

УДК 62.799:628.87

*Д-р техн. наук В. С. Антонюк, Ю. Г. Мережаний**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ*

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ НА РЕСУРС ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ПРИЛАДІВ

Розглянуті вплив мікроклімату на якість та ресурс роботи прецизійних механізмів, зокрема гіроскопічних приладів. Приведені рекомендації щодо зменшення негативного впливу мікроклімату виробничого приміщення на прецизійне виробництво, та запропоновано систему керування мікрокліматом для забезпечення надійності гіроскопічних приладів та систем.

Ключові слова: мікроклімат, чистота приміщення, складання, прецизійність.

Вступ

Підвищення вимог до технічних та експлуатаційних характеристик механічних та електро-механічних приладів вимагає високої точності і стабільності характеристик прецизійних механізмів, що використовуються в цих приладах. В більшості випадків причиною відмов прецизійних механізмів є висока інтенсивність зношування поверхонь деталей, заїдання у парах тертя, недостатня антифрикційна якість змащування вузлів тертя [1].

Практика експлуатації гіроскопічних приладів показує, що найбільш важливою причиною, яка впливає на точність приладу, є стан опор ротора, оскільки інші елементи приладу не дають такого впливу на зниження точності [2]. Порушення в роботі головних опор може впливати на зміщення центра мас гіромотору, збільшувати динамічну нерівновагу і вібрацію ротора, збільшувати потужність, яку споживає гіромотор. Фактично ресурс роботи гіромотора визначається довговічністю та надійністю роботи підшипників головних опор.

В якості способів подовження довговічності опор ротора пропонується удосконалювати конструкцію підшипників та їх вузлів, а також технологію їх виготовлення, випробування та монтажу. Наприклад, щоб знизити вплив мікроклімату на елементи конструкції прецизійних механізмів в приладах, при їх конструюванні передбачають спеціальні ущільнення, які забезпечують захист від пилу та герметичність корпусу приладу [2].

Проте, зазначені заходи стосуються лише конструктивних особливостей приладів та удосконалення технологічних операцій, і не враховують технологічні умови, в яких виконуються операції складання та регулювання. В той же час відомо, що похибки допущенні при складанні й регулюванні гіроскопічних приладів суттєво впливають

на їх точність та надійність [1]. До того ж, слід враховувати, що при виготовленні прецизійних приладів суттєвий вплив на їх подальшу експлуатацію вносять не тільки технологічні фактори, але й умови, в яких відбуваються процеси складання та регулювання. При цьому суттєву роль відіграє мікроклімат або технологічне середовище, в якому виконуються операції складання, в першу чергу це запиленість повітря, температура та вологість повітря. Пил може потрапляти в відповідальні елементи гіроскопічних приладів (опори, контактні пристрої, тощо) і різко погіршувати або зовсім порушувати їх роботу.

Ступінь насиченості повітря водяною парою характеризується відносною вологістю. Висока вологість повітря, а особливо конденсація вологи, прискорюють корозію деталей приладів і знижують міцність електричної ізоляції між струмонесучими деталями. Низька вологість повітря збільшує зношування щіток і кілець контактних пристроїв.

Зміна температури приладу впливає на лінійні розміри деталей, жорсткість окремих елементів конструкції, опір електричних провідників і магнітопроводів. При зміні температури можуть деформуватись окремі деталі конструкції приладів із-за нерівномірних внутрішніх напружень. При низьких температурах, внаслідок зменшення зазорів в зчленуваннях і підвищення в'язкості мастила, можуть значно підвищуватись моменти тертя в опорах і навіть може відбутись заклиннення механізму.

Метою роботи є розробка та вдосконалення спеціальних автоматизованих систем контролю та керування мікрокліматичними параметрами в складальних цехах прецизійного виробництва з підвищеним «класом чистоти», які забезпечують якість та надійність виготовлення прецизійних приладів та систем.

Вирішення поставленої задачі

Забезпечення якості прецизійних механоскладальних та регулювальних робіт можливе при дотримуваних певних умовах технологічного процесу з створенням відповідного технологічного середовища, параметри якого чітко контролюються та регулюються.

