

Пути проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники в изменяющихся условиях

© Ю.П. Похабов¹, Л.С. Точилов²

¹АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро»,
Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия

²АО «ВПК НПО машиностроения»,
Реутов, Московская область, 143966, Россия

Рассмотрены условия создания надежных и в то же время инновационных образцов ракетно-космической техники с учетом изменяющихся ключевых внешних (доступность современных средств, систем и баз знаний для цифрового проектирования) и внутренних (соотношение уровня творчества и опыта конструкторской организации) факторов проектно-конструкторской деятельности. Выполнен анализ влияния на развитие конструкторской организации как внедрения и использования современных систем автоматизации проектирования и управления жизненным циклом изделия, так и возможности для развития ИТ-систем в случае разрыва сотрудничества с их западными разработчиками. В результате проведенного исследования установлено, что наиболее перспективным вариантом сохранения и повышения надежности отечественной ракетно-космической техники в современных условиях является комплексное решение, основанное на базе знаний методик проектирования высокоответственных систем с учетом заданных требований надежности (например, методики конструкторско-технологического анализа надежности и др.).

Ключевые слова: конструкторско-технологический анализ надежности, проектирование, надежность, инновации, импортозамещение, ракетно-космическая техника, теория решения изобретательских задач

Конструкторская организация: опыт и творчество. Процесс проектирования в ракетно-космической технике (РКТ) базируется на творчестве (эвристике), с одной стороны, и опирается на опыт и знания, полученные в ходе выполнения предыдущих проектов, — с другой. Очевидно, что в равной степени важно и то и другое. Однако на практике сложно обеспечить одинаковый приоритет указанным направлениям проектирования (рис. 1, линия *a*), а возможно, и не нужно этого делать. Например, исходя из конструктивно-компоновочной и конструктивно-силовой схем и внешнего вида конструкций новых изделий РКТ можно прийти к выводу о том, какое из двух направлений проектирования превалировало:

- 1) создание футуристического изделия (рис. 1, линия *b*) [1];
- 2) комбинирование старых отработанных конструкторских решений (рис. 1, линия *в*).

Для обеспечения надежности конструкций, на первый взгляд, стоит отдать предпочтение второму направлению проектирования

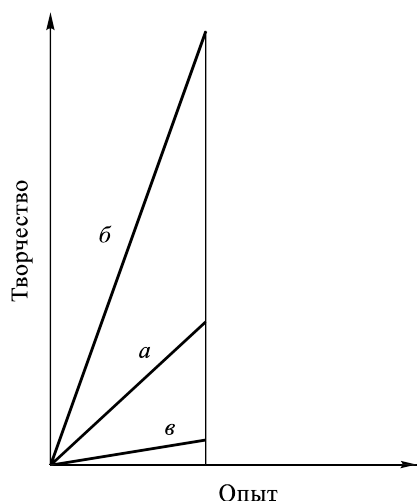


Рис. 1. Соотношение творчества и опыта при создании нового изделия

(см. рис. 1, линия *в*), хотя и очевиден недостаток эволюционной переработки проверенных решений: отказ от инновационных идей с целью снижения рисков. Интересно отметить, что это происходит как бы само собой, даже если команда опытных конструкторов и пытается создать инновационное изделие [2].

В зависимости от развития процесса проектирования в конструкторской организации понятно, что в каждом новом изделии соотношение творчества и опыта может существенно различаться.

Поэтому будем рассматривать такое соотношение применительно к конструкторской организации, которая достаточно стабильна и сбалансирована в организационно-техническом плане. Это позволит установить соотношение творчества и опыта от изделия к изделию на среднем уровне. Стабильность и сбалансированность конструкторской организации обеспечиваются постоянством, в первую очередь, кадрового состава, в который входят как те, кого можно условно считать консерваторами, так и те, кого можно условно полагать инноваторами. Консерваторы — это, как правило, опытные конструкторы, выполнившие ряд проектов и имеющие доступ к результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ организации. Инноваторы — напротив, молодые специалисты с хорошими базовыми знаниями, отличающиеся креативностью и возможностью реализовать все это на практике.

