

## ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрена задача программно-методического обеспечения экспериментального исследования стойкости шахтных ракетных комплексов при механическом действии взрывов. Указаны характеристики, влияющие на оценку стойкости. Изложены требования и даны рекомендации по разработке методик и программ определения стойкости на различных этапах создания и отработки ракетных комплексов. Приведены основные положения экспериментально-расчетного метода исследования стойкости ракетных комплексов. В качестве критериев правильности расчетных методик определения стойкости ракетных комплексов использованы критерий среднего и критерий Фишера. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании стойкости ракетных комплексов.

Розглянуто задачу програмно-методичного забезпечення експериментального дослідження стійкості шахтних ракетних комплексів при механічній дії вибухів. Зазначено характеристики, що впливають на оцінку стійкості. Викладено вимоги й надані рекомендації з розробки методик і програм визначення стійкості на різних етапах створення й відпрацювання ракетних комплексів. Наведено основні положення експериментально-розрахункового методу дослідження стійкості ракетних комплексів. Як критерії правильності розрахункових методик визначення стійкості ракетних комплексів використано критерій середнього й критерій Фишера. Отримані результати можуть бути використані при дослідженні стійкості ракетних комплексів.

The task of the program and methodic support for experimental investigations of the silo missile complexes resistance under the explosion mechanical impact is examined. Characteristics influencing on the resistance evaluation are specified. Requirements are issued, and recommendations for the development of methods and programs to define resistance at different stages of the missile complexes creation and improvement are made. Main statements of an experimental and analytical method for investigating the rocket complexes resistance are presented. As validity criteria for the computation methods of the missile complexes resistance determination, the Fisher criterion and the average criterion are used. The results derived can be used in research of the missile complexes resistance.

Механическое действие взрыва является основным поражающим фактором, определяющим технический облик, состав и габариты шахтных ракетных комплексов (ШРК). Стойкость и работоспособность шахтной пусковой установки (ШПУ) и ракеты при механическом воздействии взрыва зависят, с одной стороны, от структуры воздействия, сейсмогеологических условий расположения ШПУ, размещаемого оборудования и систем РК. С другой стороны, стойкость ШРК определяется динамическими и кинематическими характеристиками ШПУ, ракеты, отдельных подсистем ШПУ, зазорами системы амортизации (СА), массовыми и инерционными характеристиками отдельных систем ШРК, их взаимным расположением в шахте, при этом функционирование всех подсистем ШРК подчинено одной задаче: обеспечить требуемую живучесть комплекса в целом [1].

Задачей оценки стойкости к воздействию взрыва является определение способности выполнять комплексом и его элементами заданные функции, при этом стойкость комплекса или его элементов характеризуется способностью сохранять в установленных пределах свою работоспособность во время и после механического воздействия взрыва.

По каждому определяющему параметру записывается условие его работоспособности:

$$F_k = Z_{kr} - Z_{kn} < 0, \quad (1)$$

где  $Z_{kr}$  – экспериментальное или расчетное значение К-го определяющего параметра;  $Z_{kn}$  – предельно допустимое значение К-го определяющего параметра.

© А.А. Василенко, А.В. Дегтярев, П.Г. Капля, В.М. Федоров, 2009

Техн. механика. – 2009. – № 1.

Требуемая стойкость систем и агрегатов считается обеспеченной, если по всем определяющим параметрам выполняются условия (1) и считается необеспеченной, если хотя бы по одному определяющему параметру оно не выполняется.

Соответствие количественных показателей стойкости составных частей, систем и элементов РК должно быть подтверждено расчетами при проектировании и, как правило, проверено экспериментально.

Объем и условия проведения экспериментальных проверок устанавливаются по согласованию между заказчиком и разработчиком. Испытания должны проводиться в соответствии с комплексным планом экспериментальной отработки и включать работы, направленные на исследование параметров, условий и режимов работы, проверки совместного функционирования составных частей, агрегатов и узлов их технических и эксплуатационных характеристик в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, и установление их соответствия заданным величинам.

В ходе испытаний должны быть решены следующие задачи:

- оценка правильности выбора основных конструктивных и схемных решений;
- подтверждение работоспособности в заданных условиях эксплуатации всех составных частей комплекса в процессе их совместного функционирования;
- подтверждение работоспособности ракеты, ее систем и агрегатов в условиях воздействия и определение характеристик фактической стойкости;
- получение опытных данных для определения направлений дальнейшего совершенствования комплекса.

Испытания должны проводиться на опытных образцах ракетных комплексов, оснащенных специальными системами измерений.

На все виды испытаний должны разрабатываться программы испытаний. Содержание программ испытаний должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Исследования по оценке стойкости предусматривают разработку расчетных и экспериментальных методик и методических положений. Процесс оценки стойкости комплекса к механическому воздействию является многоэтапной процедурой, которую можно представить в виде структурной схемы:

- анализ и уточнение условий, в которых объект должен выполнять свои функции;
- анализ и конкретизация требований по уровням воздействий;
- определение критериев работоспособности и показателей стойкости в условиях воздействия;
- экспериментальная проверка стойкости критичных узлов в автономных испытаниях;
- экспериментальное подтверждение стойкости комплекса в целом при комплексных испытаниях в условиях действия нагрузок, максимально приближенных к натурному воздействию;
- расчетно-экспериментальная оценка стойкости комплекса с использованием результатов автономных и комплексных испытаний;
- проведение заключительной оценки стойкости объекта с привлечением всего объема имеющихся теоретических и экспериментальных данных.

Теоретические и экспериментальные работы проводятся по следующим основным направлениям:

- теоретические исследования и разработка методик расчета и выбора рациональных параметров систем стойкости элементов РК при механическом действии взрывов;

- теоретические и экспериментальные исследования для обеспечения разработки методик испытаний объектов и оборудования;

- разработка опытных образцов испытательных стендов.

Направление этих исследований заключается в следующем:

- разработка специальных алгоритмов расчета параметров механического воздействия и их представление в форме, удобной для исследования стойкости элементов РК;

- анализ амплитудно-частотного характера механического воздействия и выделение его качественных и количественных характеристик;

- исследование методов имитации механического воздействия при стендовых испытаниях элементов РК и выбор легко реализуемых на стендах воздействий, эквивалентных по своему динамическому нагружению объектов натурному механическому воздействию;

- выявление и определение этапов экспериментальной отработки РК; обоснование последовательности и очередности отработки объектов РК.

Выбор испытательного воздействия заключается в определении натуральных воздействий, соответствующих наиболее неблагоприятным для данного РК, с целью последующего упрощения этих воздействий для возможности их реализации.

В зависимости от объекта и целей испытаний задача упрощения натуральных воздействий может быть решена путем:

- нахождения типовых воздействий;

- разработки упрощенных воздействий.

С целью разработки типовых воздействий выделенные неблагоприятные воздействия группируются по основным признакам: форме, амплитудам и длительности периодов. Типовые воздействия, сохраняющие форму и характерные особенности натуральных, могут быть рекомендованы для испытания конструктивно подобных моделей и натуральных элементов РК на стендах и в крупномасштабных опытах. При этом необходимо, чтобы схема нагружения соответствовала реальной.

Для проверки стойкости реальных опытных образцов элементов РК необходимо провести испытания на всю совокупность воздействий, соответствующих натурным. Очевидно, что такие испытания могут быть проведены только на стенде с программным управлением. Помимо всесторонней и полной проверки опытного образца элемента РК, испытания на таком стенде позволили бы провести испытания и на расчетные воздействия, чего нельзя осуществить при крупномасштабных испытаниях. Кроме того, задавая на стенде более жесткие режимы испытаний, можно определить предельные возможности элементов РК.

В настоящее время испытания опытных образцов РК и их элементов проводятся с помощью крупномасштабных испытаний. Испытываемый объект размещается в экспериментальном защитном сооружении. Ввиду того, что энергия испытательных воздействий значительно меньше энергии расчетных воздействий, частотный спектр сейсмического воздействия смещен в об-

ласть более высоких частот по сравнению с натурным воздействием. Это приводит к тому, что скорости и перемещения ШПУ при крупномасштабных опытах меньше соответствующих величин для натурального воздействия, хотя ускорения сооружения могут быть равными или даже превышать натурные. Поскольку для испытания, например, систем амортизации, которые представляют собой низкочастотные системы, существенными являются именно скорости и перемещения сооружения, то с помощью крупномасштабных испытаний не всегда удастся полностью нагрузить испытываемый образец.

Особенностью испытаний опытного образца с помощью крупномасштабных опытов является также и то, что ввиду большой стоимости и сложности организации подобных опытов, эти испытания являются единичными, что в свою очередь требует иного, по сравнению с испытаниями на стендах, подхода к оценке работоспособности опытного образца. По результатам одного испытания, даже если параметры воздействия при этом будут полностью соответствовать параметрам натурального воздействия какого-либо из расчетных случаев, нельзя сделать непосредственный вывод о работоспособности системы во всех случаях. Поэтому при комплексных испытаниях опытного образца основной упор делается на проверку и уточнение методик расчета объектов. Затем по уточненной методике расчетным путем определяется ее работоспособность в условиях, соответствующих расчетным случаям.

Вопросы обеспечения и оценки требуемой стойкости объектов и их элементов к механическому воздействию должны решаться на всех стадиях их разработки и создания. В связи с этим необходим комплекс взаимосвязанных расчетных и расчетно-экспериментальных методик, позволяющих оценить стойкость объектов в целом.

Ниже изложены общие требования к структуре и содержанию методик оценки стойкости с точки зрения обеспечения единого методического подхода к их разработке.

В зависимости от стадии создания ШПК методическое обеспечение стойкости разрабатывается для трех этапов: проектирования, отработки и комплексной проверки стойкости.

Рассмотрим содержание методик этапа экспериментальной комплексной проверки оценки стойкости. Методика испытаний объекта должна предусматривать максимальное приближение комплектации, условий функционирования и объема проверок к реальным штатным условиям. Методическое обеспечение на этапе комплексной экспериментальной проверки оценки стойкости должно предусматривать разработки программ-методик проведения комплексных испытаний натурального объекта и его элементов, методики оценки результатов испытаний и методики оценки фактической стойкости ШПК в целом.

Комплексные крупномасштабные испытания проводятся по отдельным решениям и специально разрабатываемым программам-методикам и носят, как правило, зачетный характер.

Порядок и объем проведения комплексных испытаний РК на стойкость определяется специальными методиками, общими и частными, и программами испытаний элементов РК.

**Типовой состав программы комплексных испытаний** включает следующие разделы:

**1. Цели испытаний.**

Формулируются цели данного вида испытаний.

**2. Задачи испытаний.**

Приводится перечень конкретных задач, решаемых данными испытаниями, в том числе по отдельным системам, входящим в объект испытаний. Определяется перечень характеристик, которые необходимо измерить в процессе испытаний или определить по результатам испытаний.

**3. Объекты испытаний.**

Излагаются требования к образцам, поступающим на испытания. Указывается комплектность образцов; документация, по которой изготавливаются образцы; требования к системе измерений.

В случае необходимости устанавливается порядок проведения доработок образцов до начала испытаний, указываются отклонения образцов от штатного варианта и причины отклонения.

**4. Объем и методика испытаний.**

Указывается метод испытаний, условия и последовательность их проведения, количество образцов и циклов испытаний. Определяется объем статистической информации, которую необходимо получить в процессе испытаний.

**5. Организация испытаний.**

Определяется место, этапы и последовательность проведения испытаний; организации, обеспечивающие проведение испытаний; состав комиссии по проведению испытаний; порядок взаимодействия и распределение обязанностей между организациями, участвующими в испытаниях.

**6. Средства и материально-техническое обеспечение испытаний.**

Указывается состав средств испытаний, в том числе средств измерений и обработки результатов измерений, перечень ведомостей комплектации испытательного, измерительного и технологического оборудования и других материально-технических средств, порядок приемки и необходимая сопроводительная документация на оборудование.

**7. Организация измерений и обработки измерительной информации.**

Указывается порядок проведения измерений; ответственные за измерения и обработку полученной информации; основные документы, по которым проводится обработка.

**8. Документация и отчетность.**

Определяется состав и разработчики технической документации; сроки поставки документации в организацию, проверяющую испытания; порядок и сроки выпуска отчетов по результатам каждого испытания и отчета по окончании данного вида испытаний; порядок утверждения и рассылки отчетных документов и выдачи рекомендаций о возможности перехода к следующему виду испытаний.

**9. Перечень частных программ и методик.**

Приводится полный перечень частных программ и методик определения параметров, характеризующих стойкость РК. В методиках должны быть от-

ражены вопросы точности определения параметров и оценки результатов испытаний.

Поскольку методическое обеспечение на этапе комплексной проверки стойкости предусматривает разработку методик оценки результатов испытаний и оценки фактической стойкости ШРК в целом, рассмотрим основные положения экспериментально-расчетного метода, которые состоят в следующем:

1. На основании прямых экспериментальных данных испытаний делается вывод: выдерживает или выходит из строя испытываемый объект.

2. На основании анализа величин, измеренных в опыте (нагрузок и реакций систем), проверяется правильность методик расчета, принятых при проектировании.

3. При условии подтверждения правильности методик расчета расчетным путем с использованием этих методик определяется показатель стойкости объекта в принятых условиях испытаний.

4. При условии неподтверждения правильности методик расчета последние уточняются по данным испытаний. Уточненные методики расчета затем используются для расчета показателя стойкости.

Оценка правильности расчетной методики при наличии единственного результата измерений производится по критерию:

$$|\Delta_z| = |Z_{кэ} - Z_{кр}| = U_{1-\frac{p}{2}} \cdot \sqrt{D_{\Delta z}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_z$  – отклонение измеренной величины параметра от расчетной;  $Z_{кэ}, Z_{кр}$  – измеренное в опыте и рассчитанное значение параметра  $Z$ ;  $U_{1-\frac{p}{2}}$  – квантиль нормального распределения при уровне значимости  $P$ ;

$D_{\Delta z}$  – генеральная дисперсия случайной величины  $\Delta_z$ .

Величина параметра  $Z_{кр}$  рассчитывается по проверяемой расчетной методике и измерениям в реализованном в опыте воздействии.

Величина генеральной дисперсии  $D_{\Delta z}$  определяется как сумма дисперсий измерения входного параметра, выходного параметра, разброса параметров исследуемой системы и проверяемой методики. Ошибки измерений входного и выходного параметров необходимо брать из документации на примененные измерительные средства, величины разброса параметров исследуемой системы – из проектной документации системы, точность расчетных методик – из их описания.

Оценка правильности расчетной методики при наличии нескольких результатов измерений параметра производится по критерию среднего:

$$|m_{\Delta z}| \leq t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{S_{\Delta z}}{N}} \quad (3)$$

и критерию Фишера:

$$\frac{S_{\Delta z}}{D_{\Delta z}} \leq F_{1-p}(f_1, \infty), \quad (4)$$

где  $m_{\Delta z} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_{zi}}{N}$  – оценка математического ожидания случайной величины  $\Delta_z$ ;  $\Delta_{zi} = Z_{кэ} - Z_{кп}$  –  $i$ -е значение случайной величины  $\Delta_z$ ;  $S_{\Delta z}$  – оценка дисперсии случайной величины  $\Delta Z$ :

$$S^2_{\Delta z} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_{zi} - m_{\Delta z})^2}{N - 1};$$

$N$  – число значений случайной величины  $\Delta_z$  в выборке;  $t_{\beta}$  – квантиль распределения Стьюдента, величина которого находится по [2] при принятом уровне значимости  $P$  ( $P=0,1$ ) и числу значений величины  $\Delta Z$  в выборке –  $N$ ;  $F_{1-p}(f_1, \infty)$  – квантиль распределения Фишера, величина которого находится по [2] при принятом уровне значимости  $P$  ( $P = 0,1$ ) и функции  $f_1=N - 1$ .

Расчетная методика, проверяемая по каждому определяющему параметру в условиях его работоспособности (1), признается правильной, если соблюдается либо неравенство, соответствующее наличию одного единственного результата измерения (2), либо неравенство, соответствующее наличию нескольких результатов измерений (3), (4).

При невыполнении указанных неравенств производится корректировка расчетных методик.

Поскольку испытываются единичные экземпляры объекта, а условия их функционирования и нагружения отличаются от натуральных, для выработки заключения о фактической стойкости объекта и ее соответствия заданным требованиям должна использоваться вся совокупность информации, полученной в результате теоретических и экспериментальных исследований на всех этапах разработки и отработки РК.

1. *Василенко А. А.* Вероятностный метод исследования живучести ракет в ШПУ при механическом воздействии ядерного взрыва : дис. канд. техн. наук : утв. 12.07.78 / *Василенко Анатолий Андреевич.* – Днепропетровск, 1976. – 217 с.
2. *Пустельник Е. И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений / *Е. И. Пустельник.* – М. : Издательство «Наука», 1968. – 288 с.

Государственное предприятие  
Конструкторское бюро «Южное»,  
Днепропетровск

Получено 02.10.08  
в окончательном варианте 15.01.09