УДК 62-97/-98

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА

Шевченко В.И., Шевченко А.В., Шевченко М.В.

ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru

В статье рассмотрен перспективный эксергетический метод термодинамического анализа для оценивания технического состояния средств обеспечения температурно-влажностного режима. Описан эксергетический баланс типовой системы термостатирования в общем виде. Представлены особенности процесса функционирования типовой системы термостатирования и преимущества эксергетического метода термодинамического анализа при определении технического состояния в сравнении с другими известными методами (термодинамический метод). Наряду с эксергетическим КПД качество процессов энергопреобразования в сложной системе из многих элементов при определении ее технического состояния характеризуется величиной, которая называется степенью термодинамического совершенства. Представляющая собой отношение эксергии на выходе из системы к эксергии на входе в систему она и является по сути аналогом эксергетического КПД. Представлена блок-схема эксергетического метода термодинамического анализа определения технического состояния типовой системы термостатирования основанная.

Ключевые слова: система термостатирования, техническое состояние, термодинамический анализ

THE EXERGY METHOD OF ESTIMATION OF TECHNICAL CONDITION OF MEANS OF ENSURING OF TEMPERATURE MOISTURE CONDITIONS

Shevchenko V.I., Shevchenko A.V., Shevchenko M.V.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

In article the perspective the exergy method of the thermodynamic analysis for estimation of technical condition of means of ensuring of temperature moisture conditions is considered. The exergy balance of standard system of thermostatic control in a general view is described. Features of process of functioning of standard system of thermostatic control and advantage of an the exergy method of the thermodynamic analysis when determining technical condition in comparison with other known methods (a thermodynamic method) are presented. Along with exergy efficiency quality of processes of power transformation in difficult system from many elements when determining its technical state, is characterized by the size which is called as degree of thermodynamic perfection. Representing the exergy relation on leaving the system to an the exergy on login also is in fact, analog of exergy efficiency. The flowchart of an the exergy method of the thermodynamic analysis of definition of technical condition of standard system of thermostatic control based is submitted.

Keywords: system of thermostatic control, technical condition, thermodynamic analysis

Современный этап развития космических средств характеризуется значительным усложнением и расширением функциональных возможностей ракетно-космических комплексов и входящих в их состав наземных космических систем. В настоящее время на стартовых и технических комплексах космодромов России используются различные системы обеспечения температурно-влажностного режима. За длительный срок эксплуатации они показали достаточно функциональную пригодность, надежность и безопасность.

Однако длительная эксплуатация таких систем показала необходимость использования современных методов контроля их технического состояния, реализация которых возможна на месте эксплуатации за счет использования данных измерений штатных систем контроля технологических процессов.

В данной работе представлена возможность оценивания технического состояния типовой системы термостатирования (СТС) на основе эксергетического метода термодинамического анализа.

Эксергетический метод термодинамического анализа определения технического состояния

В современных СТС существенное место занимают энергетические превращения, определяемые первым и вторым законами термодинамики. При этом функционирование СТС происходит в условиях взаимодействия с равновесной окружающей средой, параметры которой (температура и давление) оказывают существенное влияние на их характеристики. Установлено, что в потоках затрат, характеризующих эксплуатацию СТС, доминирующую роль играют именно энергозатраты. Кроме того, получено, что применительно к классу системы, к которому можно отнести СТС, термодинамический оптимум во многих случаях мало

отличается от технико-экономического. Такое совпадение результатов объясняется тем, что изменение параметров системы в пределах, необходимых для термодинамической оптимизации, не изменяет другие виды затрат.

Следовательно, оценивание ресурсных свойств СТС возможно осуществить путем исследования степени термодинамического совершенства, позволяющего оценить потери энергии как в целом, так и в каждом из отдельных процессов, протекающих в системе.

Энергетические балансы сложных технических систем имеют существенные недостатки: они не учитывают качественных различий энергоресурсов и особенностей процессов функционирования, обусловленных их необратимостью, а так же не учитывают внешние потери. Преодолеть эти недостатки можно путем применения эксергетического подхода к анализу термодинамических процессов [1].

Эксергия теплового потока $E_{вх}$ при температуре T определяется количеством работы, которое может быть получено или должно быть затрачено в обратимом процессе переноса энтропии, характеризующей данный тепловой поток, на уровень температуры окружающей среды. Эта термодинамическая функция характеризует не энергию теплового потока, а его максимально возможную работу, которую этот поток может совершить вне рассматриваемой системы.