Использование слова «условно» в связке понятий «консерватор — инноватор» было приведено неслучайно, так как вполне вероятны исключения: инноватор — не всегда молодой инженер, консерватор — не всегда опытный и пожилой специалист, могут быть пожилой инноватор и молодой консерватор. Приток молодых специалистов в конструкторскую организацию обычно незначительно изменяет сложившуюся практику ее работы. Во-первых, любая организация является инертной структурой, объединяющей субъекты труда (работников: проектантов, конструкторов, менеджеров и т. п.) и объект труда (конкретный трудовой процесс, нормативно заданный и включающий предмет труда, средства (орудия), цели и задачи труда, правила исполнения работы и условия организации трудового процесса) [3]. Во-вторых, немногие молодые инженеры способны совмещать три

основных условия: знания, креативность и возможность их практической реализации. Такие два фактора, как инертность организации и незначительная роль молодежи, влияющие на результаты работы организации, не способствуют переходу на качественно новый уровень разработок [4]. Однако молодые специалисты привносят в конструкторскую организацию свои знания в области информационных технологий, они лучше опытных конструкторов осваивают современные системы автоматизации проектирования и управления жизненным циклом изделия, а также быстрее приобретают многие другие навыки, жизненно необходимые конструкторским организациям для повышения эффективности и надежности выпускаемых изделий РКТ.

Цель статьи — поиск путей проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники в условиях быстро меняющихся информационных технологий при сохранении опыта отработанных и зарекомендовавших себя технических решений.

Влияние внедрения современных информационных технологий на развитие конструкторских организаций. К решению поставленной задачи можно подойти со стороны не только субъектов труда, но и средств производства. Такое решение представляется корректным, поскольку информационные технологии (ИТ), в отличие классических средств производства, в значительно большей степени позволяют аккумулировать передовой мировой опыт проектирования в базах знаний (БЗ) [5], для того чтобы за счет этого повысить уровень конструкторской организации до среднего (если он был ниже, рис. 2, кривая *a*), а также закрепить и расширить возможности (если он был выше, рис. 2, кривая *b*).

Интересным представляется вопрос изменения уровня творчества в результате применения ИТ с БЗ. Консервативная организация, имеющая значительный опыт проектирования, представлена на рис. 2 кривой *a*. Новые решения создаются в ней путем комбинации старых испытанных решений, но это также своего рода творческий процесс, и он не может быть равным нулю. В данном примере применение ИТ с БЗ даст существенный рост эффективности производства по обеим осям на рис. 2. С одной стороны, культура использования известных решений восприимчива к новым знаниям,

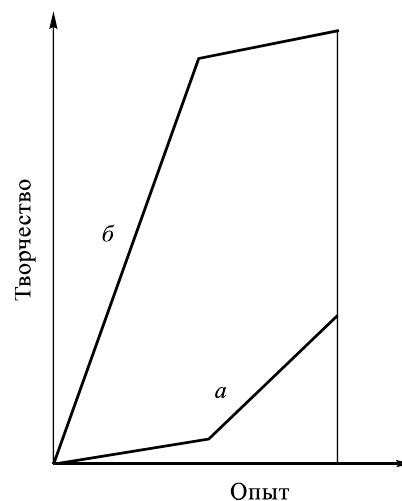


Рис. 2. Развитие конструкторской организации с учетом фактора применения информационных технологий для создания баз знаний

заложенным в ИТ с БЗ, с другой — реализуется привычными средствами для комбинирования.

Развитие творческой организации, которая наряду с комбинированием использует широкий арсенал средств создания знаний [2] и теорию решения изобретательских задач (ТРИЗ) [6], можно представить с помощью кривой *b* на рис. 2. В этом случае применение ИТ с БЗ расширяет нормативный перечень рекомендованных решений, хотя в творческом плане комбинирование — лишь один из процессов создания новых знаний. Поэтому применение ИТ с БЗ в приведенном примере дает более скромные результаты, причем даже при условии качественно проведенного внедрения. В данной работе под качественным внедрением понимается формальное достижение целей планируемых изменений. Однако следует отметить, что результаты современных исследований в области глубоких изменений [7] позволяют надеяться на возможный дополнительный прогресс проектных организаций в отношении накопленного опыта и творческих возможностей.

