

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.7.014

ЖИВУЧЕСТЬ ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА: АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Б.И. Крючков, М.М. Харламов, А.Е. Маликов

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. экон. наук М.М. Харламов;
А.Е. Маликов (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Рассматриваются методы исследования и обеспечения живучести длительно функционирующих пилотируемых космических комплексов (ПКК). Оцениваются возможности их экипажей по борьбе за живучесть при опасных воздействиях различного характера на объект. Обсуждаются модели и показатели живучести ПКК.

Ключевые слова: пилотируемый космический комплекс, опасные воздействия, аварийная ситуация, космонавты, экипажи, показатели и модели живучести

Survivability of a Manned Space Complex: Analysis, Modeling, Support. B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov, A.E. Malikov

The paper considers methods of studying and ensuring the survivability of long-term functioning manned space complexes (MSC). The capabilities of crews to fight for the survivability of the complex under various hazardous impacts on the object are assessed. Models and indicators of the survivability of MSC are discussed.

Keywords: manned space complex, hazardous impacts, emergency situation, cosmonauts, crews, aindicators and models of survivability

Программой фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 3684-р¹, повышение живучести и безопасности сложных человеко-машинных комплексов отнесено к «Перечню приоритетных направлений

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 г. № 3684-р. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы). В редакции распоряжений Правительства Российской Федерации от 21.04.2022 № 966-р, 22.07.2024 № 1955-р. // Документ размещен на сайте Правительство Российской Федерации: URL: <http://government.ru/docs/all/132190/?page=4>.

фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021–2030 годы». Повышение живучести и безопасности, наряду с вопросами эргономики и биомеханики человеко-машинных систем, в рамках данного документа рассматривается в числе «основных научных задач машиностроения и процессов управления...».

Большинство нормативно-технических документов (НТД), регламентирующих создание сложных системотехнических комплексов, в том числе и космических, предусматривают, что уже на этапах проектирования должно обеспечиваться одно из их важнейших свойств – живучесть.

Живучесть ПКК (понятие, содержание)

Понятие живучести применяется в самых различных областях техники: в судостроении (военном и гражданском)², энергетике, строительстве, информационно-вычислительных системах, оборонно-промышленном комплексе, ракетно-космической технике и др. [1–3]. В отношении ПКК живучесть можно рассматривать как свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию опасных ситуаций, характеризующихся созданием угрозы здоровью и жизни экипажа, целостности космического комплекса.

В национальном стандарте РФ «Требования надежности космических систем...»³ дано следующее лаконичное, достаточно удобное для использования при исследованиях ПКК определение: *живучесть – способность технического устройства, сооружения, средства или системы выполнять основные функции, несмотря на полученные повреждения.*

Живучесть ПКК определяет его способность выполнять запланированную программу полета после того как пилотируемый комплекс был подвергнут каким-либо опасным воздействиям (ОВ). Такие воздействия могут сопровождаться негативными последствиями, несмотря на высокий уровень надежности объекта, обеспечиваемый проектными и эксплуатационными методами. Критические воздействия на экипаж и ПКК могут приводить к нарушению условий деятельности космонавтов, материальному ущербу, неполному выполнению программы полета комплекса. Катастрофические воздействия несут угрозу здоровью и жизни экипажа, потери его работоспособности, утраты ПКК или его составной части, потери результатов функционирования ПКК.

Если ПКК обладает высокой живучестью, экипаж может сохранять работоспособность и продолжать космический полет, выполняя запланированные

² Колесников, Р.Д. Проблема обеспечения борьбы за живучесть на современных кораблях / Р.Д. Колесников // Mil.Press Flot. URL: <https://flot.com/science/reality/shipdamagecontrol/?ysclid=mg6m1c6n1038872132> (дата обращения 14.02.2025).

³ ГОСТ Р 56526-2015. Национальный стандарт РФ. Требования надежности космических систем, комплексов и АКА единичного (мелкосерийного) изготовления с измененными фонами активного существования. Дата введения 2016-04-01 // Документ размещен на сайте Стандартинформ. URL: https://rosstands.ru/file/gost/49/140/gost_r_56526-2015.pdf.

целевые работы (ЦР) и космические эксперименты (КЭ). Если ПКК имеет низкую живучесть, могут наступить критические или катастрофические последствия.

Повышение живучести ПКК – один из главных путей предотвращения разрушительных последствий и снижения ущерба в случае нанесения повреждений ПКК и/или его экипажу за счет ОВ. Живучесть ПКК обеспечивается конструкторскими, эксплуатационными и организационными мерами. На этапе эксплуатации (летных испытаний) значительная роль в обеспечении живучести ПКК отводится экипажу пилотируемой экспедиции.

Требования живучести, согласно ряду ГОСТ (Р 55996–2014; Р 56526–2015; 15.016–2016) и требований отраслевых НТД должны задаваться в ТЗ и ТТ на ПКК наряду с другими требованиями, такими как надежность, стойкость к внешним воздействиям и факторам, безопасность эксплуатации, безопасность экипажа. Все перечисленные свойства определяют безопасность функционирования ПКК в целом. На рис. 1 с помощью диаграммы Эйлера показаны взаимосвязи этих свойств. Живучесть ПКК относится к одному из основных свойств ПКК, которое должно исследоваться, обеспечиваться и оцениваться наравне с другими ключевыми свойствами в интересах сохранения и восстановления пилотируемого комплекса при различных ОВ на него.

