

УДК 62-192: 519.248 + 629.7.017.1

© Лукин В. Л., Сухорученков Б. И.  
Lukin V.L., Sukhoruchenkov B.I.**ПЛАНИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ  
С УЧЕТОМ ЧИСЛЕННОСТИ СОЗДАВАЕМОЙ ГРУППИРОВКИ****PLANNING VOLUME FLIGHT TESTS AIRCRAFT  
FOR RELIABILITY CONSIDERING THE SIZE POSED GROUPINGS**

**Аннотация.** В статье приводится обоснование методов планирования объема летных испытаний летательных аппаратов однократного применения на безотказность. Эти методы обеспечивают максимальную эффективность группировки летательных аппаратов при ограниченных затратах на создание группировки.

**Annotation.** The article provides the rationale for planning methods of flight test aircraft, a single application for reliability. These methods ensure maximum efficiency grouping aircraft, with limited cost to create a grouping.

**Ключевые слова.** Группировка летательных аппаратов, летные испытания, вероятность безотказной работы, объем испытаний, методы планирования.

**Key words.** Grouping of aircraft, flight tests, probability of non-failure operation, the volume of tests, methods of planning.

**Введение**

Рассматривается период разработки или модернизации летательных аппаратов (ЛА) однократного применения типа баллистической ракеты (БР), крылатой ракеты, ракеты-носителя (РН) или космического аппарата (КА). Предполагается, что ЛА предназначен для решения целевой задачи (ЦЗ) в составе группировки ЛА численностью  $N$ . Эффективность решения ЦЗ определяется тактико-техническими характеристиками (ТТХ) ЛА, основными из которых являются готовность к применению, точность функционирования, эффективность выполнения ЦЗ и показатели надежности. Требования к ТТХ ЛА задаются в техническом задании (ТЗ) на опытно-конструкторскую работу. Для подтверждения соответствия ТТХ требованиям и доведения их до требуемого уровня в случае несоответствия проводятся летные испытания (ЛИ) ЛА. Эффективность ЛИ зависит от ряда условий и показателей: качества планирования и подготовки испытаний, экспериментальной и методической

базы, уровня подготовки и квалификации специалистов-испытателей и органов управления. При этом существенную роль играет планирование объема испытаний ЛА. Объем ЛИ часто лимитируется необходимостью подтверждения требований по безотказности ЛА. Поэтому далее рассматривается только задача планирования объема испытаний ЛА на безотказность.

В настоящее время планирование объема ЛИ ЛА на безотказность осуществляется из условия подтверждения требований к вероятности безотказной работы (ВБР) ЛА в течение периода его целевого функционирования. К современным ЛА предъявляются высокие требования к ВБР, для достоверного подтверждения которых необходим значительный объем испытаний (до нескольких десятков). В то же время в условиях действующих ограничений численность создаваемой группировки БР может быть в пределах нескольких десятков. При создании космических средств и проведении космических исследований для решения уникальных ЦЗ объем создаваемой со-

---

Лукин Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, академик-секретарь секции «Инженерные проблемы стабильности и конверсии» Российской инженерной академии, тел. (495) 543-36-70;

Сухорученков Борис Иванович – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения военной академии РВСН имени Петра Великого, тел. (495)696-06-48.

Lukin Vladimir Leonidovich – doctor of technical sciences, Professor, academician-secretary of the section "Engineering problems of stability and conversion" Russia Academy of Engineering, tel. (495) 543-36-70;

Sukhoruchenkov Boris Ivanovich – professor, doctor of technical sciences, Professor roaketnogo weapons Military Academy RVSN Peter the Great, tel. (495)696-06-48.

вокупности РН и КА может снижаться до нескольких образцов. В этих условиях требуемый объем ЛИ становится соизмерим с численностью создаваемой совокупности ЛА и даже превосходит ее. Необходимость проведения такого объема ЛИ представляется нерациональным. Поэтому возникает задача планирования объема летных испытаний ЛА на безотказность с учетом численности создаваемой группировки ЛА, методы решения которой в сравнении с существующими методами рассматриваются далее.

### 1 Принятые обозначения

При обосновании метода планирования объема летных испытаний ЛА на безотказность с учетом численности создаваемой группировки ЛА примем следующие обозначения:

- $C$  – затраты со создание группировки ЛА;
- $C_1$  – затраты на производство одного образца ЛА при серийном производстве;
- $C_n$  – затраты на подготовку системы ЛИ ЛА;
- $k_n$  – сомножитель, учитывающий затраты на подготовку системы ЛИ ЛА по сравнению с затратами на производство одного образца ЛА:  $C_n = k_n C_1$ ;
- $k_{ли}$  – сомножитель, учитывающий отличие затрат на изготовление образца ЛА для ЛИ и проведение одного испытания по сравнению с затратами  $C_1$ ;
- $k_{кн}$  – сомножитель, учитывающий отличие затрат на изготовление образца ЛА от серийной партии для контрольных испытаний по сравнению с затратами  $C_1$ ;
- $m$  – число возможных случайных отказов ЛА при ЛИ;
- $N$  – число ЛА в создаваемой группировке;
- $N_n$  – число серийных партий для создания группировки ЛА;
- $N_{ф}$  – фиктивное число ЛА, которые можно создать на выделенные средства;
- $n$  – объем летных испытаний ЛА;
- $n_{рац}$  – рациональный объем летных испытаний ЛА;
- $n_{кн}$  – число контрольных испытаний (КИ) ЛА от каждой серийной партии для подтверждения качества изготовления партии ЛА;
- $P$  – вероятность безотказной работы (ВБР) ЛА за период подготовки и решения целевой задачи;
- $P_n$  – нижняя доверительная граница для ВБР;
- $P_{тр}$  – требуемое значение ВБР;
- $P_{нтр}$  – нижний предел требуемого значения ВБР;
- $S$  – показатель оптимальности метода «эффективность–затраты»;
- $S_n$  – нормированное значение показателя  $S$ ;
- $Q_n$  – объем партии при серийном изготовлении ЛА;

- $W$  – показатель эффективности решения группировочной целевой задачи;
- $W_1$  – показатель эффективности решения частной целевой задачи каждым ЛА при  $P = 1$ ;
- $W_r$  – гарантированное значение показателя эффективности;
- $W_{нн}$  – нормированное значение показателя  $W_r$ ;
- $\gamma$  – доверительная вероятность;
- $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;
- $\bar{P}, \hat{P}, \bar{P}_n, \hat{P}_n, \bar{W}_{гн}, \hat{W}_{гн}$  – оценки параметров  $P, P_n$  и

показателя  $W_{нн}$  по результатам ЛИ и их реализации.

### 2. Основные допущения

При решении поставленной задачи примем следующие допущения.

1. Основными показателями качества создаваемой группировки ЛА, которые влияют на выбор объема ЛИ, являются эффективность решения группировочной целевой задачи и общие затраты на создание группировки ЛА.
2. Эффективность группировки ЛА при решении ЦЗ аддитивно зависит от эффективности решения частной ЦЗ каждым ЛА.
3. Затраты на создание группировки ЛА пропорциональны затратам  $C_1$ .
4. ТТХ ЛА, кроме оценок ВБР, не зависят от объема ЛИ.
5. Нарращивание группировки ЛА при  $N > N_n$  производится на основе серийного производства ЛА.
6. Доработки ЛА при ЛИ, производимые для устранения выявленных дефектов, являются эффективными.

### 3. Существующие методы планирования объема испытаний ЛА на безотказность

#### 3.1. Формы задания требований к ВБР и правила принятия решений

Существующие методы планирования объема испытаний ЛА на безотказность зависят от формы задания и уровня требований к ВБР. В соответствии с ГОСТ [2, 3] требования к ВБР ЛА в течение периода их целевого функционирования могут быть заданы в виде двух форм:

- *первая форма*: задается требуемое значение ВБР  $P_{тр}$  [0,95; 0,98] и требуемое среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки ВБР по результатам ЛИ  $\sigma_{тр}$  [0,05; 0,08] для подтверждения ВБР;
- *вторая форма*: задается нижний предел для ВБР  $P_{нтр}$  [0,8; 0,95] и требуемая доверительная вероятность  $\gamma_{тр}$  [0,8; 0,95] для контроля ВБР.

Для подтверждения требований по ВБР проводятся ЛИ и по их результатам определяется точечная оценка ВБР  $\bar{P}$  и ее СКО  $\sigma_{\bar{P}}$  (при первой форме требований) или нижняя доверительная граница для ВБР  $\bar{P}_n$  при заданной доверительной вероятности  $\gamma = \gamma_{тр}$  (при второй форме требований). Решение о соответствии или несоответствии ВБР требованиям принимается на основе сравнения полученных оценок ВБР с требуемыми значениями:

• при первой форме требований:  
 ВБР ЛА соответствует требованиям, если  $\bar{P} \geq P_{тр}$  и  $\sigma_{\bar{P}} \leq \sigma_{тр}$  ;  
 ВБР ЛА не соответствует требованиям, если  $\bar{P} < P_{тр}$  и  $\sigma_{\bar{P}} \leq \sigma_{тр}$  ;  
 решение принять нельзя, если  $\sigma_{\bar{P}} > \sigma_{тр}$  ;

(1)

• при второй форме требований:  
 ВБР ЛА соответствует требованиям, если  $\bar{P}_n < P_{нтр}$  ;  
 решение принять нельзя, если  $\bar{P}_n \geq P_{нтр}$  .

(2)

Если решение принять не удастся, необходимо повышать точность оценивания ВБР ЛА по результатам ЛИ, например, увеличивая число ЛИ или привлекая дополнительную информацию о ВБР на основе наземных испытаний элементов ЛА.

**3.2. Планирование объема испытаний ЛА при первой форме требований к ВБР**

Предположим, что проводится  $n$  испытаний ЛА и предполагается, что при этом произойдет  $m$  случайных отказов ЛА. Если при отказе причины его установлены и проведены доработки для их устранения, то такой отказ при оценивании ВБР не учитывается. При ЛИ ВБР изменяется (возрастает) благодаря выявлению и устранению обнаруженных дефектов и неисправностей. Конечное значение ВБР после ЛИ можно оценить различными методами, например, методом наименьших квадратов, методом максимального правдоподобия [1]. Как показано в работе [1], наиболее точные оценки получаются на основе метода несмещенных оценок (МНО). В соответствии с этим

методом точечная оценка достигнутого уровня ВБР в конце ЛИ и ее дисперсия определяются по зависимостям

$$\bar{P} = \frac{n+1-m}{n+2}; \quad \sigma_{\bar{P}}^2 = \frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)}. \quad (3)$$

Заметим, что в зависимостях (3) учитывается только число случайных отказов. Если при отказах ЛА выявляются причины отказов и проводятся эффективные доработки для их устранения, то такие отказы ЛА не влияют на достигнутый уровень ВБР [1] и в зависимостях (3) не учитываются.

Для принятия решения по правилу (1) с учетом (3) необходимо провести такое число ЛИ  $n$ , чтобы СКО оценки ВБР было не больше требуемого значения

$$\frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)} \leq \sigma_{тр}^2. \quad (4)$$

Планируемое число ЛИ определяется на основе соотношения (4) численным методом. Оно зависит от требуемого СКО оценки  $\sigma_{тр}$  и возможного числа случайных отказов  $m$ . Результаты вычислений числа ЛИ при вариациях  $\sigma_{тр}$  и  $m$  представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что для принятия решения необходимо значительное число ЛИ, особенно при повышенных требованиях к точности оценок ВБР  $\sigma_{тр} \leq 0,06$  и повышенном числе возможных отказов  $m \geq 1$ . При достижении требуемой точности оценок ВБР решение по правилу (1) может быть отрицательным (о несоответствии ВБР требованиям). В то же время испытания ЛА обычно проводятся до получения положительного решения о ВБР. Для этого необходимо выполнение первого условия (1) с учетом (3)

$$\frac{n+1-m}{n+2} \geq P_{тр}. \quad (5)$$

На основе (5) получается следующая зависимость для требуемого числа ЛИ:

$$n_{тр} \geq \frac{2P_{тр} - 1 + m}{1 - P_{тр}}. \quad (6)$$

Объем испытаний, необходимых для принятия положительного решения о соответствии ВБР требованиям, определенный по зависимости (6), приведен в табл. 1. Видно, что для положительного решения требуется больше испытаний, нежели для достижения требуемой точно-

Таблица 1

**Необходимое число испытаний ЛА при первой форме требований к ВБР**

$m$	Для принятия решения при различных СКО $\sigma_{тр}$				Для принятия положительного решения при различных значениях $P_{тр}$			
	0,05	0,06	0,07	0,08	0,95	0,96	0,97	0,98
0	17	14	12	10	18	23	32	48
1	25	20	17	15	38	48	65	98
2	31	25	21	18	58	73	98	148

сти оценок ВБР. При этом число ЛИ значительно возрастает при росте требований к ВБР и возможного числа отказов. При планировании объема испытаний необходимо учитывать вероятности возможного числа случайных отказов, которое зависит от ВБР  $P$  и числа испытаний  $n$  и определяются по биномиальному распределению

$$\text{Вер}(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} P^{n-m} (1-P)^m. \quad (7)$$

Вероятности, вычисленные по зависимости (7) при числе испытаний, необходимых для принятия положительного решения о ВБР и приведенных в табл. 1, указаны в табл. 2.

**Вероятности числа случайных отказов при числе испытаний, необходимых для принятия положительного решения о ВБР**

$m$	Вероятности безотказной работы $P$			
	0,95	0,96	0,97	0,98
Вер ( $m = 0$ )	0,40	0,39	0,38	0,38
Вер ( $m = 1$ )	0,33	0,28	0,28	0,28
Вер ( $m \leq 1$ )	0,59	0,42	0,42	0,42
Вер ( $m = 2$ )	0,23	0,23	0,23	0,23
Вер ( $m \leq 2$ )	0,44	0,43	0,43	0,43

Анализ данных табл. 2 показывает, что при планировании объема ЛИ не удастся достоверно предугадать возможное число случайных отказов ЛА. Практически с одинаковой невысокой вероятностью число отказов может быть от нуля до двух и более. Однако, как следует из табл. 2, если ВБР соответствует требованиям (при  $P = P_{\text{тp}}$ ), то планирование объема ЛИ ЛА для принятия положительного решения о ВБР целесообразно производить при предположении, что число случайных отказов будет не более одного. Выбор оптимистического варианта безотказных испытаний ( $m = 0$ ) или более реального варианта получения одного отказа ( $m = 1$ ) можно осуществить с привлечением лица, принимающего решение (ЛПР). Если планирование производится при предположении безотказных испытаний, то с вероятностью примерно 0,40 надо быть готовыми к тому, что может произойти хотя бы один отказ и для принятия положительного решения о ВБР необходимо будет продолжить испытания ЛА. Если планировать объем испытаний при предположении одного возможного отказа, то с вероятностью 0,15–0,40 можно подтвердить требуемую ВБР ЛА при меньшем числе испытаний, если они будут безотказными.

### 3.3. Планирование объема испытаний ЛА при второй форме требований к ВБР

Если требования к ВБР ЛА заданы по второй форме, то для принятия решения о соответствии ВБР требо-

ваниям необходимо по результатам испытаний оценить нижнюю доверительную границу  $P_H$  для ВБР, соответствующую требуемой доверительной вероятности  $\gamma_{\text{тp}}$ . Для этого в настоящее время используется метод, основанный на использовании биномиального распределения и узаконенный в ГОСТ [2, 3]. Как показано в [1], более точные оценки нижней доверительной границы  $P_H$  для ВБР по результатам  $n$  испытаний при  $m$  случайных отказах определяются по МНО из соотношения

$$(n+1) C_n^m \int_0^{\bar{P}_H} p^{n-m} (1-p)^m dp = 1 - \gamma_{\text{тp}}, \quad (8)$$

где  $C_n^m$  – число сочетаний из  $n$  по  $m$ .

Таблица 2

На основе этой зависимости после преобразований получаются соотношения для нахождения оценок нижней доверительной границы для ВБР при ограниченном числе отказов  $m$

при  $m = 0$ :

$$\bar{P}_H = \sqrt[n+1]{1 - \gamma_{\text{тp}}}; \quad (9)$$

при  $m = 1$ :

$$(n+1) \bar{P}_H^n \left( 1 - \frac{n}{n+1} \bar{P}_H \right) = 1 - \gamma_{\text{тp}}; \quad (10)$$

при  $m = 2$ :

$$0,5 n (n+1) \bar{P}_H^{n-1} \times \left[ 1 - \frac{2(n-1)}{n} \bar{P}_H + \frac{n-1}{n+1} \bar{P}_H^2 \right] = 1 - \gamma_{\text{тp}}. \quad (11)$$

Для принятия положительного решения о ВБР необходимо выполнить первое из условий (2). На основе этого с учетом (9)–(11) можно определить необходимое число ЛИ, которое зависит от значений  $P_{\text{тp}}$ ,  $\gamma_{\text{тp}}$  и  $m$ . При планировании безотказных испытаний (при  $m = 0$ ) планируемое число испытаний вычисляется по зависимости

$$n = \left[ \frac{\ln(1 - \gamma_{\text{тp}})}{\ln P_{\text{тp}}} \right]_{\text{цчб}} - 1, \quad (12)$$

где цчб – оператор выделения ближайшего большего целого числа.

При  $m \geq 1$  планируемое число испытаний определяется численными методами. Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Планируемое число испытаний ЛА для принятия положительного решения о соответствии ВБР требованиям, заданным по второй форме**

m	Требуемая доверительная вероятность $\gamma_{тр}$											
	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95	0,8	0,9	0,95
	$P_{нтр} = 0,80$			$P_{нтр} = 0,85$			$P_{нтр} = 0,90$			$P_{нтр} = 0,95$		
0	8	11	14	10	15	19	16	22	29	32	45	59
1	13	17	21	18	24	29	28	37	45	58	76	92
2	20	24	29	27	33	39	41	51	60	84	104	123

Из табл. 3 видно, что необходимый объем ЛИ возрастает с увеличением требуемого значения ВБР  $P_{нтр}$ , доверительной вероятности  $\gamma_{тр}$  и предполагаемого числа случайных отказов  $m$ . Сравнение данных табл. 3 и табл. 1 показывает, что для подтверждения ВБР требованиям, заданным по второй форме, необходимо меньше испытаний по сравнению с требованиями по первой форме. При этом обеспечивается достаточная достоверность принимаемого положительного решения (с вероятностью  $\gamma_{тр}$ ), в то время как при контроле ВБР требованиям, заданным по первой форме, может быть до 50% неверных решений [1].

Анализ существующих методов планирования объема испытаний ЛА показывает, что для принятия решения о соответствии ВБР ЛА требованиям необходимо значительное число испытаний, которое может быть соизмеримо и даже превышать число ЛА, входящих в группировку, что представляется нерациональным. Поэтому для корректного планирования объема испытаний ЛА необходимо учитывать численность создаваемой совокупности ЛА, что рассматривается далее.

**4. Показатели качества создаваемой группировки ЛА**

Для планирования объема испытаний ЛА с учетом численности создаваемой группировки ЛА необходимо выбрать основные показатели качества группировки ЛА и определить зависимости их от объема ЛИ.

**4.1. Эффективность группировки ЛА при решении целевой задачи**

Эффективность решения целевой задачи  $W$  группировкой ЛА зависит от численности группировки  $N$ , ВБР ЛА  $P$  и эффективности решения поставленной задачи каждым ЛА  $W_1$  при  $P = 1$ . Последний показатель  $W_1$  зависит от готовности ЛА к применению, точности функционирования и других технических характеристик ЛА. Показатель эффективности группировки ЛА при приня-

тых допущениях представим в виде

$$W = N \cdot P \cdot W_1 \tag{13}$$

Объем испытаний ЛА влияет на показатели  $P$  и  $W_1$ . При планировании объема испытаний ЛА на безотказность будем учитывать гарантированную оценку ВБР в виде оценки нижней доверительной границы ВБР  $\bar{P}_n$ , которая зависит от объема испытаний  $n$ , числа случайных отказов ЛА  $m$  при испытаниях и доверительной вероятности  $\gamma$ . При фиксированных значениях показателя  $W_1$  гарантированная оценка показателя эффективности группировки ЛА определяется по зависимости

$$\bar{W}_r = N \bar{P}_n(n, m, \gamma) W_1 \tag{14}$$

Оценка вычисляется по зависимостям (8)–(11).

**4.2. Затраты на создание группировки ЛА**

Затраты на создание группировки ЛА зависят от численности группировки, затрат на создание одного ЛА, затрат на подготовку системы испытаний ЛА, затрат на проведение летных и контрольных испытаний (КИ) ЛА при серийном производстве и при принятых допущениях определяются по зависимости

$$C = k_n \cdot C_1 + C_1 \cdot N + k_{ли} \cdot C_1 \cdot n + k_{ки} \cdot C_1 \cdot n_{ки} \cdot N_n \tag{15}$$

Число серийных партий  $N_n$  зависит от численности создаваемой группировки ЛА, объема каждой партии  $Q_n$  и числа образцов ЛА, испытываемых от каждой партии и определяется по зависимости

$$N_n = \left( \frac{N}{Q_n - n_{ки}} \right) цчб \tag{16}$$

где цчб – оператор округления до целого числа в большую сторону.

При выборе числа ЛИ необходимо обеспечить максимальное значение показателя эффективности  $W$  и минимальную величину затрат  $C$ . Так как эти требования противоречивы, то для определения рационального числа ЛИ необходимо использовать методы векторной (многокритериальной) оптимизации [4]. Далее рассматриваются только два основных метода, которые часто используются в настоящее время.

**5. Планирование объема испытаний ЛА по методу «эффективность – затраты»**

Выбор числа ЛИ с учетом эффективности и затрат на создание группировки ЛА может производиться по критерию

$$S(n) = \frac{\bar{W}_r(n)}{C(n)} = \max. \tag{17}$$

Показатель  $S(n)$  на основе (14)–(16) преобразуем к виду

$$S(n) = \frac{\bar{P}_n(n, m, \gamma) W_1}{C_1 (k_n / N + 1 + k_{ли} n / N + k_{ки} n_{ки} N_n / N)} \tag{18}$$

В соответствии с принятыми допущениями зависимость показателей  $W_1$  и  $C_1$  от  $n$  не учитывается. Поэтому планирование числа испытаний ЛА на безотказность можно осуществлять по нормированному показателю

$$S_n(n) = \frac{\bar{P}_n(n, m, \gamma)}{k_n / N + 1 + k_{ли} n / N + k_{ки} n_{ки} N_n / N} \tag{19}$$

10. На основе анализа зависимости  $S_n(n)$  выбирается рациональное число испытаний ЛА при предполагаемом числе случайных отказов  $m$ .

11. Можно повторить вычисления по пп. 4–10 при другом значении предполагаемого числа случайных отказов  $m$ .

12. Окончательный выбор рационального числа испытаний ЛА осуществляется ЛПР с учетом вероятности получения случайных отказов  $m$  при испытаниях.

*Пример 1.* Предполагается создание группировки ЛА одноразового применения численностью  $N = 50$ . Необходимо определить рациональный объем летных испытаний ЛА при следующих данных:  $Q_n = 10, n_{ки} = 1, k_{ли} = 1, k_{ки} = 1, k_n = 2, \gamma = 0,9, m = 0$ .

Результаты вычислений реализаций оценок показателя  $S_n$  по изложенному выше алгоритму при некоторых значениях предполагаемого числа испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты вычислений реализаций оценок показателя  $S_n$**

Значения параметров	Число испытаний $n_i$						
	2	5	7	10	15	20	25
$\hat{P}_{ni}$	0,464	0,681	0,750	0,811	0,866	0,896	0,915
$S_{ni}$	0,390	0,544	0,581	0,600	0,597	0,578	0,554

Определение объема испытаний, обеспечивающих максимум показателя (19), производится по следующему алгоритму:

1. Задается численность создаваемой группировки  $N$ .
2. На основе технико-экономического анализа определяются и задаются исходные данные  $Q_n, n_{ки}, k_{ли}, k_{ки}, k_n$ .
3. С привлечением ЛПР задается доверительная вероятность  $\gamma$  и ожидаемое число случайных отказов  $m$ .
4. Последовательно выбираются значения возможного числа испытаний  $n_i, i=1, \dots, K$ .
5. По зависимостям (8)–(11) при значениях  $n_i, m$  и  $\gamma$  вычисляется оценка нижней доверительной границы для ВБР  $\bar{P}_{ni}$ .
6. Вычисляется число серийных партий по зависимости (16).
7. Вычисляется показатель  $S_{ni}$  по зависимости (19).
8. Повторяются вычисления по пп. 4–7 для всех выбранных значений числа испытаний  $n_i, i=1, \dots, K$ .
9. Строится график зависимости показателя  $S_n$  от числа испытаний на основе полученных значений  $S_{ni}$  при выбранных  $n_i$ .

На основе данных табл. 4 можно построить зависимость показателя  $S_n$  от числа испытаний  $n$ , которая показана на рис. 1.

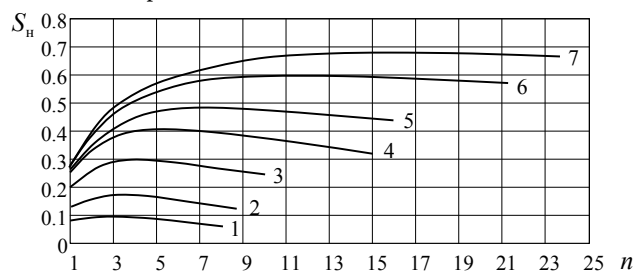


Рис. 1. Зависимости показателя  $S_n$  от числа безотказных испытаний при  $Q_n = 10, n_{ки} = 1, k_{ли} = 1, k_{ки} = 1, k_n = 2, \gamma = 0,9$  и вариациях численности  $N$  группировки ЛА: 1-  $N = 1$ ; 2-  $N = 2$ ; 3-  $N = 5$ ; 4-  $N = 10$ ; 5-  $N = 20$ ; 6-  $N = 50$ ; 7-  $N = 100$

Здесь же приведены зависимости  $S_n(n)$ , полученные при тех же исходных данных, но при других составах группировки  $N$ . Видно, что значение показателя  $S_n$  в районе максимальных значений имеет пологий характер. Поэтому без значительного ущерба для эффективности группировки ЛА при планировании можно выбрать число испытаний ЛА несколько ниже оптимального

значения. В условиях примера 1 оптимальное значение числа ЛИ, при котором достигается максимум показателя  $S_n$ , равно  $n_{\text{опт}} = 12$ . В качестве рационального значения числа испытаний можно принять величину  $n_{\text{рац}} = 9$ , при котором показатель  $S_n$  снижается лишь на 0,5 %.

Аналогично можно построить зависимости показателя  $S_n(n)$  при других исходных данных и при другом предполагаемом числе случайных отказов. На основе полученных результатов можно определить рациональное число испытаний ЛА. Зависимости рационального числа ЛИ от численности группировки ЛА, полученные в результате вычислений при тех же исходных данных, как в примере 1, и предполагаемом числе случайных отказов  $m = 0$  и  $m = 1$ , показаны на рис. 2.

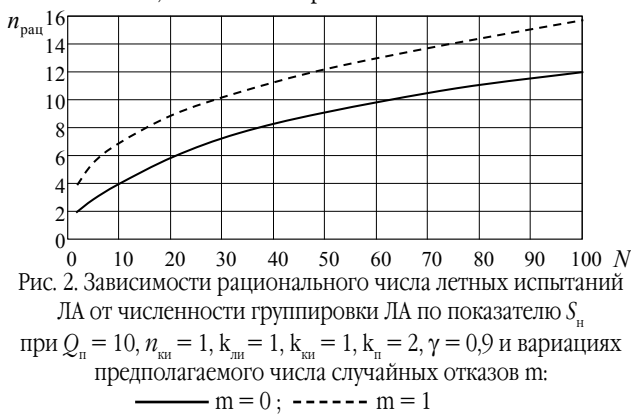


Рис. 2. Зависимости рационального числа летных испытаний ЛА от численности группировки ЛА по показателю  $S_n$  при  $Q_n = 10$ ,  $n_{\text{ки}} = 1$ ,  $k_{\text{ли}} = 1$ ,  $k_{\text{ки}} = 1$ ,  $k_n = 2$ ,  $\gamma = 0,9$  и вариациях предполагаемого числа случайных отказов  $m$ :  
 —  $m = 0$ ; - - - - -  $m = 1$

Из рис. 2 видно, что при планировании объема испытаний ЛА по методу «эффективность – затраты» рациональное число ЛИ ЛА возрастает с ростом численности создаваемой группировки ЛА и с увеличением предполагаемого числа случайных отказов при ЛИ. При малой численности группировки планируемое число ЛИ может снижаться до  $n_{\text{рац}} = 2-5$ .

### 6. Планирование объема испытаний ЛА при ограниченных затратах на создание группировки ЛА

Задача планирования объема испытаний ЛА на безотказность может решаться при ограниченных затратах  $C_{\text{опр}}$ , выделяемых на создание группировки ЛА. В этом случае в соответствии с (15) возможная численность группировки и объем ЛИ связаны соотношением

$$k_n \cdot C_1 + C_1 \cdot N + k_{\text{ли}} \cdot C_1 \cdot n + k_{\text{ки}} \cdot C_1 \cdot n_{\text{ки}} \cdot N_n = C_{\text{опр}}, \quad (20)$$

Введем в рассмотрение отношение

$$C_{\text{опр}}/C_1 = k_n + N + k_{\text{ли}} n + k_{\text{ки}} n_{\text{ки}} N_n = N_{\text{ф}}, \quad (21)$$

где  $N_{\text{ф}}$  – некоторое фиктивное число ЛА, которые можно изготовить на выделенные средства.

Если объем ЛИ увеличить, то возрастет гарантированное значение ВБР и эффективность группировки, однако согласно (21) при этом снизится численность

создаваемой группировки ЛА, что приведет к снижению ее эффективности. Поэтому можно определить планируемый объем ЛИ, при котором гарантированная оценка показателя эффективности группировки ЛА, создаваемой на выделенные средства, будет максимальной. Так как в соответствии с принятыми допущениями зависимость показателя  $W_1$  от объема ЛИ не учитывается, то планируемый объем ЛИ можно определить по критерию

$$\bar{W}_r = N \bar{P}_n(n, m, \gamma) = \max \text{ при } N_{\text{ф}} = \text{const}. \quad (22)$$

Численность группировки ЛА, входящая в показатель  $\bar{W}_r$ , определяется с учетом (21) по зависимости

$$N = N_{\text{ф}} - k_n - k_{\text{ли}} n - k_{\text{ки}} n_{\text{ки}} N_n. \quad (23)$$

При планировании объема испытаний удобно использовать нормированное значение показателя

$$\bar{W}_{\text{гн}} = \bar{W}_r / N_{\text{ф}} = N \bar{P}_n(n, m, \gamma) / N_{\text{ф}}. \quad (24)$$

Для определения объема ЛИ можно использовать следующий алгоритм:

1. Вычисляется и задается фиктивное число ЛА  $N_{\text{ф}} = C_{\text{опр}}/C_1$ , которые можно изготовить на выделенные средства.
2. На основе технико-экономического анализа определяются и задаются исходные данные  $Q_n, n_{\text{ки}}, k_{\text{ли}}, k_{\text{ки}}, k_n$ .
3. С привлечением ЛПР задается доверительная вероятность  $\gamma$  и ожидаемое число случайных отказов  $m$ .
4. Последовательно выбираются значения возможного числа испытаний  $n_i, i=1, \dots, K$ .
5. По зависимостям (8)–(11) при значениях  $n_i, m$  и  $\gamma$  вычисляется оценка нижней доверительной границы для ВБР  $\bar{P}_{ni}$ .
6. На основе зависимостей (16) и (23) методом последовательных сближений определяется необходимое число партий изготовления ЛА и возможная численность группировки ЛА  $N_i$  при числе ЛИ  $n_i$ . При первом сближении число партий можно принять равным  $N_n = 0$ .
7. Вычисляется показатель  $\bar{W}_{\text{гн}i}$  по зависимости (24).
8. Повторяются вычисления по пп. 4–7 для выбранных значений числа испытаний  $n_i, i=1, \dots, K$ .
9. Строится график зависимости показателя  $\bar{W}_{\text{гн}}$  от числа испытаний  $n$  на основе значений  $n_i$  и  $\bar{W}_{\text{гн}i}$ .
10. На основе анализа зависимости  $\bar{W}_{\text{гн}}(n)$  выбирается рациональное число испытаний ЛА при предполагаемом числе случайных отказов  $m$ .
11. По п. 6 определяется численность группировки ЛА  $N$ , соответствующая рациональному числу испытаний ЛА.
12. Можно повторить вычисления по пп. 4–11 при другом значении предполагаемого числа случайных отказов  $m$ .
13. Окончательный выбор рационального числа испытаний ЛА и определение получаемой при этом численности

ности группировки ЛА осуществляется ЛПР с учетом вероятности получения случайных отказов  $m$  при испытаниях.

*Пример 2.* Предполагается создание группировки ЛА одноразового применения при выделенных средствах, которые позволяют создать число ЛА  $N_{\phi} = 60$ . Необходимо определить рациональный объем летных испытаний ЛА и получаемую при этом численность группировки ЛА при следующих данных:  $Q_{\pi} = 10, n_{\text{кн}} = 1, k_{\text{дн}} = 1, k_{\text{кн}} = 1, k_{\pi} = 2, \gamma = 0,9, m = 0$ .

Результаты вычислений оценок показателей по изложенному выше алгоритму при некоторых значениях предполагаемого числа испытаний приведены в табл. 5.

Зависимость реализаций оценок показателя эффективности  $\hat{W}_{\text{гн}}$  от числа ЛИ при  $N_{\phi} = 60$ , построенная на основе данных табл. 5, а также зависимости при других значениях  $N_{\phi}$ , полученные по изложенному выше алгоритму, показаны на рис. 3.

Аналогично можно построить зависимости оценок показателя  $\bar{w}_{\text{гн}}(n)$  при других исходных данных и при

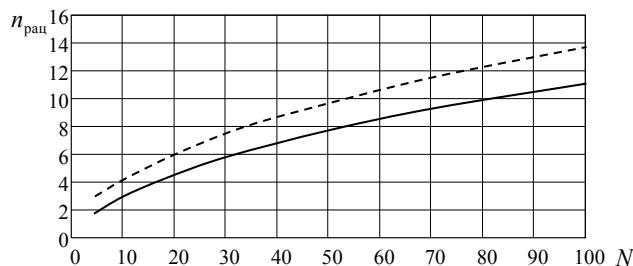


Рис. 4. Зависимости рационального числа летных испытаний от численности группировки ЛА по показателю ЛА при ограниченных затратах:

$Q_{\pi} = 10, n_{\text{кн}} = 1, k_{\text{дн}} = 1, k_{\text{кн}} = 1, k_{\pi} = 2, \gamma = 0,9$  и вариациях предполагаемого числа случайных отказов  $m$ :  
 —  $m = 0$ ; - - - - -  $m = 1$

Из рис. 4 видно, что при планировании объема испытаний ЛА при ограниченных затратах рациональное число ЛИ ЛА возрастает с ростом численности создаваемой группировки ЛА и с увеличением предполагаемого числа случайных отказов ЛА при ЛИ. При малой численности группировки рациональное число ЛИ может снижаться до  $n_{\text{рац}} = 2-4$ .

Таблица 5

**Результаты вычислений оценок показателя**

$n_i$	$\hat{P}_{ni}$	$N_{\pi i}$	$N_i$	$\hat{W}_{\text{гн}i} = \hat{W}_{\text{г}} / N_{\phi}$
2	0,464	6	50	0,387
4	0,631	6	48	0,505
7	0,750	5	46	0,575
10	0,811	5	43	0,581
15	0,866	5	38	0,548
20	0,896	4	34	0,508
25	0,915	4	29	0,442

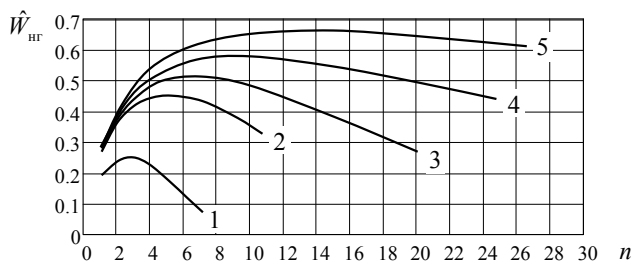


Рис. 3. Зависимости реализаций оценок показателя от числа безотказных испытаний при

$Q_{\pi} = 10, n_{\text{кн}} = 1, k_{\text{дн}} = 1, k_{\text{кн}} = 1, k_{\pi} = 2, \gamma = 0,9$  и вариациях фиктивного числа ЛА  $N_{\phi}$ :  
 1-  $N_{\phi} = 10$ ; 2-  $N_{\phi} = 20$ ; 3-  $N_{\phi} = 30$ ; 4-  $N_{\phi} = 60$ ; 5-  $N_{\phi} = 110$

в другом предполагаемом числе случайных отказов. На основе полученных результатов можно определить рациональное число испытаний ЛА и соответствующую численность группировки ЛА, которую можно создать при выделенных затратах. Зависимости рационального числа испытаний от возможной численности группировки ЛА, полученные в результате вычислений при тех же исходных данных, как в примере 2, и при предполагаемом числе случайных отказов  $m = 0$  и  $m = 1$ , показаны на рис.4.

**7. Рекомендации по планированию объема испытаний ЛА на безотказность**

Сравнение результатов исследований, изложенных в пп. 5 и 6, показывает, что рассмотренные методы планирования числа испытаний ЛА на безотказность приводят к одинаковому характеру зависимостей рационального объема ЛИ от численности создаваемой группировки ЛА и предполагаемого числа случайных отказов ЛА при испытаниях, см. рис. 2 и 4. Из рисунков также видно, что при ограниченных затратах на создание группировки ЛА рациональное число испытаний ЛА несколько ниже, нежели получаемых на основе метода «эффективность – затраты».

Выбор метода планирования объема летных испытаний ЛА и предполагаемого числа случайных отказов ЛА при испытаниях производится с участием ЛПР. Для повышения объективности принимаемого решения целесообразно использовать различные методы и критерии оптимизации и выбирать «осредненные» значения



рационального числа испытаний ЛА на безотказность. При этом можно учесть вероятности возможного числа случайных отказов, вычисляемые по формуле (7) при предположении, что ВБР ЛА соответствует требуемой.

В зависимости от предполагаемого числа случайных отказов при планировании можно выбрать оптимистический или пессимистический вариант объема испытаний ЛА на безотказность. Рассмотрим это на примере.

*Пример 3.* Необходимо провести планирование объема летных испытаний ЛА при исходных данных, соответствующих примеру 1. Предполагается, что ЛА имеет требуемую ВБР  $P_{\text{тр}} = 0,95$ .

В соответствии с результатами расчетов, полученных в примере 1, можно определить 2 варианта рационального числа ЛИ:

- вариант 1 при предположении  $m = 0$ :  $n_{\text{рац}} = 9$ ;
- вариант 2 при предположении  $m = 1$ :  $n_{\text{рац}} = 12$ .

Первый вариант плана при  $n_{\text{рац}} = 9$  является оптимистическим. Вероятность его реализации соответствует вероятности безотказных испытаний, которая согласно зависимости (7) равна

$$\text{Вер}(m = 0) = 0,95^9 = 0,63.$$

Второй вариант плана при  $n_{\text{рац}} = 12$  является пессимистическим. Вероятность его реализации соответ-

ствует вероятности получения при испытаниях не более одного случайного отказа, которая согласно зависимости (7) равна:

$$\text{Вер}(m = 0) = 0,95^{12} = 0,54.$$

$$\text{Вер}(m = 1) = 12 \cdot 0,95^{11} (1 - 0,95) = 0,34.$$

$$\text{Вер}(m \leq 1) = 0,54 + 0,34 = 0,88.$$

Заметим, что приведенные результаты получены только для случайных отказов. Отказы из-за возможных дефектов не учитываются, так как при эффективных доработках при их устранении они не влияют на оценку ВБР ЛА, достигаемую к окончанию ЛИ [1].

Если принять первый вариант плана, то с вероятностью 0,37 при ЛИ может произойти хотя бы один случайный отказ ЛА и потребуются увеличить число испытаний. Если принять второй вариант плана, то с вероятностью 0,63 первые девять испытаний могут оказаться безотказными, так что при  $n = 9$  испытания ЛА на безотказность можно прекратить.

Изложенные методы планирования объема испытаний ЛА на безотказность позволяют определить рациональное число ЛИ в зависимости от совокупности создаваемой группировки ЛА и обеспечить максимальную эффективность группировки при ограниченных затратах на ее создание.

#### Литература

1. Волков Л. И., Лукин В. Л., Сухорученков Б. И. Методы статистического контроля надежности технических систем. Юбилейный: ЗАО «ПСТМ», 2008. 332 с.
2. ГОСТ 211697-87. Комплексы наземные. Основные положения по обеспечению и контролю надежности. М., 1987. 44 с.
3. ГОСТ 21259-89. Системы и комплексы космические. Порядок задания требований, оценки и контроля надежности. М., 1989. 60 с.
4. Подиновский В. В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях. М.: МО, 1981. 212 с.

Материал поступил в редакцию 16. 01. 2010 г.