Теперь остановимся на стратегии, в которой драйвером развития конструкторских организаций являются типовые решения на базе зарубежных систем проектирования и поддержки жизненного цикла изделия, которые имеют свои преимущества и недостатки. К преимуществам, помимо указанных, следует отнести привлекательность современных высокотехнологичных рабочих мест для молодых специалистов, к недостаткам — высокую общую стоимость владения [8] такими рабочими местами и, главное, риск прекращения лицензионных соглашений на использование зарубежных систем проектирования и поддержки жизненного цикла изделия. Если указанный риск осуществится, то выбранная стратегия может оказаться тупиковой. Для того чтобы этого избежать, наиболее очевидной корректировкой стратегии является импортозамещение отечественными аналогами зарубежных ИТ по мере утраты ими своей работоспособности. В этом случае конструкторские организации должны будут взять на себя функции драйвера развития отечественных ИТ, которые должны автоматизировать их работу.

Поскольку данная статья посвящена не развитию отечественных информационных технологий, а поиску путей создания инновационной надежной отечественной РКТ, не зависящих от внешних неблагоприятных условий, не следует ставить во главу угла наиболее продвинутое решения современных ИТ, которые в любой момент могут стать недоступными в виду лицензионных или санкционных ограничений. В дальнейшем будем исходить из базовых возможностей информационных технологий, предназначенных для автоматизации работы конструкторов.

Конструктор и ИТ-системы. Создание надежных изделий РКТ зависит от уровня применяемых технологий цифрового проектирования и управления жизненным циклом изделия [9–11]. Однако надежность цифрового проектирования приобретает новые смыслы вследствие того, что большая часть процессов при разработке и отработке изделий переносится в виртуальную область вычислений. При этом производство материальных объектов, в первую очередь для экспериментальной отработки, сводится к минимуму, но оказалось, что математический аппарат современной теории надежности к этому не приспособлен.

Считается, что в случае достижения заданных целевых показателей работоспособности и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.) надежность обеспечивается сама собой по умолчанию [12, 13]. Показатели надежности в цифровой инженерии уже не рассматриваются в качестве целевых. Само понятие «надежность» начинает размываться: надежность в цифровых технологиях вроде бы никуда не делась (ее по-прежнему надо обеспечивать), но непонятно, как контролировать показатели надежности. Компьютер не умеет вычислять вероятностные показатели надежности и тем более использовать их как исходные данные для проектирования [14, 15].

Мало того, в настоящее время уже никого не устраивает основа современной теории надежности как констатация того или иного уровня надежности для машины, отработавшей свой ресурс [16]. Необходимы инженерные методы прогноза надежности, основанные на использовании установленной и упорядоченной верификационной деятельности, а не на стремлении к получению достоверной информации о частоте отказов, как это принято при использовании статистических методов современной теории надежности [17].

На методологические проблемы обеспечения надежности в цифровых технологиях накладываются тенденции развития компьютерной техники и состояния инженерного образования. За более чем 30-летнюю историю существования систем автоматизированного проектирования (САПР), а затем CAD/CAM/CAE-систем и CALS-технологий стремительно усовершенствовались технические и программно-вычислительные средства проектирования, но человек как творец техники по-прежнему остается в автоматизированной среде проектирования слабым звеном: качество его мышления не улучшилось, аналитические способности не повысились, методологического обеспечения его профессиональной деятельности не появилось, образовательная подготовка заметно снизилась. Правда, значительно возросли навыки владения компьютерной техникой, но это слабо влияет на улучшение качества конструкторских разработок (имеется в виду

не презентабельный вид чертежей и снижение ошибок, связанных с просчетами или ограниченным пространственным воображением человека, а сущность принимаемых им конструкторских решений).

