
Sokolovskij Aleksej Nikolaevich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Sokolovskij@rambler.ru, Russia, Mozhaisky Military Space Academy,

Shvecov Alexandr Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, Mysash@yandex.ru, Russia, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 624.92.012.3.4

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ ПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО ИХ ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

С.В. Зарин

Представлены результаты динамических испытаний пролетных железобетонных конструкций балочного типа. На основе этих результатов приведена разработанная методика оценивания функциональной пригодности пролетных конструкций стартовых сооружений ракетно-космических комплексов по их динамическим характеристикам.

Ключевые слова: функциональная пригодность, пролетная конструкция, несущая способность, вибрационная диагностика, динамические характеристики.

Одним из актуальных вопросов повышения эффективности применения космических средств в военных целях является поддержание строительных объектов наземной космической инфраструктуры, включая стартовые сооружения (СС), к готовности к проведению пусков ракет космического назначения (РКН) в установленные сроки. Это требует применения технических средств мониторинга состояния строительных элементов СС, позволяющих оперативно получать информацию о функциональной готовности СС к выполнению пусков РКН за счет использования штатных систем испытаний и долговременного контроля на СС. Одним из путей решения этой задачи является использование в составе систем испытаний и долговременного контроля интегральных методов диагностирования снижения несущей способности пролетных железобетонных конструкций СС с использованием средств вибрационного контроля.

Постановка задачи. При проектировании СС ракетно-космических комплексов (РКК) проектной организацией совместно с заказчиком должен задаваться расчетный срок их службы [1, 2].

Расчетным сроком службы является установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием [3].

Для СС РКК он ограничивается не только сроками износа несущих конструкций, но и заданным количеством пусков РКН, в зависимости от того, какой из этих показателей наступит раньше. В настоящее время большинство из эксплуатируемых стартовых сооружений находятся за пределами заданных расчетных сроков их службы.

По истечении расчетного срока службы зданий и сооружений (ЗиС) должно проводиться обследование их технического состояния (ТС) с последующим принятием решения о возможности дальнейшей эксплуатации, реконструкции или необходимости восстановления, усиления, ремонта [4, 5]. В период непосредственной угрозы агрессии и в военное время появляется острая необходимость проводить пуски РКН в сжатые сроки для выполнения и наращивания орбитальной группировки космических аппаратов. В тоже время существующие методики оценивания ТС ЗиС [4, 5] не позволяют в кратчайшие сроки получать информацию о функциональной готовности строительной части (СЧ) СС к проведению пусков РКН в установленные сроки.

Экспериментальные исследования.

Для решения указанной задачи автором были проведены опытно-теоретические исследования с целью оценивания возможности использования метода функциональной вибрационной диагностики (ФВД) [6, 7] для идентификации ТС несущих железобетонных конструкций балочного типа в СС. Образцами для проведения исследований были выбраны железобетонные перемычки заводского изготовления 1ПБ-100-1П (рис. 1).

На первом этапе была теоретически определена собственная частота колебаний указанных перемычек λ как шарнирно опертых балочных конструкций [8]:

$$\lambda = \frac{\varphi}{l^2} \sqrt{\frac{C}{\mu}}, \quad (1)$$

где φ – безразмерный коэффициент частоты, зависящий от способа закрепления конструкции; l – пролет; C – приведенная, постоянная в пролете изгибная жесткость балки; μ – приведенная постоянная в пролете масса на единицу длины.

Метод ФВД [6, 7] основан на использовании зависимости (1), позволяющей по регистрации собственных частот λ колебаний конструкций СС при их вибрациях, возбуждаемых динамическим воздействием газовой струи РКН, диагностировать снижение параметра C , адекватного несущей способности конструкции. Известно, что приведенная жесткость C [9] равна

$$C = E_0 I_{\text{пр}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{пр}} = I_0 + n(I_1 + I_2), \quad (3)$$

где E_0 – модуль упругости бетона; $n = E_1/E_0$ – отношение модулей упругости стали и бетона; I_0 – момент инерции относительно нейтральной плоскости сечения площади сжатого бетона; I_1 – момент инерции относительно нейтральной плоскости сечения площади нижней арматуры; I_2 – момент инерции относительно нейтральной плоскости сечения площади верхней арматуры.