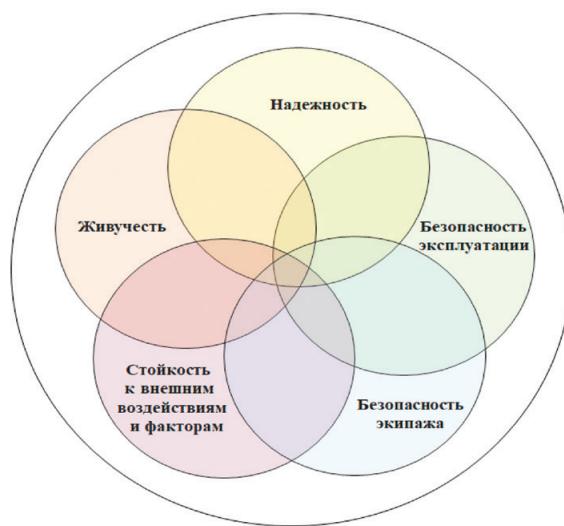


Рис. 1. Взаимосвязи свойств ПКК при обеспечении безопасности его функционирования (диаграмма Эйлера)

Как правило, ОВ имеют различную природу и носят случайный характер. Заранее не известен их вид, время возникновения, продолжительность действия, поражаемый элемент; в системе «Экипаж – ПКК» им может быть и человек, и техника или то и другое одновременно.

Для ПКК можно привести следующие примеры ОВ: пробой микрометеороидом или твердой частицей космического мусора корпуса какого-либо отсека, баллонов высокого давления или баков с горючим; пожар в обитаемом отсеке; критическое воздействие радиации на экипаж и оборудование; токсичность атмосферы в обитаемых отсеках; опасные столкновения элементов космической инфраструктуры (обитаемых модулей, робототехнических систем, планетоходов, манипуляторов, свободнолетящих автоматических космических аппаратов (АКА) и др.). На Луне упомянутые ОВ могут дополняться иными специфическими воздействиями, в числе которых опасное влияние лунной пыли на технику и человека, негативное воздействие гипомагнитной среды на экипаж и др. На Марсе, кроме того, ОВ могут быть связаны с пылевыми бурями [4–8].

Продолжительность ОВ на ПКК различна. Такие ОВ, как, например, пробой корпуса ПКК микрометеороидом, могут считаться импульсными, их длительность близка к нулевой. Другие ОВ имеют случайную длительность $\hat{\tau}_{\text{ов}}$, которую можно задать функцией распределения $F_{\hat{\tau}_{\text{ов}}}(\tau) = P(\hat{\tau}_{\text{ов}} < \tau)$. В ряде случаев (действие радиации, гипомагнитной среды и др.) негативный эффект от влияния ОВ будет накапливаться со временем полета $t_{\text{п}}$ ПКК и может быть представлен линейной зависимостью вида $\mathcal{E}_{\text{ов}}(t_{\text{п}}) = b(t_{\text{п}} - t_{\text{ов}})\Delta(t_{\text{п}} - t_{\text{ов}})$, где $t_{\text{ов}}$ – момент возникновения ОВ; $b = d\mathcal{E}_{\text{ов}}(t_{\text{п}}) / dt_{\text{п}}$ – скорость негативного влияния ОВ вида V_i ; $\Delta(t_{\text{п}} - t_{\text{ов}})$ – единичная функция Хэвисайда. Возможны ОВ постоянной длительности τ , когда амплитуда ОВ I_0 задается функциями вида $I_0(t_{\text{п}}) = I_0^0(1 - t_{\text{п}} / \tau)$ или $I_0(t_{\text{п}}) = I_0^0 \exp(-t_{\text{п}}^2 / b\tau)$, где b – параметр, равный для технических систем 0,3–0,5 [1].

В общем случае для каждого типа ПКК число возможных ОВ можно представить в виде конечного множества m , а их состав – в виде вектора $V_i = [V_1, V_2 \dots, V_m]$, где $[i = 1 \dots m]$ – последовательность значений целочисленной переменной с шагом 1. Практика пилотируемых космических полетов показывает, что возникновение ОВ⁴ является событием редким [4, 7, 9, 10, 14, 16]. На этом основании можно принять, что возможное число ОВ распределено по закону Пуассона. Тогда вероятность того, что за время функционирования t на ПКК возникнет k ОВ будет:

$$P(V_i) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ – параметр потока ОВ;

λt – математическое ожидание случайной величины \hat{k} .

ОВ на ПКК могут вызвать q аварийных ситуаций (АС), которые можно представить в виде вектора:

⁴ Парфенов, В. Утечка воздуха на МКС достигла максимального уровня риска // Сетевое издание Naked Science. URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/iss-leak-no-panic> (дата обращения 14.02.2025).

$$\beta_{\langle z \rangle} = [\beta_1, \beta_2 \dots, \beta_q], [z = 1 \ (1) \ q],$$

где β_z – тип АС;

z – номер АС;

q – число АС на ПКК в результате V_i воздействий.

Вероятность возникновения АС типа β_z при условии, что воздействие V_i произошло, можно записать в виде условной вероятности $P(\hat{A}_{\beta_z} / B_{V_i}) = P(\hat{A}_{\beta_z} \cap B_{V_i} / P(B_{V_i}))$, где \hat{A}_{β_z} – случайное событие, заключающееся в том, что в результате воздействия V_i возникает АС типа β_z ; B_{V_i} – событие, заключающееся в том, что, воздействие V_i на ПКК совершилось.

Воздействия V_i могут быть причиной нескольких типов АС. Так, в работе [11] рассматривается 11 возможных катастрофических последствий для РС МКС как результат его пробоя фрагментом космического мусора. В их числе: детонация гидрозина при пробое топливного бака; отрыв панелей солнечных батарей; потеря негерметичного модуля из-за разрушения конструкции, потеря экипажа из-за влияния гипоксии и др.

Возможные сценарии возникновения АС в результате ОВ

При ОВ на ПКК могут возникать первичные (некритические) последствия в виде локальных повреждений (дефектов), которые могут либо не повлиять на результативность полета (ущерб от них незначителен или равен нулю), либо нанести некоторый ущерб U . Однако катастрофических последствий при этом не возникает. Подобные процессы характерны для ПКК с высокой живучестью. В системах с низкой живучестью локальные повреждения могут приводить к опасным АС и катастрофическим (каскадным) разрушениям. При этом ущерб U будет значимым. В предельном случае возможна потеря экипажа и/или ПКК.