Отсюда можно сделать вывод, что разрыв между инженерными знаниями человека и возможностями современных ИТ увеличивается. Это приводит к тому, что человек начинает подстраиваться под требования информационных технологий. Хорошо, если это развивает человека (используется качественная ИТ-система), но плохо, если ограничивает его возможности (простые или некачественные ИТ-системы).

Компьютер и проектирование надежной ракетно-технической техники. Устранить диспропорции в системе человек — компьютер при проектировании РКТ можно только при осознании того, что человек и компьютер осуществляют разные функции. Компьютер — это всего лишь высокоскоростное устройство для проведения вычислений, будь то выполнение чертежей либо численных расчетов методом конечных элементов. При решении инженерных задач компьютер не проводит самостоятельного поиска областей, в которых должен находиться конечный результат, а лишь выполняет заданные вычисления в соответствии с установленным алгоритмом. С расширением операционных возможностей вычислительной техники стали забывать одну элементарную истину: вследствие своего устройства и принципов действия компьютер не предназначен для верификации исходных данных и валидации результатов вычислений. Задача компьютерных вычислений — строго следовать алгоритму предписанных действий, какими бы ни были недостоверными и даже абсурдными исходные данные и неправдоподобными конечные результаты. Компьютер не думает и ничего не домысливает за конструктора, поскольку, по выражению С. Джобса — одного из основателей компании Apple, всегда «...выполняет очень простые инструкции — возьми число, прибавь его к другому числу, сравни результат с третьим, но он выполняет их со скоростью 1 000 000 операций в секунду, а на скорости 1 000 000 операций в секунду результат уже кажется волшебством». Компьютер предназначен для выполнения рутинной работы конструктора — преобразования информации, связанной с хранением и обработкой баз данных, автоматизированного составления цифровых моделей, проведения технических расчетов и представления исходной информации в удобный для последующего использования вид (чертежи, объемные модели, спецификации, схемы, текстовые документы и т. д.).

Понимание того, что компьютер — это всего лишь «высокоскоростная логарифмическая линейка» в руках человека, приводит к тому, что у последнего существует роль по подготовке и верификации

исходных данных и валидации результатов вычислений, а также он несет ответственность за такие действия. В инженерной деятельности это играет ключевую роль, поскольку техносфера в целом предназначена для удовлетворения нужд человека, а значит, только он определяет принципы создания технических объектов, в основе которых лежат физические законы и закономерности. Знание инженерных дисциплин и методов проектирования технических объектов позволяет выбрать параметры исходной модели, выполнить математические вычисления, связанные с режимами и условиями применения, и оценить полученные результаты. Прерогатива человека заключается в том, чтобы, задав соответствующие исходные данные, направить имеющиеся ресурсы компьютера в требуемую область для получения наиболее оптимального результата [18].

Для того чтобы эффективно работать с компьютером, необходима методика верификации исходных данных и валидации результатов компьютерных вычислений, которая позволяет в алгоритмизированном режиме обеспечивать заданные качество и надежность разрабатываемых изделий. В первую очередь, это относится к уникальным высокоответственным изделиям ракетно-космической техники, для которой надежность является одним из целевых показателей.

Пробелы стандартизации. Любые системы менеджмента качества требуют выполнения установленных процедур. Если рассматривать стандарты серии ISO 9000 — это регламентирование условий бездефектного производства, т. е. организация производственных работ в строгом соответствии с требованиями чертежей без карточек разрешений на отступления [19]. Если брать ЕСКД — это регламентирование условий бездефектного проектирования, т. е. соблюдение общепринятых принципов, правил, требований, норм и стандартов разработки чертежей [20]. Для проектирования высокоответственных изделий соблюдение условий бездефектного проектирования и производства не является достаточным условием. Чтобы обеспечить предельную надежность изделия, даже изготовленного в единственном экземпляре, без резервирования критических элементов, требуется методика, позволяющая создать условия для обеспечения безошибочного проектирования — выбора обоснованных принципов работоспособности и подтверждения инженерных решений для достижения заданных показателей надежности.