Эксергетический подход подразумевает построение системы уравнений эксергетического баланса [2].

Уравнение эксергетического баланса системы в общем случае имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n} E_{вх,i} = \sum_{i=1}^{n} E_{вых,i} + \Delta E_V + \sum_{i=1}^{n} L_i + \sum_{i=1}^{n} D_i, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^{n} E_{вх,i}$ – эксергия на входе в i-й элемент; $\sum_{i=1}^{n} E_{вых,i}$ – эксергия на выходе из i-го элемента; ΔE_V – изменение эксергии объема; $\sum_{i=1}^{n} L_i$ – работа, полученная или затраченная в i-м элементе; $\sum_{i=1}^{n} D_i$ – потери эксергии в i-м элементе.

Эксергия потока вещества вычисляется по формуле

$$E = (Э - Э_{ос}) + P_{ос}(V - V_{ос}) - \\ - T_{ос}(S - S_{ос}) + \sum(\mu_{ос} - \mu_c) N_c, \quad (2)$$

где T – температура; P – давление; $\mu_{ос}$ – химический потенциал; S – энтропия; Э – энергия; V – объем; N_c – число молей.

Первые три слагаемых правой части представляют термомеханическую эксергию, а последние – химическую эксергию.

Во всех энергетических превращениях в технических системах эксергия, как и энергия, может либо сохраняться в случае идеальных энергетических превращений и при этом менять только свой вид и форму, либо уменьшаться в реальных процессах, частично или полностью исчезая, если энергия рассеивается бесполезно в окружающей среде.

Эксергия вещества в замкнутом объеме E_V характеризует закрытую систему. Задача определения эксергии E_V сводится к определению максимальной работы, которую может произвести система при переходе всех ее параметров к параметрам окружающей среды. При расчетах обычно определяется разность эксергии объема E_V в двух состояниях системы:

$$\Delta E_V = \Delta U - T_{ос}\Delta S + P_{ос}\Delta V, \quad (3)$$

где ΔU – изменение внутренней энергии; ΔS – изменение энтропии; ΔV – изменение объема; $T_{ос}$, $P_{ос}$ – температура и давление окружающей среды.

Потери эксергии связаны с увеличением энтропии, которые в замкнутой системе также отображают потери от необратимости. Практическое преимущество понятия эксергии состоит в том, что уменьшение величины эксергии дает сразу величину потери превратимой энергии (т.е. получают как абсолютную, так и относительную потерю). Диаграмма потоков эксергии типовой системы обеспечения температурно-влажностного режима, показывающая влияние увеличения потерь в основных элементах системы, представлена на рис. 1

Отношение эксергии, отводимой от данного элемента системы $E_{вых}$, к подведенной эксергии $E_{вх}$ представляет собой эксергетический КПД, который характеризует степень приближения процесса к идеальному.

Для необратимых процессов КПД определяется как

$$\eta_{ex_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{вых,i} + \sum_{i=1}^{n} L_i}{\sum_{i=1}^{n} E_{вх,i}}; \quad (4)$$

$$\eta_{ex_i} = \frac{\sum E_{эф}}{\sum E_{подвед}} = \frac{A_{эф}}{A_{подвед}}, \quad (5)$$

где $E_{эф}$ – эксергия, определяющая эффект, полученный в данном элементе; $E_{подвед}$ – подведенная к элементу эксергия; $A_{эф}$ – полезный эффект; $A_{подвед}$ – затраты в элементе.

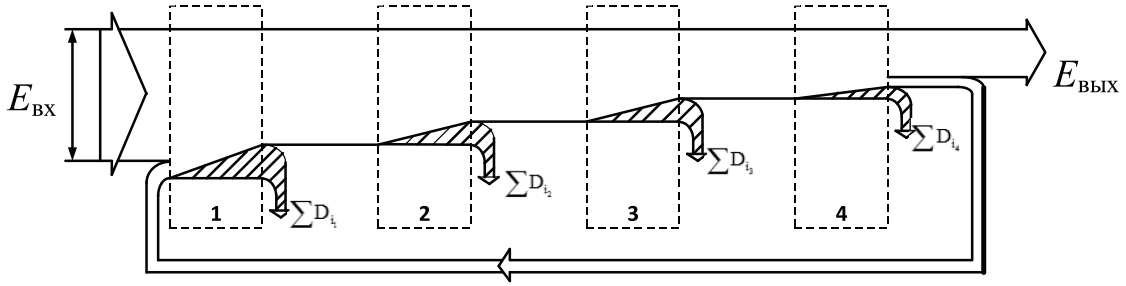

Рис. 1. Эксергетическая диаграмма типовой системы обеспечения ТВР:
1 – парокомпрессионная холодильная машина; 2 – испаритель к баку охлаждение рассола;
3 – коммуникации к объекту термостатирования; 4 – испаритель к объекту охлаждения