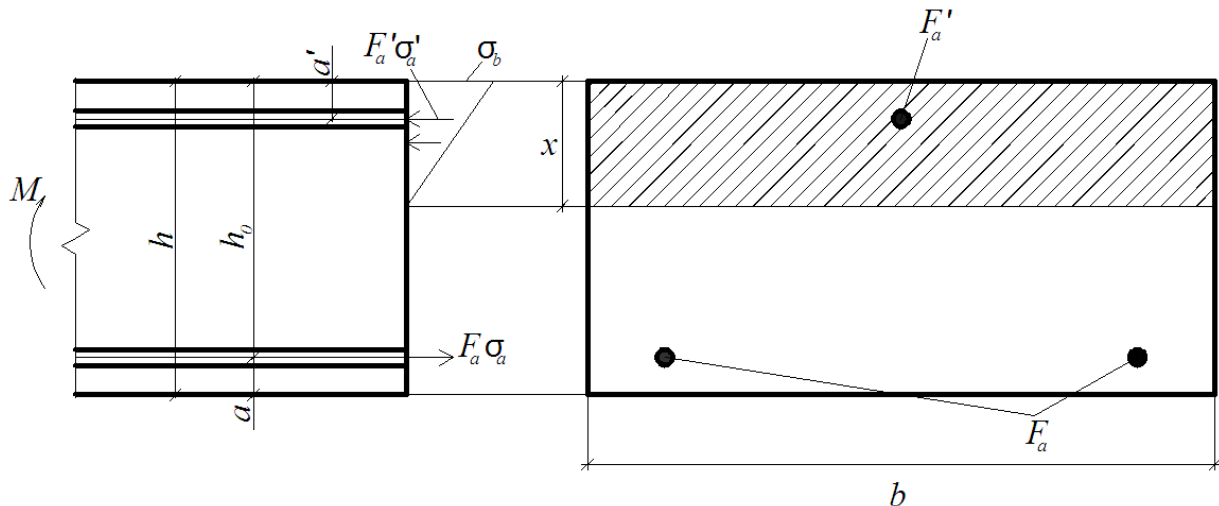


Рис. 1. Нормальное сечение перемычки заводского изготовления 1ПБ-100-1П

Положение нейтральной плоскости (координаты x) определялось из условия равенства нулю статического момента приведенной площади сечения балки [9]:

$$\sum_i y(nF_i) = \frac{1}{2}bx^2 + nF'_a(x - a') - nF_a(h_0 - x) = 0. \quad (4)$$

Собственная частота колебаний перемычек по расчету оказалась равной $\lambda^{\text{расч}} = 84$ Гц.

На следующем этапе были определены граничные значения частот собственных колебаний λ перемычек с учетом допустимых отклонений согласно нормативной базе физико-механических характеристик материалов конструкций и геометрических характеристик их составных элементов. При этом разброс составил: $\lambda^{\text{расч}} \in [75; 93]$ Гц.

На третьем этапе путем динамических испытаний были определены фактические значения собственных частот колебаний $\lambda^{\text{факт}}$ пяти перемычек 1ПБ-100-1П. При этом фактические значения $\lambda^{\text{факт}}$ опытных образцов оказались в границах допустимого интервала, полученного расчетным путем.

Затем теоретическим путем были рассчитаны частота собственных колебаний $\lambda^{\text{расч}}_{0,2}$ и границы частот собственных колебаний опытной перемычки с учетом действия на нее сосредоточенной силы $P = 0,2$ кН в сере-

дине пролета перемычки. Учет действия сосредоточенной силы P производился изменением приведенной массы на единицу длины пролета перемычки [8]

$$\mu = \mu_0 + \frac{1}{l} \sum_{s=1}^{s=s_0} k_s m_s, \quad (5)$$

где μ_0 – равномерно распределенная погонная масса; $m_s = \frac{P}{g}$ – сосредоточенная масса; s – ее номер; s_0 – количество сосредоточенных масс на перемычке; k_s – коэффициент приведения сосредоточенной массы m_s к равномерно распределенной.

После этого также были определены фактические частоты собственных колебаний опытных образцов с учетом действия сосредоточенной силы P . Они также оказались внутри границ частот собственных колебаний перемычки с учетом действия сосредоточенной силы P , полученных расчетным путем.

Это свидетельствует о том, что данный расчетный способ позволяет получать достоверные значения собственных частот колебаний пролетных конструкций.

Относительная погрешность данного способа не превышает $\pm 10\%$. Анализ показал, что наибольшее влияние на изменение частоты собственных колебаний в рамках допустимых отклонений согласно нормативной базе оказывают отклонения глубины залегания растянутой арматуры относительно верхней границы поперечного сечения перемычки. Это свидетельствует о том, что если уточнить на этапе расчета исходные данные, то появится возможность уменьшить погрешность данного способа. В результате уточнения исходных данных опытных образцов удалось снизить относительную погрешность данного способа до 2%.

В результате, если задаться сосредоточенной силой P , равной максимальной несущей способности пролетной конструкции по расчету, то возможно достоверно (в пределах указанной погрешности) определить расчетным путем предельную частоту собственных колебаний $\lambda_{\text{пред}}^{\text{расч}}$ конструкции, соответствующую 1 группе предельных состояний.

Решение задачи

На основе изложенного выше способа определения наступления предельного состояния по 1 группе предельных состояний разработана методика оценивания функциональной пригодности пролетных конструкций СС РКК по их динамическим характеристикам (рис. 2).

На первом этапе производится расчет допустимого интервала собственной частоты колебаний $\lambda_i^{\text{расч}} \in [\lambda_{\text{min}_i}^{\text{расч}} \div \lambda_{\text{max}_i}^{\text{расч}}]$ i – й конструкции согласно (1). Такие исходные данные, как ФМХ материалов конструкции, геометрические характеристики элементов конструкции и способ закреп-

ления концов конструкции, берутся из результатов предыдущего обследования технического состояния объекта. Если же данные предыдущего обследования отсутствуют, то берутся данные по проекту. Допустимые отклонения ФМХ материалов и геометрических характеристик элементов конструкции принимаются согласно нормативных документов.

На втором этапе производится регистрация эталонной собственной частоты колебаний i – й конструкции при первом пуске РКН $\lambda_{1_i}^э$. Если удалось зарегистрировать эталонную собственную частоту колебаний i – й конструкции при первом пуске РКН $\lambda_{1_i}^э$, то необходимо проверить условие

$$\lambda_{\min_i}^{\text{расч}} \leq \lambda_{1_i}^э \leq \lambda_{\max_i}^{\text{расч}}, \quad (6)$$

т.е. то, что эталонная собственная частота колебаний i – й конструкции при первом пуске РКН $\lambda_{1_i}^э$ находится в допустимом интервале расчетных собственных частот колебаний i – й конструкции. Если условие (6) не выполняется, то производится уточнение ФМХ материалов и геометрических характеристик элементов конструкции средствами неразрушающих методов контроля и разрушающими методами контроля и выполняется повторный расчет допустимого интервала собственной частоты колебаний i – й конструкции. Если же условие (6) соблюдается, то далее производится уточнение собственной частоты колебаний i – й конструкции $\lambda_i^{\text{расч}}$

$$\lambda_i^{\text{расч}} | \lambda_i^{\text{расч}} \rightarrow \lambda_{1_i}^э. \quad (7)$$

Если регистрацию эталонной собственной частоты колебаний i – й конструкции при первом пуске РКН $\lambda_{1_i}^э$ произвести не удалось, то за расчетную частоту собственных колебаний i – й конструкции принимается верхняя граница из допустимого интервала собственной частоты колебаний i – й конструкции

$$\lambda_i^{\text{расч}} = \lambda_{\max_i}^{\text{расч}}. \quad (8)$$

Третьим этапом служит расчет предельной частоты собственных колебаний i – й конструкции $\lambda_{\text{пред}_i}^{\text{расч}}$ с учетом паспортной или расчетной несущей способности конструкции $q_{\text{пред}_i}$, преобразуемой в приведенную массу на единицу длины конструкции

$$\lambda_{\text{пред}_i}^{\text{расч}} | q_i = q_{\text{пред}_i}. \quad (9)$$

На 4 этапе производится определение показателя

$$\Delta \lambda_{n_i} = \lambda_i^{\text{расч}} - \lambda_{\text{пред}_i}^{\text{расч}}. \quad (10)$$

Физически данный показатель (10) характеризует 100% несущей способности диагностируемой конструкции.

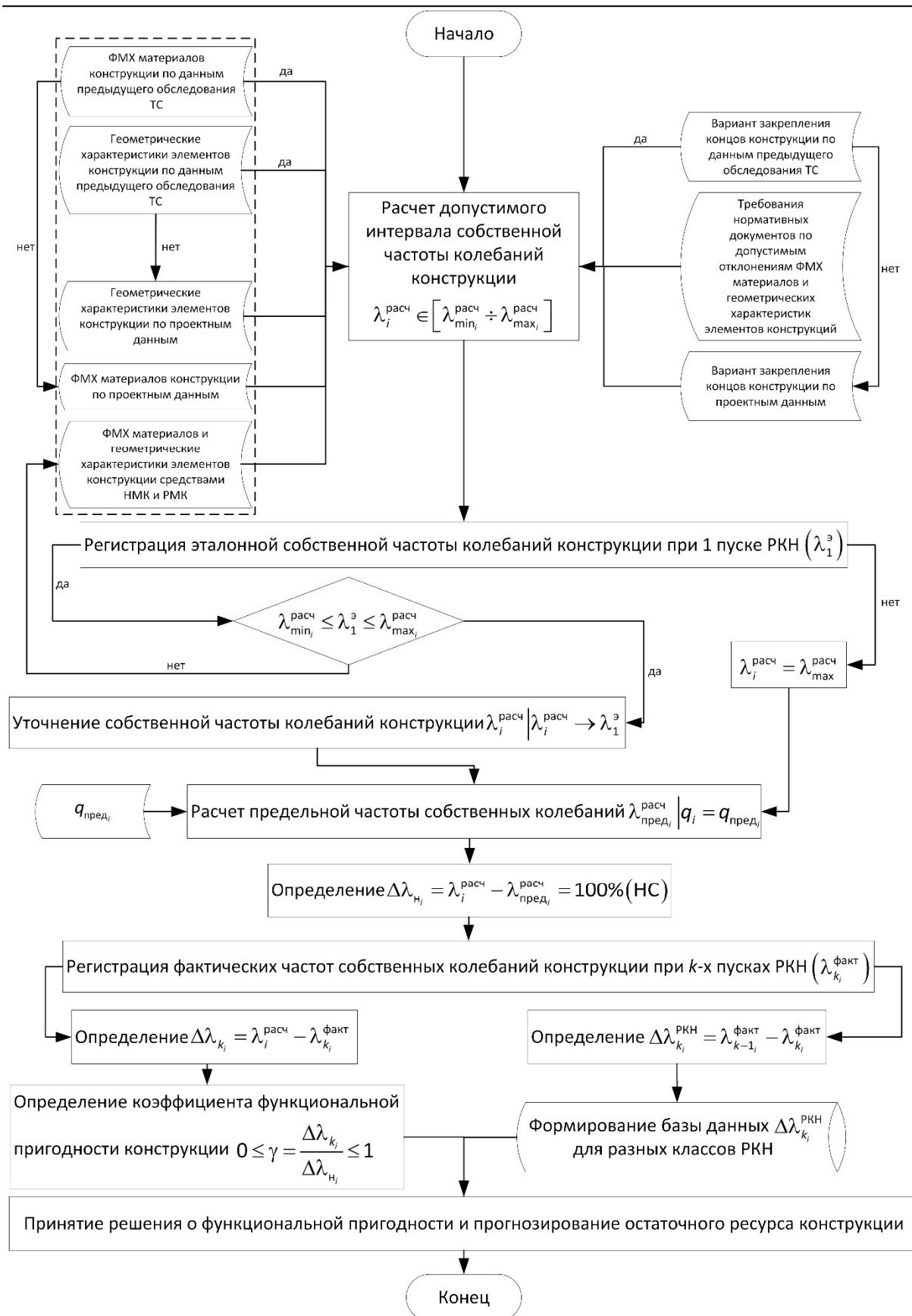


Рис. 2. Методика оценивания функциональной пригодности пролетных конструкций СС РКК по их динамическим характеристикам

Пятым этапом является регистрация фактических частот собственных колебаний i -й конструкции $\lambda_{k_i}^{\text{факт}}$ при последующих (k -ых) пусках РКН. Тогда в процессе последующей эксплуатации СС возможно определять показатель $\Delta\lambda_{k_i} = \lambda_i^{\text{расч}} - \lambda_{k_i}^{\text{факт}}$ и коэффициент функциональной пригодности i -й конструкции $0 \leq \gamma = 1 - \frac{\Delta\lambda_{k_i}}{\Delta\lambda_{n_i}} \leq 1$. Указанная методика также позволяет определять показатель $\Delta\lambda_{k_i}^{\text{РКН}} = \lambda_{k-1}^{\text{факт}} - \lambda_{k_i}^{\text{факт}}$, который указывает на какое значение снижается показатель $\Delta\lambda_{n_i}$ при пусках конкретного типа РКН, что обеспечивает формирование базы данных для разных классов РКН.

Заключительным этапом является принятие решения о функциональной пригодности и прогнозирование остаточного ресурса конструкций СЧ СС [1, 2].

Заключение. Разработанная методика позволяет на основе интегрального подхода осуществлять принятие решения о функциональной пригодности пролетных железобетонных конструкций СС РКК. Она сокращает сроки на принятие решения о функциональной пригодности СС РКК, что в период непосредственной угрозы агрессии и военное время является важнейшим фактором при выборе из существующих методик наиболее эффективной для СС по критерию оперативности принятия решения. Данная методика так же позволяет формировать базы данных для прогнозирования остаточного ресурса СЧ СС [7].

Список литературы

1. Проблемы оценивания надёжности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний / Ш.Ш. Исхаков, Ф.Е. Ковалёв, Р.Э. Косенков, А.П. Мохнаткин // Известия ПГУПС. 2016. Том 13. Вып. 4 (49)/2016. С. 592 – 599.
2. Методические аспекты оценки параметров технического состояния военных объектов / Ш.Ш. Исхаков, Ф.Е. Ковалёв, А.А. Буслов, С.В. Зарин // Сб. статей III Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. Т. 2. С. 406 – 410.
3. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М., 2015.
4. ГОСТ 31937 – 2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М., 2011.
5. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М., 2004.

6. Становление и развитие вибрационных систем мониторинга технического состояния несущих элементов стартовых сооружений: монография / Ш.Ш. Исхаков, Ф.Е. Ковалёв, А.П. Мохнаткин, Д.С. Старчуков. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. 110 с.

7. Задачи адаптации обеспечения надежности специальных объектов Космических войск нормативным требованиям безопасной эксплуатации военно-строительных комплексов / Ш.Ш. Исхаков, Ф.Е. Ковалёв, С.В. Зарин, А.П. Мохнаткин // Сб. научных трудов «Современные направления в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений». СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. С. 67 – 75.

8. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. М.: Госстройиздат, 1956. 340 с.

9. Котляревский В.А. Безопасность строительных объектов оборонного назначения. Защитные сооружения, убежища гражданской обороны // Безопасность России. Безопасность строительного комплекса: Раздел 1 в главе V / под ред. Н.А. Махутова. М.: МГОФ «Знание», 2012. С. 582-589.

Зарин Сергей Владимирович, сотрудник, sergeyzarin27091989@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ASSESSMENT METHODS OF FUNCTIONAL SUITABILITY SPAN STRUCTURES
LAUNCH FACILITIES MISSILE AND SPACE SYSTEMS DYNAMIC CHARACTERISTICS

S.V. Zarin

The article presents the results of span reinforced concrete structures dynamic tests of beam type. On the basis of these results, the developed method for assessing the functional suitability of the span structures of the missile and space systems launch facilities according to their dynamic characteristics is presented.

Key words: functional suitability, span structure, bearing capacity, vibration diagnostics, dynamic characteristics.

Zarin Sergey Vladimirovich, employee, sergeyzarin27091989@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Mozhayskiy Military Space Academy