Смысл безошибочного проектирования можно показать на примере, который использовал английский естествоиспытатель Т.Г. Гексли для описания сущности математики. Бездефектное проектирование (аналог ЕСКД) и бездефектное производство (аналог ISO 9000) — это мельничные жернова. Если засыпать в них зерна пшеницы (безошибочное проектирование), получим муку. Подсыпая же зерна пшеницы

впережку с мусором (ошибочные конструкторские решения), муки не получим. Жернова (бездефектное проектирование и бездефектное производство) будут послушно перемалывать мусор (ошибочные решения), получая все тот же мусор (изделия с неконтролируемой надежностью).

Безошибочное проектирование достигается при условии использования непредвзятого обоснования критичных решений на основе оценок рисков выполнения каждой из требуемых функций изделия для фактического исполнения документации (в состоянии «как она есть»). В такой модели конструктор предопределяет выполнение требуемых функций условиями, которые он рассматривает исходя из конструкторских и технологических ограничений, и задает их в виде технических требований чертежа, которые, безусловно, должны быть выполнены и проконтролированы на производстве. Однако вычисление показателей и проведение контроля надежности в цифровых технологиях начинают размываться, т. е. надежность вроде бы никуда не исчезает, но непонятно, как ее контролировать. Это связано с ошибочным представлением о том, что при цифровом проектировании современным инженерам не нужен сопромат — компьютер сам все знает, сам все рисует [21], т. е. речь начинает идти не о разработках, а о рисовании изделий, что дает основания для директивного сокращения сроков работ в ущерб надежности. В то время как ответственное проектирование новых изделий РКТ требует иного подхода.

В профессиональном плане рассмотрены ключевые аспекты совершенствования системы проектирования с целью повышения надежности уникальных высокоответственных образцов РКТ. Эти задачи подробно исследованы применительно к механическим устройствам одноразового срабатывания в [22]. В результате дальнейших исследований была создана алгоритмизированная методика принятия и обоснования конструкторских и технологических решений при создании уникальных высокоответственных изделий на основе конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) [14, 15, 22].

Конструкторско-технологический анализ надежности. Методика КТАН, как и любые цифровые технологии, основана на параметризации, в основе которой лежит выявление функциональности изделия — наличие и набор конкретных свойств выполнять требуемые функции. На основе полученной функциональности обосновываются работоспособность изделия как состояние, в котором оно способно выполнять требуемые функции, и далее — надежность, как свойство, которое позволяет сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации. Именно такой алгоритм процедур лежит в основе любых ИТ-систем, однако с использованием КТАН инженер получает возможность

каждое свое решение обуславливать критериями выполнения требуемой работоспособности и заданной надежности. Для этого ему не требуется статистический аппарат современной теории надежности, достаточно использовать процедуры методики КТАН, знать инженерные дисциплины и конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности.

Несмотря на то что методика конструкторско-технологического анализа надежности подразумевает ее оценку (расчет), в первую очередь надежность следует рассматривать как комплекс конструкторско-технологических и организационных мероприятий по исключению (снижению вероятности) отказов, основанный на анализе технической документации, который включает:

- постановку задач для расчетной верификации (проведение необходимых и достаточных расчетов параметров работоспособности и надежности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);

- постановку задач для экспериментальной верификации, включающих опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчетной верификации из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке исходя из условия по ограничению объектов, поставляемых на испытания;

- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;

- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводится проверка качества и надежности изделий;

- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;

- итерационный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;

- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надежности.

Выполнение указанных процедур способно естественным образом привести к выполнению условий безошибочного и бездефектного проектирования, а также бездефектного производства.

Важным отличием методики КТАН от западных аналогов (FMEA, DFR, Stage-Gate) является возможность ее адаптации под уровень конструкторской организации, что позволяет осуществлять самообучение конструкторов за счет итерационных циклов проведения анализов по заданному алгоритму. Уровень сложности внедрения КТАН не превышает уровень сложности внедрения современных

ИТ-решений с БЗ для конструкторских организаций с одинаковым соотношением творчества и опыта.

