

## Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике

*М.А. Гундарцев, В.И. Каракеян, А.С. Рябышенков, В.П. Шараева*

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

*gundartcev.m@yandex.ru*

Применение в чистых помещениях химических веществ, большая часть которых агрессивна и токсична, требует анализа системы удаления воздуха не только с функционально обусловленных, но и с энергоэкологических позиций. В работе исследована возможность применения методологии энергоэкологического анализа для сравнения экологичности различных систем удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике. Показано, что прямое удаление воздуха при термодинамическом преимуществе перед системой с очисткой менее благоприятно для окружающей среды в связи со значительным уровнем экологического индекса, отражающего потенциальный экономический ущерб атмосфере от выбросов. Установлены загрязнители, доминирующие в составе выбросов и определяющие обоснованность решения по структуре системы удаления воздуха чистого помещения, учитывающей эколого-экономические и медико-биологические аспекты ее эксплуатации.

**Ключевые слова:** энергоэкологическая эффективность; чистое помещение; система удаления воздуха; выброс; эксергия; экологический индекс

**Для цитирования:** Гундарцев М.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Шараева В.П. Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 328–332. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-328-332>

## Energy and Environment Analysis Methodology Application for the Study of the Clean Room Air Removal System in Microelectronics

*M.A. Gundartsev, V.I. Karakeyan, A.S. Ryabyshenkov, V.P. Sharaeva*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*gundartcev.m@yandex.ru*

**Abstract:** The most part of chemical substances applied in clean rooms are aggressive and toxic, which requires analysis of air removal system not only from functionally related standpoint but also with regard to energy and environment. This study investigates the possibility of applying the methodology of energy and environmental analysis to compare the environmental friendliness of various air removal systems of clean rooms. It was shown that direct air removal, although having a thermodynamic advantage over a system with purification, was less favorable for the environment due to the significant level of the environmental index, which reflected the considerable potential economic

damage from emissions to the atmosphere. This investigation has revealed the pollutants dominating in the composition of emissions and determining the validity of the decision on the structure of the air removal system of the clean room, taking into account the environmental, economic and biomedical aspects of its operation.

**Keywords:** energy and environmental efficiency; clean room; air removal system; emission; exergy; environmental index

**For citation:** Gundartsev M.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S., Sharaeva V.P. Energy and environment analysis methodology application for the study of the clean room air removal system in microelectronics. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 328–332. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-328-332>

Проблема загрязнения атмосферы как источника технологической среды для предприятий микроэлектроники и одновременно компонента среды обитания человека тесно связана с функционированием системы удаления воздуха (СУВ) чистых помещений (ЧП). Использование в ЧП химических веществ, большая часть которых агрессивна и токсична, требует анализа работы СУВ не только с функционально обусловленных, но и энергоэкологических позиций.

Рассматривая СУВ как термодинамическую систему с точки зрения эксергетического подхода, можно установить ее энергетические показатели [1]. Энергоэкологический анализ СУВ позволяет учесть также и экологическую составляющую в виде экономического ущерба атмосфере, выраженного в энергетических единицах. Согласно методическому подходу, рассматриваемому в [2, 3], в качестве такой экологической составляющей можно использовать экологический индекс (ЭИ), кДж/кг/руб.:

$$\text{ЭИ} = e / U_{\text{атм}}, \quad (1)$$

где  $e$  – удельная эксергия выброса;  $U_{\text{атм}}$  – причиненный экономический ущерб атмосфере.

Удельная эксергия выброса определяется на основе эксергетического анализа системы, расчет годового экономического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха проводится по укрупненной методике приведения различных примесей к монозагрязнителю [4]:

$$U_{\text{атм}} = U_{\text{вт}} \sigma f \sum A_i M_i, \quad (2)$$

где  $U_{\text{вт}}$  – денежная оценка единицы выбросов, представляющая собой удельный экономический ущерб от загрязнения атмосферы 1 т условного загрязняющего вещества, руб./усл.т (стоимость условной тонны выбросов для Московской области составляет 240 руб./усл.т);  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий региональные особенности территории, подверженной вредному воздействию;  $f$  – поправка, учитывающая характер рассеивания примеси в атмосфере (для газообразных примесей и аэрозолей, характерных для выбросов ЧП, равна 1);  $A_i$  – коэффициент приведения  $i$ -й примеси к монозагрязнителю, усл. т/т;  $M_i$  – масса выброса  $i$ -го загрязнителя.

При определении безразмерного коэффициента  $\sigma$ , характеризующего относительную степень опасности загрязнения воздуха над исследуемой территорией, во избежание сложностей детализированного расчета по источникам загрязнений рекомендуется использовать средневзвешенное значение с учетом площадей отдельных видов [4–6]. Функциональные территории города представлены 47 % промышленных зон, 27 % жилого комплекса и 26 % лесопарка. Тогда показатель  $\sigma$  определяется как средневзвешенный из коэффициентов для территорий разных типов [7]:  $\sigma = 0,47 \cdot 4 + 0,27 \cdot 6 + 0,26 \cdot 8 = 5,58$ .

Коэффициент приведения  $i$ -й примеси к агрегированному виду (монозагрязнителю), или безразмерный показатель относительной агрессивности загрязняющего вещества  $i$ -го вида, рассчитывается по формуле

$$A_i = \text{ПДК}_{\text{CO}_2} / \text{ПДК}_i, \quad (3)$$

где  $\text{ПДК}_{\text{CO}_2}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере, принимаемая за эталон и равная  $3 \text{ мг/м}^3$ ;  $\text{ПДК}_i$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества  $i$ -го вида в атмосфере.

Предположим, что известно, во сколько раз один загрязнитель опаснее другого ( $\text{CO}_2$ ). Тогда можно придать каждому из них весовые коэффициенты  $A_i$ . После умножения  $M_i$  на весовые коэффициенты  $A_i$  и их сложения получаем условный монозагрязнитель массой  $\sum A_i M_i$ , характеризующий общий уровень загрязнения атмосферы.

Энергоэкологический анализ проводится для СУВ типового предприятия микроэлектроники для теплого (ТПГ) и холодного периодов года (ХПГ) на основании тома нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ), разработанного при эффективности очистного оборудования  $\eta_{\text{o.o}} = 0,9$ , когда в атмосферу поступает 0,1 часть загрязнений, содержащихся в выбросах. При отсутствии очистного оборудования и при прямом удалении воздуха в атмосферу попадет десятикратно увеличенная масса примесей. В результате обработки данных тома нормативов ПДВ получены суммарные значения приведенной массы при наличии очистки  $\sum A_i M_{i \text{ o}} = 1086,2 \text{ т/год}$  и в случае прямого удаления воздуха (без очистки)  $\sum A_i M_{i \text{ б.о}} = 10\,862 \text{ т/год}$ . Тогда по формуле (2) получим значение годового ущерба атмосфере для СУВ.

С очисткой эффективностью  $\eta_{\text{o.o}} = 0,9$ :

$$U_{\text{атм.о}} = 240 \cdot 5,58 \cdot 1086,2 = 1\,454\,639 \text{ руб./год.}$$

Без очистки:

$$U_{\text{атм.б.о}} = 240 \cdot 5,58 \cdot 10\,862 = 14\,546\,390 \text{ руб./год.}$$

В таблице приведены результаты энергоэкологического анализа СУВ, полученные по формуле (1) с использованием данных работы [2]. С точки зрения зависимости экономического ущерба атмосфере от аппаратурно-технологического решения СУВ и условий внешней среды. Высокая удельная эксергия выбросов при прямом удалении в ТПГ приводит к росту ЭИ в 2,6 раза по сравнению с системой с очисткой. В ХПГ различия в ЭИ не столь заметны, что может быть обусловлено более благоприятными условиями для рассеивания загрязнений в атмосфере.

Анализ тома нормативов ПДВ указывает на наличие в составе выбросов ЧП широкого спектра химических веществ всех классов опасности (рисунок). Однако основной экономический ущерб атмосфере наносят вещества 1-го и 2-го классов опасности (мышьяк, аммиак и др.) по действующему в настоящее время ГОСТ 12.1.007-76.

Отметим также наличие загрязнителей, не отраженных на диаграмме в силу незначительности массы выброса, но с эффектом комбинированного действия в виде синергизма или аддитивности (диоксид азота + диоксид серы, диоксид серы + фториды газообразные и т.д.). Все загрязнители в результате очистки выбросов находятся в пределах своих ПДК<sub>сс</sub>. Однако при оценке эколого-гигиенических аспектов загрязнения атмосферы следует также считаться с возможностью образования из таких загрязнителей под действием условий атмосферы вторичных загрязнителей, имеющих более опасные свойства и трудно поддающиеся мониторингу [8–10].

**Результаты энергоэкологического анализа СУВ**  
**Results of energy-ecological analysis of air removal system**

Параметр	ТПГ	ХПГ
$e_{\text{o}}$ , кДж/кг	10	160
$U_{\text{атм.о}}$ , руб.	1 454 639	
$\text{ЭИ}_{\text{o}}$ , кДж/кг/руб.	0,000007	0,000011
$e_{\text{б.о}}$ , кДж/кг	39	182
$U_{\text{атм.б.о}}$ , руб.	14 546 390	
$\text{ЭИ}_{\text{б.о}}$ , кДж/кг/руб.	0,0000027	0,000012
$\text{ЭИ}_{\text{o}}/\text{ЭИ}_{\text{б.о}}$	2,6	0,9

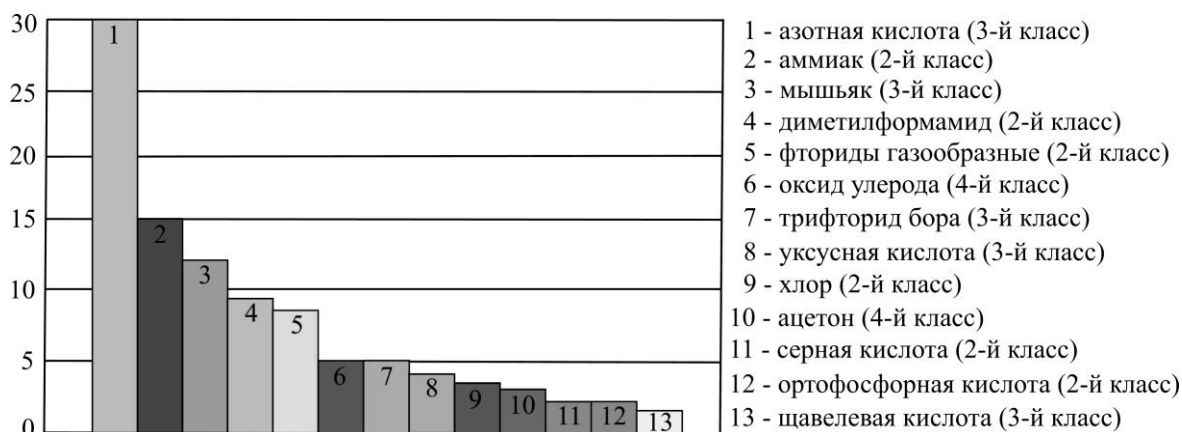


Диаграмма поэлементных ущербов атмосфере от загрязнителей 2, 3, 4-го классов в выбросах СУВ  
Diagram of element-by-element damage to the atmosphere from pollutants of the 2nd, 3rd, 4th hazard classes in WMS emissions

Таким образом, ЭИ в виде отношения удельной эксергии выброса к причиненному экономическому ущербу атмосфере является объективным критерием экологичности СУВ. Значение ЭИ определяется аппаратурно-технологическим решением системы и условиями внешней среды. Установление его взаимосвязей с полями рассеивания доминирующих загрязнителей в атмосфере имеет существенное значение для разработки практических мероприятий по оптимизации системы производственно-экологического мониторинга.

### Литература

1. *Гаврилин В.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С.* Оценка эффективности системы кондиционирования воздуха чистых производственных помещений с учетом термодинамических параметров // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 2. С. 133–140.
2. *Казаков Р.А., Дарда И.В., Зволинский В.П.* Основы теоретического анализа энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 38–43.
3. *Каракеян В.И., Гундарцев М.А.* Эксертетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 6. С. 573–580.
4. *Каракеян В.И.* Экономика природопользования: учеб. для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 478 с.
5. *Тхеин Хтут У., Пьо Тху, Гаврилин В.А.* Анализ системы фильтрации чистых помещений высокотехнологичных производств // Экологические системы и приборы. 2019. № 4. С. 44–48.
6. *Тхеин Хтут У., Пьо Тху, Шареева В.П.* Анализ системы фильтрации чистых помещений высокотехнологичных производств // Экология и безопасность жизнедеятельности: сб. ст. XVIII Междунар. науч.-прак. конф. (20–21 декабря 2018 г.). Пенза: РИО ПГАУ, 2018. С. 300–302.
7. *Гундарцев М.А., Гундарцев А.А., Константинова А.А.* Построение полей рассеивания вредных примесей от промышленных предприятий // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. №1. С. 14–20. DOI: 10.25791/asu.1.2021.1248
8. *Pleshko E.S., Riabyshenkov A.S., Gundartcev M.A., Nikulina I.M.* Modeling the distribution of impurities in the atmosphere from the stationary point source // Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Moscow – St. Petersburg, Russia, January 27–30, 2020). 2020. P. 2483–2485.
9. *Захаров А.Н., Пьо Тху.* Энергоэффективность многоступенчатой системы фильтрации чистых помещений // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Техногенная энергобезопасность и энергоресурсосбережение» (Москва, 05 июля 2018 г.). М.: МИЭЭ, 2018. С. 113–114.
10. *Пьо Тху, Рябышенков А.С.* Анализ системы кондиционирования и фильтрации воздуха в чистых помещениях микроэлектроники // Экологические системы и приборы. 2018. № 9. С. 22–29.

Поступило в редакцию 24.11.2020 г.; после доработки 24.11.2020 г.; принято к публикации 14.04.2021 г.

**Гундарцев Михаил Александрович** – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Gundartcev.m@yandex.ru

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

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

**Шараева Валерия Павловна** – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sharaevalera@mail.ru

### References

1. Gavrilin V.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S. Evaluation of the efficiency of the air conditioning system for clean industrial premises taking into account thermodynamic parameters. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 133–140. (In Russian).
2. Kazakov R.A., Darda I.V., Zvolinsky V.P. Basis of theoretical analysis of energy and ecological efficiency of metallurgical enterprises. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 4, pp. 38–43. (In Russian).
3. Karakeyan V.I., Gundartsev M.A. Exergetic analysis of the air exchange system in clean rooms. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 573–580. (In Russian).
4. Karakeyan V.I. *Environmental Economics: a textbook for academic bachelor's degree*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 478 p. (In Russian).
5. Thein Khtut U., Pyo Thu, Gavrilin V.A. Analysis of the filtration system of clean rooms in high-tech industries. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological Systems and Equipment*, 2019, no. 4, pp. 44–48. (In Russian).
6. Thein Khtut U., Pyo Thu, Sharaeva V.P. Analysis of the filtration system of clean rooms in high-tech industries. *Ecology and life safety: collection of articles of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Penza, RIO PSAU Publ., 2018, pp. 300–302. (In Russian).
7. Gundartsev M.A., Gundartsev A.A., Konstantinova A.A. Construction of fields for dispersion of harmful impurities from industrial enterprises. *Promyshlennyye ASU i kontroly = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2021, no. 1, pp. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.25791/asu.1.2021.1248> (In Russian).
8. Pleshko E.S., Ryabyshenkov A.S., Gundartsev M.A., Nikulina I.M. Modeling the distribution of impurities in the atmosphere from the stationary point source. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2020, pp. 2483–2485.
9. Zakharov A.N., Pyo Thu. Energy efficiency of a multistage filtration system for clean rooms. *Abstracts of the international scientific and technical conference «Technogenic energy security and energy saving»*. Moscow, MEEE Publ., 2018, pp. 113–114. (In Russian).
10. Pyo Thu, Ryabyshenkov A.S. Analysis of the air conditioning and filtration system in clean rooms of microelectronics. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 2018, no. 9, pp. 22–29. (In Russian).

Received 24.11.2020; Revised 24.11.2020; Accepted 14.04.2021.

### Information about the authors:

**Mikhail A. Gundartsev** – PhD student of the Institute for Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Gundartsev.m@yandex.ru

**Andrey S. Ryabyshenkov** – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute for Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ryabyshenkov@mail.ru

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

**Valeria P. Sharaeva** – PhD student of the Institute for Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sharaevalera@mail.ru