

Методика предварительной эргономической оптимизации компоновки бортовой аппаратуры в отсеках пилотируемых космических аппаратов и космических станций

© А.А. Беляков¹, А.И. Шулепов², Е.В. Прокопьев¹,
А.А. Мурадов¹, В.М. Папазов¹

¹ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева,
Московская область, г. Королев, 141070, Российская Федерация

²Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева,
Самарская область, г. Самара, 443086, Российская Федерация

Рассмотрено выполнение эргономических требований к компоновке бортовой аппаратуры в отсеках пилотируемых космических аппаратов и космических станций. Описаны особенности взаимодействия оператора с приборами при их наземной и летной (или по назначению) эксплуатации, в том числе в целях диагностики бортовых систем, что влияет на подход к оценке энергетических затрат. Приведены методические допущения, которые касаются учета факторов среды рабочего пространства оператора. В целях развития основ методики предварительной эргономической оптимизации компоновки приборов предложены дополнения в части оценки энергетических затрат оператора в условиях невесомости и проверки условия допустимой нагрузки. Даны рекомендации по преодолению алгоритмической коллизии, связанной с массивными крупногабаритными блоками бортовой аппаратуры. На примере герметичного отсека одного из пилотируемых изделий была проведена валидация методики, изложен порядок ее отработки и верификации.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, эргономичность компоновки приборов, электронная геометрическая модель изделия, макетирование, энергетические затраты оператора, монтаж радиоэлектронной аппаратуры

Введение. В настоящее время для решения задач эргономики на стадиях эскизного (или технического) проекта и создания рабочей конструкторской документации на изделия широкое распространение получают методы электронного макетирования [1, 2] и электронной соматографии [3, 4]. Решение задач методом электронного макетирования проводят с помощью специализированного программного обеспечения, примером которого является РТС Creo Manikin Analysis компании РТС Inc. Для применения этого метода требуются построение электронной геометрической модели изделия и наличие электронных габаритных моделей инструмента и манекена оператора. Моделирование сводится к трассировке путей перемещения инструмента и контролю пересечений инструмента с обстановкой, после чего определяются трассы с допускаемыми антропометрическими характеристиками. Решение задач методом электронной соматографии

проводят аналогично с помощью специализированного программного обеспечения, например: Maya компании Autodesk Inc., Blender компании Blender Foundation, Marmoset Toolbag компании Marmoset LLC. Для применения этого метода требуются построение динамических сцен и качественный рендеринг. Моделирование сводится к оценке физиологических характеристик оператора по окружению на рабочем месте, после чего оптимизируются технологический процесс и параметры рабочего пространства.

Разработка эргономичных компоновок бортовой аппаратуры (БА) в отсеках космических аппаратов (КА) является актуальной как для автоматических, так и для пилотируемых КА, поскольку обеспечивает удобный доступ к приборам при монтаже, испытаниях, замене, эксплуатации. Требования к габаритным размерам способствуют разделению пространства отсека на зоны размещения приборов и агрегатов, зоны полезного груза и обитаемый объем. С увеличением количества БА и уменьшением геометрических размеров зон размещения эргономичность компоновки БА снижается. В ранее проведенном исследовании [5] была предложена методика по выполнению эргономических, монтажных, габаритных требований при размещении БА. Там же приведены сведения об учитываемых факторах и характере их влияния на результат оптимизации компоновки приборов в отсеке КА.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы детализировать методику эксплуатации БА (наземной, летной или по назначению), а также пересмотреть способы оценки энергетических затрат оператора в зависимости от массы и частоты замены БА.

Методические особенности задачи. Машиноцентрический подход в концепции системы «человек — машина — среда» позволил взять за основу метод последовательно-одиночного размещения приборов, что, в свою очередь, дало возможность проводить эргономический анализ после завершения генерации компоновки БА и существенно снизило нагрузку на вычислительные узлы алгоритма [5]. Тестирование показало, что уравнения допускаемых антропометрических характеристик вырождаются в условие допустимой нагрузки на оператора, т. е. включаются в оценку физиологических характеристик. При этом было установлено, что для приборов и блоков приборов массой 1...42 кг в отсеках с диаметром миделя 2300...4380 мм апостериорная вероятность выполнения условия допустимой нагрузки стремится к единице для технологических процессов монтажа, замены и испытаний приборов при наземной эксплуатации, т. е. в ходе автономных, комплексных, межведомственных испытаний, а также при заключительных контрольных испытаниях.

В процессах летной или штатной эксплуатации приборов оценка физиологических характеристик оператора для пилотируемых КА зависит не только от их компоновки, но и от величины обитаемого

объема, который определяет уровень комфорта в отсеке КА. Учет этого фактора направлен на обеспечение оператору благоприятных условий при выполнении целевых задач, а также возможности эвакуации в случае аварии. Условное зонирование изделий по уровню комфорта приведено на рис. 1 [6].

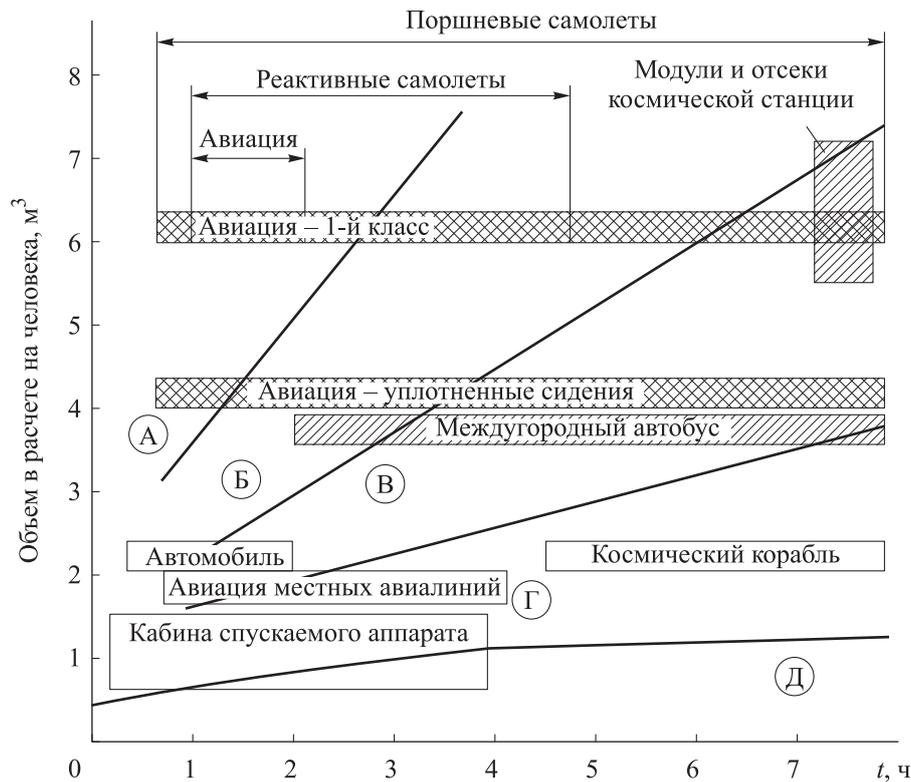


Рис. 1. Зоны комфорта по изделиям [6]:

А — роскошные условия; Б — комфортные условия; В — ограниченные условия;
Г — спартанские условия; Д — отсутствие комфорта

Как видно из рис. 1, уровень комфорта в обитаемых модулях космических станций качественно отличается от уровня комфорта в отсеках пилотируемых КА (возвращаемых и спускаемых аппаратов). Это связано с тем, что время пребывания экипажа и перечень решаемых целевых задач значительно различаются для данных видов изделий. Условия пребывания оператора в отсеке пилотируемого КА предполагают его статичное положение на всем активном участке полета, в то время как при долгосрочных экспедициях на космические станции требуются эргатические условия проживания. Следовательно, от достигнутой при разработке отсека КА величины обитаемого объема во многом будет зависеть номенклатура элементов бортовых систем, с которыми оператор должен будет взаимодействовать.

вать для управления, обслуживания, обмена информацией. Например, это может быть БА: телевизионной системы; средств противопожарной защиты, медицинского обеспечения, дозиметрического контроля, средств обеспечения газового состава, водообеспечения; датчиковой; системы управления движением и навигации; широкополосной системы связи; системы жизнеобеспечения и т. д.

Условия взаимодействия оператора с приборами характеризуются температурой, парциальным давлением, влажностью окружающей среды, уровнем шума, освещенностью, вибрацией, перегрузками, электромагнитным и ионизирующим излучением. Бортовая аппаратура некоторых систем (например, светильники, вентиляторы и т. п.) может быть размещена исходя из допускаемых значений обозначенных параметров. Для моделирования параметров окружающей среды существуют специальные методики эргономического проектирования БА систем [7] и ее экспертизы на стадиях эскизного или технического проектирования [8], поэтому в данном исследовании этот аспект не рассматривается. Предлагается обратить внимание на служебную БА и конструкцию ее крепления в отсеке КА, так как вопрос эргономической оптимизации зон размещения и компоновки БА в них является менее изученным.

Взаимодействие оператора с материальной частью вне научно-технических работ связано с бытовыми потребностями и необходимостью диагностики бортовых систем. При разработке компоновки и установок БА могут применяться методы электронного макетирования и электронной соматографии [1–4], однако на практике эргономический анализ проводится постфактум по той причине, что функциональные обязанности инженера-конструктора и инженера-испытателя разделены. Как следствие, основной разработчик обычно не имеет доступа к инструментам эргономического моделирования, поэтому ему приходится действовать через согласование с инженером-испытателем. В таком случае актуальной становится приближенная расчетно-аналитическая методика, которая позволяет разработчику проводить раннюю эргономическую оптимизацию компоновки БА автономно.

Основные варианты размещения приборов в отсеках. Укрупненно зоны размещения можно подразделить по назначению приборов следующим образом:

- зоны рабочих мест операторов — могут содержать научную аппаратуру, ноутбуки, измерительные приборы, устройства связи и т. п.;
- коммунальные зоны — могут содержать светильники, вентиляторы, огнетушители, ассенизационные устройства, водяные фильтры и т. п.;
- зоны контроля состояния изделия — могут содержать акселерометры, вибродатчики, измерители угловых скоростей, газоанализа-

торы и прочие приборы, точки установки и базирование (иногда юстировка) которых регламентированы;

- служебные зоны — содержат приборы и агрегаты, с которыми штатное взаимодействие не предполагается (только при необходимости диагностики и ремонта). В служебных зонах могут быть локализованы зоны контроля состояния изделия.

Задача размещения приборов состоит в том, чтобы определить для них оптимальные координаты — при установке приборов в эти места для компоновки БА выполняются заданные технические требования.

Очевидно, что приборы, с которыми оператор должен будет взаимодействовать непосредственно, следует устанавливать в зонах рабочих мест, в том числе на панелях интерьера. То же касается некоторых приборов в коммунальных зонах. Остальные приборы в этих зонах, как и приборы в зонах контроля состояния изделия, имеют заданное положение в отсеке КА. Координаты размещения приборов в таких зонах можно рассчитать в осях базовой системы координат КА по формуле [5]

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

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

Координаты приборов, размещаемых в служебных зонах за панелями интерьера, можно рассчитать по формуле [5]

$$r(\Gamma_{i+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{ni < i} T_i r(\Gamma_i) + \sum_{j=1}^N T_j r(\Gamma_j)}{\sum_{i=1}^{ni < i} T_i + \sum_{j=1}^N T_j}, \quad (2)$$

где T_i, T_j — логические функции связей i -х приборов и j -х опорных элементов.

В расчетах по формулам (1) и (2) предполагается, что ребра корпусов приборов параллельны осям базовой системы координат КА. При этом контроль попадания прибора в зону размещения обеспечивается путем пересчета в случае отрицательного результата при проверке условия [5]

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

где $r_Z = (x_Z \ y_Z \ z_Z)^T$ — вектор координат границ зоны размещения; Z — порядковый номер зоны размещения.

Энергетические затраты оператора. В исследовании [5] оценка энергетических затрат оператора состояла из определения значений элементов матрицы очередности, в которой строки соответствуют операциям технологических процессов монтажа приборов, а столбцы — номерам приборов в зоне размещения, и проверки условия допустимой нагрузки. Основной принцип оценки — суммирование значений динамической работы по перемещению приборов во всех техпроцессах для каждой зоны размещения. Для элементов матрицы очередности P можно записать следующую формулу [5]:

$$P_{tk} = \sum_{s=1}^{K_Z} W_{tks} : W_{tks} = \begin{cases} m_k g \left[3(|y(\Gamma_k)| + y_{\text{пол}}) + \frac{2}{3}|z(\Gamma_k)| \right], & \text{если } V_t^s = k; \\ 0, & \text{если } V_t^s \neq k, \end{cases} \quad (4)$$

где $t = \overline{1, K_Z}$ — нумерация последовательности действий оператора при демонтаже приборов; $k = \overline{1, K_Z}$ — порядковый номер прибора в зоне, относительно которого идет расчет; $s = \overline{1, K_Z}$ — порядковый номер технологического процесса демонтажа приборов; W_{tks} — динамическая работа оператора по перемещению прибора, Дж; m_k — масса прибора k или блока приборов, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; $y(\Gamma_k), z(\Gamma_k)$ — координаты прибора в поперечных осях отсека, м; $y_{\text{пол}}$ — расстояние от базовой плоскости XOZ до технологического пола, на котором будет стоять оператор, м; V_t^s — номер прибора в техпроцессе s при выполнении операции t .

Формула (4) пригодна для оценки энергетических затрат оператора при наземной эксплуатации приборов. При демонтаже БА на борту космической станции или пилотируемого КА действуют условия невесомости, поэтому расчет значений элементов матрицы очередности предлагается проводить по формуле

$$P_{tk} = \sum_{s=1}^{K_Z} \overline{W_{tks}} : \overline{W_{tks}} = \begin{cases} \frac{1}{2} m_k v_k^2 y^2 (\Gamma_k), & \text{если } V_t^s = k; \\ 0, & \text{если } V_t^s \neq k, \end{cases} \quad (5)$$

где $\overline{W_{tks}}$ — статическая работа оператора при демонтаже прибора, Дж; $v_k = 1$ — частота демонтажа прибора.

Формула (5) позволяет оценить прогноз суммарной нагрузки на оператора по операциям техпроцессов демонтажа приборов с точки зрения статической работы, т. е. определить энергетические затраты оператора по удержанию прибора в процессе его демонтажа с учетом поддержания рабочей позы за счет средств фиксации оператора. При этом масса инструмента не учитывается как пренебрежимо малая величина. Частота демонтажа прибора во всех случаях является единичной, потому что каждый прибор k демонтируется и вынимается из зоны размещения с номером Z однократно в каждом техпроцессе s на операции t . Оператор в условиях невесомости может занимать любое положение в пространстве относительно базовых плоскостей отсека КА, поэтому расчет перемещения прибора проводится по одной координате на одной из поперечных осей. На выбор координаты влияет положение оператора относительно зоны размещения БА.

Условие допустимой нагрузки в работе [5] рассматривалось для случая механической работы оператора при региональной нагрузке (работе плечевого пояса) в смену по физиологическим нормам напряжения организма при физическом труде. С учетом летной или по назначению эксплуатации приборов, согласно формуле (5), условие допустимой нагрузки должно быть дополнено ограничением физических нагрузок на оператора в смену при взаимодействии с приборами и конструкцией крепления [9]. При этом замена приборов в условиях невесомости должна занимать не более 30 % рабочего времени, поэтому энергетические ограничения составляют [5, 9]:

$$\sum_k P_{tk} \leq \begin{cases} 5\,616\,000 \text{ Дж} & \text{— наземная эксплуатация БА;} \\ 2\,512\,080 \text{ Дж} & \text{— летная эксплуатация БА.} \end{cases} \quad (6)$$

Если условие (6) не выполняется, необходимо перераспределить приборы в зоне размещения, располагая их ближе к месту, где должен находиться оператор. В формулах (4) и (5) отражено, что энергетические затраты зависят от массы демонтируемых приборов и расстояний, на которые их нужно перемещать. Поэтому, по условию (6), может возникнуть ситуация, когда алгоритм потребует поменять местами легкие приборы и массивные крупногабаритные блоки приборов. С точки зрения конструктивной совместимости приборов это не рационально, так как приборы имеют разный ресурс и разную

вероятность безотказной работы: по статистике испытаний БА в РКК «Энергия», с массивными блоками приборов и агрегатами оператору приходится взаимодействовать значительно реже, чем с приборами массой до 10 кг. Кроме того, конструкция крепления приборов должна обеспечивать возможность организации техпроцесса демонтажа с минимальной частотой изъятия исправных приборов, стоящих на пути в зоне размещения, а входящие в конструкцию установок приборов составные части не должны создавать препятствия выполнению оператором трудовых действий.

Очевидным конструктивным решением может показаться увеличение монтажных зазоров между приборами в зонах их размещения. Это будет повышать эргономичность, но при этом будет снижать плотность компоновки БА, поэтому данный способ считается неэффективным.

Иным способом оценки влияния перераспределения крупногабаритных блоков БА на энергетические затраты может стать моделирование кистей рук оператора функциями Рвачёва по методике [10] и трассировка их движений методом рецепторных геометрических моделей по методике [1] с учетом того, что скорость плавных криволинейных движений рук оператора больше скорости прямолинейных движений рук с резким изменением направления. Однако данный вариант занимает много вычислительного времени и подходит скорее инженеру-испытателю, чем инженеру-конструктору.

Для того чтобы преодолеть эти трудности, можно ввести в методику прогнозы состояния приборов во времени и когнитивную модель человеческих факторов. Подробнее с моделями вероятностных оценок комплексных показателей функциональности и надежности приборов, а также с моделями вероятностных оценок человеческих факторов можно ознакомиться в исследованиях [11, 12]. Отметим, что применять эти подходы к задаче размещения приборов нецелесообразно, поскольку для этого требуется знать доремонтный и межремонтный ресурс БА, который является стохастическим параметром, а также закон распределения для скорости возникновения человеческих ошибок. При этом сама задача размещения рассматривается дискретно, поэтому для эргономической оптимизации компоновки БА путем варьирования массогабаритных параметров приборов предлагается координаты размещения приборов, которые не удовлетворяют условию (6), пересчитывать по формуле (1) с учетом ограничений вида (3), даже если изначально их координаты определялись по формуле (2). Для этого следует ввести в алгоритм условие отсечки:

$$\lim_{m_k \rightarrow \max} r(\Gamma_k) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет задавать ограничение по массе БА, при превышении которого значения координат размещения этой БА будут пересчитываться по формуле (1).

Организация и проведение валидации методики. Разработанные в ходе данного исследования дополнения к методике, предложенной в работе [5], позволяют расширить возможности алгоритма размещения БА в отсеках КА. Тогда принципиальная блок-схема алгоритма принимает вид, показанный на рис. 2–4.

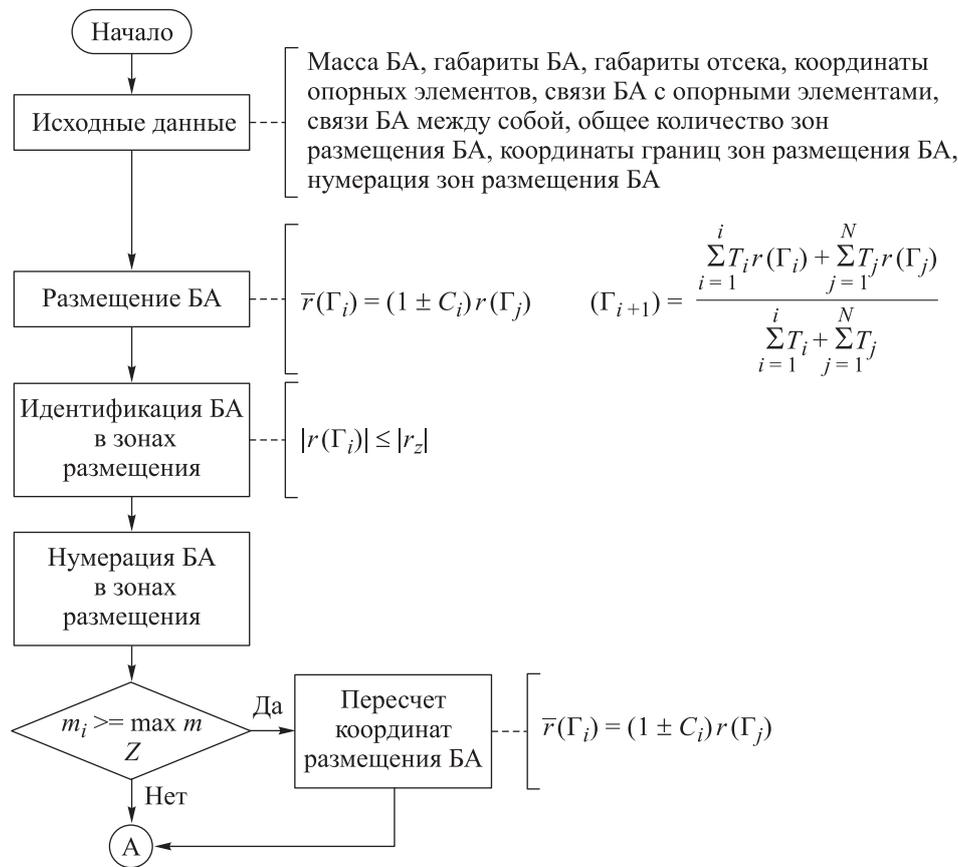


Рис. 2. Блок-схема алгоритма размещения приборов (фрагмент 1)

Для валидации данной методики:

– запрограммирован алгоритм по блок-схеме (см. рис. 2–4) на языке программирования Python с целью автоматизации вычислительных и сканирующих процедур;

– разработана тестовая компоновка приборов в количестве 23 шт. в одной из служебных зон размещения цилиндрического отсека КА

диаметром 4380 мм и длиной 9000 мм в системе автоматизированного проектирования PTC Creo Parametric 7.0 Advanced Assembly Extension;
 – проведена проверочная оценка эргономичности компоновки БА в модуле PTC Creo Manikin Analysis.

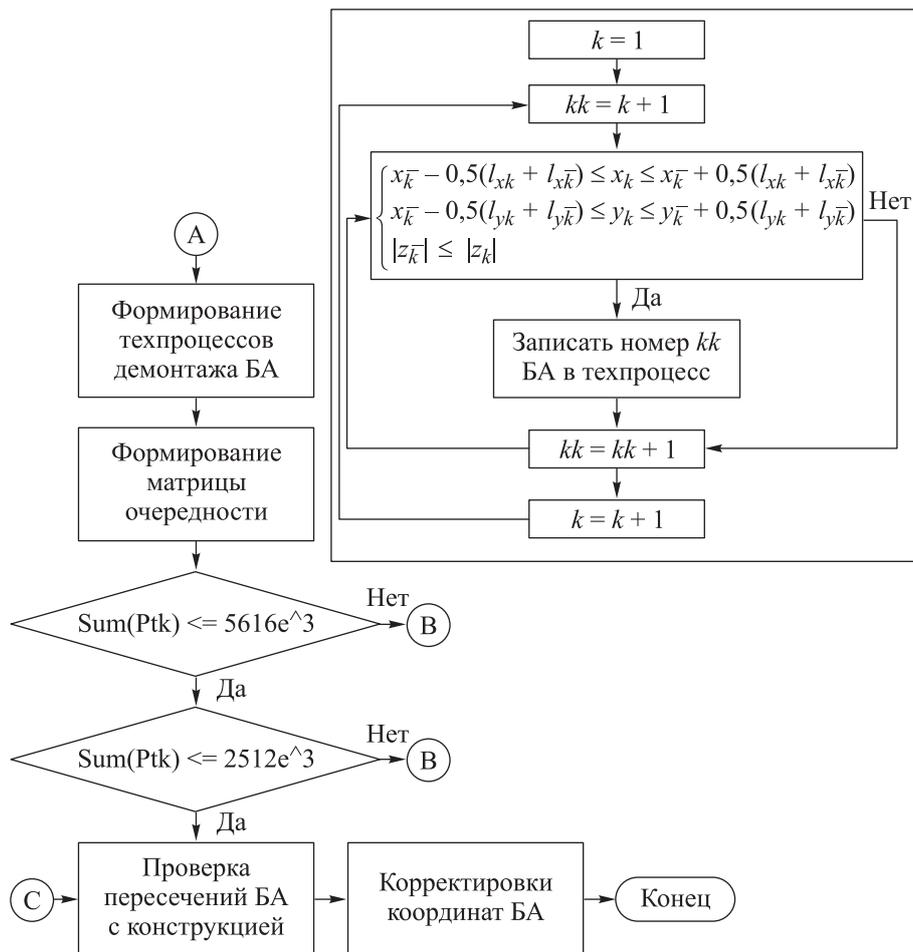


Рис. 3. Блок-схема алгоритма размещения приборов (фрагмент 2)

Условное разделение зон размещения БА в отсеке КА по назначению показано на рис. 5. Желтым очерчены приборы в зонах рабочих мест операторов, красным — приборы в коммунальных зонах, зеленым — приборы в зонах контроля состояния изделия, синим — прочие приборы в служебных зонах.

Компоновка БА в одной из служебных зон размещения, оптимизированная с применением формул (1)–(7) методики предварительной эргономической оптимизации, представлена на рис. 6.

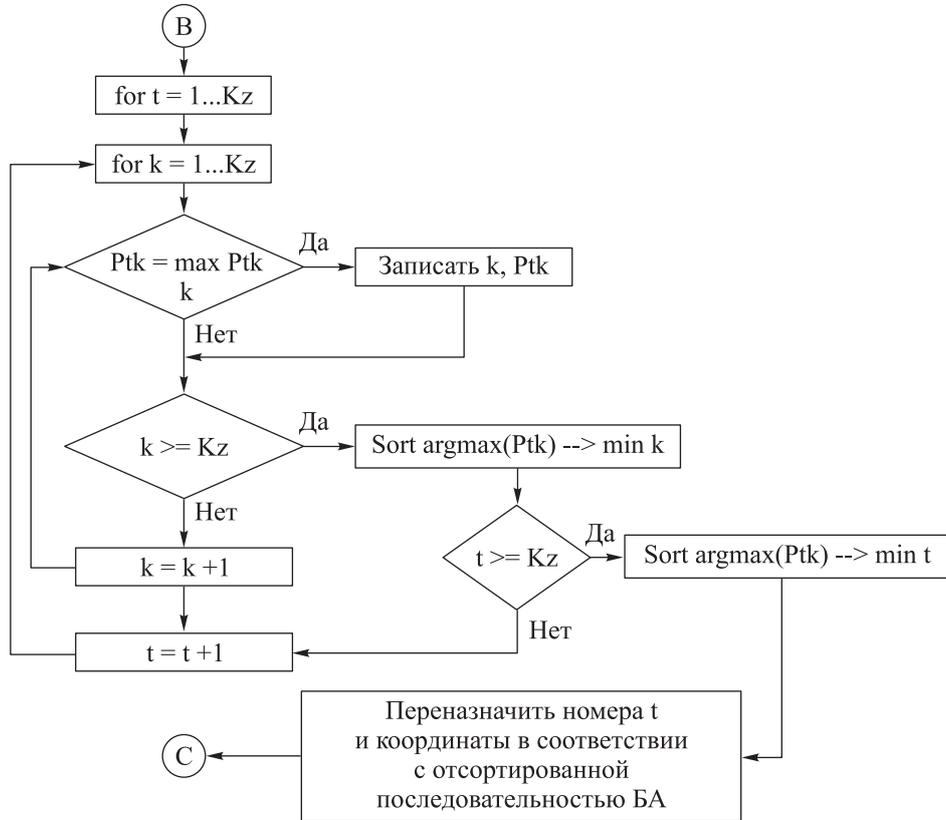


Рис. 4. Блок-схема алгоритма размещения приборов (фрагмент 3)

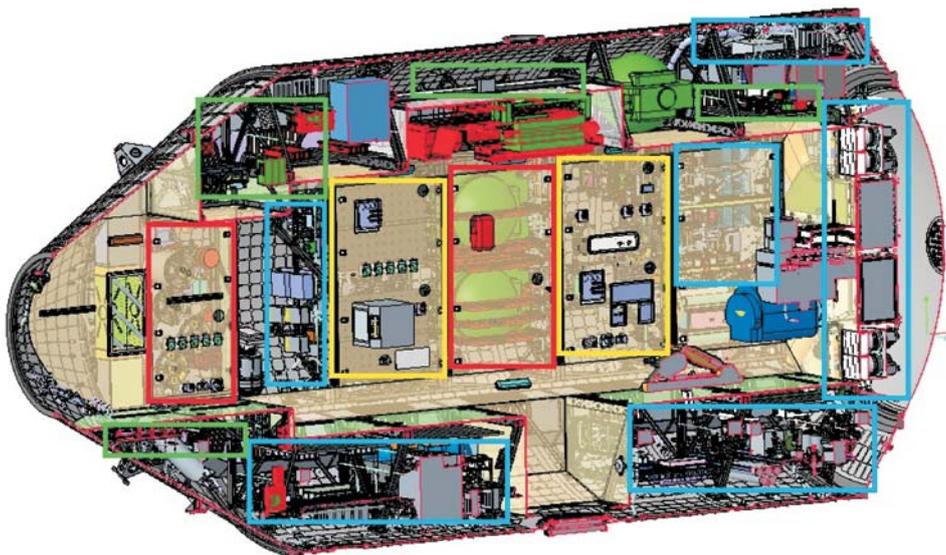


Рис. 5. Зоны размещения приборов в отсеке

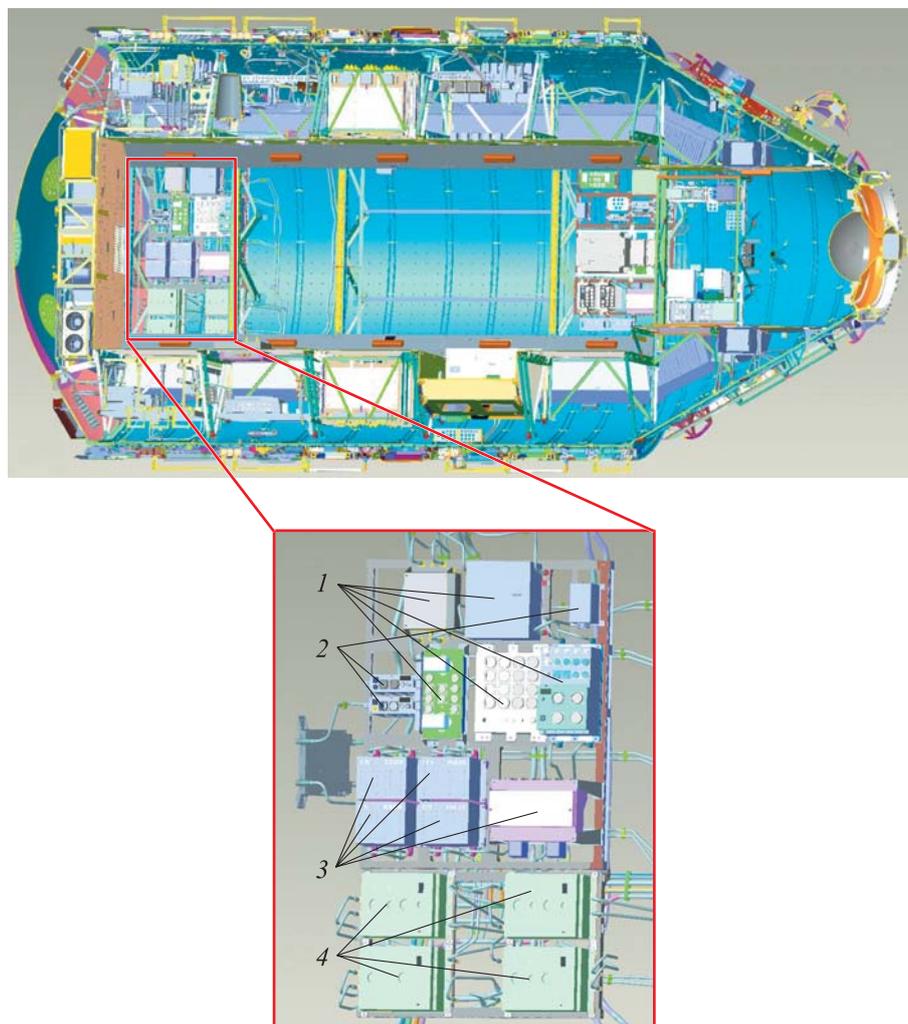


Рис. 6. Компоновка приборов в служебной зоне размещения:
1 — приборы № 15–19; 2 — приборы № 1, 2, 7; 3 — приборы № 3, 4, 6, 8, 9;
4 — приборы № 20–23

В ходе предварительной эргономической оптимизации компоновки БА в тестовой служебной зоне были проведены следующие изменения:

– шесть приборов (№ 5, 10–14) были установлены на откидную панель интерьера, что позволило избежать их демонтажа при необходимости работы с теми приборами, которые размещены ближе к обечайке корпуса отсека;

– три малогабаритных прибора (№ 1, 2, 7) были смещены на приборную раму, что позволило устранить перекрытие более крупных приборов.

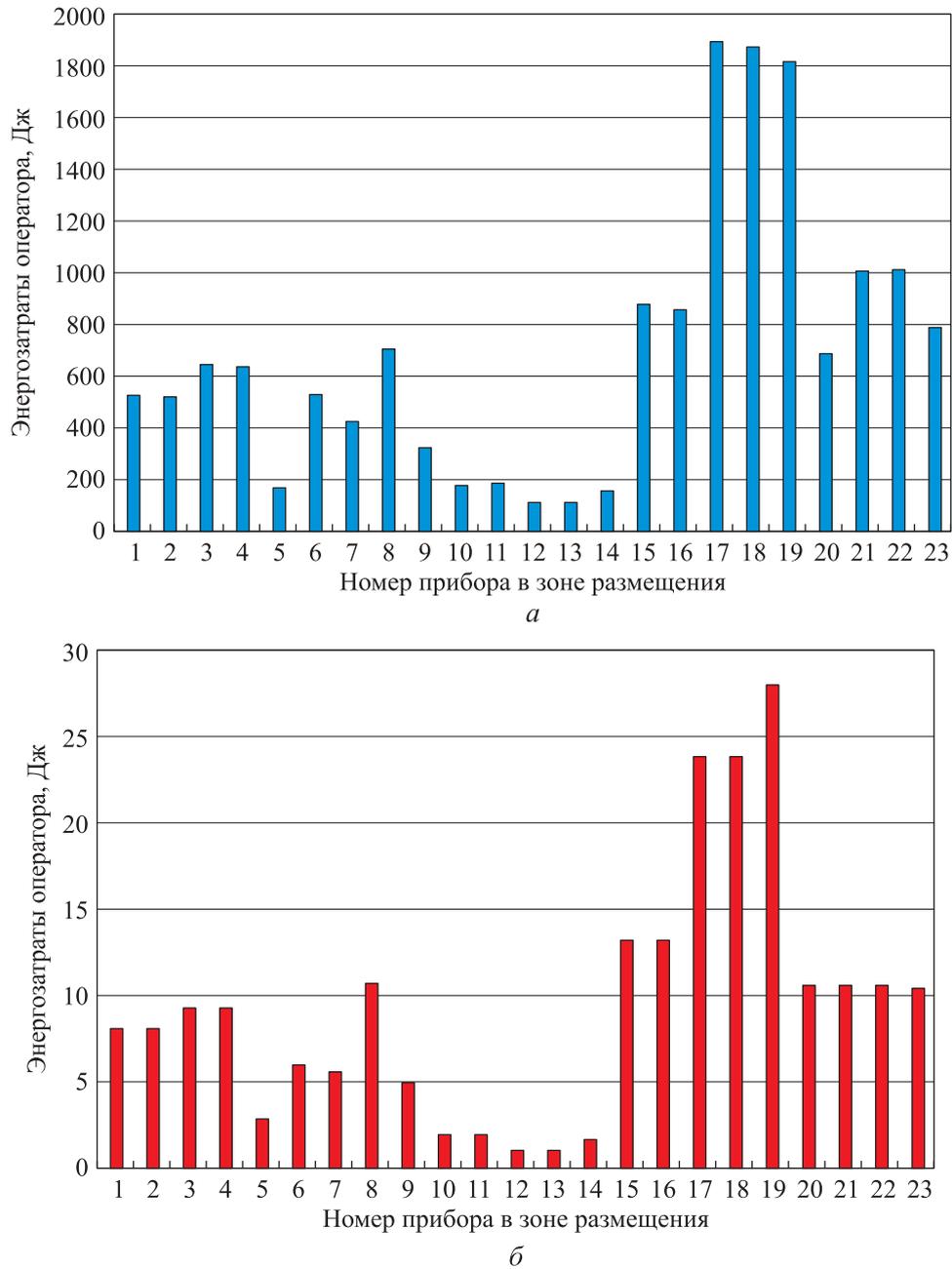


Рис. 7. Энергетические затраты оператора:
a — наземная эксплуатация; *б* — летная эксплуатация

Расчетные результаты энергетических затрат оператора в техпроцессах демонтажа приборов в ходе наземной и летной эксплуатации приведены на рис. 7. Затем для полученной компоновки БА была проведена проверка путем моделирования процесса взаимодействия оператора с приборами в тестовой служебной зоне размещения

в модуле PTC Creo Manikin Analysis. Для этого использовался электронный манекен оператора с заданными антропометрическими характеристиками. Порядок проверки был аналогичен тому, что изложен в работе [5]. В результате получено подтверждение принципиальной работоспособности алгоритма — доступ к приборам явно виден и на рис. 6.

Для того чтобы перейти к верификации методики, прежде всего необходимо подтвердить условия допустимой нагрузки (6) для летного случая. После этого предстоит провести оценку точности результатов, представленных на рис. 7, и откорректировать формулы (4) и (5), если относительная погрешность будет выше 15 %. Верификация будет проводиться поэтапно:

на *первом этапе* — в модуле PTC Creo Manikin Analysis при заданных по статистике мощностях энергетических затрат и времени на монтажно-демонтажные операции по внутренним нормативам;

на *втором этапе* — на стенде виртуальной реальности в ПАО РКК «Энергия», что позволит провести хронометраж времени демонтажа в условиях, приближенных к реальным, и учесть антропометрические характеристики оператора, чтобы уточнить результаты проверки эргономических зазоров из работы [5];

на *третьем этапе* — на стенде дополненной реальности в ПАО РКК «Энергия», что позволит отработать динамику технологических процессов демонтажа приборов и получить более точные данные по времени и отработке антропометрии;

на *четвертом этапе* — на материальных макетах, что позволит получить экспериментальные антропометрические и физиологические характеристики оператора, а также хронометражи рабочего времени для случая наземной эксплуатации БА;

на *пятом этапе* — в ходе летных испытаний, что позволит получить точные экспериментальные антропометрические и физиологические характеристики оператора, а также хронометражи рабочего времени для случая летной эксплуатации БА.

Результаты верификации методики предварительной эргономической оптимизации компоновки БА будут изложены в следующих статьях.

Заключение. В ходе исследования были детализированы способы оценки энергетических затрат оператора в зависимости от массы и частоты замены БА при наземной и летной ее эксплуатации, проведена валидация разработанного алгоритма и изложен порядок дальнейшей верификации методики. Компоновочные решения влияют на уровень комфорта в обитаемом объеме отсека и зонах размещения приборов при выполнении оператором целевых, бытовых и диагностических задач. Для моделирования компоновки БА с учетом факторов окружения существуют различные инструменты, подходящие

по специфике больше для инженера-конструктора или инженера-испытателя. Методика предварительной эргономической оптимизации компоновки БА применима при разработке конструкторской документации на установку приборов. Кроме того, она может быть принята к реализации при проведении работ в рамках эргономического обеспечения для разрабатываемых изделий в случае ее успешной верификации. Таким образом, сформированы дальнейшие направления работ по теме данного исследования. При этом следует иметь в виду, что эргономические требования к компоновке БА в отсеках КА не должны содержать ограничения, противоречащие функциональным, габаритным, монтажным, а также массоцентричным и инерционным требованиям, в которых отражаются основные критерии эффективности решения задачи размещения БА — минимумы массы, отклонений центра масс и моментов инерции отсеков КА и изделия в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е Вин Тун. *Оценка эргономичности компоновки отсека оборудования летательного аппарата. Дис. ... канд. техн. наук.* Москва, МАИ, 2020, 166 с.
- [2] Colombo G., De Vecchi G., Regazzoni D., Rizzi C. Preliminary analysis of low-cost motion capture techniques to support virtual ergonomic. *ICoRD'13: Global Product Development*, 2013, pp. 423–434.
- [3] Рипецкий А.В. *Геометрическое моделирование рабочих пространств оператора. Дис. ... канд. техн. наук.* Москва, МАИ, 2007, 134 с.
- [4] Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Богданов А.А., Колбасин Б.Г. Эргономическое сопровождение разработки антропоморфных робототехнических систем космического назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 1, с. 16–26. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-1-16-26
- [5] 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>
- [6] Миненко В.Е., Быковский С.Б., Семенов А.Н. Степень комфортности кабины спускаемых аппаратов капсульной формы. *Аэрокосмический научный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2017, № 2, с. 17–33. DOI: 10.24108/aersp.0217.0000066
- [7] Корвяков В.П. Разработка прототипа планшетного интерфейса «человек-машина» для транспортного пилотируемого корабля «Союз-МС». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 6, с. 93–114. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-93-114
- [8] Глебов И.В., Потемкин А.Л., Глебова О.И. О количественной оценке эргономических показателей систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11 (131). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-11-2227
- [9] ГОСТ 12.2.049–80. *Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.* Москва, Изд-во стандартов, 1980, 15 с.

- [10] Басараб М.А., Кондрашов К.В. Моделирование геометрии кисти руки методом R-функций в задачах биометрии. *Инженерный журнал: наука и инновации (Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана)*, 2012, № 3 (3), с. 289–297.
DOI: 10.18698/2308-6033-2012-3-131
- [11] Потемкин А.Л. Оценка функциональной эффективности при проектировании систем пилотируемого космического аппарата для длительных автономных полетов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4 (136).
DOI: 10.18698/2308-6033-2023-4-2270
- [12] Meng X., Sun H., Kang J. Equipment Layout Optimization Based on Human Reliability Analysis of Cabin Environment. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, no. 9, 1263.
DOI: 10.3390/jmse9111263

Статья поступила в редакцию 03.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Беляков А.А., Шулепов А.И., Прокопьев Е.В., Мурадов А.А., Папазов В.М. Методика предварительной эргономической оптимизации компоновки бортовой аппаратуры в отсеках пилотируемых космических аппаратов и космических станций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 7. EDN

Беляков Андрей Алексеевич — аспирант, инженер-конструктор III категории, ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. e-mail: post@rsce.ru

Шулепов Александр Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры космического машиностроения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, доктор транспорта, академик Российской академии транспорта, заслуженный конструктор Российской Федерации.
e-mail: shulepov-al@mail.ru

Прокопьев Евгений Валерьевич — ведущий инженер-испытатель, ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. e-mail: post@rsce.ru

Мурадов Артемий Артурович — инженер-испытатель II категории, ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. e-mail: post@rsce.ru

Папазов Владимир Михайлович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. e-mail: post@rsce.ru

Methodology of preliminary ergonomic optimization of on-board equipment layout in compartments of the manned spacecraft and space stations

© A.A. Belyakov¹, A.I. Shulepov², E.V. Prokopiev¹,
A.A. Muradov¹, V.M. Papazov¹

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Moscow Region, Korolyov, 141070, Russian Federation

²Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation

The paper considers the problem of meeting ergonomic requirements to the on-board equipment layout in compartments of the manned spacecraft and space stations. It describes features of the operator interaction processes with the equipment during their ground and flight (or intended) operation including diagnosis of the on-board systems, which affects the approach to assessing the energy costs. Methodological assumptions are provided, they relate to accounting for the environmental factors of the operator's workspace. Additions are proposed to develop fundamentals of the methodology for preliminary ergonomic optimization of the equipment arrangement in terms of assessing the operator's energy costs under zero-gravity and testing the permissible load conditions. Besides, recommendations are given to overcome the algorithmic collision associated with massive large-sized units of the on-board equipment. Moreover, the methodology was validated using the example of a pressurized compartment of one of the manned spacecraft, and its development and verification procedure was described.

Keywords: on-board equipment, ergonomic equipment layout, product electronic geometric model, prototyping, operator's energy costs, electronic equipment installation

REFERENCES

- [1] Ye Win Tun. *Otsenka ergonomichnosti komponovki otseka oborudovaniya letatel'nogo apparata: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment of ergonomics of the aircraft equipment compartment layout. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, MAI Publ., 2020, 166 p.
- [2] Colombo G., De Vecchi G., Regazzoni D., Rizzi C. Preliminary analysis of low-cost motion capture techniques to support virtual ergonomic. *ICoRD'13: Global Product Development*, 2013, pp. 423–434.
- [3] Ripetskiy A.V. *Geometricheskoe modelirovanie rabochikh prostranstv operatora. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Geometric simulation of the operator's workspaces. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, MAI Publ., 2007, 134 p.
- [4] Dudorov E.A., Sokhin I.G., Bogdanov A.A., Kolbasin B.G. Ergonomicheskoe soprovozhdenie razrabotki antropomorfnykh robototekhnicheskikh system kosmicheskogo naznacheniya [Ergonomic support for the development of anthropomorphic robotic systems for space purposes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 1, pp. 16–26. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-16-26>
- [5] Belyakov A.A., Shulepov A.I., Shesteryakov S.I., Prikhodko V.I., Kabushev I.S., Prokopiev E.V., Muradov A.A. Vypolnenie ergonomicheskikh, montazhnykh, gabaritnykh trebovaniy pri avtomatizirovannom razmeshchenii priborov v otseках izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Ergonomic, mounting, size requirements implementation while automatically arranging devices in compart-

- ments of rocket and space vehicles]. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177671>
- [6] Minenko V.E., Bykovskiy S.B., Semenenko A.N. Stepen komfortnosti kabiny spускаemykh apparatov kapsulnoy formy [A cockpit comfort level of the descent capsule-shaped vehicles]. *Aerokosmicheskiy nauchnyi zhurnal. MGTU im. N.E. Baumana — Aerospace Scientific Journal of the Bauman MSTU*, 2017, no. 02, pp. 17–33. <https://doi.org/10.24108/aersp.0217.0000066>
- [7] Korvyakov V.P. Razrabotka prototipa planshetnogo interfeysa “chelovek-mashina” dlya transportnogo pilotiruemogo korablya “Soyuz-MS” [Prototyping a tablet-based user interface for the manned Soyuz-MS spacecraft]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2017, no. 6, pp. 93–114. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-93-114>
- [8] Glebov I.V., Potemkin A.L., Glebova O.I. O kolichestvennoy otsenke ergonomicheskikh pokazateley system zhizneobespecheniya pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov [On quantitative assessment of the ergonomic indicators of life support systems of the manned spacecraft]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 11. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2227>
- [9] GOST 12.2.049-80. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Oborudovanie proizvodstvennoe. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya* [Occupational safety standards system. Industrial equipment. General ergonomic requirements]. Moscow, Standart Publ., 1980, 15 p.
- [10] Basarab M.A., Kondrashov K.V. Modelirovanie geometrii kisti ruki metodom R-funktsiy v zadachakh biometrii [Hand geometry simulation using the method of R-functions in biometrics problems]. *Engineering Journal: Science and Innovation (Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.E. Baumana — Herald of the Bauman Moscow State Technical University)*, 2012, iss. 3 (3), pp. 289–297. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-3-131
- [11] Potemkin A.L. Otsenka funktsionalnoy effektivnosti pri proektirovanii system pilotiruemogo kosmicheskogo apparata dlya dlitelnykh avtonomnykh poletov [Assessment of functional efficiency in the design of manned spacecraft systems for long-term autonomous flights]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-4-2270>
- [12] Meng X., Sun H., Kang J. Equipment Layout Optimization Based on Human Reliability Analysis of Cabin Environment. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, no. 9, p. 1263. <https://doi.org/10.3390/jmse9111263>

Belyakov A.A., Postgraduate, Design Engineer of the III category, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. e-mail: post@rsce.ru

Shulepov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Department of Space Engineering, Samara National Research University; Doctor of Transport, Academician of the Russian Academy of Transport, Distinguished Designer of the Russian Federation. e-mail: shulepov-al@mail.ru

Prokopiev E.V., Leading Test Engineer, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. e-mail: post@rsce.ru

Muradov A.A., Test Engineer of the II category, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. e-mail: post@rsce.ru

Papazov V.M., Cand. Sc. (Eng.), Leading Researcher, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation. e-mail: post@rsce.ru