Введение ограничений на доступ к современным ИТ-решениям с БЗ для конструкторов сместит акцент в развитии конструкторских организаций с глубокой цифровизации на создание и совершенствование системных методик разработки изделий РКТ.

В частности, рассмотренная методика КТАН позволит конструкторской организации, используя лишь коробочные средства цифрового проектирования, обеспечить высокий уровень надежности разрабатываемых изделий РКТ. Причем надежность при использовании методики КТАН рассматривается как работоспособность, развернутая во времени, что максимально согласуется с целями и задачами ИТ-технологий.

Заключение. В данной работе дан сравнительный анализ двух стратегий развития конструкторских организаций (в первой драйвером развития служат современные информационные технологии с базами знаний, во второй — первично развитие знаний и методик проектирования), различающихся по уровню творчества и имеющемуся опыту, с учетом изменяющихся ключевых внешних и внутренних факторов.

Показана консервативность внутренних факторов, которые в данной работе рассматриваются «такими, как есть», т. е. без учета проведения каких-либо организационных преобразований. Ключевым внешним фактором по отношению к организации является доступность современных систем автоматизации проектирования и управления жизненным циклом изделия.

Показано, что стратегия развития, ориентированная на данные системы, с одной стороны, может стать драйвером развития проектной организации, с другой — в случае прекращения действия лицензионных соглашений эта стратегия перестает работать, как и сложные системы управления жизненным циклом изделия. Изолированные рабочие места конструкторов с устаревшими или более примитивными средствами разработки существенно затрудняют их работу.

Для того чтобы обеспечить условия проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники независимо от ограничений доступа к современным ИТ-решениям, предложена методика КТАН. Ее внедрение повысит уровень опыта и творчества конструкторской организации, позволит ей создавать надежные и инновационные изделия РКТ. В то же время не следует рассматривать КТАН в качестве «серебряной пули», т. е. изолированно от внешних условий по отношению к конструкторской организации, в частности:

- от уровня подготовки и мотивации выпускников вузов;
- уровня компетенций кооперации и заказчиков;
- доступа к современным технологиям и знаниям;

– состояния методологических и нормативных баз по проектированию и обеспечению надежности, которыми организации отрасли руководствуются в своей работе.

Тем не менее использование КТАН позволяет конструкторской организации встраиваться в существующие внешние условия путем максимальной адаптации с ИТ-системами, повышения подготовки и компетенций инженеров, стимулирования роста инженерных знаний и безконфликтности использования совместно с существующими нормативными базами проектирования и обеспечения надежности.

Конструкторско-технологический анализ надежности дает возможность осознанно выбрать стратегию обеспечения надежности РКТ: своевременно выявить и понять потенциальные опасности проектируемых конструкций, что позволяет на ранних стадиях жизненного цикла управлять рисками возникновения редких отказов, либо обоснованно отказаться от такой возможности, полагаясь на эвристические подходы и типовые ИТ-решения для проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пиллей, Апатхукатха Сиватхану. *Неизвестным путем*. Пер. с англ. Реутов, ВПК «НПО машиностроения», 2021, 256 с.
- [2] Икуджиро Нонака, Хиротака Такеучи. *Компания — создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах*. Москва, Олимп-Бизнес, 2011, 384 с.
- [3] Пырьев Е.А. *Психология труда*. Москва–Берлин, Директ-Медиа, 2016, 455 с.
- [4] Tochilov L.S., Tochilova O.L., Mayorova V.I. System analysis of the business process of attracting, selecting and involving into the teamwork of young specialists in the space industry. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, art. no. 140004, pp. 140004-1–140004-6.
- [5] Точиллов Л.С. Проект базы знаний для разработчиков ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-8-1527>
- [6] Альтшуллер Г. *Найти идею. Введение в ТРИЗ — теорию решения изобретательских задач*. Москва, Альпина Паблишер, 2021, 408 с.
- [7] Шармер О. *Теория У. Лидерство из будущего*. Москва, Манн, Иванов и Фербер, 2019, 650 с.
- [8] Koomey J., et al. A simple model for determining true total cost of ownership for data centers. *Uptime Institute White Paper*, Version. 2007, vol. 2, 2007 p.
- [9] Шваб К. *Четвертая промышленная революция*. Москва, Эксмо, 2016, 138 с.
- [10] Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И. и др. *Компьютерный инжиниринг*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2012, 93 с.
- [11] Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. Москва, ООО «АльянсПринт», 2020, 401 с.
- [12] Левенчук А. Системноинженерное мышление в управлении жизненным циклом. *Лабораторный журнал*, 2014. URL: <https://ailev.livejournal.com/1121478.html> (дата обращения: 24.03.2022).
- [13] Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В. и др. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК. *Оборонная техника*, 2018, № 1, с. 6–33.

- [14] Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0. *Онтология проектирования*, 2019, т. 9, № 1, с. 24–35.
- [15] Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях. *Надежность*, 2020, т. 20, № 2, с. 3–11.
- [16] Проников А.С. *Надежность машин*. Москва, Машиностроение, 1978, 592 с.
- [17] Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000. *Надежность: Вопросы теории и практики: сетевой журн.*, 2016, № 1, с. 17–27. URL: http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA_1_2006.pdf (дата обращения 24.03.2022).
- [18] Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов. *Вестник машиностроения*, 2013, № 6, с. 85–88.
- [19] Дубовиков Б.А. *Основы научной организации управлением качеством (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда)*. Москва, Экономика, 1966, 321 с.
- [20] Горохова В.В. *Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ*. Москва, Изд-во стандартов, 1969, 105 с.
- [21] Кулешов А.П. Преодолеть сопротивление материалов: интервью 2 Февраля 2018 г. *Стимул: журнал об инновациях в России*, 2018. URL: https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295 (дата обращения 24.03.2022).
- [22] Похабов Ю.П. *Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания*. Красноярск, СФУ, 2018, 338 с.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Похабов Ю.П., Точилов Л.С. Пути проектирования надежной отечественной ракетно-космической техники в изменяющихся условиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2184>

Похабов Юрий Павлович — канд. техн. наук, начальник центра научно-технических разработок, АО «НПО ПМ — Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»). e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Точилов Леонид Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ученый секретарь НТС АО «ВПК «НПО машиностроения» — начальник подразделения. e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Approaches to designing reliable domestic rocket and space equipment under changing conditions

© Yu.P. Pokhabov¹, L.S. Tochilov²

¹JSC “NPO PM — Small Design Bureau”,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russia

² JSC MIC Mashinostroyenia, Reutov, Moscow Region, 143966, Russia

The paper focuses on the conditions for developing both reliable and innovative samples of rocket and space equipment, with account for the changing key design-and-engineering factors, including external factors, e.g. availability of modern tools, systems and knowledge bases for digital design, and internal ones, e.g. the ratio between the level of creativity and experience of a design organization. Within the research, we analyzed how the growth of the design organization is affected by modern design automation and product life cycle management systems, when introduced and used, and by the possibility for IT systems to develop, in case when their Western developers stop cooperating. Findings of the research show that the most promising option for maintaining and improving the reliability of domestic rocket and space equipment in modern conditions is a comprehensive solution based on the methods for designing highly critical systems, with account for the specified reliability requirements, e.g. methods of design-technological analysis of reliability, etc.

Keywords: *design-technological analysis of reliability, design, reliability, innovation, import substitution, rocket and space equipment, TRIZ*

REFERENCES

- [1] Pilley Apatkhukatkha Sivatkhanu. *Neizvedannym putem* [In an unknown way]. Reutov, VPK NPO Mashinostroeniia Publ., 2021, 256 p. (In Russ.).
- [2] Ikujiro Nonaka, Hirotaka Takeuchi. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1st ed., 1995, 304 p. [In Russ.: Ikujiro Nonaka, Hirotaka Takeuchi. *Kompaniya — sozdatel znaniya. Zarozhdenie i razvitie innovatsii v yaponskikh firmakh*. Moscow, Olimp-Biznes Publ., 2011, 384 p.].
- [3] Pyrev E.A. *Psikhologiya truda* [Psychology of work]. Moscow–Berlin, Direkt-Media Publ., 2016, 455 p.
- [4] Tochilov L.S., Tochilova O.L., Mayorova V.I. System analysis of the business process of attracting, selecting and involving into the teamwork of young specialists in the space industry. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, no. 140004, pp. 140004-1–140004-6.
- [5] Tochilov L.S. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-8-1527>
- [6] Altshuller G.S. *Nayti ideiu. Vvedenie v TRIZ — teoriyu resheniya izobretatelskikh zadach* [Introduction to TRIZ — the theory of inventive problem solving]. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2021, 408 p.
- [7] Scharmer O.S. *Theory U: Leading from the Future as It Emerges*. Berrett-Koehler Publishers, 1st ed., 2009, 533 p. [In Russ.: Sharmer O.S. *Teoriya U. Liderstvo iz buduschego*. Moscow, Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2019, 650 p.].

- [8] Koomey J., et al. A simple model for determining true total cost of ownership for data centers. *Uptime Institute White Paper, Version. 2007*, vol. 2, p. 2007.
- [9] Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Currency, 2017, 192 p. [In Russ.: Schwab K. Chetvertaya promyshlennaya revoliutsiya. Moscow, Eksmo Publ., 2016, 138 p.]
- [10] Borovkov A.I., Burdakov S.F., Klyavin O.I., et al. *Kompyuterny inzhiniring* [Computer engineering]. St. Petersburg, Politekh. un. Publ., 2012, 93 p.
- [11] Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, OOO AlyansPrint Publ., 2020, 401 p.
- [12] Levenchuk A. *Zhivoy zhurnal — Live Journal*, 2014. Available at: <https://ailev.livejournal.com/1121478.html> (accesses March 24, 2022).
- [13] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., et al. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 2018, no. 1, pp. 6–33.
- [14] Pokhabov Yu.P. *Ontologiya proektirovaniya — Ontology of Designing*, 2019, vol. 9, no 1, pp. 24–35.
- [15] Pokhabov Yu.P. *Nadezhnost — Dependability*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 3–11.
- [16] Pronikov A.S. *Nadezhnost mashin* [Machine reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 592 p.
- [17] Ushakov I.A. *Nadezhnost: Voprosy teorii i praktiki — Reliability: Theory & Applications*, 2016, no. 1, pp. 17–27. Available at: http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA_1_2006.pdf (accessed March 24, 2022).
- [18] Doronin S.V., Pokhabov Yu.P. *Vestnik mashinostroeniya — Russian Engineering Research*, 2013, no. 6, pp. 85–88.
- [19] Dubovikov B.A. *Osnovy nauchnoy organizatsii upravleniem kachestva (opyt primeneniya i teoreticheskie obosnovaniya sistemy organizatsii bezdefektnogo truda)* [Fundamentals of scientific organization of quality management (experience in application and theoretical justification of the system of organization of defect-free labor)]. Moscow, Ekonomika Publ., 1966, 321 p.
- [20] Gorokhova V.V. *Primenenie Saratovskoy sistemy pri provedenii issledovatel'skikh i konstruktorskikh rabot* [The Saratov system applied in research and design work]. Moscow, Izd. standartov Publ., 1969, 105 p.
- [21] Kuleshov A.P. *Stimul: zhurnal ob innovatsiyakh v Rossii — STImul*, 2018. Available at: https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivleniematerialov/?sphrase_id=1295 (accessed March 24, 2022).
- [22] Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo sratyvaniya* [Theory and practice of ensuring the reliability of mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2018, 338 p.

Pokhabov Yu.P., Cand. Sc. (Eng.), JSC “NPO PM — Small Design Bureau”, Head of Scientific and Technical Development Centre. e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Tochilov L.S., Cand. (Phys.-Math.), Sc., Scientific Secretary, JSC MIC Mashinostroyeniya, Head of department. e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru