

Научная статья

УДК 629.7.022; 331.101.1

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177671>

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ, МОНТАЖНЫХ, ГАБАРИТНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАЗМЕЩЕНИИ ПРИБОРОВ В ОТСЕКАХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Андрей Алексеевич Беляков¹, Александр Иванович Шулепов²

Сергей Игоревич Шестеряков³, Вадим Игоревич Приходько⁴

Илья Сергеевич Кабушев⁵, Евгений Валерьевич Прокопьев⁶

Артемий Артурович Мурадов⁷

^{1,3,4,5,6,7}Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»), Московская обл., Королёв, Россия

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Самара, Россия

¹post@rsce.ru

²shulepov-al@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется вопрос выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований к бортовой аппаратуре в процессе её размещения в отсеках космических аппаратов. Получена зависимость монтажных зазоров на конструкцию креплений от масс устанавливаемых приборов. Разработаны методика и алгоритм по оценке антропометрических и физиологических характеристик оператора с целью

контроля за выполнением эргономических требований к компоновке приборов. Для коррекции координат электронных геометрических моделей бортовой аппаратуры в случае возникновения пересечений с конструкцией предложена формула пересчёта. Тестирование проведено на примере одного из крупногабаритных пилотируемых космических аппаратов научного назначения, также отмечена роль электронного и материального макетирования с целью подтверждения результатов моделирования. Созданное в ходе работы программное обеспечение предполагается использовать в процессах разработки конструкторской документации на предприятиях космического машиностроения после ряда дополнительных обновлений алгоритма.

Ключевые слова: компоновка приборов, бортовая аппаратура, эргономика, монтаж приборов, электронная геометрическая модель изделия

Для цитирования: Беляков А.А., Шулепов А.И., Шестеряков С.И., Приходько В.И., Кабушев И.С., Прокопьев Е.В., Мурадов А.А. Выполнение эргономических, монтажных, габаритных требований при автоматизированном размещении приборов в отсеках изделий ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177671>

Original article

ERGONOMIC, MOUNTING, SIZE REQUIRMENTS IMPLEMENTATION WHILE AUTOMATICALLY ARRANGING DEVICES IN COMPARTMENTS OF ROCKET AND SPACE VEHICLES

**Andrey A. Belyakov¹, Alexander I. Shulepov², Sergey I. Shesteryakov³,
Vadim I. Prihodko⁴, Ilia S. Kabushev⁵, Evgeniy V. Prokopiev⁶, Artemiy A. Muradov⁷**
^{1,3,5,6,7}S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation “Energia” (RSC “Energia”),
Moscow region, Korolev, Russia
²Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, (Samara
University), Samara, Russia

¹post@rsce.ru

²shulepov-al@mail.ru

Abstract. The processes of the on-board equipment mounting involves a considerable amount of work to ensure the interchangeability of elements comprising the systems, as well as testing and fine-tuning their output parameters, which requires accounting for specific operating conditions, thermal, mechanical and other loads, starting from the stage of preliminary design (technical proposal).

Attention is paid herewith mainly to the mass-centering or thermal characteristics of the compartment, or the electromagnetic compatibility of the onboard equipment components. This approach is typical for the stages of a technical proposal development, and preliminary product design. But further, at the stage of working design documentation development (less often at the stage of technical project), a detailed study of the design for the layout of the compartment begins, leading to an increase in the importance of ergonomic, installation, overall requirements, especially for manned space vehicles. Ergonomic, mounting and overall requirements for the devices arrangement are

interconnected since all of them refer to the same installation processes of the onboard equipment and its operation from different angles.

The dependence of mounting clearances on the design of fasteners on the masses of the installed devices was obtained based on statistical data. The method for assessing the onboard equipment belonging to a particular location zone has been proposed. Assessment of the anthropometric and physiological characteristics of the operator to control the ergonomic requirements meeting the devices layout occupies the central place in the study.

Calculation formula for correcting the electronic geometric models coordinates of the on-board equipment in the event of intersections with the structure was proposed. Testing was performed on the example of one of the large-sized manned spacecraft for scientific purposes. The role of electronic and material modeling was also noted to confirm the prototyping results. The software created in the course of the work is supposed to be employed in the development of design documentation at space engineering enterprises after extra updates to the algorithm.

Keywords: instrument layout, on-board equipment, ergonomics, instrument installation, electronic geometric model of the product

For citation: Belyakov A.A., Shulepov A.I., Shesteryakov S.I., Prihodko V.I., Kabushev I.S., Prokopiev E.V., Muradov A.A. Ergonomic, mounting, size requirements implementation while automatically arranging devices in compartments of rocket and space vehicles. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177671>

Введение

В производстве космических аппаратов (КА) доля монтажных и контрольно-испытательных работ занимает большую часть от всего цикла работ. Процессы монтажа бортовой аппаратуры (БА) предполагают проведение немалого количества работ по обеспечению взаимозаменяемости элементов, входящих в состав систем, а также отработки и доводки их выходных параметров, для чего требуется учитывать специфические условия эксплуатации, тепловые, механические и прочие нагрузки, начиная со стадии предварительного проектирования (технического предложения).

В исследованиях, посвящённых решению задачи оптимизации компоновки и последующей автоматизации размещения БА в отсеках КА для целевой функции принято зачастую выделять один основной показатель эффективности, который в частном случае соответствует рассматриваемому фактору, а остальные требования переводить в разряд ограничений или не предусматривать. При этом внимание уделяется преимущественно массо-центровочным или тепловым характеристикам отсека, или же электромагнитной совместимости составных частей БА, например, в работах [1-5]. Такой подход характерен для стадий разработки технического предложения и эскизного проекта КА, но далее на стадии разработки рабочей конструкторской документации (реже на техническом проекте) начинается подробная проработка конструкции для компоновки отсека, приводящая к повышению значимости эргономических, монтажных, габаритных требований, в особенности для пилотируемых КА. Принимая во внимание то, что основные решения утверждаются по факту защиты эскизного проекта, инженеру-

конструктору приходится обеспечивать выполнение данных требований при помощи конструкции (рам, кронштейнов, плат и т.д.) и затем согласовывать разработанные электронные геометрические модели изделий (ЭГМИ) с представителями других подразделений предприятия-разработчика. В процессе нередко выясняется, что утверждённые ранее схемы размещения БА необходимо корректировать и изменять ЭГМИ компоновки приборов. Это может быть связано с тем, что на уровне принципиальных решений недостаточно информации для предиктивной оценки выполнимости требований. В то же время на техническом проекте этот вопрос обычно прорабатывается эвристически.

Эргономические, монтажные, габаритные требования к размещению приборов взаимосвязаны потому, что все они с разных сторон относятся к одним и тем же процессам установки БА и её эксплуатации. В частности, эргономические требования отражают благоприятные условия труда для взаимодействия с приборами, монтажные требования относятся к рациональности и технологичности конструкции, габаритные требования описывают общие пространственные ограничения на зоны размещения.

По моделированию процесса монтажа (установки) приборов или инструмента исследования [6-10] предположительно могут позволить оценить эргономичность компоновки в процессе разработки ЭГМИ, но такие алгоритмы даже для модельных примеров вызывают большие затраты по времени. Например, рецепторные геометрические модели для обработки исходных данных и выполнения алгоритмов занимают от 1,5 до 96 минут в зависимости от точности расчёта для сравнительно

несложной ЭГМИ (до 100 активных компонентов в сборке) [11], так как затраты процессорного времени растут, как среднее пропорциональное от количества входящих в файл сборки ЭГМИ подсборок и деталей [12].

Здесь же речь идёт об оценке выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований к размещению приборов в масштабах всего отсека, где БА может иметь тысячи компонентов, причём это тем более критично для алгоритмов компоновки, так как большинство из них строится на методе последовательно-одиночного размещения с заданной высокой точностью расчётов, т.е. на каждом шаге конвертации зону размещения нужно регенерировать и вновь проводить оценку требований в обновлённой обстановке. Поэтому процесс может занять не меньше времени, чем при загрузке ЭГМИ верхнего уровня и проведении расчётов на конечно-элементных моделях (до нескольких часов или дней в зависимости от изделия и вида расчёта). Для работы инженера-конструктора, занятого компоновкой приборов в отсеке, это неприемлемо.

Таким образом, задача выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований при размещении приборов в отсеке КА остаётся актуальной в рамках общей задачи компоновки БА, имея целью снижение количества корректировок схем размещения БА и совокупного времени разработки и согласования ЭГМИ. Поэтому в данной работе предпринята попытка создать алгоритм, не требующий большого количества времени, для учёта данных требований при размещении приборов.

Эргономические требования

Так как требования к размещению приборов в большинстве являются сугубо техническими, что удобно для проведения испытаний и оценки работоспособности, то общий подход к разработке алгоритма в концепции системы «человек – машина – среда» является машиноцентрическим, где человеком является конкретно оператор (монтажник радиоэлектронной аппаратуры и приборов), в роли машины выступает компоновка БА, а средой – зона размещения в отсеке КА. Следовательно, учёт требований выполняется на коррективном уровне, то есть сначала размещается очередной прибор, а затем его позиция корректируется с целью устранения замечаний. В связи с этим целесообразно осуществить математическую постановку задачи и предложить методику моделирования подобранной целевой функции.

Основные эргономические требования к размещению приборов, которые для пилотируемых и автоматических КА идентичны, – это возможность визуального контроля дисплеев, индикаторов, номинала и маркировки; доступ к рабочим интерфейсам с целью осмотра, проверки и подключения средств измерений и испытаний; травмобезопасность и электробезопасность; возможность замены при операционном контроле в случае выхода из строя, в том числе возможность съёма кабелей, при минимальном демонтаже соседних элементов. Среди количественных эргономических требований относительно процесса установки и эксплуатации приборов стоит выделить антропометрические (соответствие размеров зазоров и зон размещения антропометрическим характеристикам человека, амплитудам и траекториям движений) и физиологические (соответствие энергетических затрат

нормативам по тяжести физического и напряженности умственного труда). Этого достаточно на начальном этапе, чтобы учесть особенности пространственной компоновки БА и организации рабочего места оператора с точки зрения эргономики. В дальнейших исследованиях следует эти требования детализировать как для технологических процессов сборки и монтажа БА на изделиях, так и для процессов эксплуатации – наземных, лётных и при применении по назначению.

Монтажные требования

Установка однотипной БА должна быть выполнена по возможности идентично. Конструкция креплений БА должна быть оптимальной по параметрам прочности, технологичности и массы. При моделировании компоновки в отсеке ЭГМИ должны размещаться без нарушения заданной точности установки опорных поверхностей, контрольных рисков и обеспечивающих сохранность пломб (при наличии).

Для монтажных и контрольно-испытательных работ в общем характерна высокая трудоёмкость, обусловленная низким уровнем механизации, сложностью конструкции, высокой плотностью компоновки БА, большим разнообразием и повторяемостью операций в технологических процессах, в связи с чем актуальны повышение производительности труда и сокращение издержек. Распространённым решением для этого является разбиение пространства отсека на зоны размещения, что позволяет сократить общую длину бортовой кабельной сети, облегчить монтаж, отработку, испытание, осмотр, контроль и эксплуатацию систем [13], а также исключить взаимовлияние некоторых приборов.

Габаритные требования

Помимо отсутствия пересечений между ЭГМИ при разработке компоновки БА необходимо контролировать отсутствие пересечений с конструкцией. Как говорилось выше, приборы должны быть распределены между зонами размещения по заданному признаку, при этом в случае существования риска повреждения они должны быть защищены технологическими колпачками, заглушками, накладками, кожухами и т.д. Приборы, устанавливаемые на амортизаторах, не должны касаться частей соседних элементов при всех допустимых перемещениях. Следовательно, требуется задавать величины допустимых зазоров в конструкторской документации.

Задача размещения БА в отсеках КА как в ручном, так и автоматизированном режиме решается, если рассматривать свёртку, относительно шести геометрических параметров – координат размещения центров масс БА и углов пространственной ориентации, поэтому при разработке ЭГМИ должны быть учтены требования по юстировке приборов. Однако, в действительности на степень приближённости компоновки БА к оптимальной влияет ещё и точность её реализации на производстве. Поэтому возникает необходимость увязки размерных цепей, связывающих элементы отсека с элементами БА, чтобы рассчитывать допустимые отклонения размеров на производственные погрешности. На текущий момент расчётные методики по этим направлениям имеют весьма ограниченное применение из-за низкой вычислительной эффективности, связанной со сложностью

пространственных размерных цепей [14]. В связи с этим вопросы расчёта допусков и юстировки БА выходят за рамки данной статьи.

Математическая постановка задачи

Прежде чем приступать к подбору целевой функции, критерия эффективности, моделируемых параметров и ограничений, стоит принять во внимание несколько методических фактов, которые приводятся далее.

На практике маркировка приборов находится на гранях, где имеются порты для подключения кабелей, но если в исключительных случаях она полностью закрыта, то приборы перед монтажом проверяются контролёром отдела технического контроля с последующей отметкой в маршрутной карте или технологическом паспорте. Доступ к приборам обеспечивается за счёт модульности конструкции креплений, благодаря чему есть возможность производить установку (и демонтаж) секциями. Применение амортизаторов характерно для весьма ограниченной номенклатуры приборов, при этом предельные амплитуды их колебаний меньше размеров конструкции крепежа.

Для оценки обеспечения требований путём имитационного моделирования в задаче компоновки БА существуют методы электронного макетирования [11; 15; 16] и методы электронной соматографии [7; 17; 18], относящиеся к задаче трассировки, для решения которой разработано множество алгоритмов. Все они опираются на рабочую схему размещения приборов, как на исходные данные. Но, как уже было сказано в начале статьи, задача исследования состоит в разработке алгоритма учёта

эргономических, монтажных, габаритных требований в процессе компоновки БА в отсеке КА, для чего эти методы являются ресурсоёмкими.

Таким образом, для решения задачи предстоит выполнить несколько этапов:

- Разбиение отсека на зоны размещения;
- Распределение приборов по зонам размещения;
- Определение монтажных зазоров на конструкцию креплений;
- Прогнозирование возможных энергетических затрат оператора;
- Определение соответствия зазоров размерам, амплитудам и траекториям движений оператора со средствами измерений или инструментом;
- Контроль отсутствия пересечений ЭГМИ между собой и с окружением.

При разработке компоновки БА инженер-конструктор для разбиения отсека на зоны размещения может использовать конструктивную схему деления КА на нужном уровне установок и монтажей или чертёж общего вида на отсек от разработчиков проектной документации. Для автоматизированного размещения приборов эта информация заносится в алгоритм в диалоговом режиме. То же относится и к распределению приборов по заданным зонам размещения, если такие требования есть в конструкторской документации. Для приборов, принадлежность которых к определённым зонам размещения не является принципиальной, подобные ограничения не записываются. Несмотря на это, среди приборов встречаются такие, которые рационально размещать вблизи границ зон размещения по функциональным требованиям (например, если прибор соединяется только с внешним устройством через гермопереходники) или по эргономическим

требованиям (например, если с прибором должен взаимодействовать космонавт при выполнении определённой работы). Поэтому для них координаты размещения можно вычислить по общей формуле:

$$\bar{r}(\Gamma_i) = (1 \pm C_i)r(\Gamma_j), \quad (1)$$

где i – порядковый номер прибора; j – порядковый номер опорного элемента; Γ_i – оболочечная модель прибора; Γ_j – точечная модель опорного элемента; $\bar{r}(\Gamma_i)$ – вектор координат центра масс прибора с привязкой; $r(\Gamma_j)$ – вектор координат опорного элемента; $C_i = (C_{xi} \ C_{yi} \ C_{zi})^T$ – коэффициент, учитывающий габариты и ограничения по конструкции отсека в окрестности места установки прибора.

В формуле (1) значение коэффициента для компоновки БА в конкретном отсеке рекомендуется подбирать за несколько тестовых запусков алгоритма для 5 приборов. Знак «+» выбирается в случае расчёта по эргономическим требованиям, а знак «-» выбирается в случае расчёта по функциональным требованиям.

Для всех остальных приборов с учётом заданных привязок координаты центров масс могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$r(\Gamma_{i+1}) = \frac{\sum_i T_i r(\Gamma_i) + \sum_j T_j r(\Gamma_j)}{\sum_i T_i + \sum_j T_j}, \quad (2)$$

где T_i, T_j – логические функции связей i -ых приборов и j -ых опорных элементов.

Недостатком формулы (2) является то, что БА может оказаться в запрещённой зоне (например, на месте оптико-электронного телескопического комплекса для КА

наблюдения или в обитаемом объёме у пилотируемых КА). Для компенсации этого следует проводить цикл проверки координат по условию:

$$|r(\Gamma_i)| \leq |r_z|, \quad (3)$$

где z – порядковый номер зоны размещения; r_z – вектор координат границ зоны размещения.

Если условие (3) выполняется для всех трёх координат центра масс прибора, то его координату по оси OZ нужно пересчитать по формуле (1). Такой выбор обоснован тем, что приборы систем, как правило, размещаются в базовой плоскости I-III КА.

Монтажные зазоры на конструкцию креплений по статистике варьируются в зависимости от массы приборов. По накопленным при разработке компоновок БА практическим данным подобрана аппроксимация на основе закона распределения Вейбулла, которая имеет вид:

$$h_m(m) = \frac{1}{20} m (101 - 20 \ln m) \left[1 + \exp\left(-\frac{3}{20} m^{\frac{29}{40}}\right) \right], \quad (4)$$

где m – масса отдельного прибора или блока приборов.

Генеральная совокупность и график аппроксимирующей функции (4) показаны на рисунке 1 далее. На практике масса современных отдельно взятых приборов не превышает 15 кг, поэтому значения в диапазоне 16-45 кг соответствуют блокам. Приборы массой до 6 кг ставятся на рамы с минимальным монтажным зазором 25 мм, а массивные приборы и блоки – на рамы с максимальным монтажным зазором 60 мм. Такие зазоры находятся вдоль границ зон размещения,

но внутри этих пространств они меняются в данном диапазоне, поэтому функция (4) сглажена относительно статистических данных, чтобы этот закон распределения можно было использовать не только для предельных (граничных) расчётных случаев, но и для приборов, принадлежащих к одной общей зоне размещения.

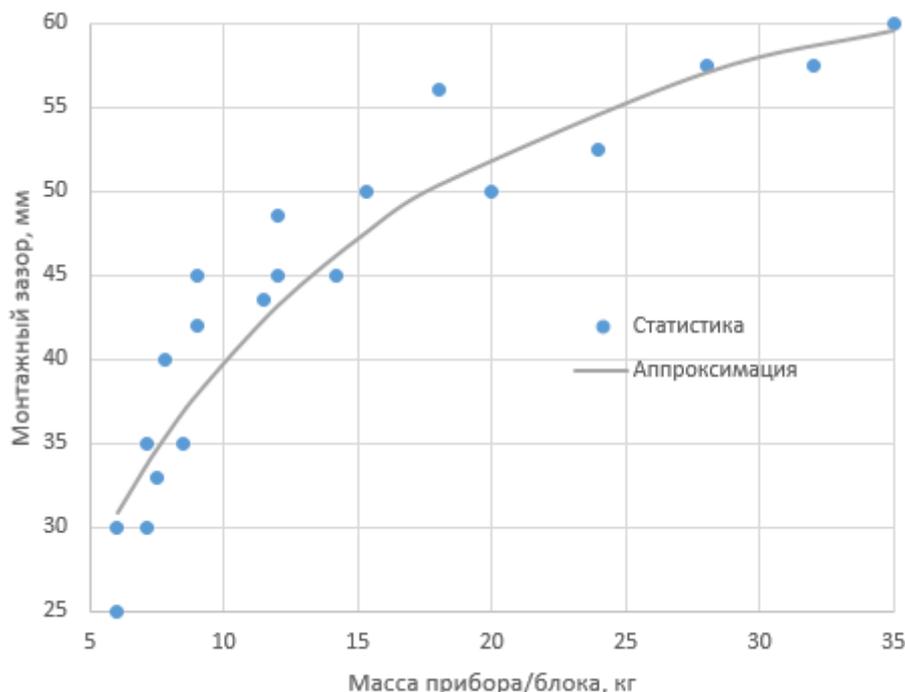


Рисунок 1. – Распределение монтажных зазоров по массе приборов и блоков

Стоит отметить, что жёсткость конструкции под действием механических, тепловых и т.п. нагрузок определяется не только несущей способностью, но и многими другими параметрами, которые в данном случае были учтены через подобранные численные коэффициенты в формуле (4). Для приборов массой менее 6 кг на общей раме допускаются монтажные зазоры в диапазоне 5-25 мм, а для приборов более 35 кг применяются зазоры 60 мм. Таким образом, в алгоритме должна быть реализована возможность коррекции зазоров под разные требования.

Для прогнозирования возможных энергетических затрат оператора имеет смысл проводить расчёты для каждой зоны отдельно, поэтому процедурно удобнее

применять не общую нумерацию приборов, а их порядковую нумерацию в зонах, которая была получена при анализе их распределения по этим зонам. Тогда можно воспользоваться формулой относительных трудовых затрат [6]:

$$Z_z = \sum_{k=1}^{K_z} \frac{p_0}{p_k} \left[m_k r(\Gamma_k) + \sum_{V \in V_k} m_V r(\Gamma_V) \right], \quad (5)$$

где $k = \overline{1, K_z}$ – порядковый номер прибора в зоне, относительно которого идёт расчёт; $V \in V_k$ – порядковые номера остальных приборов в зоне, которые потребуется демонтировать, чтобы обеспечить доступ к k -ому прибору; p_k – ресурс k -ого прибора; p_0 – ресурс отсека.

Однако, при использовании формулы (5) количество вычислений в алгоритме кратно увеличивается, если задавать не полный ресурс БА, а доремонтный (или межремонтный), тем более что его величина носит стохастический характер. Полный ресурс БА стоит использовать на ранних стадиях создания КА, но при разработке рабочей конструкторской документации нужно получить уточнённый прогноз, чтобы дать исходные данные для инженеров-технологов и экономистов производства.

Чтобы алгоритм мог комплексно обрабатывать разнотипные массивы данных и через это повышать точность результата, предлагается строить целевую функцию матрично-топологическим методом [19; 20], согласно которому математический вид оператора отображения компоновки (конвертора) должен быть подобран таким образом, чтобы обеспечивать общее решение задачи размещения БА по критерию:

$$t(F_{эрг}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где t – порядковые номера шагов для поиска решения; $F_{эрг}$ – оператор пошагового отображения компоновки БА (конвертор).

Исходя из принципа, выраженного формулой (6), предстоит синтезировать инвариантный оператор отображения компоновки при динамически изменяющемся содержании замкнутых (ограниченных геометрически) подпространств в отсеке КА.

Пусть в зоне размещения Z для приборов $k = \overline{1, K_Z}$ становятся возможными технологические процессы демонтажа $s = \overline{1, K_Z}$, порядок действий $t = \overline{1, K_Z}$ в которых определяется полученной компоновкой рассматриваемых приборов. Количество техпроцессов не превышает количество приборов в зоне размещения, так как среди всех вариантов оцениваются лишь кратчайшие по маршрутам. Количество действий в техпроцессах также не превышает количество приборов, потому что демонтажи выполняются таким образом, чтобы убрать из зоны размещения мешающие приборы.

Тогда можно сказать, что в техпроцессе s на операции t демонтируется прибор k , благодаря чему становится возможным записать последовательность демонтажа приборов $\{V_i^s\}$, где V_i^s – номер прибора в техпроцессе s при выполнении операции t . Таким образом, для каждого прибора в зоне размещения формируется техпроцесс демонтажа с учётом его текущего размещения путём выполнения условия:

$$\begin{cases} x_k - 0,5(l_{xk} + l_{x\bar{k}}) \leq x_k \leq x_k + 0,5(l_{xk} + l_{x\bar{k}}) \\ y_k - 0,5(l_{yk} + l_{y\bar{k}}) \leq y_k \leq y_k + 0,5(l_{yk} + l_{y\bar{k}}), \\ |z_k| \leq |z_k| \end{cases} \quad (7)$$

где $\bar{k} = 1 \dots k-1, k+1 \dots K_z$ – порядковые номера остальных приборов в зоне размещения; $l = (l_x \quad l_y \quad l_z)^T$ – габариты приборов.

В системе (7) проверка по оси OZ позволяет понять, находится прибор за или перед другим прибором, если две предыдущие проверки по осям OX и OY были пройдены.

Для сгенерированных техпроцессов составляется матрица очередности P , в которой строки соответствуют операциям, а столбцы – номерам приборов в зоне размещения. Значения элементов матрицы очередности определяются циклом:

$$P_{tk} = \sum_{s=1}^{K_z} W_{tks} : W_{tks} = \begin{cases} m_k g \left[3(|y(\Gamma_k)| + y_{нол}) + \frac{2}{3}|z(\Gamma_k)| \right], & \text{если } V_t^s = k \\ 0, & \text{если } V_t^s \neq k \end{cases}, \quad (8)$$

где W_{tks} – динамическая работа оператора по перемещению прибора, Дж; g – ускорение свободного падения, м/с²; $y(\Gamma_k), z(\Gamma_k)$ – координаты прибора в поперечных осях, м; $y_{нол}$ – расстояние от базовой плоскости XOZ до технологического пола, на котором будет стоять оператор, м.

Элементы матрицы очередности по формуле (8) содержат прогноз суммарной нагрузки на оператора по операциям, то есть подсчитываются энергетические затраты на демонтаж приборов во всех техпроцессах для одной зоны размещения, только когда выявлено, что на операции t демонтируется прибор k . Полученные результаты считаются пригодными, если выполняется условие допустимой нагрузки по физиологическим нормам напряжения организма при физическом труде [21]:

$$\sum_k P_{tk} \leq 5616000 \text{ Дж}. \quad (9)$$

Условие допустимой нагрузки (9) записано для случая механической работы оператора при региональной нагрузке (работе плечевого пояса) в смену. Если оно не выполняется, то приборы необходимо поменять местами в данной зоне размещения путём построчного анализа матрицы очередности и перестановок, что позволяет сформировать обобщённый вид для конвертора:

$$F_{эрг} = \bigwedge_t F_{эрг\ t} = \bigwedge_t \arg \max_k P_{tk} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Таким образом, целевой функции (6) ставится в соответствие новая целевая функция (10), по значениям которой определяются номера тех приборов, которым последовательно нужно переназначить координаты размещения в соответствии с порядком, установленным по условиям (7), тем самым обеспечивая минимизацию количества шагов в техпроцессе демонтажа относительно операций для оператора.

Для определения соответствия зазоров размерам, амплитудам и траекториям движений оператора со средствами измерений или инструментом предлагается сравнивать текущие значения зазоров с заданными по эргономическим требованиям, которые составляют от 120 мм до 185 мм для разных зон размещения. Проверке подлежит следующее условие:

$$\left| r(\Gamma_k) - r(\Gamma_{k+1}) \right| - 0,5(l_k + l_{k+1}) \geq h_{эрг}, \quad (11)$$

где $h_{эрг}$ – заданное значение зазора по эргономическим требованиям.

Если условие (11) не выполняется для всех трёх координат центра масс прибора одновременно, то необходимо проводить коррекцию зазоров. Для этого предлагается пересчитывать координаты размещения центра масс того прибора, относительно которого проводится цикл проверок:

$$r(\Gamma_k) = r(\Gamma_{k+1}) + [0,5(l_k + l_{k+1}) + h_{эпе}] \operatorname{sgn}(r^*(\Gamma_k) - r(\Gamma_{k+1})), \quad (12)$$

где $r^*(\Gamma_k)$ – координаты центра масс прибора до пересчёта; $\operatorname{sgn}(\bullet)$ – функция знака.

По формуле (12) пересчитывать нужно только ту координату центров масс БА, значение которой обеспечивает оптимальную компоновку по критерию (10). Это же отражено в том, что условие (11) должно выполняться хотя бы для одной из трёх координат прибора, так как в таком случае доступ к нему станет обеспечен, иначе его расположение неизбежно приводит к демонтажу соседних приборов. Возможные случаи для вариантов частичного выполнения условия (11) показаны на рисунке 2.

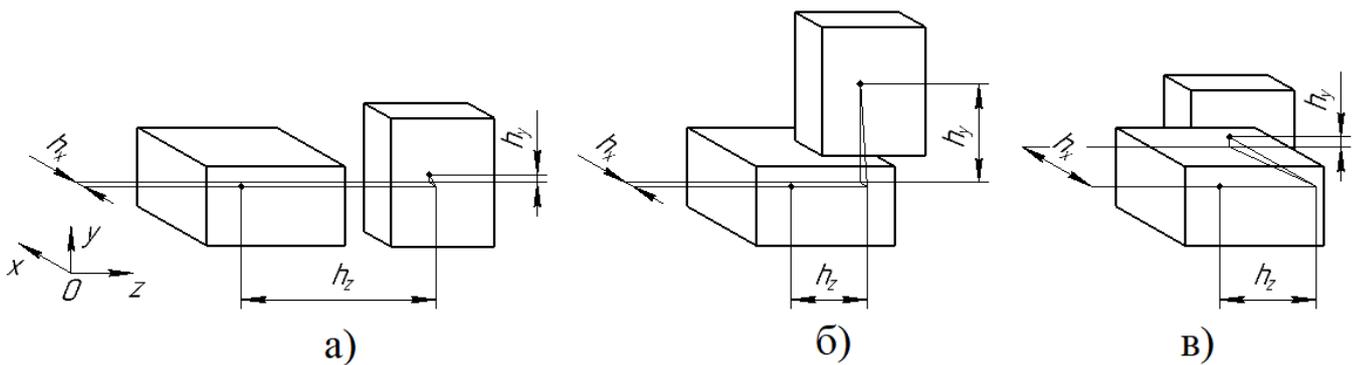


Рисунок 2. – Варианты влияния положения приборов на доступ к ним:

а) перекрыто; б) свободно по вертикали; в) свободно по горизонтали

Из приведённых схем следует, что демонтаж необходим, только когда имеются малые расхождения в координатах одновременно по осям ОХ и ОУ при положении оператора слева (рисунок 2.а), а в остальных случаях приборы не перекрывают доступ друг к другу (рисунок 2.б и рисунок 2.в). Учитывая, что в отсеке КА плотность компоновки приборов может быть высокой, при модульной конструкции креплений секциями выполнение условия (11) по одной из осей

равносильно обеспечению эргономических требований в части учёта антропометрии оператора.

Для контроля отсутствия пересечений ЭГМИ между собой и с окружением в современных системах автоматизированного проектирования встроены специальные модули, благодаря которым разрабатывать дополнительные процедуры не требуется. Если условие (11) выполняется или проведена коррекция по формуле (12), то между собой приборы пересекаться не будут. Но если выявляются пересечения приборов с конструкцией отсека, то пересчёты смещений координат необходимо проводить с учётом направления и оценки окружения, чтобы в результате не вызвать новые пересечения уже в других местах. Для отдельного прибора величина смещения может быть определена, как нормированное среднее расстояние до всех точек пересечения прибора с конструкцией, взятое в противоположном их распределению направлении. Тогда координатам центра масс прибора нужно присвоить значения по формуле:

$$r(\Gamma_k) = r^*(\Gamma_k) - \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{2}{\alpha \|l_k\|} \sum_{\alpha} \|r_{k\alpha} - r^*(\Gamma_k)\| \right) \sum_{\alpha} [r_{k\alpha} - r^*(\Gamma_k)] - h_m(m_k), \quad (13)$$

где α – номера точек пересечения конструкции с прибором; $r_{k\alpha}$ – координаты точек пересечения конструкции с прибором.

Формула (13) применима в том случае, когда настроена процедура обращения к массиву данных с координатами точек пересечения в системе автоматизированного проектирования, иначе вычисления могут потребовать много времени, и поэтому может быть рациональным провести смещения в диалоговом режиме. Так как формы интерференции геометрических объектов весьма

разнообразны, для разработки обобщающих методов коррекции взаимного расположения ЭГМИ в сборке требуется отдельное исследование.

Программное обеспечение и организация тестирования

Описанное математическое обеспечения алгоритма для совместного учёта эргономических, монтажных, габаритных требований в процессе размещения БА в отсеках КА объединено блок-схемами, представленными на рисунках 3-5, в единое программное обеспечение, которое реализовано на языке программирования Python в среде разработки PyCharm Community Edition версии 2022.2.2 и синхронизировано с системой автоматизированного проектирования PTC Creo Parametric 7.0 Advanced Assembly Extension. Проверка пересечений приборов с конструкцией осуществлена при помощи встроенного модуля PTC Creo Parametric Global Interference.

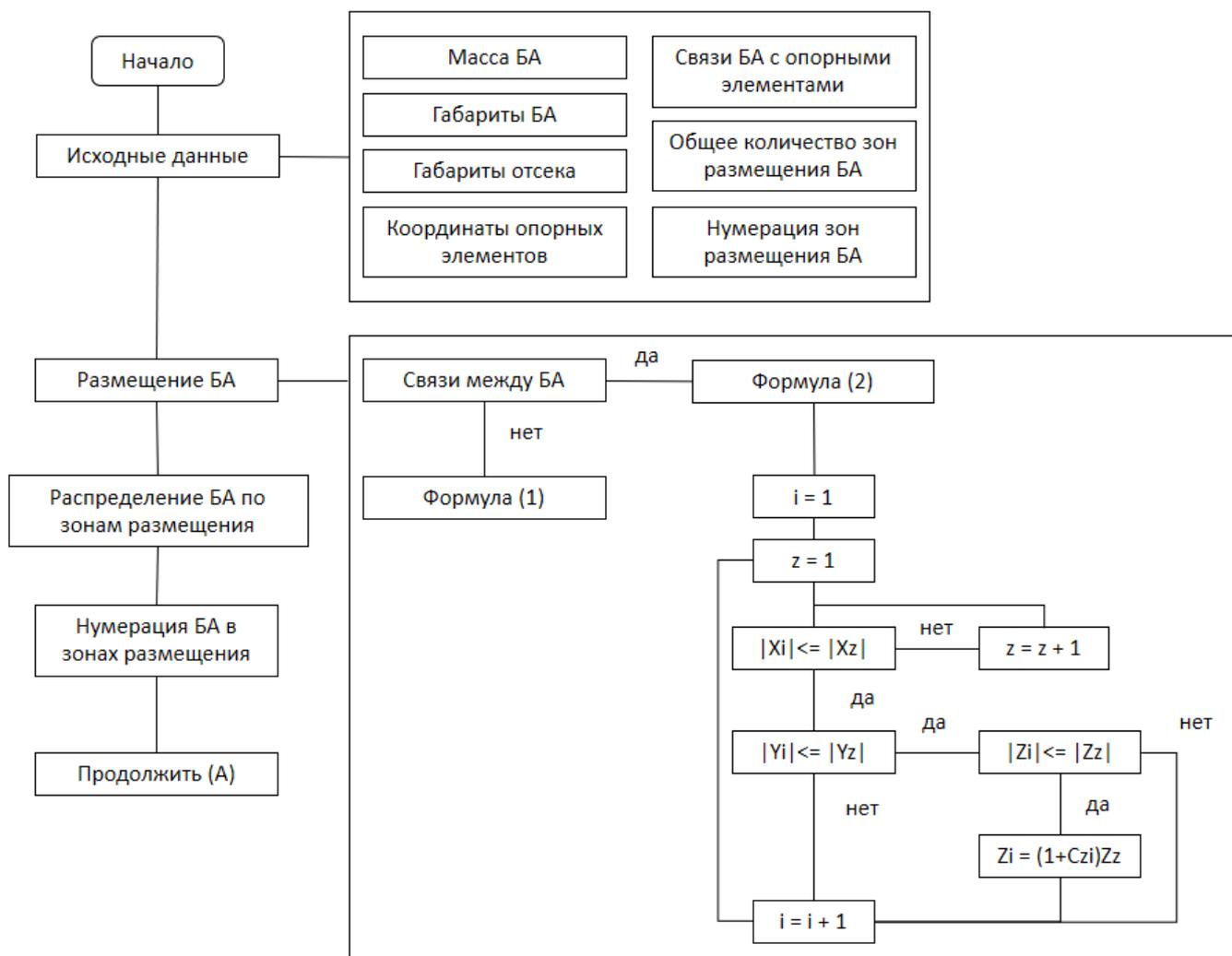


Рисунок 3. – Блок-схема алгоритма (начало)

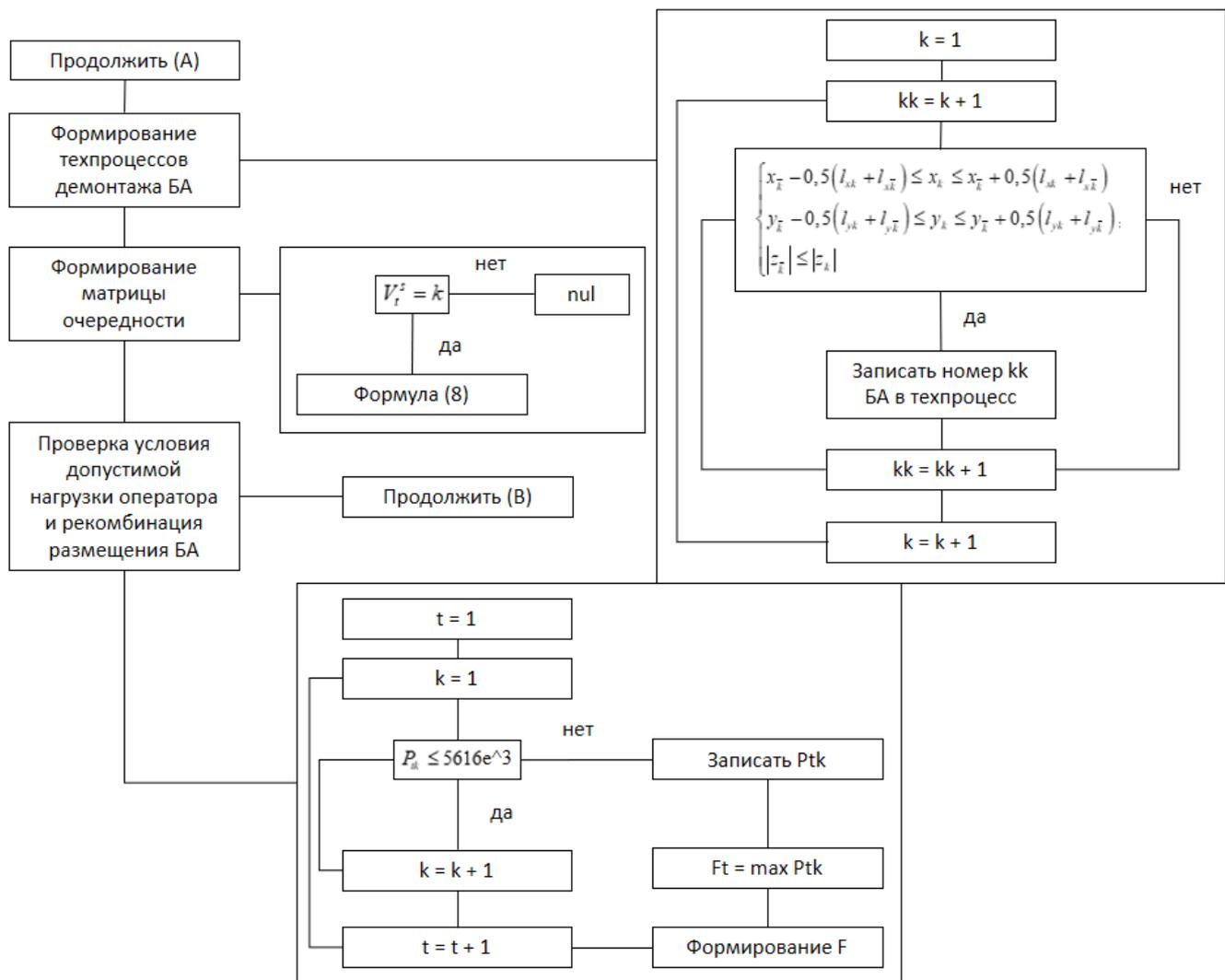


Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма (продолжение)

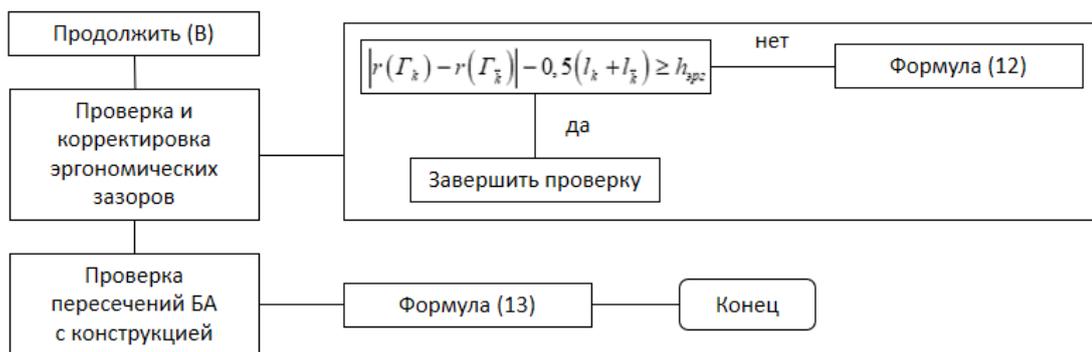


Рисунок 5. – Блок-схема алгоритма (окончание)

В качестве тестового примера использован герметичный отсек современного крупногабаритного пилотируемого КА тяжёлого класса, имеющий форму цилиндра

с конической надстройкой и сферическим днищем диаметром 4380 мм и длиной 9000 мм. Для моделирования внутренней компоновки использовались приборы в количестве 79 штук, при этом не учитывались БА и агрегаты системы обеспечения теплового режима, средства вентиляции, средства противопожарной защиты, средства обеспечения газового состава, средства дозиметрического контроля, датчиковая аппаратура. Сбор, обработка и передача массогабаритных параметров приборов осуществлялись при поддержке MS Office Excel Inquire в качестве эмулятора, куда делалась выгрузка данных из PTC Windchill MDMLink с целью временного нивелирования необходимости наладки системы управления базами данных ЭГМИ для проведения тестирования.

В первую очередь проверке на работоспособность подлежали условия (3), (7), (9), (11), далее проверялись на адекватность результаты зависимостей (8), (10), (12), (13), и затем проводилось комплексное тестирование алгоритма по блок-схемам на рисунках 3-5. Полученная схема размещения БА подвергалась контрольной проверке при помощи встроенного модуля PTC Creo Manikin Analysis, который позволяет моделировать работу оператора в заданных пространствах в диалоговом режиме.

Верификация работы алгоритма и анализ результатов

Для заключения по работе алгоритма требовалось определить достаточность реализованных в нём процедур для нахождения решения задачи, наличие маяков при загрузке некорректных исходных данных, однозначность оценки результатов

промежуточных вычислений в условных циклах, достижение лучшего результата по критериям эргономичности и времени в сравнении с существующими методами.

В результате тестирования удалось добиться выполнения эргономических, монтажных, габаритных требований к размещению БА для рассмотренного в примере отсека КА. При этом в некоторых частных случаях для выполнения этих требований наблюдался компромисс вместо экстремумов. Тестовая эксплуатация показала, что значительную часть времени работы алгоритма занимает подготовка и обработка исходных данных, что вызвано применением эмулятора. Основное время на логические и алгебраические операции составило 37 минут, включая время на освоение интерфейса и всю отладку, против 5 дней при проверке эргономических, монтажных, габаритных требований традиционным способом с привлечением трёх специалистов (разработчика конструкторской документации, инженера-технолога, инженера-испытателя по эргономике). Можно предположить, что в случае интеграции алгоритма с системой автоматизированного проектирования трудоёмкость решения задачи будет снижена ещё больше.

На рисунке 6 показана полученная компоновка для одной из зон размещения. Для подтверждения результатов используется макетирование процесса демонтажа приборов в модуле PTC Creo Manikin Analysis, что показано на рисунке 7 для одной из зон. С целью отработки компоновки БА на предмет влияния неучтённых в математических моделях стохастических факторов предусмотрено проведение материального макетирования, фрагмент которого показан на рисунке 8.

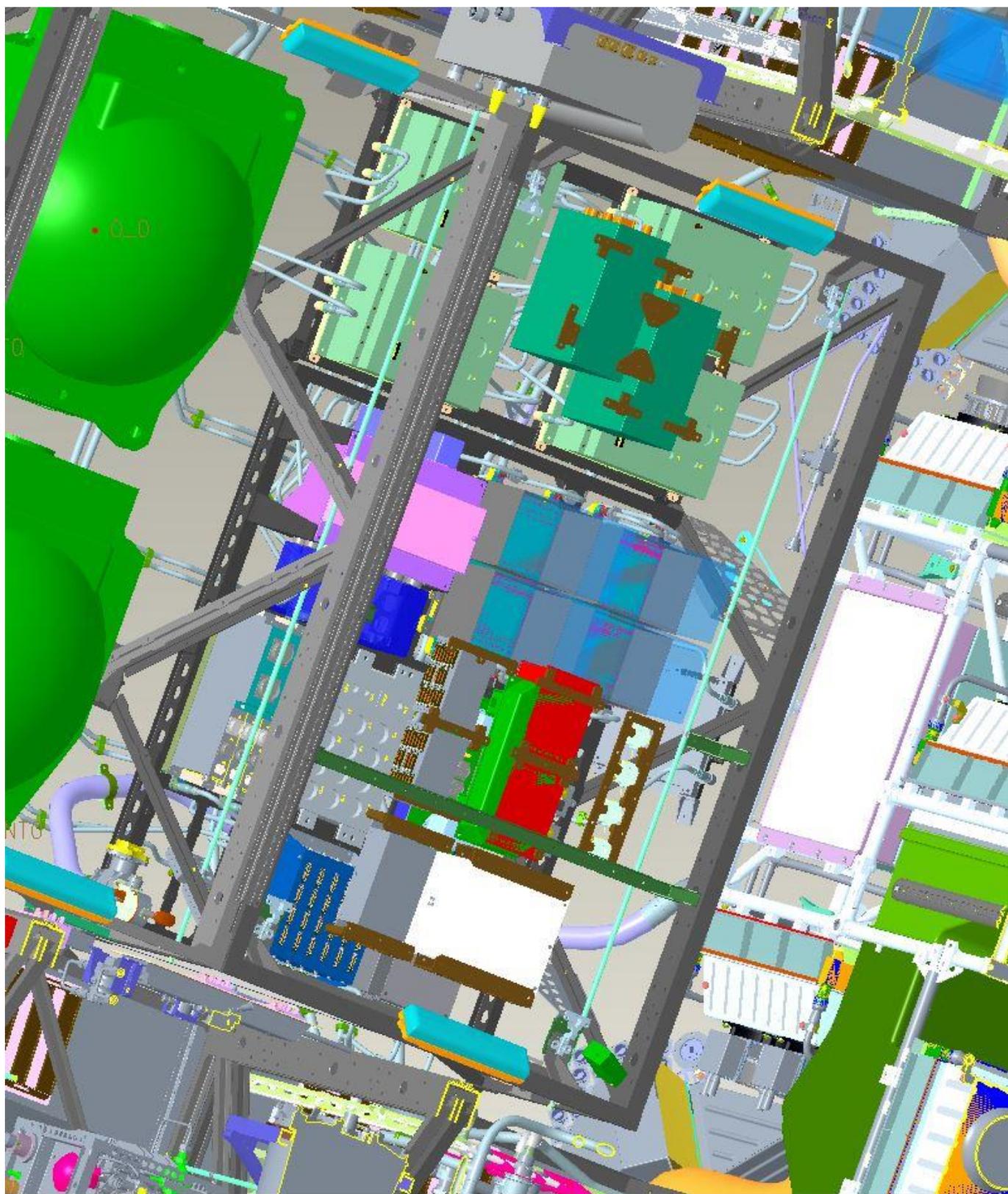


Рисунок 6. – Пример компоновки БА в одной из зон размещения

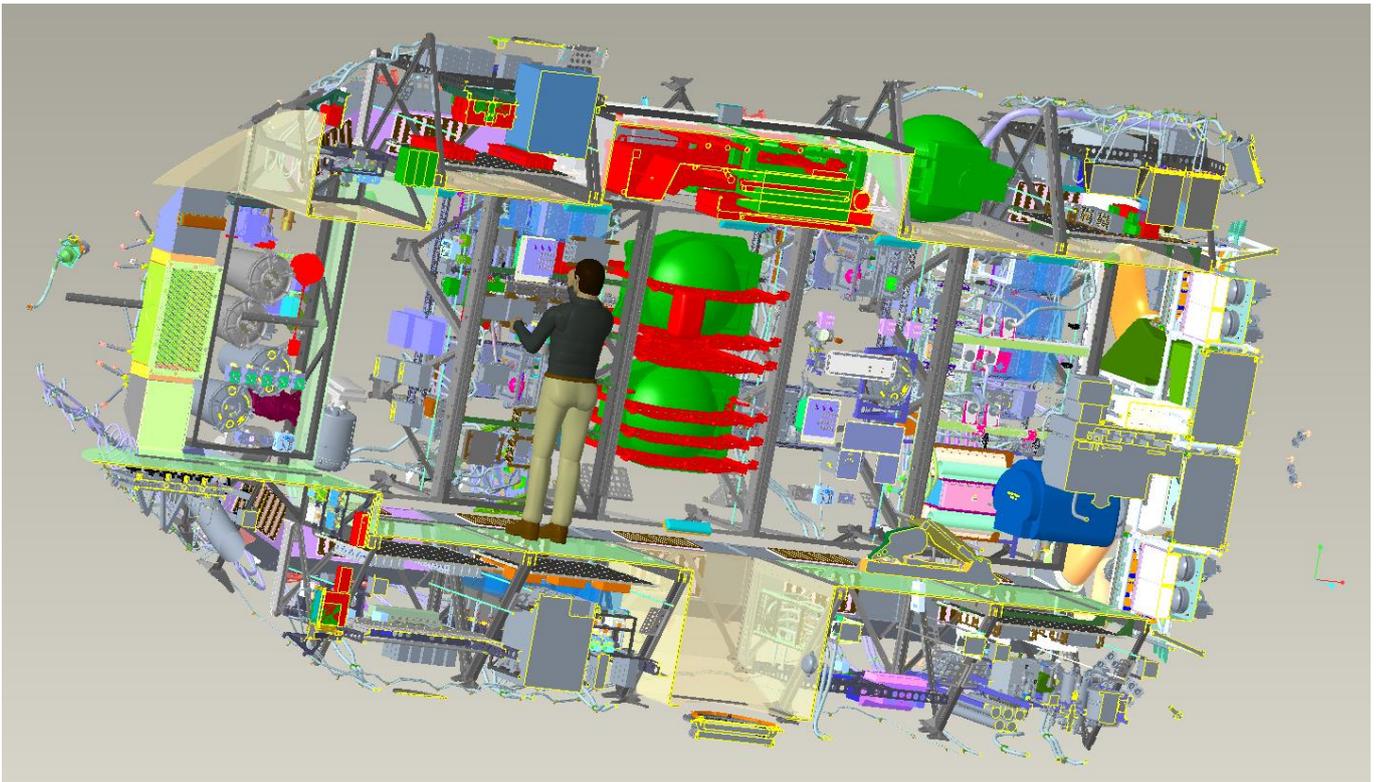


Рисунок 7. – Пример проверки компоновки БА для одной из зон размещения



Рисунок 8. – Фрагмент материального макетирования для процесса демонтажа БА

При проверке условий системы (7) установлено, что для корректного анализа взаиморасположения приборов уравнения на осях OY и OZ требуется менять местами при переходе от базовой плоскости II-IV к базовой плоскости I-III отсека

КА. Таким образом, число уравнений в системе (7) было увеличено. Также выявились некоторые расхождения с решением, полученным инженером эвристически путём визуальной оценки компоновки, в части количества БА в техпроцессах демонтажей. Связано это с тем, что при осмотре видов ЭГМИ по нормальям перекрытие приборов в пределах 10 мм слабо заметно, кроме того возрастает напряжённость умственного труда при выписывании очередности демонтажа приборов. Например, для одного из приборов инженером была выявлена последовательность демонтажа 12-13-14-19, а при помощи алгоритма и затем проверочного макетирования была определена уточнённая последовательность 12-13-14-20-19.

Расчёт пооперационной нагрузки на оператора по формулам (8)-(10) показал, что при любом сочетании массы прибора и расстояния от него до границы зоны размещения энергетические затраты удовлетворяют условию (9), и даже сумма таких затрат для техпроцессов демонтажа 32 приборов в границах одной зоны удовлетворяет условию (9), составляя не более 1% от предельного значения. Поэтому можно сказать, что выполнение физиологических требований обеспечивается всегда и не подлежит обязательному расчётно-аналитическому контролю в алгоритме. На рисунке 9 показана диаграмма энергетических затрат оператора по операциям в одном из техпроцессов демонтажа БА в качестве примера. Из неё следует, что для обеспечения доступа к прибору №15 необходимо демонтировать приборы №2 и №3 одинаковой массы, размещённые на одном уровне, и затем ещё прибор №21.

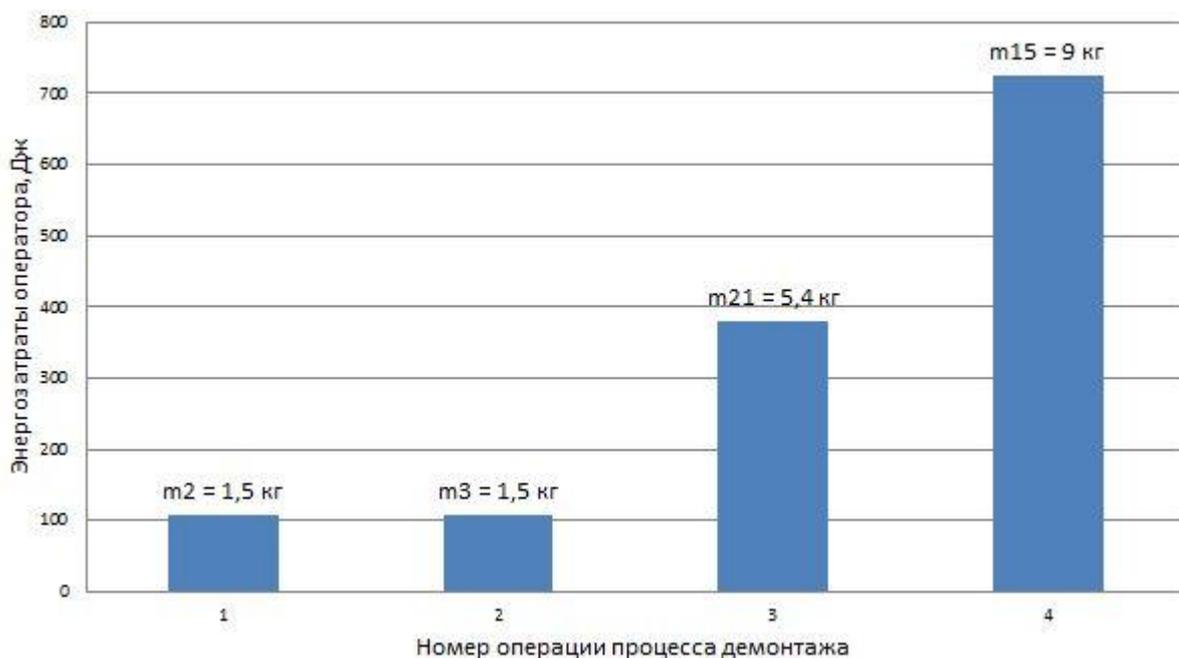


Рисунок 9. – Энергетические затраты оператора в техпроцессе демонтажа прибора №15 в зоне размещения №10 отсека КА

Также стоит отметить, что в тестировании применялись монтажные зазоры, вычисляемые по формуле (4), графики значений которых для нескольких зон размещения представлены на рисунке 10. В компоновке оказались два блока БА, чья масса составила 38,8 кг и 40 кг, – для них монтажные зазоры составили около 60 мм.

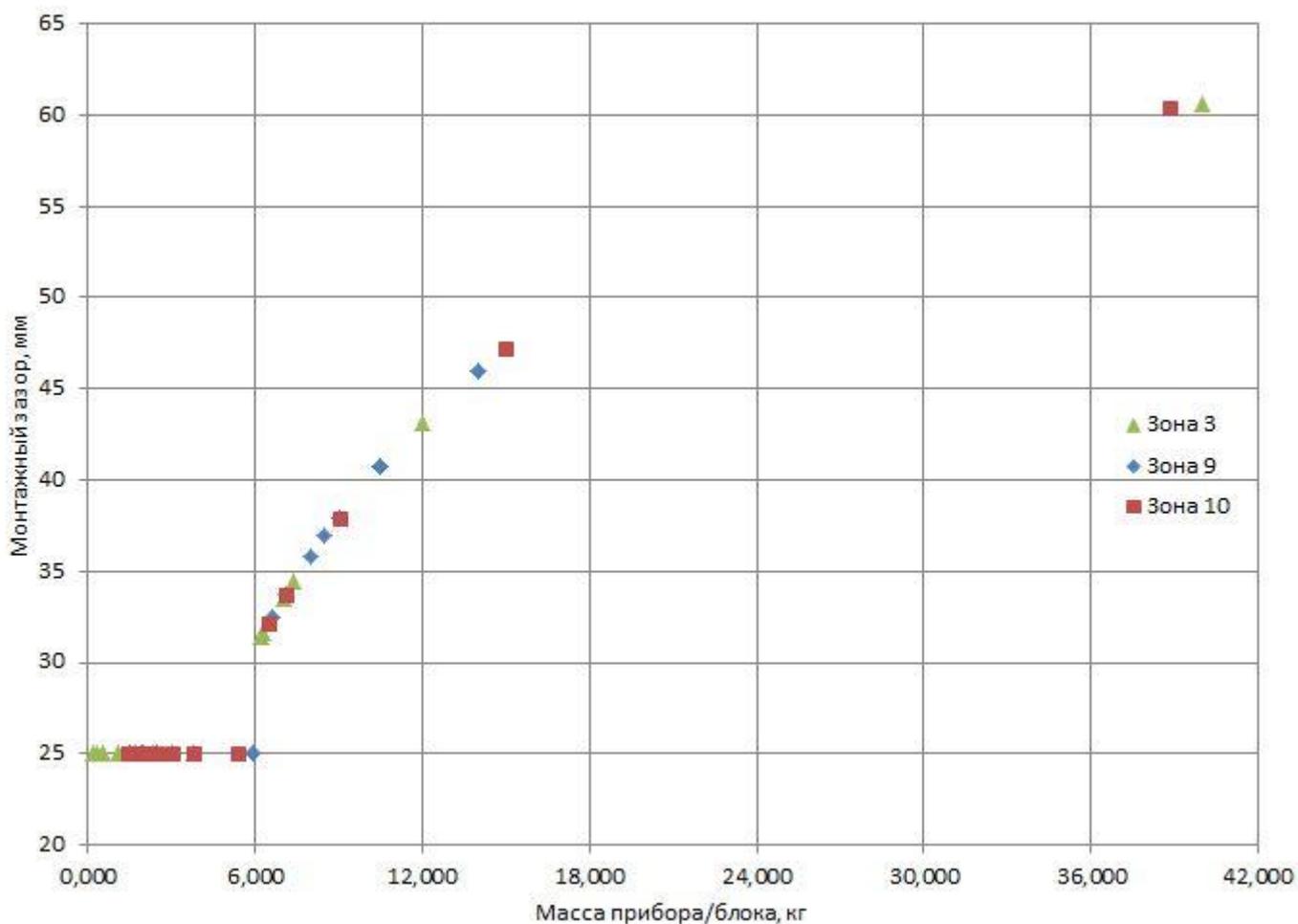


Рисунок 10. – Монтажные зазоры на приборы в зонах №3, №9, №10

Эргономические зазоры оценивались по условию (11) и доопределялись по формуле (12), в результате чего выяснилось, что размеры зон размещения не дают возможности уместить все приборы по габаритным требованиям – до цикла оценки зазоры между приборами варьировались в диапазоне от 13 мм до 113 мм. Компонка БА, являющаяся компактной, как принято считать, представляется рациональнее, чем разреженная, поэтому антропометрические требования по досягаемости приборов оператором вырождаются в условие допустимой нагрузки при демонтаже вида (9).

Что касается формулы пересчёта координат размещения приборов (13) в случае возникновения пересечений с конструкцией, то выявлена необходимость

проведения дополнительного исследования, в котором предстоит сформировать и протестировать процедуру, позволяющую оценивать доступность той части зоны размещения, куда происходит смещение прибора, и как делать пересчёт в противном случае.

Опираясь на описанные выше результаты тестирования и верификации работы алгоритма, было установлено, что его математическое и программное обеспечения нуждаются в определённых доработках до начала опытной эксплуатации.

Заключение

В рамках данной работы был рассмотрен вопрос обеспечения эргономических, монтажных, габаритных требований к приборам в процессе их размещения в отсеке КА. Систематизация накопленного практического опыта инженеров-конструкторов при решении этой задачи позволила определить, какие факторы стоит учитывать, а какими можно пренебречь при выборе критериев эффективности, разработке целевых функций и последующем математическом моделировании. Стоит отметить, что хоть и удалось при тестировании успешно решить задачу размещения БА, выполнив данные требования, оптимизация компоновки возможна лишь при совершенствовании ряда процедур алгоритма и перечня критериев поиска. Тем не менее, тестовая версия показала существенное сокращение временных затрат.

Наибольшую сложность в работе алгоритма представляет процесс сбора, обработки, передачи, ввода и хранения исходных данных ввиду отсутствия общей базы и, как следствие, использования эмулятора. С одной стороны, это удешевляет наладку и запуск программного обеспечения, но, с другой стороны, не позволяет на

должном уровне оценивать качество поступающей в больших объёмах информации. Поэтому этот вопрос ещё предстоит тщательнее прорабатывать.

Отдельное внимание стоит уделить повышению пользовательской гибкости программного обеспечения: так как разработка установок и монтажей систем ведётся параллельно, то необходимо предусмотреть функциональные возможности внесения изменений в сгенерированные схемы размещения приборов, чтобы корректировать их координаты и величины зазоров. Предварительно можно сказать, что для этого рациональнее использовать интерактивный диалоговый режим, если алгоритмически не выгодно предусмотреть все вероятные варианты этих изменений. Однако, в таком случае потребуется обязательное подключение системы управления базами данных, чтобы проводить операции над ЭГМИ и над внутренним пространством отсеков КА. Поэтому для статистической зависимости монтажного зазора от массы БА предстоит дополнительно выяснить, каким образом следует синхронизироваться с изменениями, реализуемыми для бортовых систем.

Также для развития математического и программного обеспечения остаются в силе вопросы юстировки приборов и вычисления допускаемых отклонений на производственные погрешности в пространственных размерных цепях. Дополнение алгоритма модулями подобного рода станет целесообразным после обновления его основных процедур.

Список источников

1. Шулепов А.И., Гаврилов В.Н., Мятишкин Г.В. Автоматизированное решение задачи размещения грузов на борту транспортных космических систем // Вестник Самарского университета. 2003. № 1. С. 47-49.
2. Кауров И.В. Методика проектирования системы обеспечения теплового режима малых космических аппаратов и её верификация на базе опытно-эксплуатационной отработки: дисс... канд. техн. наук. - Самара: Самарский национальный исследовательский университет. 2022. – 139 с.
3. Аншаков Г.П., Белоусов А.И., Седельников А.В. и др. Исследование влияния целевой и обеспечивающей аппаратуры на работу датчиков магнитометра космического аппарата «Фотон-М» № 2 // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. Т. 62. № 4. С. 43-47.
4. Клягин В.А., Петров И.А., Серебрянский С.А., Лаушин Д.А. Методика решения задачи автоматизированной компоновки блоков БРЭО последовательными приближениями на основе дискретной модели их размещения на базовых плоскостях отсеков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 3-4. С. 78-89.
DOI: [10.15593/2224-0082/2018.54.07](https://doi.org/10.15593/2224-0082/2018.54.07)
5. David G. Gilmore. Spacecraft thermal control handbook: fundamental technologies. AIAA, 2002, 836 p.
6. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1988. – 137 с.

7. Смирнов Б.А., Гулый Ю.И. Инженерно-психологическое и эргономическое проектирование. - Харьков: Гуманитарный центр, 2010. – 380 с.
8. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Дискретные модели обеспечения зон обслуживания и автоматизированной компоновки летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85901>
9. Клягин В.А., Петров И.А., Шкурин М.В. Анализ размещения блоков бортового радиоэлектронного оборудования на самолётах // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84442>
10. Корвяков В.П. Разработка прототипа планшетного интерфейса «человек-машина» для транспортного пилотируемого корабля «Союз-МС» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. № 6 (117). С. 93-114. DOI: [10.18698/0236-3933-2017-6-93-114](https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-93-114)
11. Е Вин Тун. Оценка эргономичности компоновки отсека оборудования летательного аппарата: дисс... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2020. – 166 с.
12. Ситу Лин, Ньи Ньи Хтун, Маркин Л.В. Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека лёгкого самолёта // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26825>
13. Рожков В.Н., Чернышев А.В. Вопросы диагностики бортовых систем. - М.: МАТИ, 1975. – 81 с.
14. Моисеев В.К., Громова Е.Г., Ломовской О.В. и др. Аналитическая модель определения припусков на стеснённый изгиб эластомером деталей летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника,

технологии и машиностроение. 2020. Т. 19. № 3. С. 73-84. DOI: [10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84)

15. Гукало А.А., Золотарёв А.М., Магжанов Р.М. Электронное макетирование как этап разработки конструкторской документации модулей орбитальных станций РКК «Энергия» // Космическая техника и технологии. 2017. № 4 (19). С. 29-35.

16. Creo Manikin Analysis Extension, PTC Data Sheet, 2008. URL: <file:///C:/Users/lenovo/Downloads/ptc-creo-manikin-extension-ds.pdf>

17. Рипецкий А.В. Геометрическое моделирование рабочих пространств оператора: дисс... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2007. – 134 с.

18. Design for Ergonomics // Creo 9: Design for Ergonomics Brochure, 2022. URL: <https://creotips.com/digital-mannequin-design-for-ergonomics-with-creo-9/>

19. Беляков А.А., Шулепов А.И. Базовые аспекты топологической технологии автоматизированной компоновки бортовой аппаратуры в отсеках космических аппаратов на примере КА ДЗЗ «Янтарь-2к» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 4. С. 7-24. DOI: [10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24)

20. Беляков А.А., Шулепов А.И. Концепция автоматизируемой пространственной матрично-топологической модели компоновки бортовой аппаратуры в приборном отсеке космического аппарата // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2023. № 2 (60). С. 84-92. DOI: [10.26162/LS.2023.60.2.011](https://doi.org/10.26162/LS.2023.60.2.011)

21. Алексеев С.В., Усенко В.Р. Гигиена труда. – М.: Медицина, 1988. – 576 с.

References

1. Shulepov A.I., Gavrilov V.N., Myatishkin G.V. *Vestnik Samarskogo universiteta*, 2003, no. 1, pp. 47-49.
2. Kaurov I.V. *Metodika proektirovaniya sistemy obespecheniya teplovogo rezhima malykh kosmicheskikh apparatov i ee verifikatsiya na baze opytno-ekspluatatsionnoi otrabotki* (Methodology for designing a temperature control system of small spacecraft and its verification on the basis of pilot testing): Doctor's thesis, Samara, Samarskii natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2022, 139 p.
3. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedel'nikov A.V. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 43-47.
4. Klyagin V.A., Petrov I.A., Serebryanskii S.A., Laushin D.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2018, no. 3-4, pp. 78-89. DOI: [10.15593/2224-0082/2018.54.07](https://doi.org/10.15593/2224-0082/2018.54.07)
5. David G. Gilmore. *Spacecraft thermal control handbook: fundamental technologies*. AIAA, 2002, 836 p.
6. Gavrilov V.N. *Avtomatizirovannaya komponovka pribornykh otsekov letatel'nykh apparatov* (Automated layout of aircraft instrument compartments), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 137 p.
7. Smirnov B.A., Gulyi Yu.I. *Inzhenerno-psikhologicheskoe i ergonomicheskoe proektirovanie* (Engineering-psychological and ergonomic design), Khar'kov, Gumanitarnyi tsentr, 2010, 380 p.

8. E Vin Tun, Markin L.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85901>
9. Klyagin V.A., Petrov I.A., Shkurin M.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84442>
10. Korvyakov V.P. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie»*, 2017, no. 6 (117), pp. 93-114. DOI: [10.18698/0236-3933-2017-6-93-114](https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-93-114)
11. E Vin Tun. *Otsenka ergonomichnosti komponovki otseka oborudovaniya letatel'nogo apparata* (Assessment of the ergonomics of the aircraft equipment compartment layout): Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2020, 166 p.
12. Situ Lin, N'i N'i Khtun, Markin L.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26825>
13. Rozhkov V.N., Chernyshev A.V. *Voprosy diagnostiki bortovykh system* (Problems of self-test of on-board systems), Moscow, MATI, 1975, 81 p.
14. Moiseev V.K., Gromova E.G., Lomovskoi O.V. et al. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 73-84. DOI: [10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2020-19-3-73-84)
15. Gukalo A.A., Zolotarev A.M., Magzhanov R.M. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2017, no. 4 (19), pp. 29-35.
16. *Creo Manikin Analysis Extension*, PTC Data Sheet, 2008. URL: <file:///C:/Users/lenovo/Downloads/ptc-creo-manikin-extension-ds.pdf>

17. Ripetskii A.V. *Geometricheskoe modelirovanie rabochikh prostranstv operatora* (Geometric modeling of an operator workspaces): Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2007, 134 p.
18. *Design for Ergonomics*, Creo 9: Design for Ergonomics Brochure, 2022. URL: <https://creotips.com/digital-mannequin-design-for-ergonomics-with-creo-9/>
19. Belyakov A.A., Shulepov A.I. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 7-24. DOI: [10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-4-7-24)
20. Belyakov A.A., Shulepov A.I. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2023, no. 2 (60), pp. 84-92. DOI: [10.26162/LS.2023.60.2.011](https://doi.org/10.26162/LS.2023.60.2.011)
21. Alekseev S.V., Usenko V.R. *Gigiena truda* (Workplace hygiene), Moscow, Meditsina, 1988, 576 p.

Статья поступила в редакцию 06.10.2023

Одобрена после рецензирования 15.10.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 06.10.2023; approved after reviewing on 15.10.2023; accepted for publication on 25.12.2023