



УДК 623.4.01

В. В. Доронин

Анализ опыта оценки объемов натурных испытаний изделий зенитной ракетной техники при разработке и модернизации

Рассмотрен подход к оценке количества пусков изделий зенитной ракетной техники на различных стадиях натурных испытаний, требуемых при выполнении опытно-конструкторской работы. Приведен анализ подхода к определению объема летных испытаний с использованием практического опыта «МКБ «Факел» 1960-х гг. Предложен способ оценки стоимости экспериментального этапа опытно-конструкторской работы.

Ключевые слова: надежность ракеты, отказ блока аппаратуры (агрегата), уровень надежности, функциональная эффективность изделия, летные испытания, работоспособность ракеты, точка испытательного пуска.

Введение

Многие конструкторские школы в области ракетостроения в настоящее время переживают второе рождение. Это связано с тем, что за последние годы существенно обновился кадровый состав проектных организаций, осваиваются новые технологии проектирования и испытаний изделий ракетной техники, активно применяются все виды компьютерного и полунатурного моделирования. Производственная база предприятий-разработчиков ракетной техники и предприятий-разработчиков бортового оборудования и агрегатов также претерпевает существенное обновление.

Часто обновленным коллективам разработчиков приходится сталкиваться с проблемами, которые были успешно решены ранее их предшественниками. В связи с этим для определения оптимальных путей дальнейшего развития конструкторских школ необходимо проанализировать опыт разработчиков предыдущих поколений и применять его для решения текущих задач планирования работ, проектирования и испытаний изделий нового поколения.

Цель статьи – анализ подхода к определению объема натурных испытаний с учетом надежности зенитных ракет на основе опыта, накопленного в АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел» имени академика П. Д. Грушина» (АО «МКБ «Факел») в начале своей деятельности, а также с учетом разработок XXI в. Оценка надежности разра-

батываемых изделий не теряет актуальности, поскольку для определения объема испытаний новой техники, а также для определения требуемого объема финансирования и сроков разработки необходимо знать достижимый уровень функциональной эффективности изделий соответствующего технологического уровня на различных стадиях проведения испытаний. Ошибки при расчете требуемого количества изделий на этапе конструкторских испытаний, как это не раз доказано на практике, приводят к возникновению значительных рисков невыполнения работ в установленные сроки.

Терминология

В 60-е годы XX в. термин «надежность» не имел до конца устоявшегося определения. Так, в ОКБ-2 (в настоящее время – АО «МКБ «Факел», входящее в состав АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей») термин «надежность» зенитной ракеты характеризовал вероятность безотказной работы в полетных условиях [1], т. е. вероятность того, что опытный образец ракеты выполнит задачу испытательного пуска в заданных условиях. При этом определяющим фактором являлась эффективность выполнения задачи пуска ракетой. Пуск ракеты считался удачным, а ракета – работоспособной, если основные задачи пуска выполнены.

Однако это определение не соответствует современному понятию «надежность». В известном многотомном справочнике под редакцией В. С. Авдеевского [2], а также в ГОСТ 27.002–2015 [3] под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность

© Доронин В. В., 2019



выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Ключевым смысловым параметром современного определения понятия «надежность» является способность сохранять определенные свойства и характеристики. Отметим, что для решения задачи сохранения совокупности параметров и характеристик эффективности необходимо сначала решить задачу их достижения и подтверждения стабильности результатов. Именно эта задача решается на этапе летных конструкторских испытаний. В это время осуществляются поиск и отработка таких технических решений, которые должны обеспечить выполнение заданных требований. По этой причине для этапа отработки (испытаний) термин «надежность изделия в пуске» не вполне подходит. К тому же на данном этапе нельзя оценивать необходимое количество испытательных пусков, используя указанное в техническом задании требование по надежности изделия.

Имеющееся на первый взгляд противоречие в подходах к оценке надежности ракет на этапе летных испытаний может быть преодолено без каких-либо корректировок с учетом следующих фактов. В 1960-е гг. количество пусков опытных изделий в АО «МКБ «Факел» на этапах испытаний достигало нескольких сотен и более (рис. 1). В распоряжении испытателей имелась внушительная статистика пусков и в целом были основания на получение статистических оценок надежности на этапах ис-

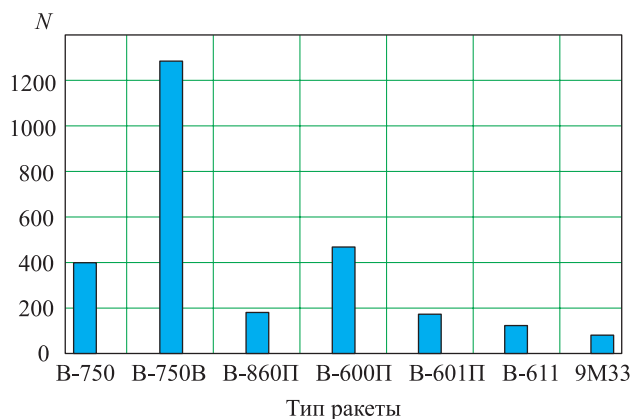


Рис. 1. Данные о количестве испытаний (N) ракет начального периода деятельности АО «МКБ «Факел»

пытаний. В этих условиях с помощью оценки надежности действительно можно было охарактеризовать вероятность выполнения задачи испытательного пуска.

