

<https://doi.org/10.15407/knit2020.01.072>

УДК 629.783:621.79.02

А. В. ВОРОНЦОВ, вед. инж.-констр.,

E-mail: voron190485@gmail.com

В. П. ФРОЛОВ, зам. нач. комплекса, канд. техн. наук

В. Н. БАЛАШОВ, нач. комплекса

К. Г. АЛЕКСЕЕВ, нач. отд.

И. Ю. ЦИПУН, нач. сектора

А. В. МОКИН, вед. спец.

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,

ул. Криворожская 3, Днепро, Украина, 49008

МОБИЛЬНАЯ ЧИСТАЯ КАМЕРА ДЛЯ СБОРКИ ГОЛОВНЫХ БЛОКОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПЛОЩАДЬЮ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Работа посвящена оптимизации и снижению затрат при проектировании чистых помещений, используемых в ракетно-космической технике. Представлены основные направления оптимизации и снижения затрат не только на этапе выполнения проектных работ, но и в процессе эксплуатации. Предложено новое архитектурно-планировочное решение организации чистого помещения в монтажно-испытательном корпусе (МИК). Преимущества использования мобильной чистой камеры для сборки головного блока (ГБ): мобильность, возможность транспортировки и развертывания в помещениях МИК; возможность отключения системы очистки воздуха в период между пусками; компактность размещения в МИК; в МИК не используется стандартное грузоподъемное оборудование (мостовые краны); использование шилюзовой камеры как части зала сборника ГБ при выполнении технологических операций по сборке ГБ, проще схема работы системы температурно-влажностного режима в чистой камере сбора ГБ (возможно ее частичное отключение); для персонала, работающего в чистой камере, предполагается использование одноразовой рабочей спецодежды, что исключает использование прачечной; минимизация расходов на содержание в период между пусками, камера может складываться и упаковываться в контейнеры. Учитывая перечисленные преимущества мобильной чистой камеры, можно сделать вывод о целесообразности ее применения при сборке ГБ. Разработанное планировочное решение является альтернативой ранее спроектированным помещениям. Следует отметить, что концепция создания мобильной чистой камеры отражает современное направление развития наземных комплексов и отвечает требованиям мобильности, экономичности и чистоты.

Ключевые слова: сборка головного блока, мобильная чистая камера, проектирование чистых помещений.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях мировой конкуренции на рынке пусковых услуг по выведению КА на заданную орбиту возникает необходимость рационального подхода к проектированию чистых помещений эксплуатируемых в составе наземных комплек-

сов ракет-носителей (РН) [1, 2]. Обеспечение высокого уровня чистоты помещений при подготовке головных блоков (ГБ) РН необходимо для успешной реализации большинства космических программ, поскольку наличие загрязнений, даже минимальных, может существенно ухудшить характеристики приборов и систем

Цитування: Воронцов А. В., Фролов В. П., Балашов В. Н., Алексеев К. Г., Ципун И. Ю., Мокин А. В. Мобильная чистая камера для сборки головных блоков с изменяемой площадью рабочей зоны. *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 1 (122). С. 72—78. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.072>

космического аппарата. Для проведения технологии работ с ГБ необходимо обеспечить требуемый уровень чистоты внутри зала сборки.

В связи с негерметичным исполнением КА, увеличением срока службы на орбите важное значение приобретает обеспечение высокого уровня чистоты при производстве и подготовке самих КА. Загрязнения, вносимые в процессе сборки ГБ, приводят к образованию на орбите около КА пылевого облака (это явление принято называть собственной или внешней атмосферой КА). Это может фатальным образом сказаться на эксплуатации самого КА.

В общемировой практике работы с КА выявлены основные уязвимые элементы конструкции — это оптические поверхности (иллюминаторы, линзы телескопов и астронавигационных приборов, а также солнечные батареи, терморегулирующие покрытия), чувствительными к загрязнению также считаются следующие элементы аппаратуры КА: плазменные зонды, детекторы заряженных частиц малой энергии, коммутирующие устройства. Загрязнение оптических элементов изменяет их качественные характеристики пропускания и отражения, создает дополнительные рассеяния света. Яркость свечения отдельных крупных частиц диаметром в несколько микрон в пылевом облаке, окружающем КА, близка к яркости звезд первой или даже нулевой звездной величины. Такие частицы могут служить ложными ориентирами для астронавигационных приборов и приводить к сбою в системах ориентации КА. Наличие загрязнения между датчиком и наблюдаемым объектом также ухудшает функционирование аппаратуры. Другими словами, условия сборки ГБ напрямую влияют на работу КА на заданной орбите.

АНАЛИЗ ПЛАНИРОВОК ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

При рассмотрении преимуществ и недостатков разработанных чистых камер можно выделить основные отрицательные моменты, которые влияют на их стоимость:

- большие площади чистых помещений, что не только повышает стоимость самого сооружения, но и затраты в процессе эксплуатации. Важ-

ной составляющей в процессе эксплуатации чистого помещения является обеспечение чистоты подаваемого воздуха, способ его фильтрации, и в конечном итоге расход этого воздуха. Расход чистого воздуха для чистой камеры напрямую влияет на сам критерий оптимизации экономической эффективности;

- наличие и использование устаревшего оборудования, которое требует много места для выполнения технологических операций и для хранения.

Таким образом, подход к проектированию чистых помещений и систем, находящихся в чистых зонах этих помещений, должен быть сознательно направлен на минимизацию расхода воздуха следующими мерами:

- уменьшения числа зон, в которых используется однонаправленный поток воздуха, до минимально допустимого для технологического процесса уровня;

- применение в максимально допустимых объемах в системах вентиляции рециркуляции воздуха;

- снижения скорости воздушного потока в зонах, использующих однонаправленный поток, до минимальной величины, определяемой восходящими потоками нагретого воздуха и нестабильностями воздушного потока, вызванными источниками тепла, связанными с технологическим процессом, и турбулентностью, вызванной передвижением персонала;

- защиты чистых зон, использующих однонаправленный поток воздуха, путем применения пластиковых завес или разделяющих перегородок, обеспечивающих физическую изоляцию от внешних участков с более низкими требованиями к технологической среде;

- применение альтернативных проектных концепций, эффективно отделяющих технологический процесс от источника загрязнения и персонала (примером могут быть барьерные системы в фармацевтической промышленности).

Из перечисленных возможных недостатков чистых помещений можно сделать вывод о том, что для разработки новых экономически эффективных сооружений необходимо точно иметь информацию о диапазоне масс космических ап-

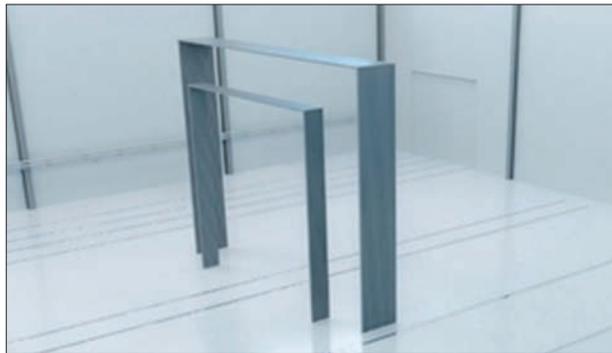


Рис. 1. Сборка секций и стыковка их в общий несущий каркас

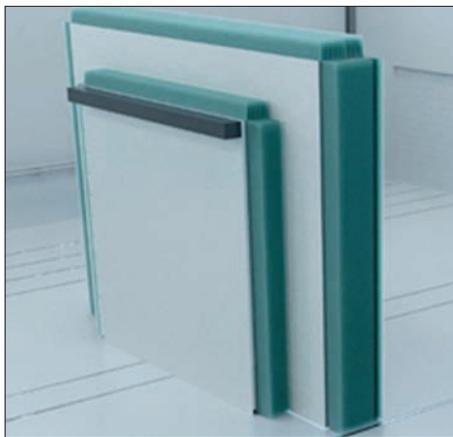


Рис. 2. Монтаж гибких гофрированных панелей на несущий каркас

паратов и габаритных размеров ГБ, собираемых в помещениях. Эта информация будет служить основой для процесса локализации (уменьшения) чистых зон.

Для оптимизации чистых помещений необходимо сначала рассмотреть виды затрат не только на этапе проектирования, но и в процессе годичной эксплуатации. При сравнении чистых помещений ISO8, ISO7, ISO6 годовые затраты можно разделить на следующие:

- стоимость энергозатрат составляет 65–70 % от всех годовых затрат;
- капитальные затраты, т. е. капиталовложения плюс износ, составляет 15–20 %;
- эксплуатационные затраты составляют 10 %.

Таким образом, чтобы снизить расходы, особое внимание следует уделить снижению энергозатрат. Энергозатраты зависят от количества подаваемого очищенного воздуха, а количество воздуха — от объемов здания.

Если чистым воздухом следует защитить малые участки, то простым, гибким и в тоже время экономически эффективным решением могут стать чистые камеры. Также наряду с применением чистых камер значительный вклад в снижение затрат на энергию может внести рециркуляция воздуха, так как она имеет дополнительное преимущество, заключающееся в параллельном снижении капитальных затрат (благодаря снижению мощности испарителя) и эксплуатационных расходов (благодаря увеличению продолжительности срока службы HEPA или ULPA-фильтров). По сравнению с устройствами, использующими 100 % наружный воздух, применение рециркуляционного воздуха позволяет снизить затраты:

- в два раза для чистых помещений класса 10 000 (класс ISO7);
- в три раза для чистых помещений класса 100 (класс ISO5).

МОБИЛЬНАЯ ЧИСТАЯ КАМЕРА ДЛЯ СБОРКИ ГОЛОВНОГО БЛОКА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПЛОЩАДЬЮ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Мобильная чистая камера (рис. 1–4) предназначена для сборки ГБ на основе КА массами 0.1–1000 кг и располагается внутри монтажно-испытательного корпуса (МИК). Основные характеристики мобильной чистой камеры приведены в табл. 1. При проектировании данной чистой камеры использована концепция локализации чистой зоны в помещении с более низким классом чистоты. Центр рабочей зоны (технологическое ядро) эффективно изолируется от пространства МИК с помощью герметичного корпуса модульной конструкции. Очищенный воздух после фильтров распределяется над зоной проведения сборки сверху, в результате формируется однопоточный поток чистого воздуха, защищающий рабочую зону чистой камеры. Таким образом, уменьшение площади, на которую распределяется поток воздуха и сниже-

ние скорости воздуха приводят к уменьшению расхода воздуха.

В основе герметичного корпуса лежит металлический каркас, состоящий из отдельных секций. На металлический каркас крепятся гибкие гофрированные панели из эластичного материала. Гофрированные панели позволяют обеспечить герметичность сооружения, в тоже время их гибкость позволяет перемещать секции каркаса в нужном направлении. Нижний стык гофрированной панели и пола герметизируется специальными накладками.

Следует заметить, что класс чистоты в чистой камере ISO8, в то время как в МИК — ISO9. Перед началом процесса подачи воздуха в чистую камеру необходима дополнительная доочистка пола МИК, на котором разворачивается конструкция.

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В ЧИСТОМ ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ЗАДАННОМ РАСХОДЕ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

При проектировании чистой камеры был проведен расчет концентрации частиц размером 0.5, 1.0, 5.0 мкм в рабочей зоне. Расчет необходим для оценки класса чистоты внутри чистой камеры и для подтверждения его соответствия ISO8.

Разница между числом частиц, которые удаляются из помещения и появляются в нем в течение определенного времени, приводит к изменению концентрации частиц в помещении.

Концентрация частиц в чистом помещении в момент времени t определяется формулой

$$C = [C_0 - S/\kappa_1 - \kappa_2/\kappa_1] \times \exp(-tk_1/v) + S/\kappa_1 + \kappa_2/\kappa_1, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= e \times Q \times [1 + q/Q - X(1 - n_p)], \\ \kappa_2 &= (1 - X) \times (1 - n_{нар}) + q \times C_1. \end{aligned}$$

При расчетах используются следующие величины: V , м³ — объем помещения, Q , м³/с (на 1 м² площади) — расход приточного воздуха, q , м³/с — объем воздуха, проникающего в помещение из-за не герметичности (инфильтрация воздуха), X , % — доля рециркуляционного воздуха, C , м⁻³ — концентрация частиц в воздухе чистого помещения, C_0 , м⁻³ — концентрация

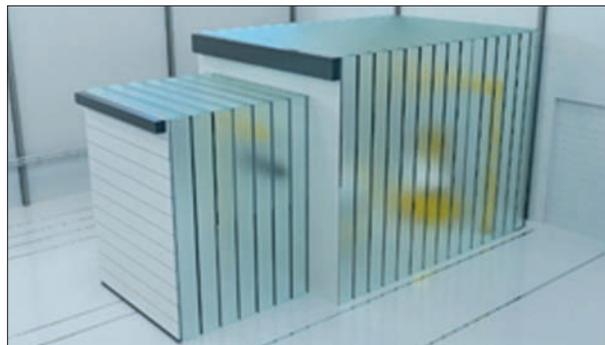


Рис. 3. Перемещение подвижных секций и формирование чистой зоны для работ с ГБ, герметизация чистой камеры

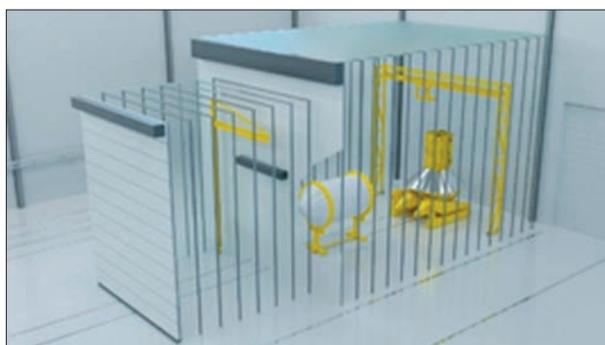


Рис. 4. Установка подвижного технологического оборудования. Выведение параметров чистоты внутри чистой камеры до требуемых показаний (ISO7, ISO8), обеспечение необходимого микроклимата в камере

Таблица 1. Основные характеристики мобильной чистой камеры

Параметр	Значение
Высота наибольшая, м	12.2
Ширина наибольшая шлюзовой камеры, м	8.2
Ширина наибольшая зала сборки головного блока, м	12.4
Длина наибольшая шлюзовой камеры, м	8
Длина наибольшая зала сборки головного блока, м	16
Длина наибольшая шлюзовой камеры в сложенном состоянии, м	0.88
Длина наибольшая зала сборки головного блока в сложенном состоянии, м	1.6
Масса, т	19

Таблица 2. Значения концентрации C частиц размером d для разных моментов времени t

d , мкм	t , ч	C , м^{-3}	C_{ISO8} , м^{-3}
0.5	1.5	1.32×10^6	3.52×10^6
0.5	2.0	0.89×10^6	3.52×10^6
1.0	1.5	3.13×10^5	8.32×10^5
1.0	2.0	2.13×10^5	8.32×10^5
5.0	1.5	1.30×10^4	2.93×10^4
5.0	2.0	0.95×10^4	2.93×10^4

частиц в воздухе в начальный момент, C_1 , м^{-3} — концентрация частиц в воздухе, поступающих за счет инфильтрации, $C_{\text{нар}}$, м^{-3} — концентрация частиц в наружном воздухе, t , с — время, $n_{\text{нар}}$ — эффективность фильтрации наружного воздуха, n_p — эффективность фильтрации рециркуляционного воздуха, S , м^{-3} — интенсивность выделения частиц внутри помещения, e — фактор эффективности системы вентиляции, n — эффективность фильтров, κ_1, κ_2 — константы.

Уравнение состоит из переменной части

$$C_{\text{var}} = [C_0 - (S/\kappa_1) - (\kappa_2/\kappa_1)] \times \exp(-tk_1/v)$$

и постоянной части

$$C_{\text{const}} = S/\kappa_1 + \kappa_2/\kappa_1, C = C_{\text{var}} + C_{\text{const}}$$

Переменная характеризует переходной процесс, когда чистое помещение достигает требуемого класса чистоты после внесения загрязнений или перехода из эксплуатируемого состояния в оснащенное. Чем больше кратность воздуха, тем меньше длительность этого переходного процесса, называемого временем восстановления.

Значение концентрации частиц в стационарном режиме определяет класс чистоты помещения.

Определим концентрацию частиц в воздухе мобильной чистой камеры для трех размеров частиц: $d = 0.5, 1$ и 5 мкм. При площади чистой камеры $\sigma = 264 \text{ м}^2$, объеме зала сборки $V_3 = 2420 \text{ м}^3$, объеме шлюзовой камеры $V_{\text{шк}} = 512 \text{ м}^3$ общий объем составит $V = V_3 + V_{\text{шк}} = 2932 \text{ м}^3$.

Согласно ГОСТ Р ИСО 14644 на 1 м^2 площади $Q_0 = 19 \text{ м}^3/\text{с}$, поэтому на полную площадь камеры $Q = 264 \times 19 = 5016 \text{ м}^3/\text{ч} = 1.4 \text{ м}^3/\text{с}$; интенсивность выделения частиц равна $S = 5 \times 10^4 \text{ мин}^{-1} = 830 \text{ с}^{-1}$.

Результаты расчетов по формуле (1) концентрации частиц размером $d = 0.5, 1$ и 5 мкм для моментов времени $t = 1.5$ и 2 ч приведены в табл. 2.

Видно, что полученные значения концентрации C меньше допустимых пределов класса ISO8. Это значит, что концентрация частиц в воздухе мобильной чистой камеры находится в допустимых пределах и соответствует классу ISO8, следовательно, применение данной камеры при сборке ГБ и подготовке КА не только возможно, но и может быть экономически целесообразным исходя из вышеперечисленных критериев (рассмотренных в разделе анализ планировок чистых помещений).

Основные преимущества мобильной чистой камеры:

- мобильность, возможность транспортировки и развертывания в помещениях МИК;
 - возможность отключения системы очистки воздуха в межпусковой период;
 - компактность размещения в МИК;
 - в МИК не используется стандартное грузоподъемное оборудование (мостовые краны):
 - использование шлюзовой камеры как части зала сборки ГБ при выполнении технологических операций по сборке ГБ;
 - более упрощенная схема работы системы температурно-влажностного режима в чистой камере сборки ГБ (возможно ее частичное отключение);
 - для персонала, работающего в чистой камере, предусматривается использование одноразовой рабочей спецодежды, что отменяет необходимость использования постирочных;
 - использование вместо аппарели роботизированной площадки обслуживания с телескопической стрелой;
 - отказ от арочной площадки обслуживания;
 - минимизация расходов на содержание в межпусковой период, камера может складываться и упаковываться в контейнеры.
- Основные недостатки мобильной чистой камеры:
- мобильная чистая камера занимает полезную площадь МИК;
 - камера имеет ограниченные размеры;
 - необходим монтаж при развертывании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уайт В. *Проектирование чистых помещений*. Москва: «Клинтрум», 2004. 338 с.
2. Федотов А. Е. *Чистые помещения*. Москва: АСИНКОМ, 2003. 576 с.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2019

REFERENCES

1. Whyte W. (2004). *Designin of Cleanrooms University*. Moscow: Cleanroom [in Russian].
2. Fedotov A. (2003). *Cleanrooms*. Moscow: ASENMCО [in Russian].

Received 05.07.2019

О. В. Воронцов, провід. інж.-констр.,

E-mail: voron190485@gmail.com

В. П. Фролов, заст. нач. комплексу, канд. техн. наук

В. М. Балашов, нач. комплексу

К. Г. Алексеев, нач. відд.

І. Ю. Цитун, нач. сектору

О. В. Мокін, провід. спец.

ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»,

вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

МОБІЛЬНА ЧИСТА КАМЕРА ДЛЯ ЗБИРАННЯ ГОЛОВНИХ БЛОКІВ ЗІ ЗМІННОЮ ПЛОЩЕЮ РОБОЧОЇ ЗОНИ

Роботу присвячено оптимізації і зниженню витрат при проектуванні чистих приміщень, що використовуються у ракетно-космічній техніці.

Представлено основні напрямки оптимізації і зниження затрат не тільки на етапі виконання проектних робіт, але і у процесі експлуатації. Запропоноване нове архітектурно-планувальне рішення організації чистого приміщення у монтажньо-випробувальному корпусі (МВК). Переваги використання мобільної чистої камери для збирання головного блоку (ГБ): мобільність, можливість транспортування і розгортання у приміщеннях МВК; можливість відключення системи очищення повітря у міжпусковий період; компактність розміщення у МВК; у МВК не використовується стандартне вантажопідйомне обладнання (мостові крани); використання шлюзової камери як частини зали збирання ГБ при виконанні технологічних операцій по збірці ГБ; простіша схема роботи системи температурно-вологісного режиму у чистій камері збирання ГБ (можливе її часткове відключення); для персоналу, що працює у чистій камері, передбачається використання одноразового робочого спецодягу, що виключає використання пральні; мінімізація витрат на утримання у міжпусковий період, камера може складатись і пакуватись у контейнери.

З огляду на перелічені переваги мобільної чистої камери, можна зробити висновок про доцільність її застосування при збиранні ГБ. Розроблене планувальне рішення є альтернативою раніше проєктованим приміщенням. Слід відмітити, що концепція створення мобільної чистої камери відображає сучасний напрямок розвитку наземних комплексів і відповідає вимогам мобільності, економічності і чистоти.

Ключові слова: збирання головного блоку, мобільна чиста камера, проектування чистих приміщень.

O. Vorontsov, Leading design engineer,
E-mail: voron190485@gmail.com
V. Frolov, Deputy Head of complex, Cand. Sci. in Tech.
V. Balashov, Head of complex
K. Alekseev, Head of department
I. Tsipun, Head of sector
O. Mokin, Leading specialist
Yuzhnoye State Design Office,
3, Krivorizka Str., Dnipro, Ukraine 49008

MOBILE CLEAN CHAMBER FOR ASSEMBLY OF ORBITAL MODULES WITH A VARIABLE AREA OF WORKING ZONE

The article concerns the optimization and cost reduction when designing clean rooms exploited in rocket technology. There are shown general directions of optimization and cost reduction both for the stage of project development and exploiting process. We propose the new architectural planning solution for clean room arrangement in the assembly and testing building (ATB).

The advantages of mobile clean chamber application for the assembly of the orbital module (OM) are next: mobility, the possibility of transportation and deployment in the rooms of ATB; possibility of air purification system cutoff during the inter-launch period; compact placement in ATB; the standard lifting equipment (bridge cranes) is not used inside ATB; the transfer chamber is used as a part of OM assembly hall during technological operations for module assembly; the schedule of the temperature-humidity condition system operation in a clean chamber of OM assembly is simpler (its partial shutdown is possible); the staff working in a clean chamber provided for one-off uniform, which makes laundry unnecessary; maintenance cost minimization in inter-launch periods when the chamber can be folded and packaged in containers.

The listed advantages of the mobile clean chamber prove the advisability of its application in the assembly of OM. The developed planning solution is an alternative to prior designed premises. Notice, that the concept of the mobile clean chamber design matches the current directions of the progress of ground complexes and complies with the requirements of mobility, economy, and clearance.

Keywords: assembly of orbital module, mobile clean chamber, design of clean premises.