilon_K = \frac{E_{P.K}}{E_{F.K}} = 1 - \frac{E_{D.K.} - E_{L.K.}}{E_{F.K}}; \quad (7)$$

y_K — относительная деструкция эксергии

$$y_{DK} = \frac{E_{D.K.}}{E_{F.tot}}. \quad (8)$$

Критерии эксергоэкономического анализа:

цена эксергии топлива:

$$C_{F.K} = \frac{C_{F.K}}{E_{F.K}}; \quad (9)$$

цена эксергии продукта

$$C_{P.K} = \frac{C_{P.K}}{E_{P.K}}; \quad (10)$$

цена, связанная с деструкцией эксергии

$$C_{D.K} = C_{F.K} \cdot E_{D.K.}; \quad (11)$$

цена связанная с потерями эксергии

$$C_{L.K} = C_{F.K} \cdot E_{L.K.}; \quad (12)$$

цена капитальных затрат Z_K^{Cl} ;

цена эксплуатации и обслуживания Z^{OM} ;

сумма двух последних составляющих Z_K :

$$Z_K = Z_K^{Cl} + Z_K^{OM}; \quad (13)$$

относительная разница цен

$$r_k = \frac{C_{P.K} - C_{F.K}}{C_{F.K}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{z_k}{C_{F.K} E_{P.K}}; \quad (14)$$

эксергоэкономический фактор

$$f_k = \frac{z_k}{z_k + C_{F.K}(E_{D.K} + E_{L.K})}. \quad (15)$$

Значение $C_{F.K}$ зависит от относительного положения компонента системы и его взаимосвязи с предыдущими и последующими компонентами.

Когда соответствующие функции цены установлены, цена оптимальной энергетической эффективности ε_K^{OPT} для k -го компонента приблизительно определяется как

$$\varepsilon_K^{OPT} = \frac{1}{1 + F_k}, \quad (16)$$

при

$$F_k = \left(\frac{(\beta + y_k) B_k n_k}{\tau C_{F.K} E_{P,k}^{1-m_k}} \right)^{\frac{1}{n_k+1}}, \quad (17)$$

где β — фактор восстановления капитала; y_K — коэффициент, учитывающий фиксированную часть эксплуатационных затрат и затрат на обслуживание, которые зависят от капитальных инвестиций, ассоциированных с K -м компонентом; B_F , n_K и m_K — постоянные, которые используются для определения функций ε_K и $E_{P.K}$, τ — среднее

годовое время эксплуатации системы при номинальной производительности.

Эксергоэкономический анализ и оценка указывают и сравнивают реальные источники стоимости в системе, определяют оптимальную стоимость, по которой проходит каждый поток продукта.

Стоимость эксплуатации энергопреобразующей системы логически определяется, д.е. / кВт,

$$Z = Z^{Cl} = Z^{fuel} + Z^{OM}, \quad (18)$$

Экономическая модель настоящей эксергопреобразующей системы представляет общее решение системы уравнений:

капитальные (инвестиционные) затраты системы, д.е. / кВт,

$$Z^{Cl} = a\bar{a} \frac{1}{t_A}; \quad (19)$$

для каждого элемента системы:

$$Z^{Cl} = a_K x_K^n (1-b) \frac{y}{N_k}; \quad (20)$$

затраты на начальную энергию для функционирования системы, д.е./кВт,

$$Z^{fuel} = w c_F; \quad (21)$$

стоимость эксплуатации и обслуживания, д.е. / кВт,

$$Z^{OM} = b \frac{1}{t_A} + d; \quad (22)$$

амортизационные отчисления, д.е./кВт,

$$a = \frac{q^n (1-q)}{q^{n-1}} \left(1 + \frac{i+r}{100} \frac{CP}{2} \right); \quad (23)$$

коэффициент дисконтирования

$$q^{-1} = \left(1 + \frac{i+t+v}{100} \right)^{-1}. \quad (24)$$

В формулах 5 — 24 приняты обозначения:

C_F , — стоимость топлива, (д.е/кВт); $\bar{\alpha}$ — инвестиционная стоимость (д.е/кВт); d — затраты на ремонт и обслуживание, которые зависят от поколения используемой техники (д.е/кВт); b — затраты на ремонт, которые зависят от установленной мощности (д.е/кВт); i — банковский процент инвестиционных затрат на создание системы (% /год); r — инфляционный коэффициент (%/год); n — срок службы объекта (год) ; CP — время создания объекта (год) ; t_A — годовые налоги (% / год); v — годовое страхование (% / год); x — характеристика к-элемента, a — цена единицы оборудования; n и y — показатели функции; N — срок эксплуатации.

В общем случае эксергоэкономический критерий оптимизации имеет вид:

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum C_n E_n + \bar{K}_n}{\sum_K E_K}, \quad (25)$$

где C_n , E_n — стоимость и годовое потребление эксергии из внешних источников; \bar{K}_n — годовые капитальные и связанные с ними затраты в n -ных элементах системы; E_K — годовые затраты эксергии для получения K -го продукта.

Целью комплексной системы оптимизации является выбор значений таких параметров системы (технологических, конструктивных и т. д.), которые обеспечили бы оптимальные или близкие к оптимальным значения критерия эффективности:

$$Z_{\text{опт}} = \text{extr}\{Z(x_j)\}, x_j \in R_n, \quad (26)$$

где R_n — n -мерное действительное векторное пространство.

Эксергоэкономический подход так же позволяет решить проблему, относящуюся к термотрансформаторам, а именно экологическую проблему. С точки зрения эксергии экологическое влияние — это работа, которая выполняется системой в окружающей среде.

Всю эксергию, которая вводится в уже построенную систему, принято называть эксергией топлива (не связано с разработкой оборудования).

$$E = \int_0^{\tau} E \exp(-\lambda\tau) d\tau \approx E[1 - \exp(-\lambda\tau_e)] = E(\tau_e) = E(\tau_e) \frac{\tau_\lambda}{\tau_e} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_e}{\tau_\lambda}\right) \right], \quad (27)$$

где τ_λ — нормальное время дисконтирования, обратное степени дисконтирования λ ; τ_e — полный срок службы системы.

В термоэкономике величина λ может изменяться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

В термоэкологии изменение величины λ зависит от двух факторов:

- λ уменьшается при использовании традиционных невозобновляемых источников энергии, так как природные ресурсы, независимо от места их добычи, в целом являются исчерпаемыми;

- λ увеличивается при использовании нетрадиционных источников энергии.

Эксергоэкономический метод широко используется при решении различных оптимизационных задач, в том числе при использовании альтернативных источников: солнечных, теплонасосных, когенерационных установок и других вариантов энергетических систем. [2,6,7]

При анализе солнечных теплонасосных системам следует отметить, что их специфической чертой, принципиально отличающей их от других энергоинтенсивных систем, является наличие одного «бесплатного» источника — Солнца. Поэтому проведение чисто термодинамического анализа теплонасосных систем на потери эксергии и степень

термодинамического совершенства, хотя и является возможным, будет мало информативным, поскольку часть эксергетических потерь, как будто бы, «ничего не стоит».

Однако при переходе к термоэкономическим показателям потери эксергии в подсистеме солнечный коллектор – теплообменники обретают вполне конкретную стоимость, так как привязаны к стоимостным характеристикам соответствующего оборудования. [2,6,7]

Стоимость любого теплового потока (входящего или исходящего) определяется произведением цены эксергии (удельной стоимости эксергии) и величины эксергии этого потока.

Различные электростанции в мире (в зависимости от экономических и географических условий) повышают температуру конденсации T_k до 100°C и выше, так как пропорционально с ростом T_k растет тариф на тепло, которое другие предприятия покупают для использования в технологическом процессе (коммунальные предприятия покупают тепло для теплоснабжения и горячего водоснабжения).