Эксергетический КПД для всей системы определяется как

$$\eta_{ex} = \prod_{i=1}^{N} \eta_{ex_i}. \qquad (6)$$

Наряду с эксергетическим КПД качество процессов энергопреобразования в сложной системе из многих элементов характеризуется величиной, которая называется степенью термодинамического совершенства (СТДС) [4]. СТДС представляет собой отношение эксергии на выходе из системы к эксергии на входе в систему и является по сути аналогом эксергетического КПД [5].

В общем виде величина СТДС СТС определяется следующим образом:

$$\nu = 1 - \frac{D_{сист}}{\sum E_{ex}}, \qquad (7)$$

где $D_{сист}$ – общие потери эксергии системы; E_{ex} – сумма потоков эксергии элементов системы.

Эксергетический метод оценивания технического состояния СТС заключается в расчете текущих значений СТДС с учетом как стационарной, так и нестационарной составляющих термодинамических процессов при ее функционировании.

При определении значений потоков эксергии рабочее тело, используемое в СТС (в зависимости от принимаемых допущений), может быть представлено или как идеальный газ (азот, воздух) (8), или как реальный газ (все жидкие рабочие тела) (9). В зависимости от этого формула для определения потока эксергии запишется в двух вариантах:

$$E_{вхк} = \dot{m}\tau_ц \left[\left(I_{вх} - I_{ос} \right) - T_{ос} \left(S_{вх} - S_{ос} \right) \right]; \qquad (8)$$

$$E_{вхк} = \dot{m}\tau_ц \left[C_{pm} \left(T_{вх} - T_{co} \right) - T_{ос} \left(C_{pm} \ln \frac{T_{вх}}{T_{ос}} - R \ln \frac{P_{вх}}{P_{ос}} \right) \right], \qquad (9)$$

где $\dot{m}$ – расход рабочего тела; $\tau_ц$ – общее время цикла; $E_{вхк}$ – эксергия на входе в k-й элемент; $T_{ос}$ – температура окружающей среды; $T_{вх}$ – температура на входе в элемент; $I_{вх}$, $I_{ос}$ – значения энтальпии на входе в элемент и окружающей среды; $S_{вх}$, $S_{ос}$ – значения энтропии на входе в элемент и окружающей среды; $P_{вх}$, $P_{ос}$ – значения давления на входе в элемент и окружающей среды; C_{pm} – теплоемкость рабочего тела; R – универсальная газовая постоянная.

Согласно закону Гюи – Стодолы потери эксергии D в СТС вычисляются по формуле:

$$D = \Delta S T_{ос}, \qquad (10)$$

где ΔS – сумма приращений энтропий всех тел, участвующих в процессах в реальной системе.

Все потери эксергии при проведении теплообменных процессов делятся на внешние и внутренние [3]. К внешним потерям элементов СТС относятся потери эксергии для теплообменных аппаратов через тепловую изоляцию элементов и потери эксергии с технологическими потоками.

Внутренние потери эксергии в элементах СТС обусловлены потерями эксергии за счет гидравлических сопротивлений, а также теплообмена при конечных разностях температур. Полные потери эксергии в элементе определяются как

$$D = \sum D_i = D_Т + D_P + D_И, \qquad (11)$$

В процессах теплообмена потери эксергии от конечной разности температур при изменении агрегатного состояния потоков вычисляются следующим образом:

$$D_Т = Q \left[\left(1 - \frac{T_{ос}}{T_B} \right) - \left(1 - \frac{T_{ос}}{T_A} \right) \right] = Q T_{ос} \left(\frac{\left(T_B - T_A \right)}{T_B T_A} \right). \qquad (12)$$

Потеря эксергии от конечной разности температур уменьшается при уменьшении разности температур потоков ($T_B - T_A$).

