

## Системный анализ функционирования чистых помещений для микроэлектроники

*А.С. Рябышенков*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

## System Analysis of Clean Rooms Functioning for Microelectronics

*A.S. Ryabyshenkov*

*National Research University of Electronic Technology*

Описаны основные концептуальные проблемы при проектировании и эксплуатации отечественной и зарубежной инфраструктуры чистых помещений высокотехнологических производств. Разработана эффективная концепция технологической экологии микроэлектроники, направленная на защиту предмета труда от негативного влияния внутрипроизводственной среды системой кондиционирования воздуха. Проведен детальный анализ многолетнего опыта эксплуатации чистых помещений различных классов. Разработана и обоснована концепция технологической экологии микроэлектроники на основе системного анализа различных аспектов функционирования чистых помещений для микроэлектроники.

*Ключевые слова:* технологическая экология; микроэлектроника; внутрипроизводственная среда; чистые помещения; система кондиционирования воздуха; эффективность функционирования.

The basic conceptual problems in design and operation of domestic and foreign-tech infrastructure of the clean rooms industries have been described. The purpose of this work is to develop an efficient concept of the ecology microelectronic technology aimed at protecting the subject of work from the negative impact of the in-plant environment with air conditioning. A detailed analysis of the long-term experience of operation of clean rooms of various classes has been conducted. The concept of the environmental technology in microelectronics has been developed and proved based on a systematic analysis of the various aspects of clean rooms functioning for microelectronics.

*Keywords:* technological environments; microelectronics; IPLs environment clean rooms; air-conditioning system; the performance.

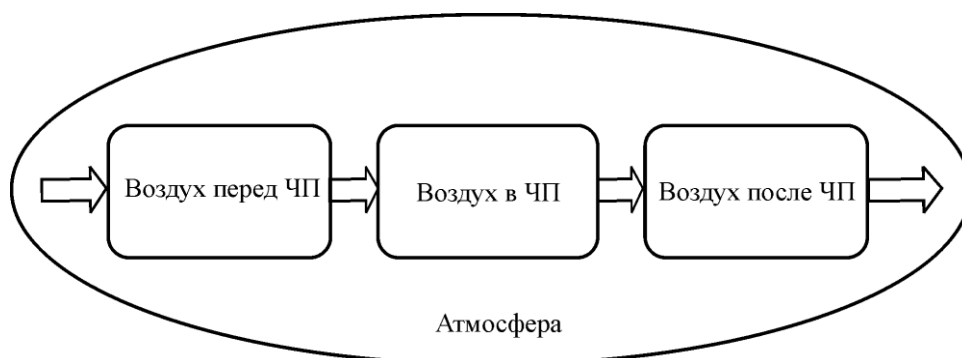
**Введение.** Попытки создания обобщенной концепции технологической экологии микроэлектроники, нацеленной главным образом на защиту предмета труда от негативного влияния внутрипроизводственной среды с помощью системы кондиционирования воздуха (СКВ), предпринимались и ранее. В работах [1, 2] описаны исследования, завершившиеся определенными практическими результатами в этом направлении, актуальными для прежнего уровня микроэлектронных технологий. Некоторые частные

вопросы решались в работах [3–5], посвященных расчету и выбору параметров технологического оборудования по критерию минимума привносимой дефектности. В [6] анализируются СКВ для чистых помещений (ЧП). Среди зарубежных исследований по данной проблеме следует отметить работы [7–9].

В настоящее время задача развития концепции технологической экологии микроэлектроники, обеспечивающей производство конкурентоспособной продукции более высокого уровня, приобретает особое значение. В современных условиях такая концепция должна учитывать не только полезность технической системы, но и ее экологичность, что предполагает ее тесные взаимосвязи с социально-экологической системой всей территории.

Многолетний опыт эксплуатации ЧП указывает на определенные недостатки предыдущих подходов к проектированию и эксплуатации СКВ. Необходимы более полный учет взаимосвязи их технических характеристик с внешней средой и конструктивно-технологическими особенностями СКВ, адекватная оценка технологической, энергетической и экологической эффективности ее функционирования, а также исследования возможных физико-химических превращений в обрабатываемом воздухе, ранее не принимавшихся во внимание, и ряд других обстоятельств.

**Методология концепции технологии с учетом современных факторов.** Современная научно-техническая концепция техноэкологии микроэлектроники может быть представлена в виде СКВ, реализующей основную функцию (Ф) по обеспечению требуемого класса чистоты помещения с помощью трех крупных подсистем (ПС): ПС1, выполняющей функцию Ф1 по формированию материально-энергетических характеристик потоков на пути воздуха из атмосферы через центральный кондиционер до ЧП ( $P_{вх}$ ); ПС2 с функцией Ф2 по формированию потоков в самом ЧП ( $P_{чп}$ ); ПС3 с функцией Ф3 по обработке удаляемого и рециркуляционного воздуха ( $P_{вых}$ ) (рис.1).



*Рис.1. Схема материальных, энергетических и информационных потоков в системе СКВ ЧП*

Концепция предполагает максимально возможный учет в исследованиях и практических разработках всего комплекса параметров и характеристик потока наружного воздуха ( $P_{атм}$ ) на территории расположения предприятия, процессов его трансформации до входа в ЧП при выполнении его главной функции в самом ЧП ( $P_{чп}$ ), а также при его направлении в атмосферу. При этом в соответствии с требованиями экологической безопасности должно соблюдаться правило  $P_{вых} \leq P_{атм}$ , т.е. качество воздуха на выходе из производства не может быть хуже, чем до него.

Предлагаемая концепция может быть представлена в виде укрупненной иерархической структуры, содержащей функции каждой подсистемы по отношению к объекту воздействия (воздуху как технологической среды), учитываемые факторы и реализуемые процессы (рис.2).

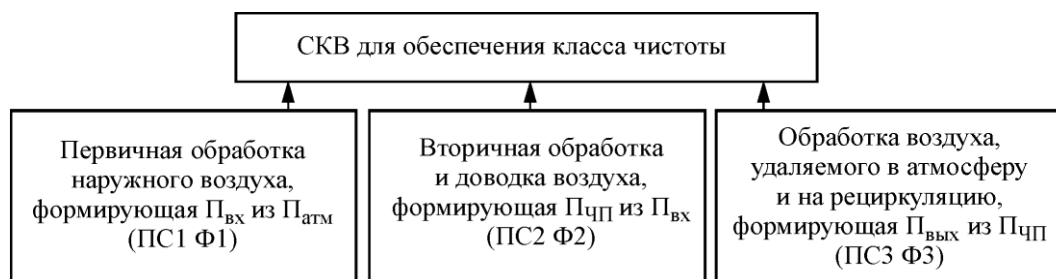


Рис.2. Иерархия функций в СКВ ЧП

Иерархия функций свидетельствует о значительном многообразии факторов, влияющих на эксплуатационную надежность, экономичность, энергоэффективность и экологичность системы воздухоподготовки ЧП. Нельзя исключить обнаружение новых явлений и факторов, приобретающих важность для современного уровня микроэлектроники и не имеющих в настоящий момент достаточной научной проработки. С учетом этих позиций и конечных целей все представленные научно-технические положения можно рассматривать как новую ступень развития проблемы анализа эффективности функционирования чистых помещений микроэлектроники [10]. Очевидно, что весь диапазон уже известных уточненных и новых факторов, составляющих систему, должен вырабатываться одновременно для трех подсистем. При этом обязательным условием должно быть то обстоятельство, что конечные факторы ПС1 должны быть начальными факторами ПС2, а конечные факторы ПС2 – начальными факторами для ПС3.

Дальнейшая детализация функций подсистем СКВ представлена в таблице, где, исходя из принципа разумной достаточности, приведены все основные и необходимые процессы, факторы, а также контролируемые параметры, влияющие на эффективность функционирования ЧП. В зависимости от конкретных технологических требований к классу чистых помещений в показанные процедуры могут вноситься соответствующие корректировки и изменения.

Очевидно, что комплекс процессов в  $P_{чп}$ , обеспечиваемый ПС2, занимает главное положение в организации требуемой технологической среды. Однако он, в свою очередь, зависит от функционирования ПС1, формирующей комплекс  $P_{вх}$ . Любые отклонения внешних условий от заложенных в проект ведут к самым неблагоприятным последствиям для основной технологии. Поэтому именно ПС1 и ПС2 в основном определяют структуру генеральной схемы СКВ и, соответственно, масштаб энергозатрат на подготовку воздуха. Отметим также, что при дальнейшем ужесточении технологических требований и повышении класса ЧП могут происходить совершенно новые и производные от указанных процессы, не отраженные в таблице.

Функция, реализуемая ПС3, касается обезвреживания выбросов в атмосферу и воздуха, направляемого на рециркуляцию, и, на первый взгляд, не имеет прямого отношения к основной функции системы. На самом деле она в значительной степени определяет состояние комплекса  $P_{атм}$ , т. е. качество сырья, а следовательно, и энергетику всего процесса подготовки воздуха как технологической среды. А поскольку СКВ ЧП является всего лишь подсистемой большой природно-технической системы, следует отметить первостепенную роль этой функции для качества воздуха как среды обитания.

Эколого-энергетические функции подсистем СКВ ЧП

Номер ПС	Элементы ПС	Процессы и факторы в элементах ПС	Контролируемые параметры
ПС1	Наружный воздух	Погодно-климатические характеристики воздуха	Роза ветров, температура, скорость воздуха, относительная влажность, давление, температурная инверсия, энтальпия, загрязненность, влагосодержание
	<b>Первичная обработка воздуха</b>		
	Стартовый фильтр	Фильтрация в стартовом фильтре	Эффективность фильтрации, потери напора и скорость потока, фильтрующая поверхность и производительность
	Кондиционер центральный	Тепловлагомассо-обмен: нагревание, охлаждение, увлажнение, осушение воздуха	Температура воздуха и влагосодержание воздуха
		Аэродинамика	Потери напора и скорость воздуха
		Вибрации	Амплитуда и частота
	Воздуховоды	Аэродинамика трехфазной среды	Потери напора и скорость воздуха
		Пылегенерация	Интенсивность аэрозолей
	<b>Вторичная обработка и доводка воздуха</b>		
	ПС2	Воздуховоды	Аэродинамика
Вибрации			Амплитуда и частота
Фазово-компонентные трансформации			Приращение давления водяного пара
Буферный объем		Аэродинамика	Потери напора и скорость воздуха
ЧП		Аэродинамика финишных фильтров	
		Аэродинамика фальшполов	
		Аэродинамика в объеме	
		Пылегенерация в ЧП	Концентрация аэрозолей
		Аэроионизация	Концентрация аэроионов
		Виброакустика	Амплитуда, частота вибраций и уровень звукового давления
		Образование статического электричества	Плотность зарядов
		Электромагнитные поля	Напряженность магнитного и электрического полей
		Восстановление чистоты	Время

Окончание таблицы

Номер ПС	Элементы ПС	Процессы и факторы в элементах ПС	Контролируемые параметры
<b>Обезвреживание удаляемого воздуха</b>			
ПСЗ	Рециркуляционный контур	Аэродинамика по рециркуляционному контуру	Потери напора и скорость воздуха
		Доводка воздуха до требуемого класса чистоты	Температура, скорость и относительная влажность, концентрация аэрозолей
	Вытяжные устройства и воздухопроводы	Взаимодействие примесей и образование вторичных соединений с участием вредных и опасных веществ	Экологическая оценка технологических газов и жидкостей
		Аэродинамика вытяжных устройств	Потери напора и скорость воздуха
		Оценка содержания примесей в атмосфере	Концентрация аэрозолей

**Заключение.** Рассматривая ЧП как часть сложноорганизованной наукоемкой природно-технической геосистемы, можно утверждать, что к его исследованию и конструированию в полной мере применимы принципы системного анализа как методологии решения проблемы путем последовательной ее декомпозиции на взаимосвязанные частные подпроблемы. Оценка эффективности функционирования ЧП на основе энергетического подхода связана с оптимизацией уровня затрат выходных потоков вещества и энергии системы. Применение принципа иерархии и ранжирования создает возможность решения проблемы путем последовательной декомпозиции ее на взаимосвязанные частные подпроблемы. Функционально-экологический анализ позволяет характеризовать экологичность системы.

Концепция технологической экологии микроэлектроники, построенная на подходах и принципах системного анализа различных аспектов функционирования комплекса жизнеобеспечения высокотехнологичных производств, может служить методологической базой для проектирования, оснащения оборудованием и квалифицированной эксплуатации для всей индустрии чистых помещений.

### Литература

1. Долгушев А.И., Каракеян В.И., Ушаков В.И. Научная концепция технологической экологии интегральной электроники // Электронная промышленность. – 1988. – Вып. 10(178). – С. 3–5.
2. Каракеян В.И., Ларионов Н.М., Рябышенков А.С., Ивченко А.О. Теоретическое обоснование и разработка систем контроля микропримесей в воздухе // Экологические приборы и системы. – 2012. – №2. – С. 15–17.
3. Одиноква Е.В., Панфилов Ю.В., Юрченко П.И. Перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности ионно-лучевым способом // Инженерный журнал: наука и инновации. – Электронное научно-технологическое издание. – 2013. – №6(18). – URL: engjournal.ru (дата обращения: 20.10.2015).
4. Прецизионное кондиционирование воздуха в чистых помещениях / В.И. Каракеян, В.И. Ушаков, В.М. Редин и др.; под ред. В.И. Ушакова. – М.: МИЭТ, 1988. – 68 с.

5. **Каракеян В.И., Редин В.М., Терещенко А.М., Осипова Н.В.** Аэродинамические режимы в чистых производственных помещениях и пылегенерация динамичных фильтров // Электронная промышленность. – 1995. – № 4–5. – С. 16–18.
6. **Федотов А.Е.** Чистые помещения. – 2-е изд. – М.: Асинком, 2003. – 576 с.
7. Чистые помещения / *Под ред. И.Хаякава:* пер. с япон. под ред. В.Г. Ржанова, В.И. Ушакова. – М.: Мир, 1990. – 456 с.
8. **Уайт В.** Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М.: Клинрум, 2008. – 304 с.
9. Проектирование чистых помещений / *Под ред. В.Уайта:* пер. с англ. – М.: Клинрум, 2004. – 360 с.
10. **Каракеян В.И., Дисветова Н.М.** Функционально-экологический анализ системы кондиционирования воздуха чистых помещений: методы анализа и контроля объектов природно-технических геосистем: сб. науч. тр. / Под ред. В.И. Каракеяна. – М.: МИЭТ, 2014. – С. 53–59.

Статья поступила  
26 октября 2015 г.

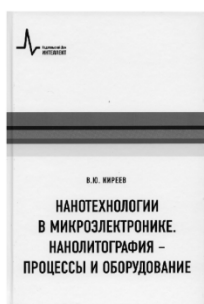
**Рябышенков Андрей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* техносферная безопасность и технологическая экология высокоэффективных производств.  
**E-mail:** ryabyshenkov@mail.ru

**Киреев В.Ю.**

**Книжные новинки**



**Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография - процессы и оборудование: Учебно-справочное руководство / В.Ю. Киреев - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2016. - 320 с., цв. вкл.**



ISBN 978-5-91559-215-4

В учебно-справочном руководстве проведен анализ возможностей, особенностей, ограничений и областей применения различных литографических и нелитографических методов наноструктурирования для создания топологии ИС с элементами субнанометрового диапазона. Показаны основные физические и химические механизмы и ограничения, лежащие в основе оптической нанолитографии, нанолитографии на экстремальном ультрафиолете, наноимпринт литографии, электронной нанолитографии и вакуумного газоплазменного травления.

Приведено современное производственное оборудование различных видов нанолитографии, его операционные и конструкционно-технологические параметры, технологические и экономические характеристики реализуемых процессов.

Руководство для университетов с обучением по специальностям: 210601 «Нанотехнология в электронике», 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», 222900 «Нанотехнология и микросистемная техника», 210600 «Нанотехнология», 210100 «Электронное машиностроение», а также для инженеров и научных работников.