Повышение температуры конденсации рационально производить до тех пор, пока цена на тепло не сравняется с ценой на электроэнергию. Предельное значение T_k с экономической точки зрения для ТЭЦ составляет 120°C . Дальнейшее повышение температуры конденсации экономически нецелесообразно.

Таким образом, проводить сравнение теплового насоса с ТЭЦ можно только при производстве тепла до 100°C . При более высоких температурах необходимо перейти к сравнению с другими системами теплоснабжения.

Таковыми системами (особенно для сравнения с бытовыми тепловыми насосами вне зависимости от температурного уровня производства тепла) являются котлы (бойлеры), достаточно широко применяемые при использовании различных видов первичной энергии:

- электроэнергии;

- жидкого топлива (нефти);

- газа.

Для иллюстрации на примере изложенного метода эксергоэкономической оптимизации рассмотрим варианты теплоснабжения в сравнении с теплонасосной системой [2,6]. (рис.2)

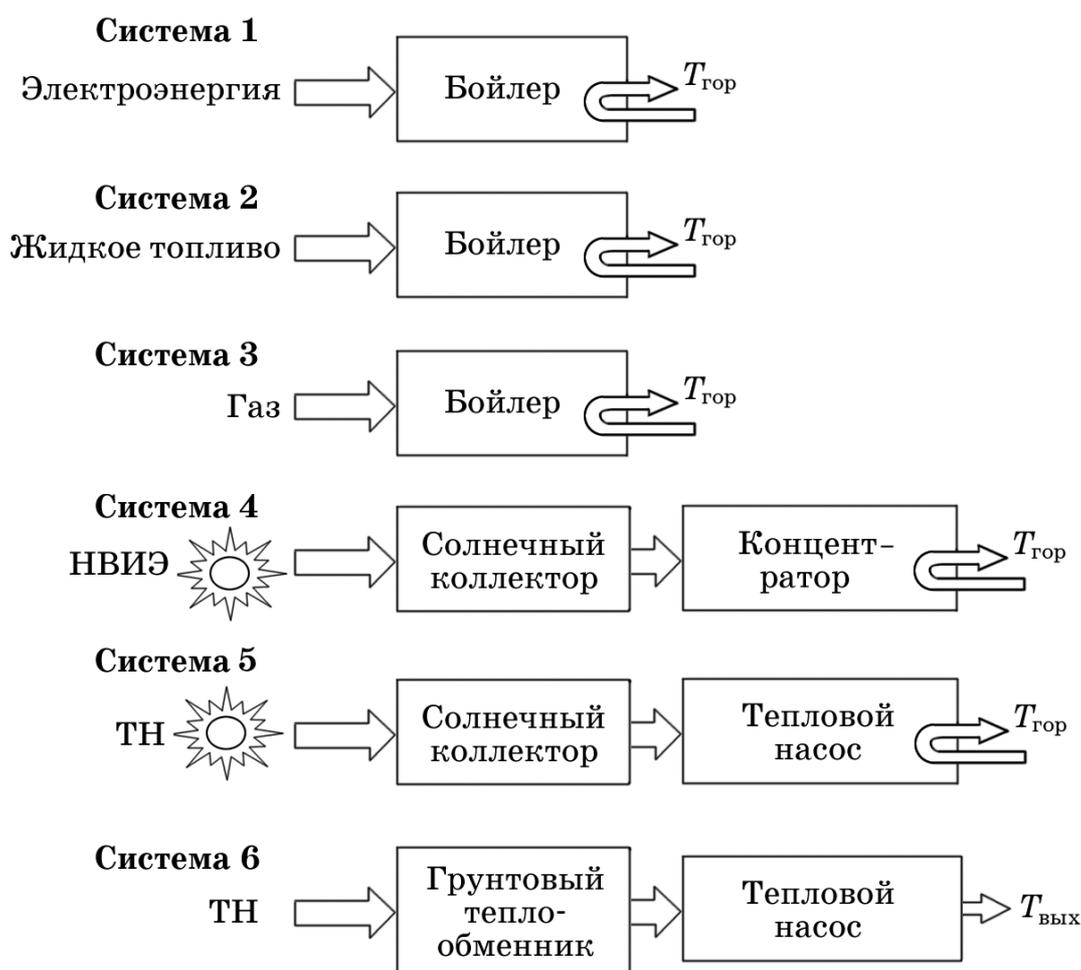


Рис 2. Схемы традиционных, солнечной и гелиотеплонасосной систем теплоснабжения.

Из многолетнего опыта проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения были выбраны средние показатели их эффективности:

КПД отопительного котла (бойлера) на жидком топливе $\eta = 0,75$;

КПД отопительного котла (бойлера) на газе $\eta_k = 0,70$;

Из опыта проектирования тепловых насосов известно:

- изоэнтропный КПД компрессора $\eta_k = 0,85$;

- температурный напор в конденсаторе и испарителе $\Delta T = 10^0\text{C}$.

Для анализируемой энергетической системы приведены данные для характеристики параметра x для k -го элемента, приведенной в табл. 1 для средней закупочной цены (значение a) на энергоноситель (табл. 2), значение коэффициентов n , b , y , N (табл. 3) и значение эксергоэкономического фактора f (табл. 4).

Характеристики параметра x для k -го элемента приведенной в табл. 1

Таблица 1

Элемент	Основная характеристика (величина x)	Значение
Солнечный коллектор	Теплообменная поверхность	21206 м ²
Компрессор	Эффективная поверхность	587 кВт
Конденсатор	Теплообменная поверхность	129,2 м ²
Испаритель	Теплообменная поверхность	102,9 с
Водогрейный котел	Потери жидкого топлива	4050 кг/час
Аккумулятор	Теплопроводность	3000 кВт

Экономическая модель системы (величина α) представлена в табл.2.

Таблица 2

Элемент	Средняя закупочная цена за единицу оборудования
Солнечный коллектор	13 евро/м ²
Компрессор	292 евро/м ²
Конденсатор	13 евро/м ²
Испаритель	74 евро/м ²
Водогрейный котел	190,3 евро / кг · ч
Аккумулятор	$8,47 \cdot 10^{-6}$ евро/кДж

Средняя закупочная цена на энергоноситель:

- жидкое топливо – $2,2 \cdot 10^{-6}$ евро/кДж

- электроэнергия – $3,48 \cdot 10^{-2}$ евро/кВт · ч.

Для определения капитальных (инвестиционных) затрат для каждого элемента необходимо знать параметры n , b , y , N (табл. 3).

Таблица 3

Элемент	n	b	Y	N
Солнечный коллектор	1	0,06	4	20
Компрессор	0,95	0,06	2	10
Конденсатор	0,6	0,06	2	15
Испаритель	0,53	0,06	16	15
Водогрейный котел	0,5	0,06	16	20

Анализ вариантов системы теплоснабжения на основе эксергоэкономического фактора f (табл. 4)

Таблица 4

Системы	$Z^{Cl} + Z^{OH}$ евро/ч	Z^{fuel} евро/ч	f
Система 1	4035	734140	0,01
Система 2	5044	226286	0,022
Система 3	5044	288000	0,017
Система 4	42020	556353	0,07
Система 5	73911	149146	0,331

Проведя анализ систем теплоснабжения на основе эксергоэкономического фактора f – табл. 4, отметим, что система 1 имеет наименьшее значение f , аналогично как и другие низкие показатели эффективности. Системы 2 и 3 мало отличаются друг от друга,

эффективность системы 4 можно оценить примерно в 3,5 раза выше эффективности систем 2 и 3. Система 5 – теплонасосная – наиболее эффективна.

Из приведенного расчета следует, что наиболее эффективной системой теплоснабжения является вариант 5, то есть когда используются возобновляемые источники энергии (в данном случае, солнечная и тепловой насос). Большой эффективностью будет обладать система теплоснабжения, предусматривающая наличие аккумулятора теплоты (учитывая переменное во времени солнечное излучение).

Выводы.

Обобщая вышесказанное можно отметить, что эксергетический метод оптимизации любой энергетической системы означает вариацию и структуры параметров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих ресурсных и технологических ограничениях, обеспечении защиты окружающей среды, создании условий эксплуатационной надежности и невысокой стоимости ремонта.

Литература.

1. Амерханов Р.А. К вопросу о эксергоэкономическом анализе и оптимизации технических систем. - Безопасность, экология, энергосбережение: Матер. науч.-практ. семина. (Гизель-Дере, 2001 г.) Вып. 3. Ростов-н/Д., 2001. С. 102-108.
2. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии: научное издание. - М.: КолосС, 2003. – 532 с.
3. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника. - М.: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.
4. Амерханов Р.А. Вопросы оптимизации технических систем. - Известия вузов. Сев.-Кавк. регион: 2002. №2. С. 77-79.
5. Амерханов Р.А. Эксегроэкономическая оптимизация теплонасосных систем. - Энергосбережение и водоподготовка. 2003. № 2. С. 65-67
6. Амерханов Р.А. Тепловые насосы. - М.: Энергоатомиздат, 2005. – 160 с.
7. Амерханов Р.А., Бутузов В.А., Гарькавый К.А. Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 2009. – 504 с.
8. Амерханов Р.А., Бегдай С.Н., Гарькавый К.А. Оптимизация эксергоэкономической системы теплоснабжения. - Труды Кубанского

госагроуниверситета, Выпуск №2(6). – Краснодар: КубГАУ, 2007. ISBN 5-94672-211-5. С. 173-176.

9. Амерханов Р.А., Долинский А.А., Драганов Б.Х. Основы эксергоэкономического метода оптимизации энергопреобразующих систем. - Промышленная теплотехника, Том 32, №1, 2010. С. 90-101.

Literatura.

1. Amerhanov R.A. K voprosu o jeksergojekonomicheskom analize i optimizacii tehniceskix sistem. - Bezopasnost', jekologija, jenergosberezenie: Mater. nauch.-prakt. semin. (Gizel'-Dere, 2001 g.) Вып. 3. Rostov-n/D., 2001. S. 102-108.

2. Amerhanov R.A. Optimizacija sel'skhozjajstvennyx jenergetičeskix ustanovok s ispol'zovaniem vozobnovljaemyx vidov jenerгии: nauchnoe izdanie. - M.: KolosS, 2003. – 532 s.

3. Amerhanov R.A., Draganov B.H. Teplotehnika. - M.:Jenergoatomizdat, 2006. – 432 s.

4. Amerhanov R.A. Voprosy optimizacii tehniceskix sistem. - Izvestija vuzov. Sev.–Kavk. region: 2002. №2. S. 77-79.

5. Amerhanov R.A. Jeksegrojekonomičeskaja optimizacija teplonasosnyx sistem. - Jenergosberezenie i vodopodgotovka. 2003. № 2. S. 65-67

6. Amerhanov R.A. Teplovyje nasosy. - M.: Jenergoatomizdat, 2005. – 160 s.

7. Amerhanov R.A., Butuzov V.A., Gar'kavyj K.A. Voprosy teorii i innovacionnyx reshenij pri ispol'zovanii geliojenergetičeskix sistem. - M.: Jenergoatomizdat, 2009. – 504 s.

8. Amerhanov R.A., Begdaj S.N., Gar'kavyj K.A. Optimizacija jenergojekonomičeskoj sistemy teplosnabzhenija. - Trudy Kubanskogo gosagrouniversiteta, Выпуск №2(6). – Краснодар: KubGAU, 2007. ISBN 5-94672-211-5. S. 173-176.

9. Amerhanov R.A., Dolinskij A.A., Draganov B.H. Osnovy jeksergojekonomičeskogo metoda optimizacii jenergopreobrazujuščix sistem. - Promyšlennaja teplotehnika, Tom 32, №1, 2010. S. 90-101.