

Оценка эффективности системы кондиционирования воздуха чистых производственных помещений с учетом термодинамических параметров

В.А. Гаврилин, В.И. Каракеян, А.С. Рябышенков

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

ryabyshenkov@mail.ru

Энергоемкость системы кондиционирования воздуха чистых производственных помещений – важный показатель конкурентоспособности микроэлектронной отрасли. Предлагаемый подход позволяет на основе различных схем формирования аэродинамического режима адекватно оценить термодинамическое совершенство системы путем составления эксергетических балансов потока вещества и определения потерь в ней эксергии. Это служит объективной предпосылкой оптимизации аппаратно-технологического решения по критерию энергоемкости. Сопоставление удельных эксергетических потоков в элементах системы позволяет установить участки, подлежащие улучшению.

Предложено в качестве показателя оценки экономического уровня системы кондиционирования воздуха чистых производственных помещений использовать стоимостное содержание эксергии, поскольку термодинамические показатели качества системы – необходимое, но недостаточное условие для принятия окончательного схемного решения. Термозкономическим критерием для выбора технологической схемы служит минимум целевой функции минимизации стоимости единицы удельной эксергии воздуха. На основе эксергетического анализа и посредством построения диаграмм эксергетических и стоимостных показателей системы определен критерий наиболее эффективного обеспечения технологического микроклимата чистых производственных помещений в зависимости от внешних условий. Расчетным путем показано, что термодинамический и термозкономический оптимумы в анализируемых системах в основном совпадают.

Таким образом, термодинамический подход выявляет неэффективные элементы системы кондиционирования воздуха по уровню удельной эксергии, а термозкономический анализ позволяет определить целесообразность использования дополнительных аппаратно-технологических компонентов исследуемой системы.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха; эксергетический баланс; эффективность; показатели эксергии.

Для цитирования: Гаврилин В.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С. Оценка эффективности системы кондиционирования воздуха чистых про-

изводственных помещений с учетом термодинамических параметров // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 133–140. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-133-140

Evaluation of Efficiency of Air Conditioning System of Clean Rooms with Regard to Thermodynamic Parameters

V.A. Gavrilin, V.I. Karakeyan, A.S. Ryabyshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

ryabyshenkov@mail.ru

The energy intensity of the air conditioning system of clean rooms of microelectronics is an important indicator of the competitiveness in the branch. The proposed approach makes it possible to adequately assess the thermodynamic perfection of the system on the basis of various schemes for the formation of aerodynamic regime by compiling the exergic balance flows of the substance and determining the exergy losses in it. This serves as an objective prerequisite for optimizing the hardware-technology solution by the energy intensity criterion, because the thermodynamic indices of the system quality are the necessary but not sufficient condition for making a final scheme decision.

It has been proposed to use as an index for evaluating the economical level of the air conditioning system the exergy cost content. The thermo-economic criterion for selecting a technological scheme is the minimum objective function to minimize the cost of a unit of specific air exergy. Based on the exergic analysis and by the constructing diagrams of the exergy and cost parameters of the system, the conditions for the most effective provision of a technological microclimate of clean rooms are determined on external conditions. The calculation has shown that the thermodynamic and economic optimums in the analyzed systems mainly coincide.

Thus, the thermodynamic approach reveals the non-effective elements of SLE by the level of specific exergy, and the thermodynamic analysis makes it possible to determine the feasibility of using additional hardware and technology components of the system under study.

Keywords: air conditioning system; exergy balance; efficiency; exergy indicators.

For citation: Gavrilin V.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S. Evaluation of efficiency of air conditioning system of clean rooms with regard to thermodynamic parameters // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 2. – P. 133–140. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-133-140

Введение. Система кондиционирования воздуха (СКВ) чистых производственных помещений (ЧПП) представляет собой открытую термодинамическую систему. В такой системе эксергия потока воздуха определяется максимальной полезной работой при ее взаимодействии с окружающей средой до установления равновесия. Целевой функцией термодинамической оптимизации СКВ служит эксергетический КПД, который может быть максимизирован путем изменения как структуры системы, так и режимов ее эксплуатации [1].