На современном этапе разработок новой техники ситуация иная. Так, количество натуральных работ сократилось ввиду большой стоимости опытных экземпляров изделий ракетной техники и ограниченного бюджета разработок. С учетом того что проводимые доработки материальной части и программного обеспечения при проведении испытаний зачастую существенно меняют свойства зенитной ракеты от пуска к пуску, ни о какой статистике в малой серии пусков не может быть и речи. Статистические оценки результатов на этапах испытаний возможны с определенными допущениями на имитационных математических моделях. Однако результат моделирования будет иметь требуемую достоверность только после осуществления верификации моделей, которая в свою очередь завершается в целом после выполнения всего объема летных испытаний. К тому же использование математических моделей в качестве мощного инструмента восполнения недостающего объема испытаний пока не в должной мере допускается заказывающими структурами.

На основании изложенного выше, по мнению автора, процессу испытаний новой техники в части достижения результата больше соответствует название «функциональная эффективность изделия» в реализовавшихся условиях, определяющее степень выполнения задач пуска совокупностью функциональных блоков и агрегатов ракеты. Количественно функциональная эффективность должна соответствовать вероятности выполнения ракетой задачи испытательного пуска.

Термин «надежность» наилучшим образом может быть применен при оценке повторяемости результата в серийном производстве, когда конструкторской документации (КД) присвоена литера «О1», а государственной комиссией признано, что изделие, изготовленное по принятой КД, подтвердило правильность конструкции, реализованных технических решений и стабильно выполняет функциональное предназначение. С указанного момента



может быть дан старт накоплению статистики по отказам с одновременным улучшением технологических процессов производства для последующего получения оценок надежности техники серийного производства.

Также следует обратить внимание на ряд вопросов к прежней терминологии в части трактовки используемого ранее понятия «отказ». В ОКБ-2 в 60-е годы XX в. под отказом понималась утрата работоспособности ракеты в полете, следствием которого являлся неуспешный результат пуска [1].

С учетом изложенного ранее следует отметить, что при испытаниях новой техники невыполнение задач пуска возможно по разным причинам.

Во-первых, это может быть собственно отказ какого-либо блока аппаратуры или агрегата ракеты, связанный с нарушением штатного функционирования соответствующей аппаратуры из-за поломки или выхода из строя элементов того или иного блока (агрегата).

Во-вторых, в ряде испытаний невыполнение задач пуска может быть обусловлено некорректной работой того или иного блока или агрегата из-за неправильного исполнения ими своих функций в конкретных условиях. Причем сам блок или агрегат может правильно функционировать в соответствии с заложенной логикой.

Корректность выполнения алгоритма (функции) обеспечивается как отсутствием ошибок в алгоритме, т. е. явных несоответствий исполняемого кода исходному алгоритму, так и адекватностью представления действительности, на основе которого спроектирован алгоритм (агрегат). Отсутствие у разработчика полного представления обо всех явлениях, внутренних и внешних процессах, свойствах внешней среды и других ключевых моментах может стать причиной некорректного построения алгоритмов (блоков, агрегатов) для некоторых указанных условий. В этом случае, характерном для процесса испытаний новой техники, следует говорить не об отказе, а о недостаточной функциональной эффективности аппаратуры, агрегатов или ракеты в целом в тех или иных условиях применения.

Такая интерпретация возникшей проблемы важна для того, чтобы правильнее сфор-

мулировать проблему и спланировать дальнейшие работы по ее решению. Очевидно, что искать неисправность, которой могло и не быть, или искать причину неуспешной работы в свете изложенных выше соображений, по сути, разные задачи.

Рассмотренные отличия в трактовках понятий «надежность» и «отказ» ракеты можно объяснить разным уровнем технического совершенства ракет 1960-х гг. и их современных аналогов. Так, большая часть ракет первого поколения представляла собой сложные аналоговые системы автоматического регулирования. По этой причине разнообразия ситуаций с выбором алгоритмов решения задач во всех условиях применения практически не возникало. Многие нарушения в системах автоматического регулирования действительно можно было интерпретировать как сбои (отказы).

Для современных ракет с цифровыми системами на борту [4] причинами невыполнения задач и отрицательных результатов в пусках могут быть некорректности алгоритмов, неучтенные ситуации, возникшие в полетных условиях, другие виды неопределенности, а также поломки (отказы) узлов аппаратуры и агрегатов.

В следующем разделе представлен анализ опыта испытаний в ОКБ-2 начального этапа работы предприятия, результаты которого позволяют получить представление об объемах испытаний техники нового поколения того периода.

Для обеспечения возможности цитирования исходных текстов в указанных материалах использована прежняя терминология в части определения надежности и отказов.

Опыт работ МКБ «Факел» в части оценки надежности изделий основной тематики в период 1953–1968 гг.

Обсуждаемая тематика в рамках открытой публикации может базироваться на материалах прошлых лет периода становления ОКБ-2, которые в настоящее время находятся в открытом доступе.

Несмотря на то что с тех пор прошло около полувека, сменилось несколько поколений ракетной техники, опыт советской оборонной промышленности очень важен для современного этапа развития отечественной техники.



Отечественная школа зенитного ракетостроения активно развивалась под руководством академика П. Д. Грушина. В те годы приоритетной была задача обеспечения требуемого результата в минимально возможные сроки. Страна остро нуждалась в эффективной защите воздушных рубежей. При больших объемах выпуска продукции в советское время важную роль играла правильная оценка этих объемов и сроков проведения испытаний, которые напрямую определяли затраты государства на разработку новой техники. Не все получалось с первого раза, возникали проблемы и неудачи в пусках, но задачи в конечном счете решались, что обеспечивало мировое лидерство нашим разработкам. Отечественная техника противовоздушной обороны (ПВО) практически все время применялась в зонах локальных военных конфликтов, совершенствовалась по результатам боевого применения. Стоит отметить, что средства воздушного нападения, применяемые в зонах локальных военных конфликтов, представляли собой новейшую технику американского и европейского (израильского) производства. А отечественная техника ПВО практически все время применялась в зонах локальных военных конфликтов, совершенствовалась по результатам боевого применения. По этой причине России многие годы удавалось и удастся на практике доказывать лидерство в разработках и производстве зенитного ракетного оружия.

В XXI в. определяющими факторами при разработке новой техники выступают выделенный заказчиком бюджет на разработку и строго установленные сроки завершения этой разработки, законодательно закрепленные системой наказаний предприятий и руководителей за неисполнение в срок. Это отличие наложило отпечаток на результативность проводимых работ, сказалось на сроках достижения целей разработок, эффективности финансовых вложений, общем состоянии предприятий-разработчиков. По этой причине так важно уметь правильно оценить объем испытаний, который должен обеспечить выполнение задачи в установленный срок с минимизированными рисками.

Глубокий анализ богатого научно-практического наследия предшественников – первого поколения отечественных ракетостроителей показывает, что требования к объемам испытаний и их результативности были в свое время досконально изучены и на основе всесторонних оценок сформулированы основные подходы к организации испытаний и их объективной оценке.

На основании опыта отработки и эксплуатации зенитных ракет первого поколения типа В-750, использованных в ЗРК С-75, и их модификаций сделан вывод о том, что значение надежности, близкое к расчетному, было достигнуто только через 3–4 года серийного производства, после отстрела в общей сложности 600–800 ракет. В этот период продолжалась доводка оборудования ракет, совершенствовались технические решения, отработывалась технология серийного производства. График количества пусков, требующихся для достижения установленной надежности ракет, приведен ранее (см. рис. 1). Статистические данные достигнутого уровня надежности ряда зенитных ракет разработки АО «МКБ «Факел» представлены на рис. 2. Приняты следующие обозначения:

P_{00} – установившийся уровень надежности ракет после завершения заводского цикла освоения серийного производства (через 3–4 года серийного выпуска);

СКО P_{00} – среднеквадратическое отклонение значения установившегося уровня надежности по всей выборке;

P_n – уровень надежности, достигнутый к моменту завершения испытаний изделия определенного типа, спланированных до начала серийного производства;

СКО P_n – среднеквадратическое отклонение значения уровня надежности P_n .

По ряду изделий типа В-601П, В-611, 9М33 значения установившегося уровня надежности на рис. 2 отсутствуют ввиду того, что указанные данные появились позднее и не вошли в цитируемые материалы.

С помощью рис. 2 можно проанализировать особенности результатов испытаний ракет разного типа. Кроме того, эти данные можно использовать для установки связи с особенно-

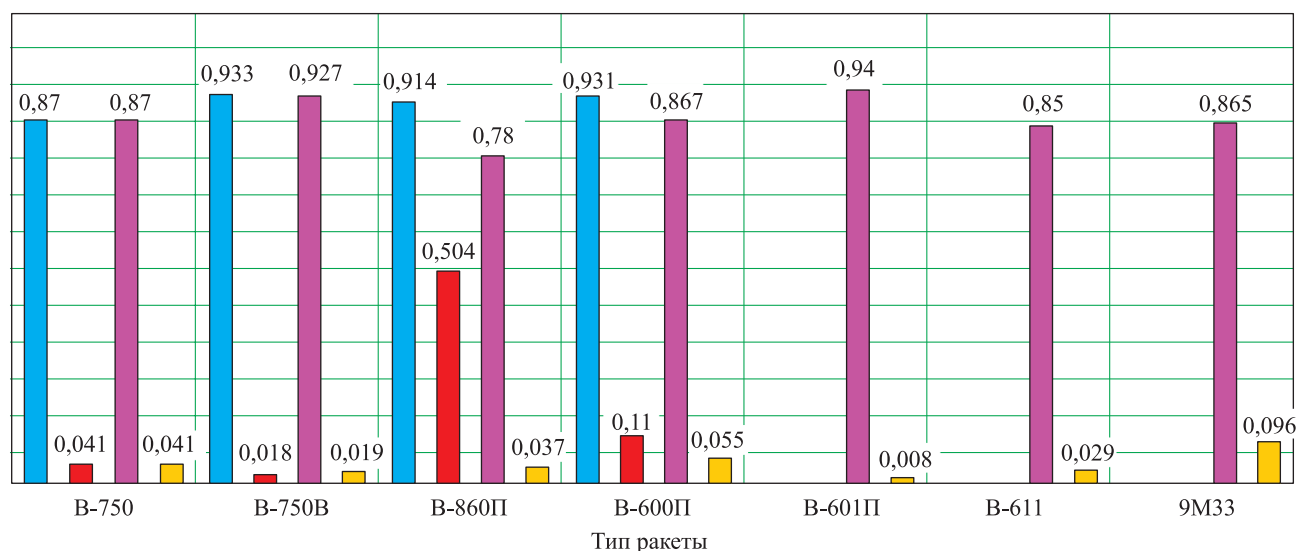


Рис. 2. Установившийся уровень надежности ракет первого поколения:
■ – установившийся уровень P_{00} ; ■ – SKO P_{00} ; ■ – P_n ; ■ – SKO P_n