Для вирішення поставленої задачі забезпечення якості і надійності прецизійних приладів та систем запропоновано математичну модель технологічного середовища виробничого приміщення складальної ділянки прецизійних приладів. При розробці математичної моделі мікроклімату виробничих приміщень бралися до уваги наступні задачі:

- розрахунок потоку повітря всередині приміщення з розміщеним у ньому обладнанням, перегородок, джерел тепла, вологи і забруднень;
- розрахунок розподілення температури в приміщенні;
- розрахунок розподілення вологості в приміщенні;
- розрахунок потоків розповсюдження та концентрації забруднень в приміщенні.

В основу математичної моделі мікроклімату виробничих приміщень складальної ділянки прецизійного виробництва з підвищеним «класом чистоти» покладено систему нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса, рівнянь переносу тепла, вологи та концентрації забруднень [3]:

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_3}, \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial x_3}, \\ \frac{du_3}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial x_3} + g\beta\theta, \\ \frac{du_1}{dx_1} + \frac{du_2}{dx_2} + \frac{du_3}{dx_3} &= 0, \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{L}{C_p} \Phi + \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H_2}{\partial x_2} + \frac{\partial H_3}{\partial x_3} + J_\theta, \\ \frac{dq}{dt} &= -\Phi + \frac{\partial P_1}{\partial x_1} + \frac{\partial P_2}{\partial x_2} + \frac{\partial P_3}{\partial x_3} + J_q, \\ \frac{dc}{dt} &= \frac{\partial C_1}{\partial x_1} + \frac{\partial C_2}{\partial x_2} + \frac{\partial C_3}{\partial x_3} + J_c, \end{aligned}$$

де x_i ($i = 1, 2, 3$) – декартові координати; u_i – компоненти швидкості; t – час; p – тиск; ρ – густина повітря; θ – температура, що відраховується від середнього значення $\bar{\theta}$; T – абсо-

лютна температура повітря; q – питома вологість; c – об'ємна концентрація домішок; J_θ, J_q, J_c – штучні джерела тепла, вологи і забруднюючих домішок; δ_{ij} – символ Кронекера; $\nu_u, \nu_\theta, \nu_q, \nu_c$ – коефіцієнти кінематичної в'язкості, температуропровідності, дифузії вологи і домішок; Φ – швидкість формування рідкої фази; L – прихована теплота конденсації (або сублімації); q_n – питома вологість насичення; g – прискорення вільного падіння; β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення.

Вважаючи, що $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}$ і враховуючи

відносно малі розміри розрахункової області, при проведенні числових експериментів можна враховувати, що $u_1 = u_2 = u_3 = \theta = q = c = 0$ при $t = t_0$.

Граничні умови при цьому будуть мати наступний вигляд:

$$u_n = 0, \quad u_\tau = 0,$$

$$\theta = \theta_n \text{ або}$$

$$(v_\theta + k_H) \frac{\partial \theta}{\partial n} = \tau_\theta, \quad (\text{для твердої поверхні})$$

$$\frac{\partial q}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0,$$

$$u_\tau = 0, \quad u_n = u_{in}, \quad v = \theta_{in}, \quad (\text{на вході потоку в розрахункову область})$$

$$q = q_{in}, \quad c = c_{in},$$

$$u_\tau = 0, \quad u_n = u_{out}, \quad (\text{на виході потоку з розрахункової області})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{\partial q}{\partial n} = \frac{\partial c}{\partial n} = 0,$$

де u_τ, u_n – нормальна і дотична складові швидкості; θ_n – температура на поверхні; τ_θ – тепловий потік; нижніми індексами *in* або *out* супроводжуються параметри на вході потоку в розрахункову область або виходу з неї.

На основі математичної моделі запропоновано систему керування мікрокліматом виробничого приміщення для прецизійного складання приладів, яка регламентується технологічними умовами виробництва та вимогами стандартів ISO 9001, ISO 14644 та інших (рис. 1).

