В.Г.Найденов, доктор технических наук,
старший научный сотрудник
К.А.Крупский
А.В.Бочкарев

# Методический подход к оценке потребного количества натурных экспериментов при проведении испытаний сложных образцов вооружения, военной и специальной техники

*В статье авторами предложен новый методический подход к оценке потребного количества натурных экспериментов при проведении испытаний сложных образцов ВВСТ. Предлагаемый подход позволяет определить такое количество натурных экспериментов, которое будет достаточно для оценки (калибровки) с требуемой точностью параметров имитационных моделей испытываемых систем вооружения. Оценка факта достаточности количества проводимых с испытываемым образцом натурных экспериментов устанавливается путем проверки выполнения статистической гипотезы, свидетельствующей о равенстве математических ожиданий случайных величин оценок тактико-технических характеристик образца вооружения, полученных по результатам натурных и имитационных экспериментов.*

В процессе полигонных испытаний сложных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) проводятся натурные эксперименты, по результатам которых оцениваются тактико-технические характеристики (ТТХ) испытываемых образцов.

Натурные испытания образцов ВВСТ представляют собой наилучший способ получения искомых оценок ТТХ и показателей боевой эффективности рассматриваемых образцов, так как в процессе их проведения могут быть получены наиболее объективные статистические данные при воздействии внешней среды, адекватном условиям боевого применения испытываемых образцов вооружения.

Однако в практике полигонных испытаний возможности проведения большого количества натурных экспериментов в процессе испытаний сложных образцов ВВСТ существенно ограничены. Это связано с тем, что для натурных испытаний сложных образцов вооружения необходимы большие затраты времени и материальных ресурсов.

В связи с этим в практике полигонных испытаний используется опытно-теоретический метод испытаний сложных систем вооружения.

При реализации опытно-теоретического метода испытаний сложных систем вооружения, как правило, применяется имитационное моделирование, заключающееся в имитации на ЭВМ процессов функционирования таких систем или отдельных их частей и элементов, а также имитации внешних факторов, воздействующих на испытываемую систему.

В общем случае алгоритм имитации функционирования $i$-й части сложной системы вооружения может быть записан с помощью операторного уравнения вида [1]:

$$S_i(t)=\psi_i\left\{t,t_0,S_i(t_0),\left(t,\boldsymbol{X}_{L_i}\Big|_{t_0}^{t}\right)\right\},$$

где $S_i(t)$ – текущее состояние $i$-й части сложной системы вооружения;

$S_i(t_0)$ – начальное состояние $i$-й подсистемы;

$\left(t,\boldsymbol{X}_{L_i}\Big|_{t_0}^{t}\right)$ – входное сообщение для $i$-й подсистемы, которое определяется совокупностью упорядоченных пар $\left(t,\boldsymbol{X}_{L_i}\right)$ для всех $t\in T$, где $T$ – множество моментов времени, в которых рассматривается функционирование $i$-й подсистемы;

$L$ – $n$-мерное пространство, в котором определена совокупность всех функций $\boldsymbol{X}_{L_i}$.

При использовании в процессе испытаний образцов вооружения опытно-теоретического метода в составе имитационных моделей имеются расчетные части, которые позволяют по результатам проведенного имитационного моделирования с использованием соответствующих математических соотношений оценивать те или иные тактико-технические характеристики испытываемых образцов вооружения. В этом случае результаты имитационного моделирования позволяют сформировать вектор $B$ входных параметров для расчетных моделей, которые далее и используются в процессе оценивания искомых ТТХ испытываемых образцов ВВСТ.

Однако для обеспечения адекватности разрабатываемых расчетных моделей необходимо провести корректировку (калибровку) ряда параметров этих моделей с использованием результатов проведенных соответствующих натурных испытаний [1, 2].

В связи с этим в настоящее время приобрела актуальность задача обоснования оптимального соотношения между объемами проведения натурных и имитационных экспериментов при проведении полигонных испытаний сложных систем вооружения.

В научно-технической литературе проблеме оптимального сочетания рассматриваемых двух видов испытательных экспериментов при отработке образцов ВВСТ уделено очень ограниченное внимание.

Так, в работах [1, 2, 3] рассмотрен упрощенный подход к оптимальному сочетанию натурных и имитационных экспериментов с точки зрения минимизации дисперсии погрешности взвешенной совместной обработки результатов рассматриваемых видов испытательных экспериментов при ограничениях, накладываемых на стоимость их проведения.

Однако в практике полигонных испытаний образцов ВВСТ оценка их тактико-технических характеристик, как правило, не проводится путем усреднения результатов натурных и имитационных экспериментов. Поэтому данный подход является очень упрощенным и, конечно, не получил дальнейшего развития.

В работе [4] приведен подход к определению рационального соотношения между количеством летных и наземных экспериментов для испытаний авиационной техники при условии достижения максимальной эффективности проведения таких испытаний. Однако этот подход не рассматривает в явном виде задачу оценки требуемого количества проводимых натурных и имитационных экспериментов при испытаниях сложных образцов вооружения.

В данной статье предлагается иной подход к определению требуемого соотношения натурных и имитационных экспериментов при испытаниях образцов ВВСТ, позволяющих получить достоверные оценки их ТТХ при реализации опытно-теоретического метода испытаний таких образцов.

Задача исследования формулируется следующим образом.

Требуется определить такое количество натурных экспериментов, по результатам которых можно откалибровать с требуемой точностью параметры имитационных моделей, что позволит оценить с высокой достоверностью ТТХ испытываемых образцов вооружения.

Предположим, что в процессе проведения на полигоне испытаний конкретной системы вооружения оценивается $M$-мерный вектор ее тактико-технических характеристик $\boldsymbol{\Theta}=[\Theta_1,\ldots,\Theta_m,\ldots,\Theta_M]$, где $m=\overline{1,M}$.

Оценка значений тактико-технических характеристик может осуществляться по результатам как натурных, так и имитационных экспериментов. На основании натурных экспериментов можно провести оценку (калибровку) с высокой точностью и достоверностью параметров расчетных моделей, описывающих алгоритмы оценки этих ТТХ. При этом считается, что результаты натурных испытаний имеют приоритет и в случае достаточного объема статистического материала по ним можно получить оценки ТТХ испытываемой системы вооружения с требуемой точностью и достоверностью.

Будем считать, что проводится серия $N_{нат.m}$ $\left(n_{нат.m}=\overline{1,N_{нат.m}}\right)$ натурных экспериментов и серия $N_{имит.m}$ $\left(n_{имит.m}=\overline{1,N_{имит.m}}\right)$ имитационных экспериментов, по результатам которых проводится оценка *m*-й тактико-технической характеристики испытываемой системы вооружения.

Полагаем, что при оценке *m*-й характеристики испытываемого образца используется расчетная модель, которая описывает алгоритм ее вычисления и, в общем виде, может быть записана в следующем виде:

$$\Theta_m\left(N_{имит.m}\right)=G\left(\boldsymbol{A_m},\boldsymbol{B_m},N_{имит.m}\right),$$

где $\boldsymbol{A_m}=\left(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km}\right)$ – вектор калибруемых параметров *m*-й расчетной модели, по которой рассчитывается значение характеристики $\Theta_m$ испытываемой системы вооружения;

$\boldsymbol{B_m}=\left(b_{1m},\ldots,b_{lm},\ldots,b_{Lm}\right)$ – вектор входных параметров для *m*-й расчетной модели, позволяющей оценить характеристику $\Theta_m$ испытываемой системы вооружения;

$n_{имит.m}$ – текущий номер имитационного эксперимента, проводимого с использованием имитационной модели опытного образца вооружения $\left(n_{имит.m}=\overline{1,N_{имит.m}}\right)$.

Будем считать, что оценка *m*-й характеристики образца вооружения $\left(\hat{\Theta}_m\right)$ имеет следующую структуру:

$$\hat{\Theta}_m=\Theta_{m.ист}+\xi\left(\Theta_m\right),$$

где $\Theta_{m.ист}$ – истинное значение *m*-й оцениваемой характеристики образца вооружения;

$\xi\left(\Theta_m\right)$ – случайная составляющая оценки *m*-й характеристики образца вооружения, распределенная по нормальному закону.

Оценка (калибровка) параметров *m*-й расчетной модели может быть проведена с использованием метода наименьших квадратов при определенном уже по результатам имитационного моделирования векторе входных параметров $\boldsymbol{B_m}=\left(b_{1m},\ldots,b_{lm},\ldots,b_{Lm}\right)$. При этом строится функционал следующего вида [5, 6]:

$$F\left(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\boldsymbol{\hat{B}_m}\right)=\sum_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left\{\Theta_{m\left(n_{нат.}\right)}-G\left(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\boldsymbol{\hat{B}_m},n_{n_{нат.}}\right)\right\}^2. \qquad (1)$$

Задача оценки значения вектора параметров $\boldsymbol{A_m}=\left[a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km}\right]$ расчетной модели сводится к нахождению такого значения этого вектора, при котором наблюдается минимум функционала (1), т. е.

$$A_m(opt)=\underset{A_m\in\psi_{A_m}}{Argmin}\,F\left(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\boldsymbol{\hat{B}_m}\right)=$$
$$=\underset{A_m\in\psi_{A_m}}{Argmin}\sum_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left\{\Theta_{m\left(n_{нат.}\right)}-G\left(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\boldsymbol{\hat{B}_m},n_{n_{нат.}}\right)\right\}^2, \qquad (2)$$

где $\psi_{A_m}$ – область изменения значений вектора $\boldsymbol{A_m}$.

Необходимо отметить, что значения оценки вектора $\boldsymbol{\hat{B}_m}$ в разных имитационных экспериментах будут различными. Это связано с наличием в имитационных моделях образцов ВВСТ и их составных частей различных датчиков случайных чисел, которые будут выдавать в каждом эксперименте различные значения случайных величин. В этом случае решение задачи (2) существует, и эта задача будет иметь единственное решение.

В случае, когда выражение, описывающее используемую для оценки *m*-й характеристики образца ВВСТ расчетную модель, является дифференцируемым, то для решения задачи (2) вначале составляется, а затем решается система, как правило, нелинейных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}})}{\partial a_{1m}}=0 \\ \dfrac{\partial F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}})}{\partial a_{km}}=0 \\ \dfrac{\partial F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}})}{\partial a_{Km}}=0 \end{cases}. \qquad (3)$$

Решение системы уравнений (3) может быть затруднено, поскольку функционал $F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km})$ может быть не дифференцируемым или трудно дифференцируемым. В этом случае для решения задачи (2) целесообразно использовать численные методы. Поскольку задача (2) является безусловной задачей математического программирования, то для ее решения целесообразно использовать, например, метод деформируемого многогранника [7].

Суть метода деформируемого многогранника заключается в формировании по начальному значению вектора $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}.(\boldsymbol{нач}.)}$ первичного регулярного симплекса в $K_m$-мерном пространстве. Затем проводится вычисление значения функционала (1) в точках сформированного симплекса и в центре его «тяжести». Далее исключается точка симплекса, где функционал имеет максимальное значение и строится «отраженный» симплекс. Используя в дальнейших итерациях процедуры растяжения и сжатия симплекса и исключения вершин симплексов, где функционал имеет максимальное значение, реализуется процесс продвижения этого симплекса к точке, где функционал имеет минимальное значение. Поиск минимума функционала заканчивается, когда срабатывает принятое решающее правило.

В случае, если оценки $m$-й тактико-технической характеристики $\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})}$ в различных натурных экспериментах имеют неодинаковую точность и при этом известны дисперсии погрешностей этих оценок $\sigma_{\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})}}$, где $\left(n_{нат.}=\overline{1,N_{нат.}}\right)$, то для получения вектора параметров $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}}=(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km})$ $m$-й расчетной модели необходимо применить метод максимального правдоподобия [8]. Функция правдоподобия будет иметь следующий вид:

$$F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}},\sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=1},\ldots,\sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=N_{нат.}})=\frac{1}{\prod\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}(\sigma_{n_{нат.}}\sqrt{2\pi})}\times$$

$$\times\exp-\left(\frac{\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left\{\Theta_{m(n_{нат.})}-G(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_m,n_{n_{нат.}})\right\}^2}{2\sigma_{n_{нат.}}^2}\right).$$

Тогда логарифмическая функция правдоподобия может быть записана в следующем виде:

$$F(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}},\sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=1},\ldots,\sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=N_{нат.}})=-\sum_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\ln(\sigma_{n_{нат.}})-$$

$$-\frac{N_{нат.}}{2}\ln(2+\pi)-\frac{\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left\{\Theta_{m(n_{нат.})}-G(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km},\hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}},n_{n_{нат.}})\right\}^2}{2\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\sigma_{n_{нат.}}^2}. \qquad (4)$$

В этом случае задача оценки значения вектора параметров $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}}=(a_{1m},\ldots,a_{km},\ldots,a_{Km})$ расчетной математической модели сводится к нахождению такого значения этого вектора, при котором наблюдается минимум данного функционала. Поскольку два первых слагаемых выражения (4) не зависят от вектора $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}}$, то задача нахождения оптимального значения этого вектора запишется в следующем виде:

$$\boldsymbol{A}_{opt} = \underset{A_m \in \psi_{A_m}}{Argmin}\, L\left(a_{1m}, \ldots, a_{km}, \ldots, a_{Km}, \hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}}, \sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=1}, \ldots, \sigma_{\hat{\Theta}_m(n_{нат.})=N_{нат.}}\right) =$$
$$= \underset{A_m \in \psi_{A_m}}{Argmin}\left\{\frac{\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left\{\Theta_{m(n_{нат.})} - G\left(a_{1m}, \ldots, a_{km}, \ldots, a_{Km}, \hat{\boldsymbol{B}}_{\boldsymbol{m}}, n_{n_{нат.}}\right)\right\}^2}{2\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}} \sigma^2_{n_{нат.}}}\right\}. \qquad (5)$$

Задача (5) является достаточно сложной и, как правило, должна решаться с использованием описанного выше численного метода деформируемого многогранника.

Очевидно, что для повышения достоверности оценок искомых тактико-технических характеристик испытываемого образца вооружения количество проведенных натурных экспериментов должно увеличиваться, т. е. расширяться объем получаемой натурной статистической информации. В этом случае будет увеличиваться и достоверность оцениваемого вектора $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}}$.

Для определения достаточного количества проводимых натурных экспериментов с целью оценки (калибровки) параметров расчетной модели, позволяющей оценить характеристику $\Theta_m$ испытываемой системы вооружения с требуемой точностью, необходимо проверить статистическую совместимость результатов натурных и имитационных экспериментов, т. е. проверить выполнение гипотезы $H_{0(m)}: M\left(\boldsymbol{\Theta}_{\boldsymbol{m}(\widehat{нат.})}\right) = M\left(\boldsymbol{\Theta}_{\boldsymbol{m}(\widehat{имит.})}\right)$, свидетельствующей о равенстве математических ожиданий случайных величин оценок $m$-й ТТХ образца вооружения, полученных по результатам натурных и имитационных экспериментов. Такая проверка должна проводиться итерационно по мере увеличения количества проводимых таких экспериментов.

С этой целью возможно применить $t$-критерий Стьюдента [9, 10], предусматривающий сравнение выборок искомой характеристики системы вооружения $\Theta_m$ по средним значениям оцененной этой характеристики, полученных по результатам натурных экспериментов $\hat{\hat{\Theta}}_{m(нат.)}$ и по результатам проведенных имитационных экспериментов $\hat{\hat{\Theta}}_{m(имит.)}$.

В случае независимых выборок определяется экспериментальное значение статистики по $t$-критерию $\left(t_{эксп.}\right)$ и сравнивается с теоретическим (табличным) значением $t$-критерия $\left(t_{табл.}\right)$, определяемого из таблиц по значению степеней свободы ($p$), вычисляемой по формуле $p = N_{нат.} + N_{имит.} - 2$ или $p = 2N_{нат.} - 2$ в случае, когда $N_{нат.} = N_{имит.}$.

Экспериментальное значение статистики по $t$-критерию $\left(t_{эксп.}\right)$ определяется из следующего выражения:

$$t_{эксп.} = \frac{\left(\hat{\hat{\Theta}}_{m(нат.)} - \hat{\hat{\Theta}}_{m(имит.)}\right)}{\sigma_{выб.}} = \frac{\left(\frac{1}{N_{нат.}}\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})} - \frac{1}{N_{имит.}}\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\hat{\Theta}_{m(имит.)}\right)}{\sigma_{выб.}},$$

где $\sigma^2_{выб.}$ – выборочное значение дисперсии, которое при $N_{нат.} = N_{имит.}$ находится из выражения:

$$\sigma^2_{выб.} = \frac{\left(\sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left(\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})} - \hat{\hat{\Theta}}_{m(нат.)}\right)^2 - \sum\limits_{n_{нат.}=1}^{N_{нат.}}\left(\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})} - \hat{\hat{\Theta}}_{m(нат.)}\right)^2\right)}{\left(N_{нат.} - 1\right)N_{нат.}}.$$

Тогда в случае, если $t_{эксп.} < t_{табл.}$, принимается гипотеза $H_0(m)$, состоящая в том, что количество проведенных натурных экспериментов $N_{нат.}$ является достаточным для оценки вектора параметров $\boldsymbol{A_m} = (a_{1m}, \ldots, a_{km}, \ldots, a_{Km})$ расчетной модели, по которой оценивается характеристика $\Theta_m$ испытываемой системы вооружения.

Поскольку в процессе полигонных испытаний конкретной системы вооружения оценивается, как правило, не одна тактико-техническая характеристика, а, в общем случае, *M* характеристик, то минимально потребное количество натурных экспериментов $(N_{нат.(потр.)})$, проводимых с образцом вооружения, будет определяться следующим образом:

$$(N_{нат.(потр.)}) = max\{N_{нат.(m=1)}, \ldots, N_{нат.(m=i)}, \ldots, N_{нат.(m=M)}\}. \qquad (6)$$

Из выражения (6) можно сделать вывод, что минимально потребное количество натурных экспериментов $(N_{нат.(потр.)})$, необходимых для обеспечения испытания конкретного образца вооружения с высокой степенью достоверности, определяется максимальным количеством натурных экспериментов, требуемых для обеспечения достоверной оценки каждой тактико-технической характеристики данного образца вооружения.

На рисунке 1 приведен алгоритм, поясняющий методический подход к оценке минимально потребного количества натурных экспериментов при проведении испытаний сложных образцов вооружения.

Так, в блоке 1 алгоритма проводится ввод исходных данных, к числу которых относятся структуры расчетных моделей оценки ТТХ испытываемых образцов вооружения, количество и виды калибруемых параметров моделей.

Далее блоки 4...7 предполагают последовательное проведение минимального числа натурных экспериментов с использованием испытываемого образца и по их результатам получение оценок тактико-технических характеристик этого образца вооружения. Исходя из практики полигонных испытаний, как правило, минимальное количество таких натурных экспериментов составляет не менее трех. Кроме того, проводится такое же количество экспериментов с применением имитационных математических моделей испытываемого образца с целью оценки входных параметров расчетных моделей.

Затем в блоках 6...10 проводится последовательное построение и решение функционалов, описываемых выражениями (2) или (3), для всех исследуемых ТТХ с целью оценки параметров расчетных моделей для испытываемого образца вооружения.

Блоки 11...18 предполагают проведение минимально необходимого объема полного имитационного эксперимента при уже найденных значениях векторов $\boldsymbol{\hat{A}_m}$ и $\boldsymbol{\hat{B}_m}$ с целью оценки вектора ТТХ испытываемого образца вооружения $(\boldsymbol{\hat{\Theta}})$. Кроме того, по оцененным значениям тактико-технических характеристик $\hat{\Theta}_{m(n_{нат.})}$ и $\hat{\Theta}_{m(n_{имит.})}$ при $(N_{нат.} = N_{имит.})$ для всех математических моделей M составляются *t*-статистики.

В блоках 19...22 проводится последовательная проверка выполнения гипотезы $H_{0(m)}$ для $\forall m$, свидетельствующая о совместимости статистических данных об оценках всех тактико-технических характеристик образца ВВСТ, полученных по результатам натурных испытаний и имитационного моделирования.

В случае, если гипотеза $H_{0(m)}$ выполняется для всех оцениваемых ТТХ (блок 24), то в блоке 25 по формуле (6) вычисляется минимально потребное количество натурных экспериментов $(N_{нат.(потр.)})$, которые должны проводиться с образцом вооружения. В случае, если гипотеза $H_{0(m)}$ не проводиться с образцом вооружения.

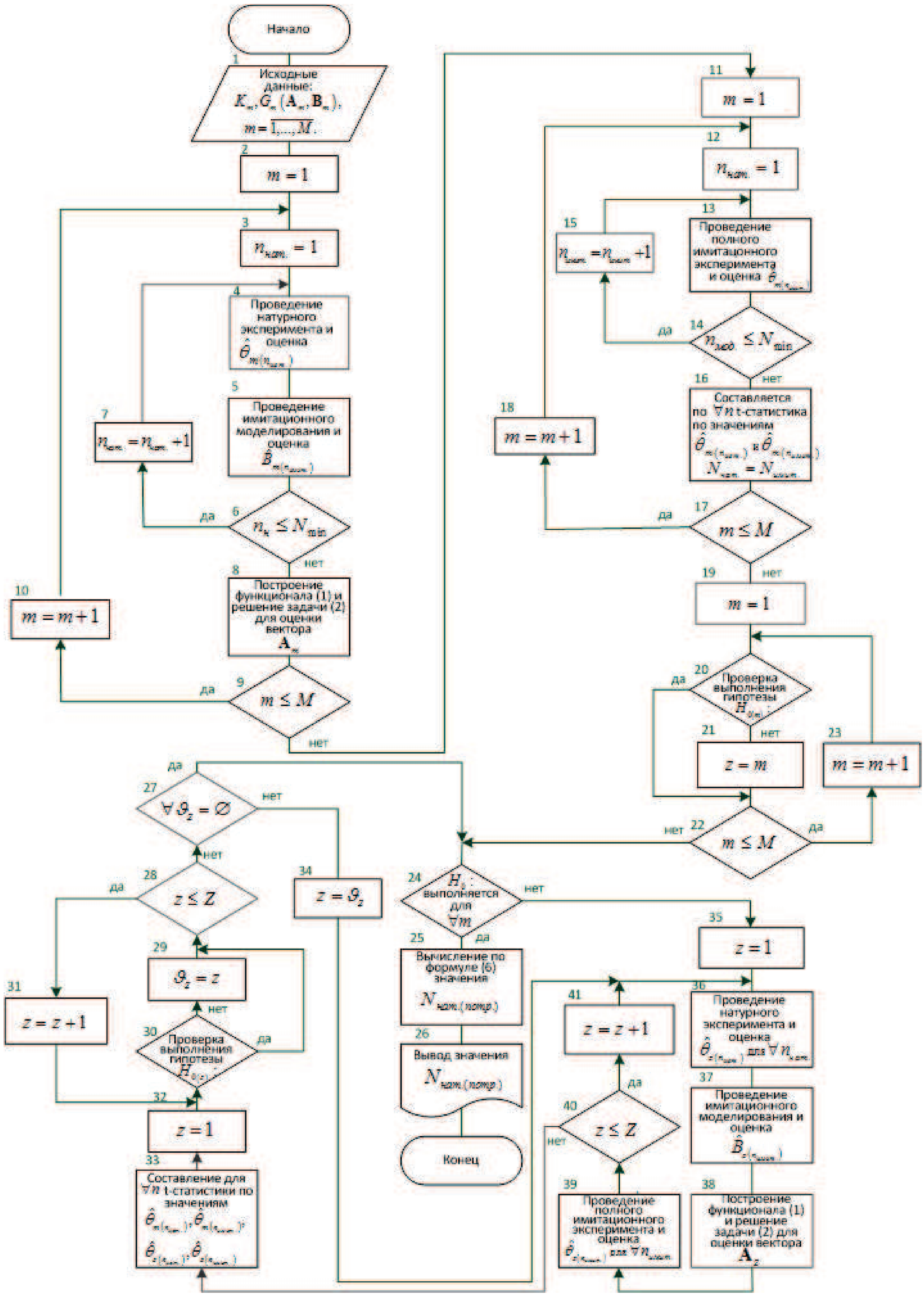


Рисунок 1 – Обобщенный алгоритм, поясняющий методический подход к оценке потребного количества проводимых натурных экспериментов

В случае, если гипотеза $H_{0(m)}$ не выполняется для всех оцениваемых ТТХ, то необходимо проведение дополнительных натурных экспериментов (блок 36) с целью расширения статистического материала, используемого для калибровки параметров $Z$ расчетных моделей испытываемого образца ВВСТ, по которым не было достигнуто выполнение гипотезы $H_{0(z)}$. При этом параллельно натурным экспериментам проводится такое же количество экспериментов с применением имитационных моделей испытываемого образца с целью оценки параметров расчетных моделей (блок 37).

Далее в блоке 38 проводится оценка вектора параметров $\boldsymbol{A}_z$ расчетных моделей для всех $z=\overline{1,Z}$, а блок 39 обозначает проведение полных имитационных экспериментов для оценки Z характеристик испытываемого образца ВВСТ.

Затем в блоке 33 для всех проведенных натурных и имитационных экспериментов проводится сбор расширенного состава статистических данных об оценках ТТХ испытываемого образца ВВСТ. В блоках 28...32 проводится последовательная проверка выполнения гипотезы $H_{0(z)}$ для $\forall z$, свидетельствующая о совместимости статистических данных для оценки всех тактико-технических характеристик образца ВВСТ, полученных по результатам натурных испытаний и имитационного моделирования.

В случае, если гипотеза $H_{0(z)}$ выполняется для всех оцениваемых ТТХ (блоки 27 и 24), то в блоке 25 по формуле (6) вычисляется минимально потребное количество натурных экспериментов $\left(N_{нат.(потр.)}\right)$, проводимых с образцом вооружения. В случае, если гипотеза $H_{0(z)}$ не выполняется хотя бы для одной из оцениваемых ТТХ, то включается ветвь алгоритма, предусматривающая проведение дополнительных натурных экспериментов с целью расширения статистического материала, используемого для калибровки параметров расчетных моделей испытываемого образца ВВСТ.

Таким образом, рассмотренный методический подход к оценке потребного количества проводимых натурных экспериментов может быть успешно применен в процессе реализации опытно-теоретического метода испытаний сложных образцов ВВСТ.

## Список использованных источников

1. Шаракшанэ А.С. и др. Сложные системы. – М.: «Высшая школа», 1977.

2. Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г. Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974.

3. Буренок В.М., Найденов В.Г. Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний вооружения, военной и специальной техники. – М.: Издательский дом «Граница», 2006.

4. Кринецкий Е.И. и др. Основы испытаний летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989.

5. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Издательство «Наука», 1967.

6. ГОСТ Р 50.2.004-2000 ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование, – М.: Мир, 1975.

8. Мудров В.И., Кушко В.Л. Метод наименьших модулей. – М.: Знание, 1971.

9. Крамер Г. Математические методы статистики. – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975.

10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2007.