Поскольку риски для каждого из двух возможных последствий имеют свое распределение [2], суммарный риск R для ПКК можно записать в виде суперпозиции распределений:

$$R = \int_0^{x_{\Pi}} f_L(x) x d_x + \int_{x_{\Pi}}^{\infty} f_P(x) x d_x, \quad (2)$$

где $f_L(x)$ и $f_P(x)$ – плотности распределения ущербов U_L и U_P , а x_{Π} – граница перехода одного распределения в другое. Ущерб U_L характеризует локальное повреждение ПКК, не приводящее к катастрофическим последствиям, а ущерб вида U_P определяет эскалацию повреждения от прямого к катастрофическому. При этом риск (или степень риска) [12] рассматривается как возможная опасность, то есть – вероятность наступления опасного состояния ПКК с учетом размера возможного ущерба U_i от ОВ вида V_i :

$$R(V_i) = \sum_{i=1}^m P_i U_i, \quad (3)$$

где P_i – вероятность наступления события V_i , связанного с ущербом;

U_i – величина ущерба, причиненного ПКК (фактически характеризует последствия воздействия V_i).

Любой ПКК характеризуется совокупностью свойств, определяющих его качество в соответствии с предназначением. Вектор показателей качества функционирования ПКК будет:

$$Y_{\langle n \rangle} = [y_1, y_2 \dots, y_n], \quad (4)$$

где $y_1, y_2 \dots, y_n$ – компоненты вектора, определяемые целями и задачами ПКК.

При нормальном (штатном) функционировании ПКК все его свойства должны находиться в некоторой области допустимых значений $\{Y_{\langle n \rangle}^{\partial}\}$.

Тогда

$$\hat{Y}_{\langle n \rangle} \in \{Y_{\langle n \rangle}^{\partial}\}. \quad (5)$$

При возникновении АС в результате ОВ в распоряжении экипажа имеется некоторое допустимое время $\tau_{\text{PBP}}^{\partial}$ для ее парирования за счет выполнения ремонтно-восстановительных работ (РВР). Фактическое время τ_{PBP} , затрачиваемое экипажем на устранение АС, зависит от многих конструктивно-технологических и организационных причин, а также от подготовленности космонавтов [7, 13]. АС будет успешно устранена, если $\tau_{\text{PBP}} \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial}$.

В процессе функционирования ПКК, которое может продолжаться годами и десятилетиями [4, 5, 7, 9], ОВ и вызываемые ими АС могут возникать неоднократно. Для того, чтобы свойства ПКК на всем протяжении эксплуатации в пилотируемом режиме находились в допустимой области значений, должно выполняться условие:

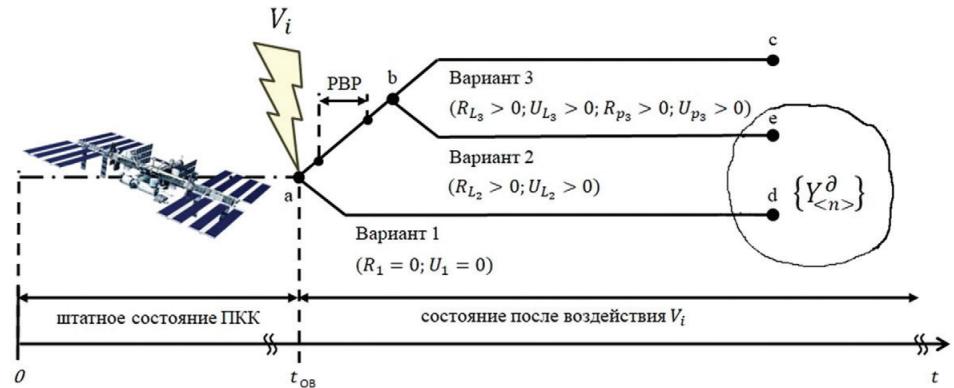
$$P(\tau) = P \{ \hat{\tau}_{\text{PBP}}^1 \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial}, \hat{\tau}_{\text{PBP}}^2 \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial}, \dots, \hat{\tau}_{\text{PBP}}^i \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial}, \dots, \hat{\tau}_{\text{PBP}}^k \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial} \}, \quad (6)$$

где $\hat{\tau}_{\text{PBP}}^i$ и $\tau_{\text{PBP}}^{\partial}$ – фактические (потребные) и допустимые затраты времени на ликвидацию АС i -го типа; k – число АС, вызванных ОВ за период функционирования ПКК.

Рассмотрим возможные варианты изменения состояний ПКК при ОВ V_i на него (рис. 2).

Вариант 1. ПКК выдерживает ОВ и остается неповрежденным. На сценарном плане рис. 2 это состояние представлено ветвью (a–d). При этом все риски и ущербы будут нулевыми.

Вариант 2. ПКК получает повреждение, однако за счет высокой живучести показатели качества его функционирования остаются в области допустимых значений $\{Y_{\langle n \rangle}^{\partial}\}$ (ветвь a–b–e). При этом появляются некоторые риски и ущербы, отличные от нуля ($R_{L_2} > 0; U_{L_2} > 0$). Высокая живучесть ПКК

Рис. 2. Сценарий эволюции ППК после ОВ в момент $t_{\text{об}}$

в данном случае обеспечивается на участке (a–b) либо конструкторскими методами, действиями экипажа, ЦУПа. Например, в случае пробоя микрометеороидом топливного бака с окислителем на МКС, истечение жидкости из него и, как следствие, закрутка станции с угловой скоростью (0,1–2) °/с приведет к потере ориентации с возможностью восстановления. В данном случае космонавты проводят РВР за время $\tau_{\text{РВР}} \leq \tau_{\text{РВР}}^{\delta}$.