Система керування мікрокліматом виробничого приміщення складається з контролера управління вентиляцією (*KУ-В*), пульта управління вентиляцією (*П-В*) та силового блоку, що включає симістори (*МГТСО*), автомат (*A*) і реле (*PЗ*).

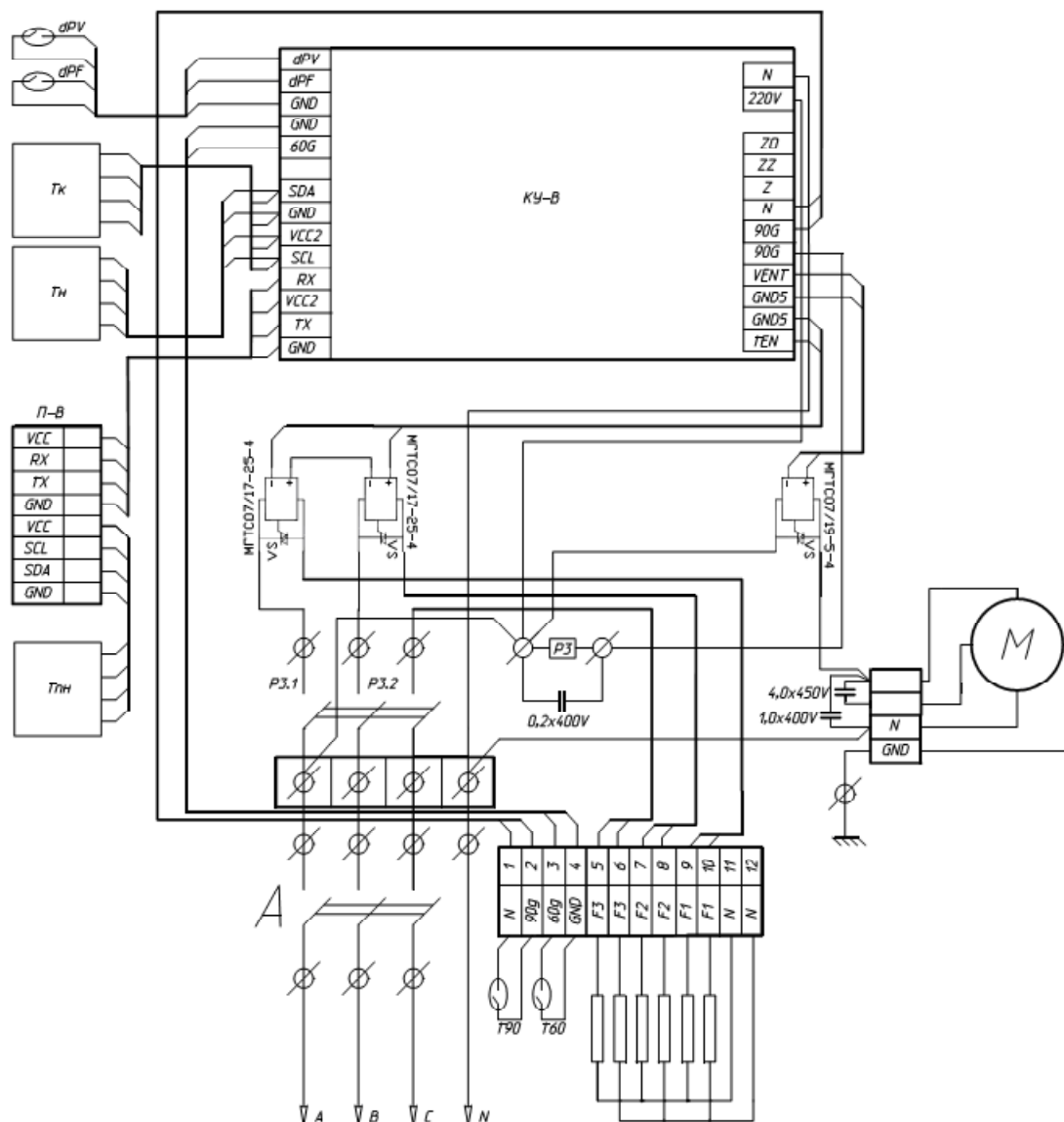


Рис. 1. Схема системи керування мікрокліматом

Для контролю параметрів мікроклімату в системі включено датчик температури приміщення ($T_{пн}$), датчик температури каналу (T_k), датчик зовнішньої температури (T_n), датчики захисту теплового електронагівача (TEH) від перегріву на $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{60}) і $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{90}). Для контролю стану роботи вентилятора (M), що нагнітає повітря в приміщення, та контролю ступеня засміченості фільтра тонкої очистки повітря використовуються датчики вимірювання перепаду тиску (dPV і dPF відповідно).

Очищення приточного повітря виконується наступним чином. Вентилятор (M) нагнітає зовнішнє повітря у систему вентиляції приміщення через фільтр тонкої очистки, що очищає повітря від часток бруду. Контролер $KY-B$ опитує датчик тиску контролю вентилятора (dPV), що

порівнює різницю тиску до приточного вентилятора (M) і після нього, та датчик тиску контролю фільтра (dPF), що порівнює різницю тиску до повітряного фільтра і після нього, й видається сигнал на керування приточного вентилятора (M). Якщо різниця тиску на датчиках (dPV і dPF) більше заданої $KY-B$, тоді $KY-B$ видає сигнал на зупинку роботи вентилятора (M). Якщо різниця тиску на датчиках тиску (dPV і dPF) менше заданої, то мікропроцесорний блок продовжує опитування датчиків. Так контролюється потік повітря, що нагнітається вентилятором (M), а також контролюється ступінь засміченості повітряного фільтра, і в разі потреби подається сигнал про необхідність його заміни.

Підігрів приточного повітря виконується наступним чином. Контролер управління ($KY-B$) керує