Вторая составляющая потерь эксергии в теплообменном аппарате – потери эксергии при теплообмене с окружающей средой – связана с потоками эксергии, направленными от аппарата в окружающую среду через тепловую изоляцию.

Потери эксергии от теплообмена со средой равны разности эксергий потоков A и B из аппарата:

$$D_{\text{т}} = G_B q_B \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{B_{\text{и}}}}\right] + G_A q_A \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{A_{\text{и}}}}\right], \quad (13)$$

где $T_{A_{\text{и}}}$, $T_{B_{\text{и}}}$ – средняя температура изоляции со стороны потока $A(B)$; $q_{A(B)}$ – количество теплоты потока $A(B)$ на единицу массового расхода.

Для расчета суммарных потерь эксергии необходимо определить мощность потерь эксергии в k-м элементе на j-м стационарном режиме и мощность потерь эксергии в k-м элементе на j-м переходном режиме. Затем производится расчет потерь эксергии элементов на разных режимах функционирования. Под эксергетической мощностью элемента будем понимать интенсивность изменения эксергии в единицу времени.

Суммарные потери эксергии для стационарного режима функционирования СТС:

$$\dot{D}^C_{k_i} = T_{oc} W \left[\ln\frac{T_x^{\text{вых}}}{T_x^{\text{вх}}} + \ln\frac{T_{\text{г}}^{\text{вых}}}{T_{\text{г}}^{\text{вх}}}\right]_{k_i} + T_{oc} R \left(\ln\frac{P_{\text{вых}} + \Delta P}{P_{\text{вых}}}\right)_{k_i} + \left(\dot{m}_A q_A \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{A_{\text{и}}}}\right] + \dot{m}_B q_B \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{B_{\text{и}}}}\right]\right)_{k_i}; \quad (14)$$

$$D^C_{k_i} = \dot{D}^C_{k_i} \tau^C_{k_i}. \quad (15)$$

Суммарные потери эксергии для нестационарного режима функционирования СТС:

$$\dot{D}^{\text{П}}_{k_i}(\tau) = T_{oc} W \left[\ln\frac{T_x^{\text{вых}}(\tau)}{T_x^{\text{вх}}(\tau)} + \ln\frac{T_{\text{г}}^{\text{вых}}(\tau)}{T_{\text{г}}^{\text{вх}}(\tau)}\right]_{k_j} + T_{oc} R \left(\ln\frac{P_{\text{вых}} + \Delta P}{P_{\text{вых}}}\right)_{k_j} + \left(G_A q_A \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{A_{\text{и}}}(\tau)}\right] + G_B q_B \left[1 - \frac{T_{oc}}{T_{B_{\text{и}}}(\tau)}\right]\right)_{k_j}; \quad (16)$$

$$D^{\text{П}}_{k_j} = \int_0^{\tau^{\text{П}}_{kj}} \dot{D}^{\text{П}}_{k_j}(\tau) d\tau, \quad (17)$$

где $\tau^{\text{П}}_k$ – время переходного режима k-го элемента; τ^C_k – время стационарного режима k-го элемента; $\dot{D}^C_{k_i}$ – мощность потерь эксергии в k-м элементе на i-м стационарном режиме; $\dot{D}^{\text{П}}_{k_j}(\tau)$ – мощность потерь эксергии в k-м элементе на j-м переходном режиме; W – водяной эквивалент; $T_{\text{г}}^{\text{вх}}$ и $T_{\text{г}}^{\text{вых}}$ – значения температур горячего потока на входе и выходе из элемента на стационарном режиме; $\dot{m}_A q_A$ – расход и количество теплоты на единицу массового потока A; $\dot{m}_{\text{В}} q_B$ – расход и количество теплоты на единицу массового потока B; $T_{A_{\text{и}}}$ и $T_{B_{\text{и}}}$ – средняя температура изоляции со стороны потоков $A(B)$ на стационарном режиме; $T_x^{\text{вх}}(\tau)$ и $T_x^{\text{вых}}(\tau)$ – значения температур холодного потока на входе и выходе из элемента на переходном режиме; $T_{\text{г}}^{\text{вх}}(\tau)$ и $T_{\text{г}}^{\text{вых}}(\tau)$ – значения температур горячего потока на входе и выходе из элемента на переходном режиме; $T_{A_{\text{и}}}(\tau)$ и $T_{B_{\text{и}}}(\tau)$ – средняя температура изоляции со стороны потоков $A(B)$ на переходном режиме.

Суммирование потерь эксергии производится как по элементам, так и по режимам, которые реализуются на данном элементе системы. Выражения потерь эксергии выглядят следующим образом:

$$D^C_k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} D^C_{k_i}; \quad (18)$$

$$D^{\text{П}}_k = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} D^{\text{П}}_{k_j}, \quad (19)$$

где $D^C_{k_i}$ и $D^{\text{П}}_{k_j}$ – потери эксергии в k-м элементе i-м стационарном и j-м переходном режимах; $D^{\text{П}}_k$ – потери эксергии в k-м элементе на всех возможных нестационарных режимах функционирования; D^C_k – потери эксергии в k-м элементе на всех возможных стационарных режимах функционирования.

Общие потери эксергии в системе определяются из суммы потерь системы на стационарном и переходном режимах

$$D_{\text{сист}} = D^C + D^{\text{П}}, \quad (20)$$

где D^C и $D^{\text{П}}$ – потери эксергии в системе на стационарных и переходных режимах в целом.

Блок-схема реализации эксергетического метода термодинамического анализа оценивания технического состояния типовой СТС представлена на рис. 2.

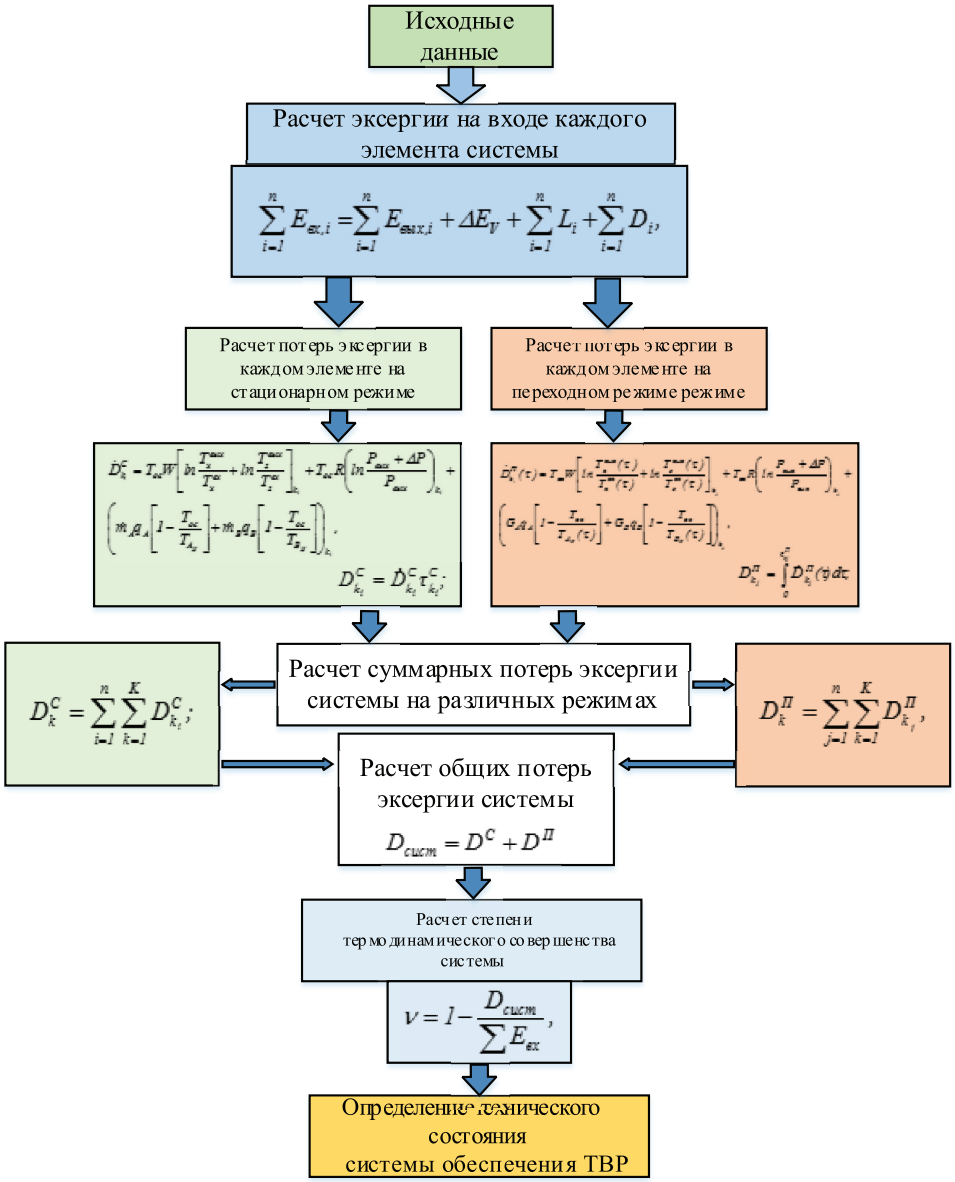

Рис. 2. Блок-схема определения технического состояния типовой системы обеспечения ТВР

Основными этапами определения технического состояния являются:

1. Этап формирования исходных данных (анализ структуры и параметров оцениваемой системы; разбиение структурной схемы на отдельные расчетные узлы; расчет температур переходных процессов; формирование условий однозначности, определяющих род рабочего тела, температурные диапазоны системы, холодопроизводительность, основные ограничения на протекание тепловых процессов).

2. Расчет потока эксергии на входе в каждый элемент варианта системы: расчет проводится по формуле (8), если рабочее тело газ, и используется (9), если рабочее тело жидкость.

3. Расчет потерь эксергии на стационарном и нестационарном режимах, в каждом элементе:

а) расчет потерь эксергии каждым элементом на стационарном режиме:

– определение мощности эксергетических потерь для каждого элемента на стационарных режимах функционирования по формуле (14);

– определение потери каждого элемента на стационарных режимах функционирования по формуле (15);

б) расчет потерь эксергии каждым элементом на нестационарном режиме:

– определение мощности эксергетических потерь для каждого элемента на нестационарных режимах функционирования по формуле (16);

– определение потери каждого элемента на нестационарных режимах функционирования по формуле (17).

4. По формулам (18) и (19) определяются потери системы от каждого элемента на стационарном и нестационарном режимах.