Описание объекта исследований. Эксергетический баланс СКВ с присущими ему термодинамическими параметрами составляется на основе схемы формирования аэродинамического режима ЧПП со всеми входными и выходными потоками воздуха (рис.1).

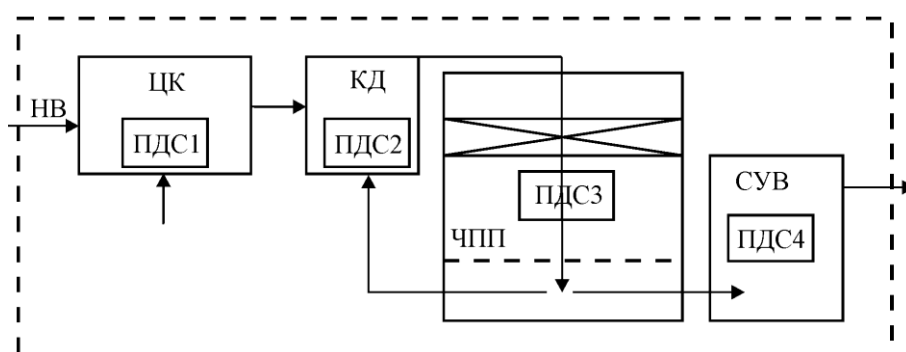


Рис.1. Схема формирования аэродинамического режима в СКВ: НВ – наружный воздух; ЦК – центральный кондиционер; КД – кондиционер-доводчик;

СУВ – система удаления воздуха; ПДС1–ПДС4 – подсистемы

Fig.1. Scheme of the formation of the aerodynamic regime in the air conditioning system: НВ – outdoor air; ЦК – central air conditioning; КД – air conditioning, door closer; СУВ – air removal system; ПДС1–ПДС4 – subsystems

В состав СКВ входят четыре подсистемы: ПДС1, ПДС2, ПДС3, ПДС4, формирующие характеристики потока воздуха через ЦК, КД, ЧПП, СУВ соответственно. Показатели эффективности работы СКВ определяются через эксергетический баланс потока вещества сопоставлением удельных эксергетических потоков (эксергии, отнесенной к 1 кг сухого воздуха) на входе $\sum e_{\text{вх}}$ и выходе $\sum e_{\text{вых}}$ с учетом внутренних и внешних потерь $\sum \Delta e_n$ (см. рис.1) [2, 3]:

$$\sum e_{\text{вх}} = \sum e_{\text{вых}} + \sum \Delta e_n. \quad (1)$$

Результаты исследований. В рассматриваемом случае входным эксергетическим потоком следует считать эксергию наружного воздуха перед ЦК в пределах контрольной поверхности, а выходным – на выходе из СУВ. Тогда эксергетический баланс (1) может быть представлен в следующем виде:

- для прямоточной системы (ПС):

$$e_1^H = e_{\text{СУВ}} + \Delta e_{\text{ЦК}} + \Delta e_{\text{КД}} + \Delta e_{\text{ЧПП}} + \Delta e_{\text{СУВ}};$$

- для рециркуляционного контура (РЦК):

$$e_1^H = e_{\text{СУВ}} + \Delta e_{\text{ЦК}} + \Delta e_{\text{КД}} + \Delta e_{\text{ЧПП}} + \Delta e_{\text{РЦК}} + \Delta e_{\text{СУВ}},$$

где e_1^H – начальная удельная эксергия воздуха на входе в ЦК; $\Delta e_{\text{ЦК}}, \Delta e_{\text{КД}}, \Delta e_{\text{ЧПП}}, \Delta e_{\text{СУВ}}, \Delta e_{\text{РЦК}}$ – потери эксергии в ЦК, КД, ЧПП, СУВ и РЦК соответственно.

Эксергетический КПД η_e (%) представляет собой отношение эксергии $e_{\text{ЧПП}}$, полезно усвоенной для организации требуемого аэродинамического режима в ЧПП, ко всей затраченной эксергии:

- для ПС:

$$\eta_e = \Delta e_{\text{ЧПП}} / (\Delta e_{\text{ЦК}} + \Delta e_{\text{КД}} + \Delta e_{\text{ЧПП}} + \Delta e_{\text{СУВ}});$$

- для РЦК:

$$\eta_e = \Delta e_{\text{ЧПП}} / (\Delta e_{\text{ЦК}} + \Delta e_{\text{КД}} + \Delta e_{\text{ЧПП}} + \Delta e_{\text{РЦК}} + \Delta e_{\text{СУВ}}).$$

Таким образом, динамика эксергии позволяет оценить термодинамические качества системы, что является необходимым, но недостаточным для принятия окончательного аппаратно-технологического решения. Для оценки технико-экономического уровня системы необходимо выразить эксергию в стоимостных величинах. При таком подходе рекомендуется все затраты разделить на энергетические, непосредственно связанные с термодинамическими характеристиками, и неэнергетические, связанные с последними опосредованно [4, 5]. Тогда суммарные приведенные затраты за определенный период определяются выражением

$$Z = E_{\text{норм}} K + bK + S_3 + S_0, \quad (2)$$

где $E_{\text{норм}}$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений K ; S_3 – суммарные приведенные энергетические затраты; $E_{\text{норм}} K + bK + S_0$ – неэнергетические затраты $S_{\text{нэ}}$, связанные с капитальным строительством, монтажом и инфраструктурой системы.

Целевая функция термоэкономической минимизации стоимости единицы удельной эксергии воздуха в ЧПП $p_{\text{тэ}}$ (руб./кДж) имеет вид

$$p_{\text{тэ}} = (S_3 + S_{\text{нэ}}) / e, \quad (3)$$

где e – затраты удельной эксергии на процесс или его отдельные этапы.

Наглядное представление о динамике эксергии и соответствующих затрат по ходу подготовки воздуха в прямоточной СКВ дает диаграмма эксергетических и финансовых потоков (рис.2). Диаграмма Грассмана отражает изменение эксергии (рис.2,а), диаграмма энергетических и неэнергетических затрат (рис.2,б) строится аналогично диаграмме потоков эксергии. Энергетические затраты представлены полосой под линией ab , а неэнергетические – над ab [6]. Диаграмма на рис.2,в связывает первую и вторую и определяется частными от деления значений стоимостной диаграммы на значения эксергетической. Она показывает удельные приведенные затраты или себестоимость единицы эксергии в соответствующем сечении.

По мере движения от входа к выходу эксергия потока воздуха уменьшается на величину потерь на участках Δe_i , а затраты на его обработку Z увеличиваются. Энергетические затраты S_{i3} при этом остаются постоянными, а неэнергетические $S_{i\text{нэ}}$ растут скачкообразно в связи с появлением нового оборудования [7].

Удельные приведенные затраты для любой подсистемы с учетом формул (2), (3) и ее КПД η_i запишем в виде

$$p_i = (S_{i3} / e_{i3} + S_{i\text{нэ}} / e_{i3}) / \eta_i = (z_{i3} + z_{i\text{нэ}}) / \eta_i.$$

Анализируя с помощью построенной диаграммы удельные приведенные затраты на единицу эксергии (4) в системе из четырех подсистем, предполагаем, что промежуточные подводы и отводы потоков отсутствуют. Тогда удельные затраты на единицу эксергии в начале процесса составят

$$z_1^{\text{H}} = (S_{13} / e_1 + S_{1\text{нэ}} / e_1) = p_{13} + p_{1\text{нэ}}.$$

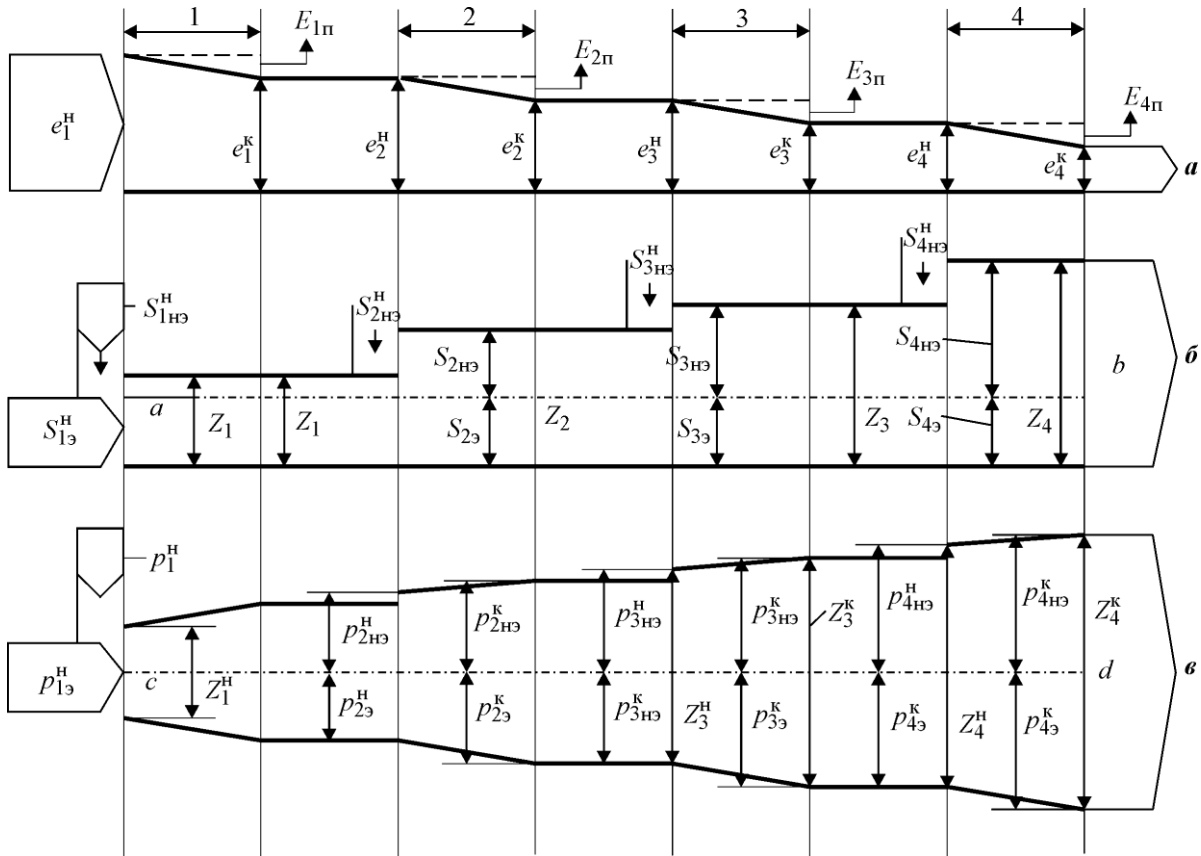


Рис.2. Диаграммы эксергетических и стоимостных показателей СКВ для ПС: а – эксергия; б – энергетические и неэнергетические затраты; в – удельная стоимость эксергии (1–4 – ЦК, КД, ЧПП, СУВ соответственно)

Fig.2. Diagram of exergy and cost indicators of air conditioning system for PS: a – exergy; b – energy and noenergy costs; c - unit cost of exergy (1 – central air conditioning; 2 – air conditioning, door closer; 3 – clean room; 4 – air removal system)

Вследствие потерь на участке 1 $\Delta e_1 = (1 - \eta_1)e_1^H$, где η_1 – КПД участка 1, удельная эксергия e_1^H , уменьшенная до $e_1^K = e_1^H \eta_1$, поступает на участок 2. Затраты на длине участка не меняются и суммарные затраты $Z_1 = S_{1э} + S_{1нэ}$ переходят на участок 2. В связи с уменьшением эксергии конечные удельные затраты возрастают и на выходе участка 1 становятся равными: $z_1^K = (p_{1э}^K + p_{1нэ}^K) / \eta_1$. Откуда следует, что рост удельных затрат в пределах одной подсистемы определяется только ее термодинамическим совершенством.

На входе на участок 2 в связи с появлением дополнительных затрат $S_{2нэ}$ на оборудование неэнергетические затраты растут при неизменности энергетических. Тогда $z_2^H = (S_{2э} + S_{2нэ}) / e_1^K = p_{2э}^H + p_{2нэ}^H$. По причине потерь эксергии на участке 2 обе составляющие удельных приведенных затрат возрастут: $z_2^K = (p_{2э}^K + p_{2нэ}^K) / \eta_{2э}$. Аналогичные преобразования происходят и на всех n участках. Удельные затраты для конечного звена системы можно представить в виде

$$z_n^K = p_{нэ}^K + p_{нэ}^H = p_{1э} / \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n + p_{1нэ} / \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n + \Delta p_2 / \eta_2 + \dots + \Delta p_n / \eta_n = p_{1э}^H v_n + p_{1нэ}^H v_n + \sum \Delta p_{иэ}, \quad (5)$$

где ν – коэффициент преобразования эксергии; $\Delta p_{инз}$ – дополнительные неэнергетические удельные затраты.

Из анализа уравнения (5) следует, что по мере преобразования эксергии удельные затраты z растут. При этом энергетическая и неэнергетическая составляющие увеличиваются пропорционально коэффициенту преобразования, а третье слагаемое $\sum \Delta p_{инз}$ растет с дополнительными затратами на оборудование, начиная с участка 2. Справедливость этого вывода очевидна для ПС с последовательным расположением подсистем и вводом эксергии в начале процесса. При наличии РЦК возвращение эксергии отработанного воздуха в систему меняет стоимостные соотношения. Однако в любом случае доминирующими являются неэнергетические компоненты. Термoeкономический анализ системы с n участками при наличии РЦК приводит к уравнению:

$$z_n^k = p_{нэ}^k + p_{инз}^k = kp_{1э} / \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n + p_{инз} / \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n + \Delta p_2 / \eta_2 + \dots \\ \dots + \Delta p_n / \eta_n = 0,1 p_{1э}^H \nu_n + p_{инз}^H \nu_n + \sum \Delta p_{инз},$$

где $k = 0,1 \dots 0,2$ – коэффициент снижения энергетических затрат при РЦК.

Термoeкономическим критерием для выбора экономически целесообразной технологической схемы СКВ является разность Δz между удельными затратами ПС и РЦК:

$$\Delta z = z_{ПС} - z_{РЦК}. \quad (6)$$

В качестве примера термoeкономического анализа различных схем СКВ на рис.3 представлены их сравнительные стоимостные показатели для ЧПП класса 5ИСО площадью 48 м², оснащенного типовым оборудованием, при кратности воздухообмена 50.

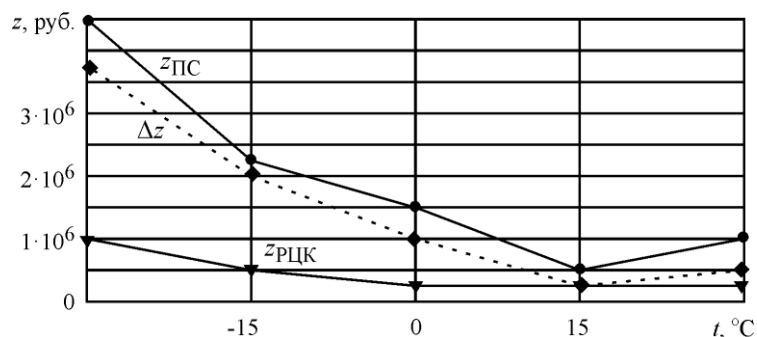


Рис.3. Зависимость стоимостных показателей эксергии от температуры наружного воздуха

Fig.3. Dependence of the cost parameters of the exergy against the temperature of the outside air

Положительные значения Δz в формуле (6) во всем интервале температур свидетельствуют об экономической целесообразности использования РЦК, особенно при понижении температуры наружного воздуха в связи с уменьшением затрат на его обработку.

Заключение. Рассмотренный термoeкономический анализ указывает на общие закономерности зависимостей приведенных затрат и затрат эксергии, выявленных при термодинамическом анализе. Представленные зависимости дают возможность оценить экономический аспект термодинамического качества аппаратно-технологического решения СКВ.

Таким образом, термодинамический подход выявляет неэффективные элементы СКВ по уровню удельной эксергии, а термоэкономический анализ позволяет определить целесообразность использования дополнительных аппаратно-технологических компонентов с позиции экономической эффективности.