стями конструкции указанных ракет. Этой возможностью читатель может воспользоваться самостоятельно.

В работах МКБ «Факел» 1960-х гг. показано, что в период налаживания производства ракет в промышленности и освоения новой техники в войсках надежность ракет оказывается ниже расчетного значения. Причем у ракет различных заводов-изготовителей, как правило, уровень надежности разный по причине отличий уровня подготовки производства, технической оснащенности, квалификации персонала и культуры производства в целом.

На совместных (государственных) испытаниях ракеты B-750B, проходивших в период с мая по август 1958 г., по результатам пусков 30 ракет «надежность» ракеты оценивалась величиной 0,7. В пусках ракет, проведенных впоследствии в период с августа 1958 г. до конца 1959 г. на полигоне Капустин Яр в условиях, сходных с условиями совместных летных испытаний (СЛИ), надежность ракет характеризуется величиной 0,859 (по результатам 368 пусков), а в 1960 г. – величиной 0,928 (по результатам еще 223 пусков).

Аналогичные данные есть и по ракете B-600П, однако вследствие меньшей интенсивности испытаний ракет процесс доводки надежности этих ракет до установленного уровня занял больший период времени.

В целом опыт отработки серийных зенитных ракет показал, что к концу СЛИ при

числе пусков 150 в среднем был достигнут уровень надежности (функциональной эффективности) около 0,7. На примере ракет типа B-750B получено, что для достижения уровня надежности, близкого к предельно достижимому, потребовалось провести около 600 пусков серийных ракет, что вместе с пусками ракет на заводских и совместных испытаниях составляет 750.

Практика отработки зенитных ракет служит доказательством того, что в процессе заводских и совместных испытаний не могут быть полностью выявлены все недостаточно надежные элементы – устраняются только явные дефекты, которые проявляются достаточно часто. При этом ввиду исключительной сложности организации испытаний зенитных ракет и недостаточности информации по работе всего бортового оборудования зачастую проводится большая серия испытаний, прежде чем удастся найти верный путь устранения того или иного дефекта.

В процессе последующего серийного производства и эксплуатации зенитных ракет их надежность продолжает непрерывно возрастать до предельного уровня, поскольку совершенствуется технология изготовления и эксплуатации ракет, повышается квалификация как производственного, так и обслуживающего персонала, а главное – продолжают устраняться отдельные дефекты, выявляющиеся в ходе отстрела зенитных ракет и типовых испытаний аппаратуры.

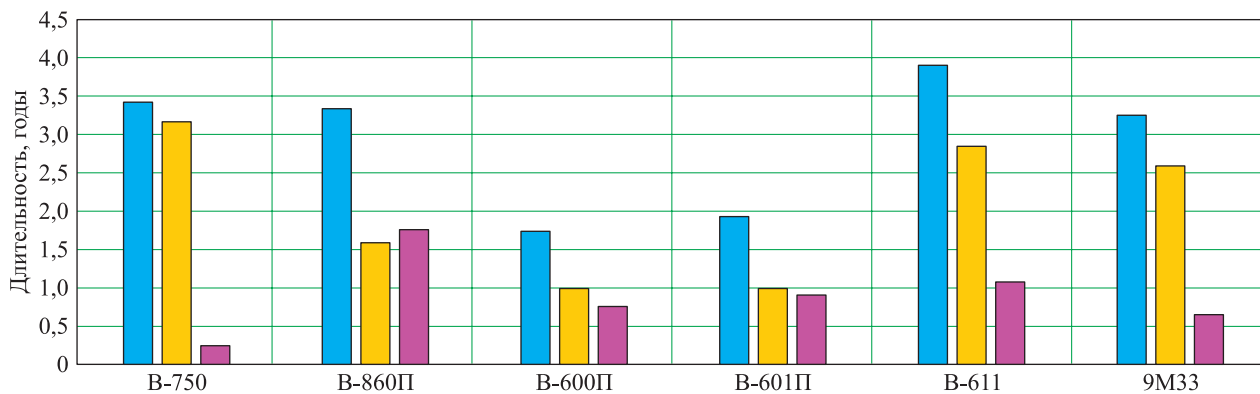


Рис. 3. Продолжительность летных испытаний ракет разработки АО «МКБ «Факел» на различных стадиях:
■ – общая продолжительность летных испытаний; ■ – продолжительность предварительных (конструкторских) и СЛИ; ■ – продолжительность совместных летных государственных (заказчика) испытаний

Интенсивность проведения испытаний, а также объем выпуска изделий изготовителями ракет определяет продолжительность испытаний.