Вариант 3. ППК получает повреждение, в результате которого показатели его качества выходят за пределы области допустимых значений $\{Y_{<n>}^{\delta}\}$ (ветвь a–b–c). По сути происходит эскалация повреждения до АС с катастрофическими последствиями (жизнеугрожающие ситуации для экипажа, потеря ППК и др.). При этом возникшие ущербы и риски могут многократно превышать ущербы и риски по варианту 2 ($R_3 >> R_2; U_3 >> U_2$).

Показатели живучести

Порядок оценивания и показатели живучести сложных системотехнических комплексов в настоящее время не регламентированы ГОСТом или другими НТД. Ученых и разработчиков ППК также нет единого представления по данному вопросу. Целесообразно рассмотреть общие подходы к выбору показателей живучести, которые были бы пригодны для любых типов ППК, условий их применения и видов ОВ. Особый интерес представляют комплексные показатели живучести, позволяющие оценивать способность ППК и его экипажа противостоять возникновению опасных ситуаций при принятых конструкторских, эксплуатационных и организационных методах обеспечения живучести. При этом надо исходить из стохастичности развития сценариев, определяющих состояние ППК с момента ОВ $t_{\text{об}}$ [9, 10, 13]. Отсюда следует, что комплексные показатели живучести должны быть вероятностными. Такие показатели учитывают не только стохастичность возникновения и развития ОВ, но и заранее не известный характер действий экипажа по парированию возникающих АС, в том числе с участием ЦУПа.

Комплексные показатели. В качестве комплексного показателя живучести $P_{\text{ж}}$ может быть выбрана условная вероятность невыхода показателей качества ПКК за пределы области допустимых значений $\{Y_{<n>}^{\partial}\}$ при условии, что произошло ОВ вида V_i , а восстановление ПКК (устранение АС) выполнено за время, не превышающее допустимое

$$P_{\text{ж}} = P([\hat{Y}_{<n>} \leq Y_{<n>}^{\partial}] / [\tau_{\text{PBP}}^l \leq \tau_{\text{PBP}}^{i\partial}]) \parallel V_i. \quad (7)$$

Предложенный показатель в полной мере отвечает сценарию развития АС, представленному на рис. 2.

Для комплексного оценивания живучести⁵, независимо от сценариев формирования АС и способов их парирования [14], может быть использован индекс живучести $\Pi_{\text{ж}}$ [2], основанный на определении рисков R

$$\Pi_{\text{ж}} = \frac{\sum_{i=1}^q R_{L_i}}{\sum_{i=1}^q R_{L_i} + \sum_{j=1}^h R_{P_j}}, \quad (8)$$

где q, h – число критических и катастрофических сценариев АС;

R_{L_i}, R_{P_j} – соответствующие риски.

В силу независимости от вида ОВ V_i на ПКК показатель $\Pi_{\text{ж}}$ имеет универсальный характер. Кроме того, он, как и вероятностный показатель $P_{\text{ж}}$, меняется в пределах от 0 до 1.

Наряду с комплексными целесообразно применение частных показателей, позволяющих оценивать отдельные наиболее важные стороны методов и процедур обеспечения живучести. Эти показатели могут быть вероятностными и детерминированными.

Частные вероятностные показатели: P_{PBP} – вероятность успешного выполнения экипажем комплекса работ по борьбе за живучесть в случае экстремального воздействия на ПКК за время, не превышающее допустимое $\tau_{\text{PBP}}^{\partial}$:

$$\tau_{\text{PBP}}^{\partial} P_{\text{PBP}}(\tau_{\text{PBP}}^{\partial}) = \text{Вер} \{ \tau_{\text{PBP}} \leq \tau_{\text{PBP}}^{\partial} \} = \int_0^{\tau_{\text{PBP}}^{\partial}} \varphi_{\text{PBP}}^{\text{PBP}}(\tau), \quad (9)$$

где $\varphi_{\text{PBP}}^{\text{PBP}}(\tau)$ – плотность распределения вероятностей времени τ_{PBP} .

$P_{\text{прогр}}$ – вероятность выполнения экипажем минимально допустимого объема (уровня) заданной функции ПКК (объема целевых задач) в случае воздействия V_i и выполнения РВР:

⁵ Махутов, Н.А. Оценка живучести сложных технических систем / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. URL: http://imash.ru\netcat_files/File/Ahmethanov (дата обращения 07.03.2025).

$$P_{\text{прогр}}(t) = P\left\{N_{\text{цз}}^{\text{факт}} \geq N_{\text{цз}}^{\text{мд}}\right\} \parallel V_i \quad (10)$$

или

$$P_{\text{прогр}}(t) = P\left\{N_{\text{цз}}^{\text{факт}} - N_{\text{цз}}^{\text{мд}} > \delta\right\} \parallel V_i.$$

где $N_{\text{цз}}^{\text{факт}}$, $N_{\text{цз}}^{\text{мд}}$ – фактическое и допустимое (минимальное) число целевых задач, выполняемых на ПКК;

δ – допустимая величина отклонения $N_{\text{цз}}^{\text{факт}}$ от $N_{\text{цз}}^{\text{мд}}$ (например, 5–10 %).

Частные детерминированные показатели: T_{PBP} – среднее время устранения АС как результата ОВ (математическое ожидание затрат времени на РВР);

$$T_{\text{PBP}} = M[\hat{\tau}_{\text{PBP}}] = \int_0^{\infty} \tau \varphi_{\hat{\tau}}^{\text{PBP}}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Аналогично могут быть определены показатели:

$T_{\text{обн}}$ – среднее время локализации (математическое ожидание времени поиска местонахождения) результата ОВ экипажем (автономно и/или при поддержке ЦУПа);

$T_{\text{ЭВ}}$ – среднее время эвакуации (математическое ожидание времени эвакуации) из ПКК при различных вариантах конфигурации объекта (например, на разных этапах его сборки), схемах эвакуации, динамике развития АС.

Модели живучести

В сфере пилотируемой космонавтики имеется достаточно большой опыт обеспечения безопасности полетов экипажей ПКК. Разработаны модели опасности в космосе, методы моделирования процессов возникновения непредвиденных ситуаций, их обнаружения, распознавания, способов устранения⁶ [14], в том числе за счет выполнения РВР [4, 6, 9, 13].

Имеющиеся теоретические разработки и фактические данные полетов ПКК, особенно таких как «Салют», «Мир», МКС, делают реальной задачу создания математической модели живучести ПКК. Целесообразно, чтобы такая модель отвечала требованиям полноты, адекватности, инвариантности и динамичности⁷, что позволило бы использовать ее для изучения всевозможных ОВ на ПКК различных типов при разных условиях их применения [13].

Поскольку живучесть ПКК определяется многими факторами, в числе которых проектные, эксплуатационные, внешние, положения ПКК в космическом пространстве и другие [14, 15], модель живучести может быть представлена в виде совокупности ряда частных моделей, которые взаимосвязаны между собой. В числе таких моделей могут быть:

⁶ Парфенов, В. Утечка воздуха на МКС достигла максимального уровня риска. URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/iss-leak-no-panic> (дата обращения: 14.02.2025).

⁷ URL: http://imash.ru›netcat_files/ File/Ahmethanov (дата обращения: 07.03.2025).

- модель, характеризующая виды, типы, частоту возникновения и динамику развития ОВ (МОВ) на ПКК;
- модель, характеризующая геометрию и структуру ПКК (МПКК), безотказность при воздействии ОВ, способы и технологии обеспечения живучести;
- модель, характеризующая последствия воздействия (МПВ) на ПКК (критические, катастрофические, нанесенный ущерб);
- модель борьбы (МБ) экипажа за живучесть ПКК с описанием алгоритмов действий космонавтов в различных АС, вызванных ОВ, с учетом принятых технологий мониторинга ПКК; одним из элементов МБ может быть подмодель восстановления ПКК, в которой формируются фактические трудозатраты экипажа на выполнение РВР;
- модель выполнения программы космического полета (МПр) формирует текущие оценки результатов функционирования ПКК с учетом видов, сроков и критичности нанесенного ущерба.

Массив информации, получаемой по результатам функционирования модели, формируется в виде базы данных (БД). Основы построения БД по АС для ПКК рассмотрены в работах [9, 13]. Информация из БД используется для оценивания вкладов различных мероприятий в обеспечение живучести ПКК на основе определения комплексных и частных показателей (формулы 7–11). При оценивании живучести учитывается состояние ПКК, состояние экипажа и степень выполнения программы полета.

Для описания процессов в рассмотренных выше частных моделях могут использоваться как детерминированные, так и вероятностные методы [1, 13]. Данные частные модели можно рассматривать как взаимосвязанные модули единой модели живучести ПКК. Идеология ее построения может опираться на принципы разработки модели опасности в космосе [9].

Рассмотренная модель может быть применена как для общетеоретических исследований проблем живучести ПКК, так и для выработки практических рекомендаций. В последнем случае в ней должны учитываться конкретные характеристики ПКК, а также экспериментальные статистические данные, определяющие процессы в каждой из частных моделей.

Из опыта пилотируемых космических полетов следует, что число возможных ОВ на ПКК – конечно и невелико [13]. Тогда модель для анализа живучести ПКК можно представить в виде *комплекса модулей* в составе *блока модулей живучести* (БМЖ), формируемых из моделей живучести ПКК по каждому ОВ (рис. 3). В качестве модулей, в частности, могут быть использованы имеющиеся модели, уже применяемые на практике. Например, имитационная математическая модель для анализа последствий пробоя гермооболочки РС МКС фрагментом космического мусора [11].

Преимуществом такого подхода является то, что обеспечивается максимальная гибкость модели, поскольку можно менять ее структуру в зависимости от решаемой задачи и имеющегося опыта. Кроме того, исследования можно начинать с минимального числа модулей, наращивая их по ходу работ.



Рис. 3. Структурная схема модели анализа живучести ПКК

Обеспечение живучести

Обеспечение живучести осуществляется техническими и организационными мерами. К техническим относятся, в частности, конструктивно-технологические меры, которые должны обеспечивать стойкость конструкции ПКК, его бортовых систем (БС) и НА к внешним воздействиям, в том числе таким как вакуум, радиация, микрометеориды, космический мусор, перепады температур, абразивное воздействие пыли, физико-химические компоненты, применяемые в составе комплекса систем обеспечения жизнедеятельности (КСОЖ), средств обеспечения теплового режима (СОТР) и в других БС. Данное качество достигается выбором износостойких материалов, применением различных защитных экранов, пожаробезопасных материалов, использованием соответствующих производственных технологий изготовления компонентов ПКК.

Кроме того, должны предусматриваться схемно-конструкторские меры, включающие выбор оптимальной топологии космического комплекса (реальное расположение элементов ПКК, их взаимодействие, формирование информационных потоков), резервирование систем и процедур, а также средства, способы и методы противоаварийной защиты, локализации утечек, пожаров, индивидуальной защиты экипажа, обеспечения безопасности взаимодействия с сопрягаемыми объектами, меры защиты от воздействия ударных и других механических нагрузок.

Организационные меры должны включать методы и технологии предупреждения развития АС до опасных ситуаций за счет мониторинга состояния объекта, ликвидации АС, восстановления и поддержания работоспособности

после эксплуатационного повреждения. Ключевая роль в их реализации в полете отводится экипажу ПКК. От его квалификации в значительной мере зависит успешность парирования АС, а значит, обеспечение живучести комплекса. Отсюда вытекают особые требования к наземной предполетной и бортовой подготовке космонавтов. Последняя проводится в целях обеспечения готовности экипажа к выполнению динамических операций, ВКД, поддержания навыков устранения АС. Роль ЦУПа должна определяться с учетом автономности пилотируемой миссии, структуры сеансов связи и возможностей командной радиолинии.

Технические и организационные меры обеспечения живучести должны предусматриваться проектными требованиями к ПКК⁸ и подтверждаться экспериментально⁹ [3, 6].

Борьба экипажа за живучесть ПКК

Понятие «борьбы экипажа за живучесть корабля» было впервые введено в военно-морском флоте¹⁰. В то же время были впервые разработаны принципы и технологии участия экипажей в обеспечении выполнения основных функций военных судов, несмотря на ОВ на них со стороны противника. С учетом специфики объектов и условий их применения упомянутые принципы и технологии «борьбы за живучесть» могут быть распространены и на пилотируемый космос.

Можно выделить следующие группы факторов, характеризующих возможности космонавтов по борьбе за живучесть ПКК: профессиональной подготовленности экипажа, информационной и алгоритмического обеспечения его деятельности.

Экипаж ПКК должен иметь необходимые знания, умения, навыки и компетенции по действиям в нештатных и АС. Данные качества последовательно формируются на всех этапах подготовки космонавтов в соответствии с принятыми нормативными документами. Действия экипажа за живучесть ПКК можно рассматривать как один из элементов его функциональной деятельности, к которой он должен быть подготовлен¹¹. Борьбой за живучесть пилотируемого комплекса руководит командир экипажа (экспедиции) [7, 13].

Основная задача информационного обеспечения – создать потоки управления информацией в системе «аварийный ПКК – Экипаж – ЦУП»,

⁸ URL: http://imash.ru>netcat_files/File/Ahmethanov (дата обращения: 07.03.2025).

⁹ ГОСТ Р 565262015. Национальный стандарт РФ. Требования надежности космических систем, комплексов и АКА единичного (мелкосерийного) изготовления с измененными фонами активного существования // Стандартинформ. 2015. URL: https://rosgosts.ru/file/gost/49/140/gost_r_56526-2015.pdf.

¹⁰ URL: <https://flot.com/science/reality/shipdamagecontrol/?ysclid=mg6mlc6n1038872132> (дата обращения: 14.02.2025).

¹¹ URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/iss-leak-no-panic> (дата обращения: 14.02.2025).

гарантирующие своевременное получение заинтересованными сторонами достоверной информации по текущему состоянию экипажа и ПКК. Информация от БС мониторинга, рекомендации от систем искусственного интеллекта (ИИ) должны поступать экипажу в реальном масштабе времени, а от ЦУПа – оперативно.

Алгоритмическое обеспечение деятельности экипажа по борьбе за живучесть объекта должно предусматривать порядок (варианты) действий по ликвидации АС, а также процедуры эвакуации на случай невозможности парирования ОВ на ПКК.

Процесс борьбы экипажа за живучесть ПКК можно условно разбить на четыре этапа:

- 1) распознавание и оценивание АС, возможной после ОВ на объект и/или экипаж;
- 2) предотвращение угрозы здоровью и жизни космонавтов;
- 3) проведение восстановительных мероприятий, направленных на сохранение работоспособности поврежденных БС, оборудования или конструкции ПКК;
- 4) выполнение программы полета с учетом принятых мер по парированию АС.

На рис. 4 представлена укрупненная блок-схема алгоритма оценивания результатов борьбы экипажа за живучесть, на которой упомянутые этапы показаны в виде блоков II, III, IV, V.

Блок I предусматривает введение всех данных, необходимых для функционирования алгоритма: λ ; компоненты векторов $Y_{\leq n}^{\partial}$, $V_{\leq \partial}$, $\beta_{\leq \partial}$; плотности распределения $f_L(x)$ и $f_P(x)$; $\varphi_{\hat{t}}^{\text{PBP}}(\tau)$; параметры k , q , $\tau_{\text{PBP}}^{i\partial}$, h , δ , $N_{\text{цз}}^{\text{M}\partial}$, x_n ; текущее время t ; характеристики подготовленности экипажа и конструктивно-технологические характеристики ПКК.

В модуле 1 блока II t_{OB} формируется с учетом пуассоновского характера потока ОВ, как показано в формуле (1), методом обратных функций [7, 9]. В модулях 2 и 3 определяется вид ОВ и тип АС с учетом вводимых $V_{\leq \partial}$, $\beta_{\leq \partial}$. Если АС катастрофическая (определяется с учетом формулы (2)) и ее устранение невозможно, управление передается модулю 7 блока III. В противном случае в модуле 5 блока III определяется время $\tau_{\text{PBP}}^{i\partial}$, зависящее от вектора $\beta_{\leq \partial}$, и вводимое в блок I в соответствующем табличном виде. Аналогично определяется $\tau_{\text{здк}}$ в модуле 6. Фактическое время τ_{PBP} обычно распределяется по закону Вейбулла [13]. Оно разыгрывается в модуле 8 блока IV методом

Монте-Карло по функции распределения $F_{\hat{t}_{\text{PBP}}}(\tau_{\text{PBP}}) = 1 - e^{-\frac{\tau_{\text{PBP}}}{\alpha}}$, где α и β – параметры этого закона. Если $\tau_{\text{PBP}} + \tau_{\text{здк}} > \tau_{\text{PBP}}^{\partial}$ – требуется эвакуация экипажа (модуль 7 блока III), если нет – после формирования $\tau_{\text{подг}}$ (модуль 10 блока V) в модуле 11 определяется момент $t_{\text{прогр}}$ начала выполнения (продолжения) программы полета после устранения последствий ОВ экипажем ПКК. Для вычисления показателей живучести в блоке VI по формулам (7–11) потребуются

соответствующие данные из БВНУП ($N_{\text{цз}}^{\text{мд}}$, δ , $\varphi_{\hat{\tau}}^{\text{PBP}}(\tau)$ и др.), некоторые данные, формируемые в предшествующих модулях (τ_{PBP}^i , $\tau_{\text{ЭВ}}^i$, R_{L_i} , R_{P_i} , $U_{\text{ОВ}}$ и др.).

Варьируя соответствующие данные, с помощью рассмотренного алгоритма, можно исследовать вклад различных мероприятий в обеспечение живучести ПКК и методом перебора вариантов находить наилучшее решение.

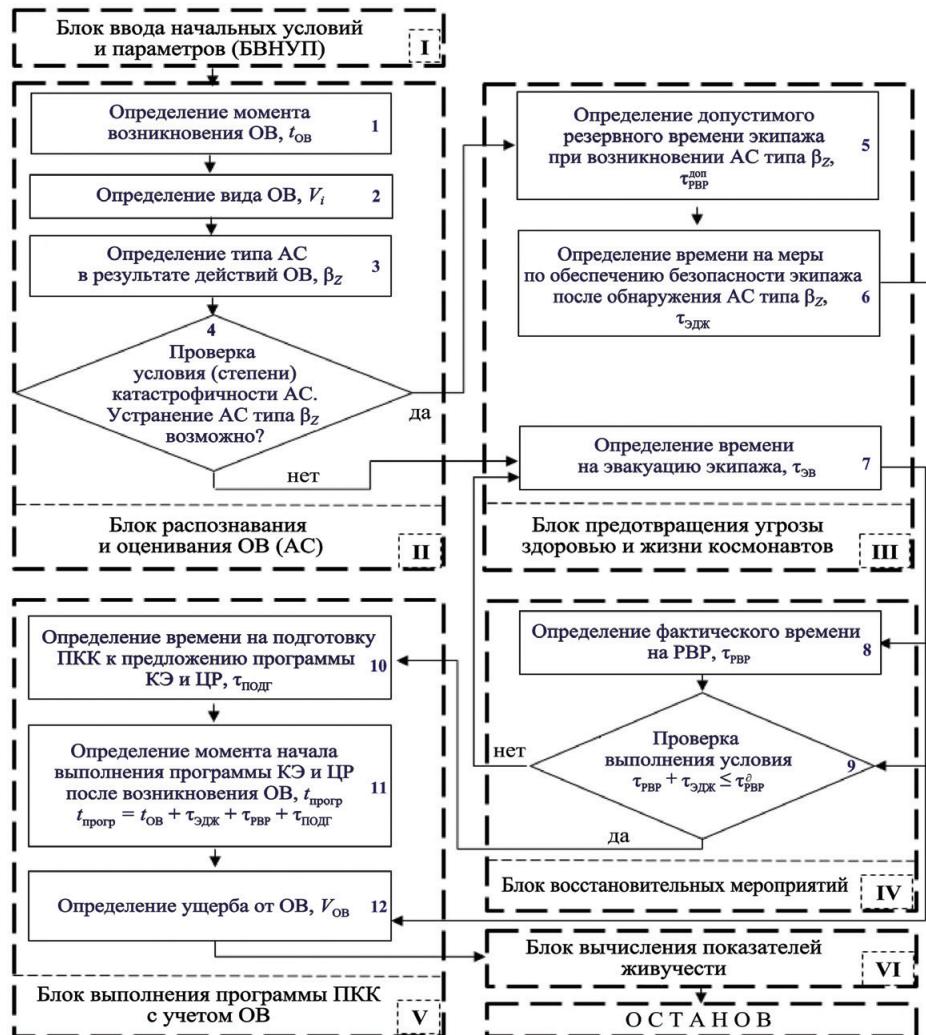


Рис. 4. Укрупненная блок-схема алгоритма оценивания результатов борьбы экипажа за живучесть ПКК

Выводы

Живучесть является одним из важнейших свойств длительно функционирующих космических комплексов. Данное свойство можно считать интегральным,

имеющее тесные взаимосвязи с такими свойствами как надежность, безопасность, устойчивость, эффективность и др.

В узком смысле живучесть рассматривается как свойство объекта противостоять развитию опасных ситуаций и сохранять критически важные качества в случае ОВ. В широком смысле живучесть характеризует способность космического комплекса обеспечивать заданную программу его функционирования и достижение целевых показателей в условиях нарушения штатных режимов эксплуатации.

До настоящего времени основное внимание уделялось исследованию живучести беспилотных космических объектов, преимущественно низкоорбитальных АКА зондирования Земли. В данной работе рассмотрена специфика анализа и способов обеспечения живучести космического комплекса, на борту которого находится экипаж, способный привнести новые возможности в устранение влияния различных дестабилизирующих факторов на результаты космического полета. При этом в основу управления техническим состоянием положена концепция совместного использования избыточных ресурсов ПКК, возможностей ЦУПа, а также интеллекта и высоких операторских качеств космонавтов.

В связи с перспективой создания и эксплуатации Российской орбитальной станции (РОС) на ее экипажи в числе прочих, будет возложена новая задача – поддержание работоспособности беспилотных аппаратов орбитальных космических группировок. При этом возникает проблема обеспечения живучести в системе «ПКК – Экипаж – Орбитальная космическая группировка – ЦУП», решение которой возможно с учетом опыта как пилотируемой космонавтики, так и опыта обеспечения живучести АКА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкесов, Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности / Г.Н. Черкесов, А.О. Недоседкин // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 3–15.
2. Мухортов, В.В. Методика оценки живучести информационно-технических объектов по отношению к программно-аппаратным воздействиям / В.В. Мухортов, Ю.В. Нефедьев. – Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4. – 13 с. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_56_2_Muhortov.pdf_03c1889a35.pdf.
3. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Соллогуб, В.П. Макаров. – Москва: Машиностроение, 2010. – 384 с.
4. Шибанов, Г.П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека. – Москва: Машиностроение, 2007. – 544 с.
5. Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под ред. В.П. Легостаева, В.А. Лопоты. – Москва: ПКК «Энергия», 2011. – 58 с.

6. Мелихов, А.С. Обеспечение пожарной безопасности обитаемых гермоотсеков космических летательных аппаратов. – Москва: ВНИИПО, 2021. – 728 с.
7. Крючков, Б.И. Профессиональная деятельность экипажей перспективных космических комплексов / Б.И. Крючков, М.М. Харламов, П.П. Долгов. – Москва: Космоскоп, 2024. – 275 с.
8. Ушаков, И.Б. Космос. Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полетах). – Москва: Научная книга, 2021. – 352 с.
9. Тищенко, А.А. Моделирование при обеспечении безопасности космических полетов / А.А. Тищенко, В.И. Ярополов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 189 с.
10. Обеспечение токсически безопасной атмосферы обитаемых космических станций при аварийных ситуациях / А.В. Юргин, С.Ю. Романов, А.С. Гузенберг, А.А. Телегин [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2007. – № 3. – С. 75–95.
11. Соколов, В.Г. Анализ последствий повреждения конструкции РС МКС, вызванного столкновением с осколком космического мусора / В.Г. Соколов, А.В. Горбенко // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 4(27). – С. 65–76.
12. Шубин, Р.А. Надежность технических систем и техногенный риск. – Тамбов: ТГТУ, 2012. – 80 с.
13. Нештатные ситуации космических полетов. Математическое моделирование. Прикладные аспекты / А.В. Алешин, Д.К. Дедков, Б.И. Крючков [и др.]. – РГНИИЦПК, 1998. – 244 с.
14. Спирин, А.И. Методические подходы к парированию аварийных ситуаций на МКС / А.И. Спирин, О.А. Николаева // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 1(28). – С. 48–59.
15. Миронов, В.В. Баллистические предельные уравнения для оптимизации системы защиты космических аппаратов от микрометеороидов и мусора / В.В. Миронов, М.А. Толкач // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 3(14). – С. 26–42.
16. Baker, J.B. On the Assessment of Robustness. Structural Safety / J.B. Baker, M. Schubert, M.H. Faber. – Vol. 30, No 3. – P. 253–267.

REFERENCES

1. Cherkesov, G.N. Description of an Approach to Assessing the Survivability of Complex Structures Under Repeated High-Precision Impacts / G.N. Cherkesov, A.O. Nedosedkin // Reliability. – 2016. – No 2. – P. 3–15.
2. Mukhortov, V.V. Methodology for Assessing the Survivability of Information and Technical Objects in Relation to Software and Hardware Impacts / V.V. Mukhortov, Yu.V. Nefediev. – Text: electronic // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No 4. – 13 p. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_56_2_Muhortov.pdf_03c1889a35.pdf.
3. Methods of Ensuring the Survivability of Low-Orbital Automatic Earth-Sensing Satellites: Mathematical Models, Computer Technologies / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, A.V. Sollogub, V.P. Makarov. – Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 384 p.
4. Shibanov, G.P. Habitability of Space and Safety of Human Presence in It. – Moscow: Mechanical Engineering, 2007. – 544 p.

5. The Moon is a Step Towards Solar System Exploration Technologies / Edited by V.P. Legostaeva, V.A. Lopoty. – Moscow: RSC Energia, 2011. – 58 p.
6. Melikhov, A.S. Ensuring Fire Safety of Inhabited Pressurized Compartments of Spacecraft. – Moscow: VNIIPPO, 2021. – 728 p.
7. Kryuchkov, B.I. Professional Activities of Crews of Advanced Space Systems / B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov, P.P. Dolgov. – Moscow: Kosmoscop, 2024. – 275 p.
8. Ushakov, I.B. Cosmos. Radiation. Human (Radiation Barrier in Interplanetary Flight). – Moscow: Scientific Book, 2021. – 352 p.
9. Tishchenko, A.A. Modeling in Ensuring the Safety of Space Flights / A.A. Tishchenko, V.I. Yaropolov. – Moscow: Mechanical Engineering, 1981. – 189 p.
10. Ensuring a Toxically Safe Atmosphere for Inhabited Space Stations in Emergency Situations / A.V. Yurgin, S.Yu. Romanov, A.S. Guzenberg, A.A. Telegin [et al.] // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Energetics. – 2007. – No 3. – P. 75–95.
11. Sokolov, V.G. Analysis of the Consequences of Damage to the ISS RS Structure Caused by a Collision With a Fragment of Space Debris / V.G. Sokolov, A.V. Gorbenko // Space Engineering and Technologies. – 2019. – No 4(27). – P. 65–76.
12. Shubin, R.A. Reliability of Technical Systems and Technogenic Risk. – Tambov: TGTU, 2012. – 80 p.
13. Emergency Situations in Space Flight. Mathematical Modeling. Applied Aspects / A.V. Aleshin, D.K. Dedkov, B.I. Kryuchkov [et al.]. – RGNIITsPK, 1998. – 244 p.
14. Spirin, A.I. Methodological Approaches to Countering Emergency Situations on the ISS / A.I. Spirin, O.A. Nikolaeva // Space Technology and Technologies. – 2020. – No 1(28). – P. 48–59.
15. Mironov, V.V. Ballistic Limit Equations for Optimizing the Spacecraft Protection System From Micrometeoroids and Debris / V.V. Mironov, M.A. Tolkach // Space Engineering and Technologies. – 2016. – No 3(14). – P. 26–42.
16. Baker, J.B. On the Assessment of Robustness / J.B. Baker, M. Schubert, M.H. Faber // Structural Safety. – Vol. 30, No 3. – P. 253–267.