роботою вентилятора, що нагнітає зовнішнє повітря у приміщення через теплоелектричний нагрівач *ТЕН (FIF3)*. Контролер *КУ-В* опитує датчик температури, що встановлений до вентилятора (T_n), датчик температури, встановлений після вентилятора (T_k), та датчик температури, встановлений в приміщенні (T_{nn}). Якщо температура на датчику температури зовнішнього повітря (T_n) менше температури на датчику температури в приміщенні (T_{nn}), контролер *КУ-В* включає *ТЕН*. Якщо температура більше або дорівнює, то *КУ-В* припиняє роботу *ТЕН*. Точне налаштування потужності роботи *ТЕН* виконується за допомогою використання широтно-імпульсного модулятора та порозрядного врегулювання. Таким чином досягається необхідне значення температури приточного повітря в приміщенні. Датчик температури в каналі (T_k) додатково виконує функцію захисту *ТЕН* від перегріву. Якщо температура на цьому датчику більше значення температури заданої *КУ-В*, то блок керування примусово припиняє роботу *ТЕН*, не даючи йому перегрітися і вийти з ладу.

Керування роботою системи, завдання параметрів мікроклімату і інші сервісні функції виконуються за допомогою пульта керування вентиляцією (*П-В*). Система забезпечує мікроклімат на прецизійному складальному виробництві згідно технічних вимог технологічного процесу в автоматичному режимі за умови її застосування разом з технологіями «чистих приміщень».

Згідно стандарту ISO 14644-1, чисте приміщення (cleanroom) – це приміщення, в якому контролюється рахункова концентрація аерозольних часток й яке побудовано і використовується таким чином, щоб звести до мінімуму надходження, генерацію та нагромадження часток в середині приміщення, і в якому, при необхідності, контролюються інші параметри, наприклад, температура, вологість й тиск. Чисті приміщення класифікуються по ступеню чистоти повітря в них [4].

Іноді для забезпечення умов технологічного процесу в межах чистого приміщення виникає необхідність створення окремих ізольованих ділянок – боксів (або мікробоксів). Якщо клас чистоти, який потрібно підтримувати всередині боксу, аналогічний класу чистоти самого чистого приміщення, можна використовувати бокс класу I, оскільки в ньому ізоляція забруднень усередині боксу забезпечується повітряним потоком, що надходить із приміщення. Якщо ж всередині боксу необхідний більш високий клас чистоти, ніж у основного чистого приміщення, тоді слід використовувати бокс класу II. Його конструкція забезпечує потік профільтрованого повітря над виробом і у той же час гарантує, що повітря не буде виходити за межі боксу. Для того, щоб забезпечити надійну роботу боксів класу II, необ-

хідно приділяти особливу увагу балансу повітряних потоків [5].

Принцип організації вентиляції в чистих приміщеннях схожий на принципи вентиляції більшості звичайних приміщень із кондиціонуванням повітря. Повітря в такі приміщення подається системою кондиціонування через встановлені на стелі повітророзподільники. Однак, системи вентиляції чистих приміщень мають цілий ряд особливостей:

- звичайні приміщення повинні забезпечуватися тільки такою кількістю повітря, що необхідна для створення умов праці; як правило, кратність повітрообміну (у годину) у них перебуває в межах від 2 до 10. У той же час в чистих приміщеннях необхідно мати величину кратності повітрообміну від 10 до 100. Ця додаткова кількість повітря необхідна для розрідження забруднень, що знаходяться в повітрі, до прийнятної концентрації;

- у чистих приміщеннях використовують набагато більш ефективні повітряні фільтри, ніж в інших приміщеннях; ефективність фільтрів для видалення з повітряного середовища часток розміром більш 0,3 мкм звичайно перевищує 99,97 %.

- у чистих приміщеннях високоефективні фільтри встановлюються в місцях подачі повітря в приміщення, а у системах кондиціонування повітря в офісах і подібним їм приміщеннях, фільтри розміщують безпосередньо за системою кондиціонування повітря, що не виключає можливості проникнення забруднень у приміщення через повітроводи або генерації часток їх внутрішніми поверхнями;

- для того, щоб виключити потрапляння повітря в чисте приміщення із суміжних, більш забруднених ділянок, у такому приміщенні повинен бути створений надлишковий тиск повітря відносно сусідніх приміщень, менш чистих; це досягається шляхом подачі в приміщення великої кількості повітря, яке потім віддаляється через витяжну вентиляцію, або подається у суміжні, менш чисті приміщення.

Також важливою ознакою чистого приміщення є стан його поверхонь. Матеріали для оздоблення чистого приміщення повинні легко піддаватися очищенню і не бути джерелом часток, що забруднюють повітря. Поверхні повинні бути виконані таким чином, щоб забезпечити доступ до них під час прибирання та виключати нагромадження забруднень у порожнинах та щілинах.

Чистота повітря пов'язана з генерацією аерозольних забруднень, що виділяється технологічним устаткуванням і працюючим в чистому приміщенні персоналом. Чим більше людей перебуває в чистому приміщенні, чим активніші дії, що виконує персонал, чим гірше якість використовуваного одягу, тим вище ступінь забруднен-

ня повітря в приміщенні. Людина, що переходить у чистому приміщенні з місця на місце й одягнена у спецодяг, що неефективно запобігає поширенню забруднень, наприклад, у спецодяг або лабораторний халат, може в середньому генерувати у хвилину близько $2 \cdot 10^6$ часток розміром $\geq 0,5$ мкм, близько 300000 часток розміром $\geq 5,0$ мкм. Якщо людина одягнена в правильно виготовлений одяг (комбінезон, взуття до колін, тощо), який виконано з матеріалів, що ефективно затримують забруднення, то середня генерація часток розміром $\geq 0,5$ мкм і $\geq 5,0$ мкм за хвилину скоротиться на 50 та 88 відсотків відповідно. Інформації щодо генерації часток технологічним обладнанням, яке працює в чистому приміщенні, доволі мало, але вважається [4], що ця величина досягає декількох мільйонів часток розміром $\geq 0,5$ мкм за хвилину.

Реалізація розробленої системи моніторингу та керування параметрами мікроклімату виробничого приміщення в умовах реального виробництва складального цеху показало, що для забезпечення технічних вимог технологічного процесу складання гіроскопічних приладів необхідно дотримуватись концентрації часток пилу в повітрі не більш 8 часток на 1 літр повітря, розміром 1 мкм. Дана система забезпечує чистоту виробничого приміщення у відповідності до класу чистоти 6 ISO, в якому згідно стандарту [4] кількість часток пилу розміром до 1 мкм не повинна перевищувати 8320 часток пилу на 1 м^3 повітря, що є допустимим для процесу складання прецизійних гіроскопічних приладів та систем.

Висновки

Ресурс роботи деталей прецизійних механізмів, зокрема механізмів, що використовуються в приладах систем орієнтації і навігації суттєво залежить від параметрів мікроклімату виробничого приміщення, таких як температура, вологість повітря і особливо запиленість повітря. При прецизійному складанні гіроскопічних приладів, наявність мікробруду, що потрапляє в елементи рухомих конструкцій приладу, значно по-

гіршує експлуатаційні характеристики приладів, а в деяких випадках може приводити до виходу елементів механізму з ладу.

Для забезпечення точності і стабільності характеристик прецизійних механізмів пропонується використовувати «чисті приміщення» разом з спеціально розробленою системою моніторингу та керуванням мікрокліматом, яка підтримує параметри технологічного середовища виробничого приміщення на заданому рівні, що відповідно забезпечує технічні умови складання прецизійних механізмів, необхідних для якісної та довговічної експлуатації навігаційних приладів та систем.

Список літератури

1. Павловский М. А. Влияние погрешностей изготовления и сборки гироскопических приборов на их точность. / М. А. Павловский. – К. : Издательство Киевского университета, 1973. – 192 с.
2. Гироскопические системы, Ч. III. Элементы гироскопических приборов / [Никитин А. Е., Шестов С. А., Матвеев В. А. и др.] ; под ред. Д. С. Пельпора. – М. : Высш. школа, 1972. – 472 с. с ил.
3. Описание пакета прикладных программ для моделирования микроклимата внутри помещений / [Сарманаев С. Р., Десятков Б. М., Бородулин А. И., Ярыгин А. А.] // Сибирский журнал промышленной математики. – 2003. – Т. VI. № 4(16). – С. 94–110.
4. Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness. (ISO 14644-1, IDT): ISO 14644-1:1999. – [Чинний від 1999-05-01]. – USAINFO.COM.: COPYRIGHTED MATERIAL LICENSED TO NASA, 1999. – I, 24 с. – (Міжнародний стандарт).
5. Проектирование чистых помещений / Под ред. В. Уайта., пер. с англ. [Алексашин О. Ф., Балаханов М. В., Власенко В. И. и др.] ; под ред. В. И. Калечица. – М. : «Клинтрум», 2004. – 360 с.

Поступила в редакцию 24.08.2011

Антонюк В.С., Мережаный Ю.Г. Влияние параметров микроклимата производственных помещений на ресурс деталей прецизионных механизмов

Рассмотрено влияние микроклимата на качество работы и ресурс прецизионных механизмов, а именно гироскопических приборов. Приведены рекомендации уменьшения отрицательного влияния микроклимата производственного помещения на прецизионное производство и предложена система управления микроклиматом с целью обеспечения надежности гироскопических приборов и систем.

Ключевые слова: микроклимат, чистота помещения, сборка, прецизионность.

Antonjuk V., Merezhanij J. Industrial premises microclimate parameters influence on the resource of precision mechanisms details

Influence of a microclimate on quality of work and resource of precision mechanisms, namely gyrosopic devices is considered. Recommendations of industrial premise microclimate negative influence reduction on precision manufacture are resulted and the control system of a microclimate for the purpose of reliability maintenance gyrosopic devices and systems is offered.

Key words: microclimate, cleanliness of a room, assembly, accuracy.