На рис. 3 отражены значения продолжительности натурной отработки изделий нескольких типов, созданных в 1960-е гг. в АО «МКБ «Факел».

Следует отметить, что в те годы вместо современного термина «государственные испытания» использовался термин «совместные летные испытания».

Целесообразно обратить внимание на продолжительность летных испытаний ракеты B-611 (см. рис. 3), созданной специально для зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) «Шторм» Военно-морского флота (ВМФ) без сухопутного аналога. При выполнении опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию указанной ракеты потребовалось наибольшее время отработки. Это связано с особенностями техники для ВМФ и дополнительными сложностями при испытаниях, при том что в те годы были специализированные средства испытаний: опытовые корабли, оптико-электронные береговые измерительные позиции, широкий спектр специально оборудованных мишеней. При проведении испытаний изделий B-611 использовался специально оборудованный испытательный морской полигон в г. Феодосия. Можно предположить, что при отсутствии перечисленных средств обеспечения испытаний сроки проведения указанной ОКР могли значительно увеличиться.

Испытания зенитных ракет в корабельном ЗРК на море значительно сложнее и со-

пряжены с большими рисками получения отрицательных результатов в процессе испытаний. При испытаниях на море требуется большее время отработки, поскольку не удастся получить объект воздействия для детального анализа – остатки мишеней скрываются под водой.

На рис. 4 приведены важные данные по начальному уровню надежности зенитных ракет новых разработок АО «МКБ «Факел» 1960-х гг., которые получены методом статистической обработки результатов натурных работ до-

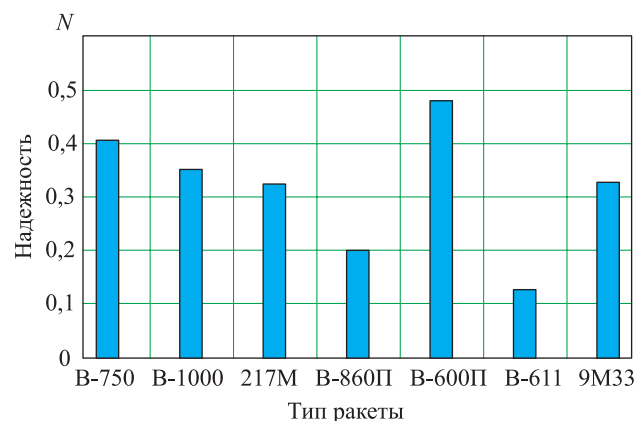


Рис. 4. Начальный уровень надежности ракет новых разработок периода 1960-х гг. в АО «МКБ «Факел»

статочного объема. Под начальной надежностью понималась надежность изделий ракетной техники на начальном этапе натурных работ – автономных летных и предварительных испытаний после завершения цикла наземных проверок. На этом этапе велик риск отказов блоков аппаратуры и агрегатов из-за их новизны, недостаточной технологичности изготовления и качества контрольных прове-



рок. Стоит обратить внимание на результат по «морской» ракете В-611, уровень начальной надежности которой оказался не выше 0,12. Значит, начальный этап испытаний указанных ракет на море шел тяжело и было много неуспешных пусков. По мнению автора данной статьи, подкрепленному опытом работ на море на этапе создания изделий современной ракетной техники, эти результаты обусловлены наличием объективных закономерностей разработок морских систем.

Решение задач определения требуемых объемов испытаний, их качества, динамики отработки и ряда других задач в ОКБ-2 было поручено опытному конструктору, на тот момент кандидату технических наук, Евгению Самуиловичу Иофинову. С 1954 г. и до последних дней своей жизни он работал на «Факеле» и прошел путь от старшего инженера до начальника проектного отдела – заместителя главного конструктора по научно-исследовательским и перспективным разработкам. Награжден орденом Трудового Красного Знамени, лауреат Ленинской и Государственной премий за участие в создании зенитных ракет В-750, их модификаций и ряд других работ.

Е. С. Иофинов по результатам анализа пусков зенитных ракет классов В-750, В-1000, В-860П, В-600, В-601, 9М33 и других получил уникальные статистические данные по уровням надежности вновь разрабатываемых зенитных управляемых ракет (ЗУР) на различных стадиях жизненного цикла. Он определил начальные уровни надежности различных типов ЗУР при выходе на летные конструкторские испытания, сделал важные обобщающие выводы о закономерностях проведения конструкторских испытаний.

Докторская диссертация Е.С. Иофинова (далее – диссертация) до недавнего времени имела статус ограниченного доступа, в связи с чем научная общественность не имела возможности ознакомиться с важнейшими результатами проведенных работ. Результаты этой работы не утратили актуальности по прошествии столь продолжительного времени и могут быть использованы для альтернативных оценок потребного количества испытательных пусков при разработке техники нового поколения.

Ниже приведены наиболее важные выводы докторской диссертации Е.С. Иофинова [1].

«...»

1. В работе проведен подробный анализ процесса отработки 13 типов зенитных ракет, среди которых 7 типов вновь разработанных ракет и 6 типов модификаций за период 1953–1968 гг.

Всего проанализированы пуски более 8200 ракет, из которых около 5000 использованы для анализа процесса роста надежности. При этом выявлены основные закономерности сложившейся практики отработки зенитных ракет.

2. Показано, что установившийся уровень надежности зенитных ракет достигает значения $P_{00} = 0,92...0,95$ для телеуправляемых ракет и $P_{00} = 0,90...0,92$ для ракет с самонаведением. Этот уровень надежности достигается в серийном производстве через несколько лет войсковой эксплуатации после 600–800 пусков ракет.

Для модификаций серийных ракет установившийся уровень надежности P_{00} выше указанного ранее.

3. Установлено, что начальный уровень надежности зенитных ракет P_0 , с которым ракеты поступают на летные испытания, как правило составляет 0,2...0,4. Для модификаций серийных ракет начальный уровень надежности выше начального уровня надежности прототипа, но ниже его достигнутого уровня надежности в серии.

4. Уровень надежности вновь разрабатываемых зенитных ракет в конце этапа летных испытаний составляет 0,70...0,75 и редко превышает 0,8. Для достижения такого уровня надежности в среднем затрачивается 160...200 пусков зенитных ракет, испытания длятся 2...4 года. При этом средняя надежность зенитных ракет на этапе летных испытаний составляет 0,5...0,7.

Для модификаций серийных ракет уровень надежности в конце этапа летных испытаний составляет величину 0,75...0,90 – в зависимости от глубины модернизации. На летные испытания таких ракет затрачивается 50...100 ракет, а продолжительность испытаний составляет 1...2 года.



5. За время летных испытаний одного типа изделия в среднем устраняется 20...30 типов дефектов, приводящих к отказам в пусках. В среднем на устранение одного типа отказа тратится 2,4 неудачного пуска. В некоторых случаях на устранение одного дефекта тратится до 10...12 неудачных пусков. Каждый дефект устраняется одной удачно проведенной доработкой.

6. Основную информацию для повышения надежности зенитных ракет дают неудачные пуски. Удачные пуски практически не оказывают влияния на рост надежности зенитных ракет, хотя имеющаяся информация позволяет выявить неисправности в работе бортового оборудования и агрегатов, которые впоследствии приводят к аварийным пускам ракет...»

Несмотря на имеющиеся отличия в современных оценках ключевых параметров испытаний от приведенных данных, тенденции, отмеченные в первоисточнике, не утрачивают актуальности и в XXI в. Вывод 6, приведенный выше, несомненно, актуален во все времена. Важно помнить, что для успешного завершения испытаний необходимо на практике пройти весь трудный путь ошибок и неудач.

Как показано в статье [4], вероятность выполнения задачи изделием нового поколения в испытательном пуске зависит от уровня отработки аппаратуры, программного обеспечения (ПО) и может быть оценена аналитическими методами. Несмотря на это полученные оценки в изложенных выводах диссертации могут быть полезными в качестве ориентиров при расчетах, проводимых по новым методикам.

Для получения оценок необходимого количества пусков на этапах испытаний с учетом достигнутой надежности (функциональной эффективности) можно использовать известную формулу накопления вероятности положительного исхода в серии испытаний [4].

Таким образом, данные, полученные на основе большой статистики прошлых лет, имеют прикладное значение и в XXI в.

Практические аспекты применения оценок функциональной эффективности на этапах испытаний

Как отмечено ранее, для получения достоверных оценок стоимости новой ОКР, а значит

и успешности разработки ракетной техники в целом, необходимо иметь корректный прогноз необходимого количества пусков (натурных испытаний). Указанное число испытаний складывается из следующих факторов.

Во-первых, для проверки эффективности применения изделий в диапазоне требований технического задания планируется определенное количество эпизодов с заданными параметрами условий. На языке испытателей каждый эпизод – это так называемая точка испытательного пуска (далее – точка). В качестве параметров условий, как правило, используются: тип мишени, характеристики поверхностей отражения мишеней для радиосигналов, координаты объектов и их производные в точке встречи ракеты с целью, помеховая обстановка, режимы взаимодействия ракеты с комплексом и др.

Во-вторых, при выполнении каждого пуска в конкретную точку могут возникать ситуации, приводящие к невыполнению задач пуска. Причины возникновения таких ситуаций рассмотрены в статье [4]. В целом отмеченное явление характеризует достигнутую функциональную эффективность изделия на соответствующем этапе испытаний. Как видно из рис. 4, на начальном этапе испытаний значение функциональной эффективности изделий новой разработки в среднем составляло 0,32. При этом для наиболее сложных изделий (например, В-860П зенитного ракетного комплекса С-200) значение функциональной эффективности составляло 0,2. Такой низкий показатель эффективности начального этапа испытаний можно объяснить тем, что впервые в практике АО «МКБ «Факел» на ракете новой конструкции была применена высокочувствительная полуактивная радиолокационная головка самонаведения.

В-третьих, для современных изделий с большим объемом цифровых вычислителей на борту очень важным фактором реализации высокой функциональной эффективности является уровень отработки ПО. Следует обратить внимание на особенности отработки ПО современных ракет, отмеченные в статье [4], которые характеризуются зависимостью от объемов исползуемого кода, сроков выполнения работ, квалификации разработчиков ПО и многих других факторов.



В-четвертых, существенное влияние на функциональную эффективность испытываемых зенитных ракет оказывают уровень отработки средств ЗРК и качество отработки взаимодействия с бортовым оборудованием ракет в различных условиях применения. Как показывает опыт АО «МКБ «Факел», до 20...30 % испытательных пусков с неудовлетворительным результатом случалось по причине ошибок или некорректной работы средств комплекса, а не ракеты. Значит, даже при полной готовности ракеты к выполнению полетного задания положительный результат мог быть получен только в 70...80 % случаев в зависимости от уровня отработки комплекса. Очевидно, что при вводе ракеты в существующий и отработанный комплекс указанная вероятность будет выше.

В-пятых, при определении объема испытаний необходимо учитывать наличие или отсутствие, а также полноту оснащения специализированного испытательного полигона, уровень обеспеченности испытаний современными средствами полигонных измерений, включая многопозиционные оптические средства фиксации работы боевого снаряжения. Отсутствие полного объема данных внешних измерений увеличивает количество неудачных пусков, затрачиваемых для обнаружения и устранения ошибок или неточностей алгоритмов.

В-шестых, при проведении контрольных тестовых испытаний на стадии завершения ОКР необходимо заранее готовить типаж мишеней, условия пусков и способы контроля результатов, максимально соответствующих требованиям тактико-технического задания. Целесообразно заранее предусмотреть последствия неудач, которые неизбежны на этапе контрольных стрельб. Необходимо установить условия и способы частичного зачета результатов контрольных стрельб. В противном случае «стрельба до победного конца» может превратиться в битву за выживание в условиях интенсивного истощения ресурсов предприятия-разработчика при восполнении количества изделий за свой счет.

С учетом важности корректной оценки стоимости ОКР, а значит и корректного определения количества испытательных пусков, целесообразно в техническом задании на разработ-

ку новых изделий ракетной техники, помимо типов целей, указывать соответствующие им мишени и условия их поражения, по которым должна быть проведена проверка зачетности на этапе государственных испытаний. Можно привести ряд примеров, когда имевшиеся в распоряжении испытателей мишени значительно отличались по уязвимости от реальных целей, заданных в техническом задании, что связано с отсутствием большей части агрегатов и блоков аппаратуры из тех, которые есть на реальных целях. Очевидно, что для получения требуемого результата в указанных условиях требуется больший расход ракет.

Указанная конкретизация требований обеспечит достоверную оценку необходимого количества пусков на этапах испытаний и, как следствие, позволит снизить общие риски срыва работ в установленные сроки.

Таким образом, если учесть все указанные факторы, можно получить необходимое количество изделий, изготавливаемых в рамках ОКР для проведения всего объема испытаний с достижением ожидаемого результата. С учетом оценки стоимости опытного образца несложно получить ориентировочную цену ОКР.

Оценим для примера требуемое количество изделий для обеспечения всего объема работ в рамках новой ОКР с исходными данными по изделию МКБ «Факел» 60-х гг. XX в.

Пусть на этапе автономных летных испытаний, когда проводятся испытания ракет без использования радиолокационных средств ЗРК, необходимо проверить работу изделия по трем точкам, отличающимся дальностью полета. Эффективность полигонного обеспечения для определенности примем 0,9, т. е. вероятность получения всего объема данных близка к высокой, но не максимальная. Выбор значения можно объяснить тем, что испытания новой техники всегда требуют совершенствования оборудования полигона, а опережающее обеспечение испытаний пока не всегда реализуется в полной мере.

Примем значение функциональной эффективности начального этапа 0,2 (как у изделия В-860П на рис. 4). Тогда вероятность выполнения задачи в экспериментальном пуске с учетом получения всех необходимых экспе-



риментальных данных составит 0,18. Для получения требуемого результата по одной точке с вероятностью 0,95 потребуется не менее 15 пусков с учетом отказов и прочих непредвиденных ситуаций. Для проведения автономных летных испытаний в полном объеме в условиях принятых исходных данных получим количество изделий $N_{\text{Али}}$: $15 \cdot 3 = 45$.

При правильной организации испытаний на начальном этапе работ не требуется одновременно проверять все точки зоны поражения. В противном случае будет получен значительный перерасход изделий. Целесообразно определить такие эпизоды (точки) испытаний, в которых может быть проверена работа всей аппаратуры изделий в полетных условиях. Вместе с тем для проверки всех особенностей работы сложной аппаратуры все-таки потребуется значительный объем летных испытаний.

На этапе СЛИ с ЗРК может потребоваться следующее количество изделий. Функциональную эффективность на рассматриваемом этапе примем за 0,7 в соответствии с выводом 4 из диссертации Е. С. Иофинова. Примем, что зенитная ракетная система (комплекс), использующая новое изделие, также разработана впервые. Значение функциональной эффективности этой системы на этапе СЛИ примем равным 0,8. Тогда вероятность выполнения задачи в экспериментальном пуске этапа СЛИ с учетом получения всего объема необходимых экспериментальных данных (эффективности полигонных измерений) составит $0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \approx 0,5$. Для получения требуемого результата по одной точке с вероятностью 0,95 необходимо не менее 4,3 пуска. Для проведения СЛИ в полном объеме в условиях принятых исходных данных с учетом проверок по 15 точкам получим количество изделий $N_{\text{СЛИ}} = 4,3 \cdot 15 \approx 65$. Следует отметить, что число проверяемых точек на этапе конструкторских испытаний определяется совместным решением заказчика и разработчика по программе испытаний и может отличаться от приведенного значения. Важно напомнить, что под точкой понимается не только пространственное положение точки встречи ракеты с целью, но и параметры цели (ее эффективная отражающая поверхность, уязвимость ее блоков и агрегатов и т. п.).

В части уязвимости, как уже отмечалось ранее, очень важно обеспечить соответствие характеристикам имитируемых целей. Недооценка этого требования приводит к повышенному расходу ракет на испытаниях. Число 15 взято исключительно для примера.

Примем, что на этапе государственных испытаний проверяется 10 точек с учетом не только координат точек встречи, но и различного типа мишеней. На этапе государственных испытаний функциональная эффективность изделия может достичь величины 0,8. Пусть функциональная эффективность комплекса достигла величины 0,9, а эффективность полигонных измерений также 0,9. Тогда можно получить, что в условиях принятых допущений для этапа государственных испытаний потребуется порядка 30 опытных ракет.

В условиях принятых допущений общий объем летных испытаний с учетом изменяющейся в процессе отработки функциональной эффективности составит порядка 140 пусков.

Если не учесть потенциально реализуемую функциональную эффективность изделий и комплекса на этапах испытаний, то количество планируемых натурных работ будет существенно занижено относительно объективно необходимого количества этих работ. В рассмотренном примере исходя из планируемых точек испытаний это количество составит $3 + 15 + 10 = 28$ — всего 20 % от необходимого. Эта кажущаяся экономия средств при определении объемов финансирования ОКР существенно увеличивает риск того, что спланированного объема испытаний не хватит даже для автономной летной отработки. Сроки испытаний с высокой вероятностью будут сорваны из-за необходимости поиска дополнительных средств, изготовления дополнительного количества ракет и продолжения испытаний.

Таким образом, использование объективных статистических данных, накопленных в АО «МКБ «Факел» в различные периоды деятельности, позволяет получать экспертные оценки требуемого количества пусков опытных образцов изделий ракетной техники для выполнения всего запланированного объема испытаний. Вместе с тем за рамками изложенного



материала остается методический аппарат выбора объема натурных работ, т. е. количества проверяемых точек зоны поражения комплекса на этапах испытаний, и допустимый вклад методов имитационного моделирования для оптимизации количества натурных испытаний. Этому вопросу планируется посвятить отдельное исследование.

Выводы

1. Несмотря на годы, прошедшие с момента обобщения первых результатов испытаний отечественной зенитной ракетной техники, и появление новых технологий создания и испытаний этой техники, актуальность исследований прошлых лет в методическом плане не теряет своей значимости.

2. Для корректной оценки необходимого объема натурных испытаний изделий ракетной техники необходимо учитывать объективные данные по предельно достижимым характеристикам функциональной эффективности изделий на различных этапах испытаний.

3. Разработка и испытания зенитных ракет нового поколения – весьма дорогостоящий процесс. Большую часть суммарных затрат на разработку новой техники составляет стоимость изготовления ракет для проведения всего объема натурных работ. По опыту АО «МКБ «Факел» необоснованная экономия на объемах и интенсивности испытаний с высокой вероятностью приводит к срыву сроков разработок и увеличению материальных затрат.

В связи с этим заказчику совместно с разработчиком при формировании ведомости исполнения контракта по созданию новых образцов ракетного оружия целесообразно проводить всестороннюю оценку рисков испытаний с целью планирования оптимального объема испытаний и стоимости ОКР в целом.

Список литературы

1. *Иофинов Е. С.* Исследование процесса роста надежности зенитных ракет при летных испытаниях и в серийном производстве: дисс. ... д-ра техн. наук. Кн. 1. Химки, 1969 г. 351 с. (экз. единственный – техническая библиотека АО «МКБ «Факел»).
2. Надежность и эффективность в технике. В 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / под ред. *А. И. Рембезы*. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
4. *Доронин В. В.* Проблемы оценки качества отработки опытных образцов ракетной техники в натурных экспериментах этапа конструкторских испытаний и пути их преодоления // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 2. С. 35–52.

Поступила 15.07.19

Доронин Виктор Валентинович – доктор технических наук, генеральный директор, генеральный конструктор Акционерного общества «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел» имени академика П. Д. Грушина, г. Химки.

Область научных интересов: разработка и проектирование зенитных ракет.

Analysis of experience in assessing the extent of full-scale testing of anti-aircraft missile products during development and modernization

The paper focuses on the approach to assessing the number of launches of anti-aircraft missile products at various stages of full-scale tests required for the implementation of development work. We analyzed the approach to determining the extent of flight tests using the practical experience of the “МКБ” Fakel” of 1960s. Furthermore, we proposed a method for estimating the cost of the experimental stage of development work

Keywords: rocket reliability, unit failure, reliability level, product functional efficiency, flight tests, rocket performance, test launch point.

Doronin Viktor Valentinovich – Doctor of Engineering Sciences, Director General, Designer General, Engineering Design Bureau “Fakel” named after academician P. D. Grushin, Joint Stock Company, Khimki.

Science research interests: development and design of anti-aircraft missiles.