5. Расчет суммарных потерь эксергии системы по формуле (20).

6. Расчет степени термодинамического совершенства системы по формуле (7).

7. По степени термодинамического совершенства системы определяется один из классов технического состояния, определенного для каждой системы обеспечения температурно-влажностного режима, и производится его оценивание.

Заключение

В статье представлен эксергетический метод термодинамического анализа оценивания технического состояния СТС, основанный на определении степени термодинамического совершенства системы, являющейся аналогом эксергетического КПД. Он отличается тем, что позволяет учесть качественные различия энергоресурсов и особенности процессов функционирования, обусловленных их необратимостью, а также внешние потери. Кроме того, особенностью метода является учет нестационарной составляющей протекающих в СТС процессов, что повышает точность определения СТДС по сравнению с другими известными методами (термодинамический метод) на 15–20%. Преимуществом метода является возможность его реализации на месте эксплуатации за счет использования данных измерений штатных систем контроля технологических процессов.

Список литературы

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

2. Бродянский В.М. Эксергетические расчеты технических систем: справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.

3. Пеньков М.М., Куценко В.Ф. Эксергетический метод оценивания качества систем терморегулирования // Альтернативная энергетика и экология. – 2001. – Вып. 4. – С. 54–56.

4. Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б. Эксергетический анализ работы промышленных установок. – М., 2000. – 297 с.

5. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 360 с.

References

1. Brodjanskij V.M. Eksergeticheskij method i ego prilogenija. M.: Energoatomizdat, 1988. 288 p.

2. Brodjanskij V.M. Eksergeticheskie raschetu technicheskih system: spravochnoe posobie. Kiev.: Nauk. dymka, 1991. 360 p.

3. Penkov M.M., Kucenko V.F. Ekserеticheskij method ocenivanija kachestva system termoregulirovanija // Alternativnaja energetika I ekologija, vup. 4, 2001. pp. 54–56.

4. Sazin B.S., Bulekov A.P., Sazin V.B. Eksergeticheskij analiz rabotu promushlenuh ustsnovok. M., 2000. 297 p.

5. Shargut Ja., Petela R. Eksergija. M.: Energija, 1968. 360 p.

Рецензенты:

Козлов В.В., д.т.н., профессор кафедры, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург;

Лебедев Е.Л., д.т.н., доцент, начальник кафедры, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург.