

УДК 697.9:621.3.049.77

АНЦИФЕРОВА С.А., студент группы ТБ-11М (НИУ «МИЭТ»)
Научный руководитель РЯБЫШЕНКОВ А.С., д.т.н., профессор (НИУ «МИЭТ»)
г. Москва

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА УЧАСТКЕ ЛАКИРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

Введение. Проведение многих технологических процессов микроэлектронного производства, в том числе и лакировки изделий, сопровождается выделением в производственные помещения значительного количества теплоты, паров и вредных веществ, что вызывает изменения состава и параметров внутрипроизводственной воздушной среды.

Состав воздушной среды характеризуется количеством веществ, которые в ней содержатся. Контролировать состояние микроклимата можно с помощью правильно рассчитанного воздухообмена.

Воздухообмен – это процесс замещения внутреннего воздуха в помещении под действием естественной вентиляции или вентиляционного оборудования [1]. От правильности его расчёта зависит поддержание комфортной обстановки на рабочем месте, здоровье работников и предотвращение накопления вредных веществ.

Недостаточная вентиляция помещения может привести к таким проблемам, как:

- накопление CO_2 ;
- оседание грибков в больших количествах, которое влечет за собой появление плесени;
- распространение инфекций и аллергенов.

Необходимо отметить, что при значительном увеличении воздухообмена могут возникать негативные последствия:

- наличие сквозняков;
- большая вероятность пересушивания воздуха;
- увеличение затрат на обогрев или охлаждение помещения.

Целью работы является проведение исследования вредных веществ на основных операциях процесса лакировки изделий и выявление наиболее значимых из них.

При лакировке в воздух рабочей зоны выделяются вредные химические вещества, основными из которых являются **летучие органические соединения (ЛОС) и аэрозоли.**

Летучие органические соединения (ЛОС) – это группа химических веществ, испаряющихся при комнатной температуре. В лаках и растворителях содержатся такие ЛОС, как:

- толуол, ксилол, бензол (ароматические углеводороды) – оказывают наркотическое действие, поражают нервную систему, печень и почки.
- ацетон, этилацетат, бутанол (кетоны и сложные эфиры) – раздражают слизистые оболочки, могут вызывать головокружение и тошноту.
- формальдегид (в некоторых составах) – обладает канцерогенным и раздражающим действием.

Аэрозоли – это мелкодисперсные частицы лака, образующиеся при распылении. Они могут содержать:

- твердые частицы пигментов и наполнителей (если лак цветной или содержит добавки).
- капли жидкого лака, которые при вдыхании оседают в дыхательных путях, вызывая раздражение и аллергические реакции.

Длительное воздействие этих веществ без должной защиты может привести к профессиональным заболеваниям: бронхитам, астме, дерматитам, отравлениям и даже онкологическим патологиям.

Расчет потребного воздухообмена (L , м³/ч) по паро- и газовыделениям и для удаления избыточного тепла из помещения проводится по формулам 1 и 2: [2].

$$L = \frac{G \cdot 1000}{X_g - X_n}, \text{ м}^3 / \text{ч}, \quad (1)$$

где G , г/ч – количество вредных веществ, выделяющихся в воздух помещения; x_v , мг/м³ – предельно допустимая концентрация вредности в воздухе рабочей зоны помещения, согласно ГОСТ 12.1.005-88 [3]; x_n , мг/м³ – максимально возможная концентрация той же вредности в воздухе населенных мест (ГН 2.1.6.3492-17) [4].

$$L = \frac{Q_{изб}}{y \cdot c \cdot \Delta t}, \text{ м}^3 / \text{ч}, \quad (2)$$

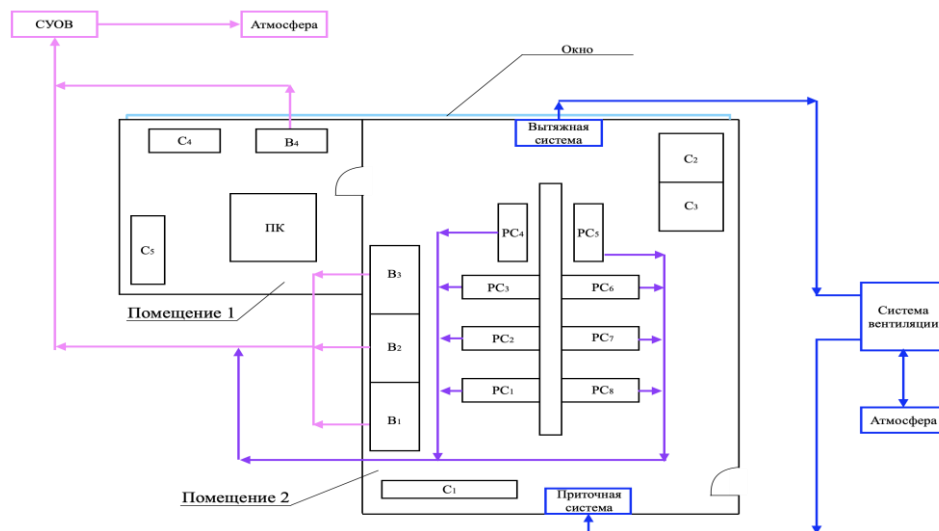
где $Q_{изб}$, ккал/ч – избыточное тепло; $\gamma_v = 1,206$ кг/м³ – удельная масса приточного воздуха; $c_v = 0,24$ ккал/кг·град – теплоемкость воздуха.

Кратность воздухообмена показывает, сколько раз в течение одного часа воздух полностью сменяется в помещении. Кратность воздухообмена (n) определяется по формуле 3:

$$n = \frac{L}{V_n}, \text{ ч}^{-1}, \quad (3)$$

где $V_{п}$, m^3 – объем помещения.

На рассматриваемом участке, схема которого представлена на рисунке 1, находятся два производственных помещения 1 и 2 (помещение 1 — объёмом 67,68 и помещение 2 – 214,24 m^3).



PC₁₋₈ – рабочий стол заливщика компаундами, В₁₋₄ – вытяжной шкаф, С₁₋₅ – стеллаж, ПК – покрасочная камера, СУОВ – система удаления и очистки воздуха.

Рисунок 1. Схема расположения участка лакировки и аппаратов местных вытяжных устройств

В работе проведен анализ вредных веществ на основных операциях процесса лакировки изделий, который показал, что при операции промывки и покраски основными вредными веществами являются демитилбензол; при приготовлении лака – метилбензол; при приготовлении клея – этилацетат; при промывке изделий – бутан-1-ол и бензин. Проведенный анализ вредных веществ позволил не только идентифицировать их, но и оценить степень опасности. Например, метилбензол (толуол) и диметиловый эфир бензол (ксилол) оказывают наркотическое действие, поражают нервную систему и органы кроветворения. Этилацетат раздражает слизистые оболочки, а пары бензина обладают выраженной остронаправленной токсичностью. Такая классификация обосновывает необходимость жёсткого контроля их концентраций и подтверждает правильность выбора в качестве критерия расчёта именно ПДК рабочей зоны. Высокая расчётная кратность воздухообмена напрямую связана с агрессивностью и объемом выделяемых соединений.

Проведенный расчёт количества вредных веществ в воздухе помещения 2 по основным операциям составил 8000 m^3 /час, а кратность воздухообмена – 40 раз/час; в помещении с покрасочной камерой, где происходит нанесение грунта, значение потребного воздухообмена составляет 2200 m^3 /час, кратности – 32 раза/час.

Для нормализации параметров внутрипроизводственной среды необходимо составление теплового баланса помещения, основанного на определении всех источников поступления и расхода тепла в помещении.

Избыточное тепло рассчитывается по формуле (4):

$$Q_{изб} = Q_{об} + Q_{осв} + Q_{л} + Q_{р} - Q_{отд}, \text{ ккал / ч}, \quad (4)$$

где $Q_{об}$, ккал/ч – тепло, выделяемое оборудованием; $Q_{осв}$, ккал/ч – тепло, выделяемое системой освещения; $Q_{л}$, ккал/ч – тепло, выделяемое людьми в помещении; $Q_{р}$, ккал/ч – тепло, вносимое за счет солнечной радиации; $Q_{отд}$, ккал/ч – теплоотдача естественным путем.

На рассматриваемом участке определены следующие источники выделения тепла:

- работники участка ($Q_{л}$);
- покрасочная камера ($Q_{об}$);
- система освещения ($Q_{осв}$);

Так как расчеты производятся в холодный период года и дополнительные условия не учитываются, то можно предположить, что $Q_{р} = Q_{отд}$.

По результатам расчетов вентиляции для удаления избыточного тепла в помещении 1 значение потребного воздухообмена равно $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$, а в помещении 2 – $850 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Также в ходе исследования проведена детальная оценка комбинированного воздействия вредных веществ для каждой технологической операции на участке лакировки. Основой для расчетов послужили данные о выделении химических соединений и требования СанПиН 1.2.3685-21.

Таблица 1. Группы веществ одностороннего действия при лакировке изделий

№ п/п	Группа веществ	Вещества	Общий вредный эффект	Норматив ($\Sigma \leq 1$)
1.	Ароматические углеводороды	Ксилол, толуол, бензол	Поражение ЦНС, печени, раздражение слизистых	СанПиН 1.2.3685-21
2.	Сложные эфиры	Этилацетат, бутилацетат	Поражение ЦНС, печени, раздражение слизистых	ГОСТ 12.1.005-88
3.	Спирты и гликоли	Бутан-1-ол, 2-этоксиэтанол, этанол	Токсичность для почек, кожи, кроветворной системы	СанПиН 1.2.3685-21
4.	Кетоны	Ацетон	Раздражение глаз, головокружение	ГОСТ 12.1.005-88

Комбинированное действие вредных веществ – это одновременное или последовательное воздействие на организм нескольких ядов при одном и том же пути поступления. В зависимости от эффектов токсичности выделяют несколько типов такого действия:

- аддитивность (суммация). Суммарный эффект воздействия веществ в смеси равен сумме эффектов её действующих компонентов;
- потенцирование (синергизм). При воздействии веществ в смеси одно вещество усиливает и удлиняет действие другого;
- антагонизм. При воздействии веществ в смеси одно вещество ослабляет действие другого, а эффект меньше, чем при суммации.

Комбинированное действие веществ оценивается по уравнению (5):

$$\Sigma = \frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} \leq 1. \quad (5)$$

Если индекс >1 , предложить меры по снижению концентраций (например, увеличение воздухообмена или замена реагентов).

Расчет комбинированного действия показал, что при процессе покраски (на этапе промывки растворителем) индекс равен 4,676, что превышает 1 — следовательно, меры по снижению концентраций при данной операции необходимы.

Оптимизированные рекомендации

1. Технологические меры:

1) **Оптимизация расхода растворителей** (снижение на 20-30%):

- внедрение дозирующих систем;
- использование замкнутых промывочных систем.

2) **Контроль температуры** (снижение испарения):

- поддержание температуры промывочных ванн не выше 25°C.

2. Организационные меры:

1) **График работы:** ограничение непрерывного контакта до 2 часов с последующим 15-минутным перерывом.

2) **Мониторинг:**

- автоматические газоанализаторы с порогом срабатывания 15 мг/м³;
- ежемесячные контрольные замеры.

3. Средства индивидуальной защиты:

Обязательный минимум:

- противогазы с фильтрами типа А (органические пары);
- защитные очки и перчатки из нитрила.

Расчёты показывают существенное расхождение в определяющих факторах для двух помещений.

Для Помещения 2 расчётный воздухообмен по вредным веществам (8000 м³/ч) почти на порядок превышает воздухообмен для удаления тепла (850 м³/ч). Это указывает на то, что определяющим фактором для данного помещения является химическое загрязнение воздуха.

Для Помещения 1 (с покрасочной камерой) разница менее значительна: 2200 м³/ч против 1500 м³/ч. Однако кратность воздухообмена по теплу (22 раза/час) здесь весьма велика, что говорит о значительном тепловыделении от оборудования (покрасочной камеры). Таким образом, система вентиляции в Помещении 1 должна быть рассчитана на одновременное эффективное удаление и вредных паров, и избыточного тепла.

Заключение.

Проведенные расчёты показали, что:

- 1) основной критерий для проектирования вентиляции на участке лакировки – воздухообмен по вредным паро- и газовыделениям, что подтверждается экстремально высокими значениями его кратности (40 и 32 раз/час);
- 2) наличие значительных тепловых нагрузок, особенно в помещении с окрасочной камерой, требует комбинированного подхода и проверки системы на способность удалять избыточное тепло.

На основе проведённых исследований разработаны рекомендации по построению системы вентиляции:

- для локализации вредных веществ у источников их образования (РС~1-8~, В~1-4~, ПК) необходимо использовать локальные вытяжные устройства (вытяжные зонты, бортовые отсосы) с высокой степенью улавливания;
- общеобменная приточно-вытяжная вентиляция должна компенсировать удаляемый воздух, обеспечивать подачу очищенного и подогретого (в холодный период) воздуха, а также создавать общий подпор для предотвращения распространения вредностей в смежные помещения;
- аварийная вентиляция должна запускаться автоматически по сигналу газоанализаторов, установленных на основные вредные вещества, и иметь производительность, обеспечивающую не менее 8-12 кратного воздухообмена, что является отраслевым стандартом для удаления внезапных выбросов.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 70735-2023. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. Устройство систем вентиляции и кондиционирования серверных помещений. Правила и контроль выполнения работ. – Введ. 2024-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2023. – III, 19 с.
2. Каледина, Н. О. Вентиляция производственных объектов : учеб. пособие для вузов / Н. О. Каледина ; Моск. гос. горн. ун-т. – 4-е изд., стер. – Электрон. дан. (1 файл : 5 Мб). – Москва : Изд-во МГГУ, 2008. – 193 с. – URL: [https://kazan.stroykanasha.ru/upload/iblock/fd1/05_Kaledina_Ventilyatsia_proizvodstvennykh_obektov.pdf] (дата обращения: 10.04.2026).
3. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 1989-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2002. – 14 с.

4. ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений : гигиенические нормативы : утв. Постановлением Глав. гос. санитар. врача РФ от 22 дек. 2017 г. № 165. – Москва : Роспотребнадзор, 2017. – 300 с.
5. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 : утв. Приказом М-ва стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва РФ от 30 дек. 2016 г. № 1038/пр. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 87 с.
6. СП 2.2.3670-20. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда : утв. Постановлением Глав. гос. санитар. врача РФ от 28 янв. 2020 г. № 2. – Москва : Роспотребнадзор, 2020. – 62 с.

Аннотация: в работе рассматривается методика расчёта необходимого воздухообмена на участке лакировки изделий микроэлектроники, что является ключевым фактором для обеспечения безопасных и эффективных условий труда. Проведён анализ вредных веществ, выделяющихся на основных операциях процесса лакировки. Определены значения потребного воздухообмена и кратности воздухообмена, результаты позволяют подобрать оптимальную систему вентиляции, сочетающую локальные вытяжные устройства и общеобменную вентиляцию, предусмотреть аварийную систему на случай внештатных ситуаций.

Ключевые слова: воздухообмен, лакировка, вредные вещества, микроэлектроника.