Литература

1. **Каракеян В.И., Дисветова Н.М.** Система кондиционирования воздуха чистых помещений как объект термодинамического анализа // Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники: Сб. науч. тр. МИЭТ / под ред. В.И. Каракеяна. – М.: МИЭТ, 2016. – С. 3–10.
2. **Цыганков А.В., Гримитлин А.М.** Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. – 2013. – № 4. – С. 47–50.
3. **Рябышенков А.С.** Термодинамический анализ процесса воздухоподготовки чистых помещений // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – №4. – С. 341–349.
4. **Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.** Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
5. **Шишов В.В.** Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для систем кондиционирования // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 5 (5). – С. 143–156.
6. **Рябышенков А.С., Захаров А.Н., Гаврилин В.А.** Эксергетический анализ рециркуляционной системы кондиционирования и фильтрации воздуха в чистых помещениях // Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники: Сб. науч. тр. МИЭТ / под ред. В.И. Каракеяна. – М.: МИЭТ, 2016. – С. 28–33.
7. **Архаров А.М., Шишов В.В.** Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию необратимости рабочих процессов систем кондиционирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2013. – №2. – С. 84–93.

Поступила 08.06.2017 г.; принята к публикации 16.01.2018 г.

Гаврилин Вячеслав Андреевич – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), gavrilinvjacheslav@gmail.com

Каракеян Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), zelikar@mail.ru

Рябышенков Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), ryabyshenkov@mail.ru

References

1. Karakeyan V.I., Disvetova N.M. Sistema kondicionirovaniya vozduha chistyh pomeshchenij kak ob"ekt termodinamicheskogo analiza [The cleanrooms air conditioning system as an object of thermodynamic analysis]. *Sbornik nauchnyh trudov MIET. Pod red. V.I. Karakejana «Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti proizvodstv mikroelektroniki»* [Collection of scientific papers MIET «Actual problems of increasing the efficiency of microelectronics production»]. Moscow, MIET, 2016, pp. 3–10. (in Russian).
2. Cygankov A.V., Grimitlin A.M. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem kondicionirovaniya vozduha [Situation and development prospects of air condition systems]. *Vestnik Mezhdunarodnoj Akademii holoda – Vestnik of International Academy of Refrigeration*, 2013, no.4, pp. 47–50. (in Russian).
3. Ryabyshenkov A.S. Termodinamicheskij analiz processa vozduhopodgotovki chistyh pomeshchenij [Thermodynamic analysis of process of clean rooms air handling] *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no.4, pp. 341–349. (in Russian).

4. Brodyanskij V.M., Fratsher V., Mihalek K. *Eksergeticheskij metod i ego prilozheniya. Pod red. V.M. Brodyanskogo* [Exergetic computations of technical systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 288 p. (in Russian).
5. Shishov V.V. Entropijno-statisticheskij analiz holodil'nyh ciklov dlya sistem kondicionirovaniya [Statistical entropy analysis of air condition refrigeration cycles]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii – Journal of engineering: science and innovations*, 2012, no. 5 (5), pp. 143–156. (in Russian).
6. Ryabyshenkov A.S., Zaharov A.N., Gavrilin V.A. Eksergeticheskij analiz recirkulyacionnoj sistemy kondicionirovaniya i fil'tracii vozduha v chistyh pomeshcheniyah [Exergetic Analysis of air condition and air filtration recirculation system in cleanrooms]. *Sbornik nauchnyh trudov MIET pod red. V.I. Karakeyana «Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti proizvodstv mikroelektronik»* [Collection of scientific papers MIET «Actual problems of increasing the efficiency of microelectronics production»]. Moscow, MIET, 2016, pp. 28–33. (in Russian).
7. Arharov A.M., Shishov V.V. Entropijno-statisticheskij analiz raspredeleniya zatrat energii na kompensaciyu neobratimosti rabochih processov sistem kondicionirovaniya [Statistical entropy distribution analysis of energy expenses on compensation for irreversibility of air condition system operation processes]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. «Mechanical engineering»*, 2013, no. 2, pp. 84–93. (in Russian).

Submitted 08.06.2017; accepted 16.01.2018.

Gavrilin Vjacheslav A. – student of National Research University of Electronic Tehnology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, 1), jacheslav@gmail.com

Karakean Valery I. – Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, 1), zelikar@mail.ru

Ryabyshenkov Andrew S. – Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, 1), ryabyshenkov@mail.ru