

УДК 69.036.7

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_37

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ И РИСКА
АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**A MODEL FOR ASSESSING THE PARAMETERS OF THE OPERATIONAL
SUITABILITY OF SPECIAL STRUCTURES IN CONDITIONS OF DEGRADATION
AND RISK OF EMERGENCY SITUATIONS**

Канд. техн. наук Д.П. Мандрица, д-р техн. наук А.Н. Миронов

Ph.D. D.P. Mandritsa, D.Sc. A.N. Mironov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В рамках данной работы предложена модель оценки параметров эксплуатационной пригодности несущих конструкций специальных сооружений в условиях деградации и риска аварийных ситуаций. Разработанная модель использует комплексный подход на основе параметрической идентификации материалов и несущих конструкций специальных сооружений и создания критериев подобия для поврежденных и неповрежденных несущих конструкций, выявление критически важных несущих конструкций после воздействия аварийных нагрузок и воздействий. Разработана физическая модель параметрической идентификации специальных сооружений с учетом параметров поврежденности, прочности и деформативности конструкций. Построены критерии подобия несущих конструкций специальных сооружений для различных стадий эксплуатации.

Ключевые слова: параметры эксплуатационной пригодности, несущие конструкции, специальные сооружения, параметры поврежденности, параметрическая идентификация, критерии подобия.

Within the framework of this work, a model for assessing the parameters of the operational suitability of load-bearing structures of special structures in conditions of degradation and risk of emergency situations is proposed. The developed model uses an integrated approach based on parametric identification of materials and load-bearing structures of special structures of the launch complex and the creation of similarity criteria for damaged and undamaged load-bearing structures, identification of critically important load-bearing structures after exposure to emergency loads and impacts. A physical model of parametric identification of special structures has been developed, taking into account the parameters of damage, strength and deformability of structures. Criteria for the similarity of load-bearing structures of special structures for various stages of operation are constructed.

Keywords: operational suitability parameters, load-bearing structures, special structures, damage parameters, parametric identification, similarity criteria.

Введение

Рассмотрим порядок определения параметров эксплуатационной пригодности для периода нормальной эксплуатации, в том числе этапа проектирования, и периода интенсивного использования специального сооружения.

Особенностью периода нормальной эксплуатации специальных сооружений является процесс постепенной деградации свойств материалов и конструкций. В период интенсивного использования специального сооружения известны параметры поврежденностей для отдельных несущих конструкций, в то время как для других несущих конструкций такие данные отсутствуют.

В качестве исходных данных для оценки параметров эксплуатационной пригодности специальных сооружений принимаются: прочностные и деформационные характеристики материалов и конструкций специальных сооружений (СС); параметры поврежденности d_i , модели сопротивления бетона и арматуры σ_b^m, σ_s^m при различных аварийных нагрузках и воздействиях.

Целью разработки модели является получение формализованных зависимостей для параметров эксплуатационной пригодности несущих конструкций специальных сооружений в условиях воздействия поражающих факторов аварийных ситуаций.

С этой целью предлагается комплексный подход на основе параметрической идентификации материалов и несущих конструкций специальных сооружений и создания критериев подобия для поврежденных и неповрежденных несущих конструкций, выявление критически важных несущих конструкций после воздействия аварийных нагрузок.

Выделенные периоды эксплуатации СС стартового комплекса (СК) позволяют сформировать модель оценки параметров эксплуатационной пригодности несущих конструкций специальных сооружений

$$P_{\alpha,i} = \Phi \left(\begin{array}{c} \Phi_{Mi}, O_{pri}, \{D_i, A_d\}, \\ \{\varepsilon_{bi}, \varepsilon_{si}\}, \{R_{bi}, R_{si}, E_b, E_s\} \end{array} \right),$$

где Φ_{Mi} — модель нагрузок и воздействия;

O_{pri} — объемно-планировочные и конструктивные решения СС;

D_i, A_d — параметры поврежденности несущих конструкций, их размеры и глубина;

$\{\varepsilon_{bi}, \varepsilon_{si}\}, \{R_{bi}, R_{si}, E_b, E_s\}$ — прочностные и деформационные характеристики бетона и арматуры с учетом накопления остаточных деформаций в период нормальной эксплуатации, а также после периода интенсивного использования специального сооружения.

Предлагаемая модель учитывает особенности деформирования поврежденного бетона после аварийных нагрузок воздействий, условия эксплуатации поврежденных конструкций и остаточный ресурс после воздействия эксплуатационных нагрузок (для специальных сооружений — газодинамических нагрузок при пуске ракет космического назначения (РКН)). Блок-схема оценки параметров эксплуатационной пригодности специальных сооружений представлена на рис. 1.

Предлагается разделить задачи по оценке параметров эксплуатационной пригодности специального сооружения и остаточного ресурса несущих конструкций СС СК на две задачи: проектировочную (этап нормальной эксплуатации) и эксплуатационную.

Рассмотрим основные этапы модели оценки параметров поврежденности, остаточной прочности и остаточного ресурса несущих конструкций.

На первом этапе определяются параметры поврежденности несущих конструкций СС СК, которые включают: моделирование параметров аварийных нагрузок и воздействий и сравнение результатов экспериментально-теоретических исследований поврежденностей с определением размеров повреждений: глубины проникания, скорости деградации, температуры на поверхности несущих конструкций, трещинообразования в условиях горения и взрывов зарядов взрывчатых веществ (ВВ), параметров дробления и возможного откола.

Для определения параметров поврежденности специальных сооружений СК широкие возможности предоставляют методы параметрической идентификации [4–7]. Оценивание поврежденности и идентификация параметров конструкций или всего сооружения позволяют построить уточненную математическую модель, которая затем используется для выполнения поверочных расчетов и технико-экономического

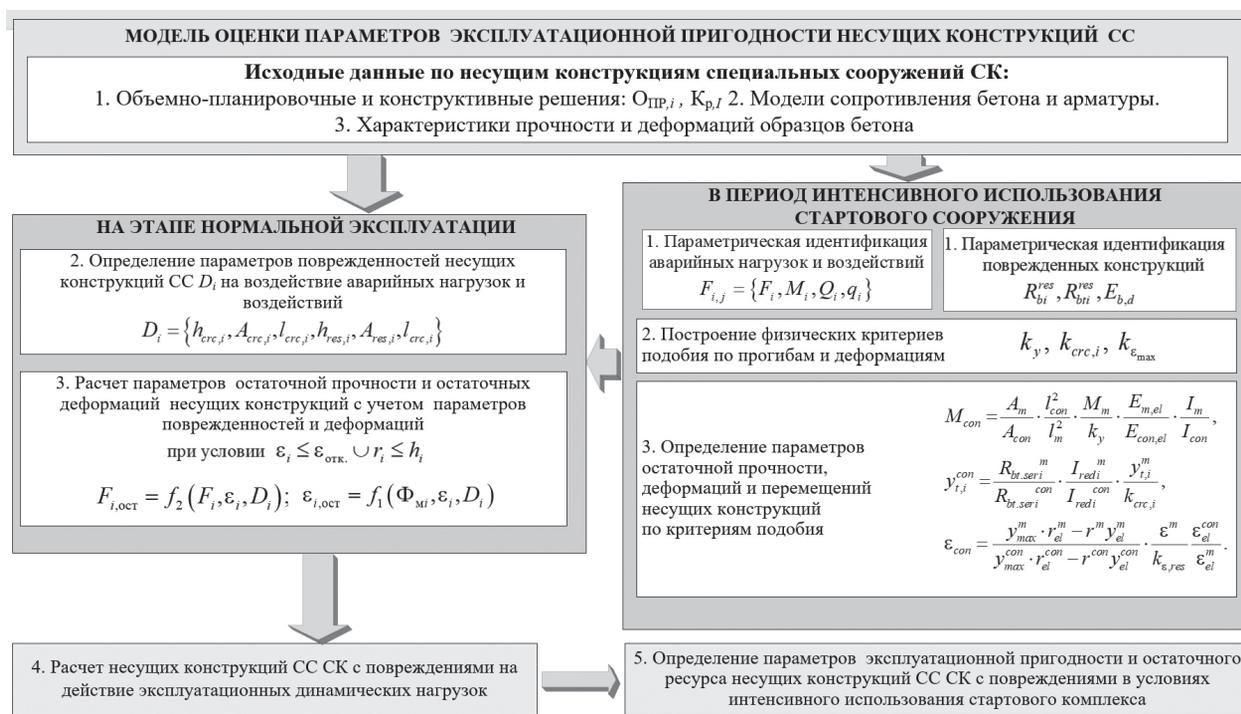


Рис. 1. Блок-схема модели оценки параметров эксплуатационной пригодности и остаточного ресурса несущих конструкций СК

обоснования с целью принятия решения о продолжении нормальной эксплуатации, восстановлении или разборке специального сооружения в зависимости от степени его поврежденности. Укрупненная схема такой процедуры изображена на рис. 2.

В процессе оценивания поврежденности и надежности несущих конструкций и сооружений центральное место занимают процеду-

ры их обследования, в которых используются неразрушающие испытания с определением нагрузок, деформаций, напряжений, перемещений и ускорений [1]. По этим данным оцениваются статические (прочность, жесткость) и динамические (собственные частоты, демпфирование) характеристики несущих конструкций специальных сооружений. Наряду с этим могут быть получены количественные оценки таких повреж-

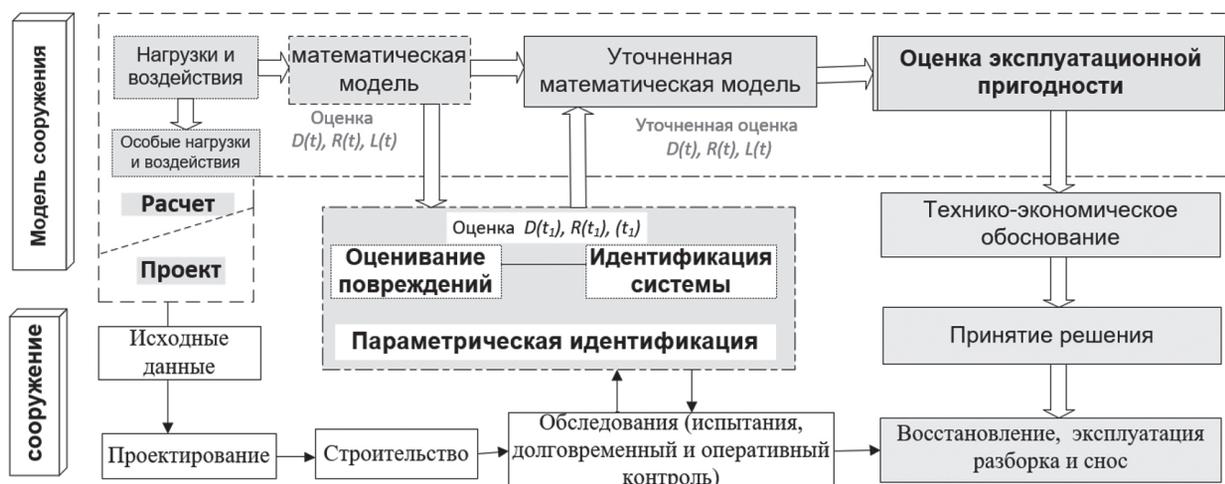


Рис. 2. Физическая модель параметрической идентификации специальных сооружений СК: $D(t)$ — поврежденность; $R(t)$ — прочность; $L(t)$ — надежность

дений, как трещины и отколы, локальная потеря устойчивости и др.

Параметрическая идентификация материалов и несущих конструкций специальных сооружений включает: идентификацию параметров динамической нагрузки на специальное сооружение; параметрическую идентификацию свойств материалов несущих конструкций специальных сооружений.

Идентификация параметров динамической нагрузки на специальное сооружение выполняется с использованием метода статистических испытаний на основе полей давлений:

$$p_c(y, z) = \left(\frac{\rho}{2}\right) C_p(y, z, \varepsilon) \bar{V}^2(z);$$

$$p_g(y, z, t) = \rho C_p(y, z, \varepsilon) \bar{V}(z),$$

где ρ — плотность воздуха;

C_p — коэффициент давления.

Скорость представляется суммой среднего значения $\bar{V}(z)$ и пульсации $v(y, z, t)$ (рис. 3).

Параметрическая идентификация свойств материалов несущих конструкций специальных сооружений основывается на построении математической модели поврежденного бетона с учетом возникновения и нарастания напряжений, деформаций и накопления повреждений при различных нагрузках и воздействиях.

Для описания модели деформирования железобетона в условиях одноосного сжатия (растяжения) воспользуемся нелинейным интегральным уравнением Вольтера вида [2]:

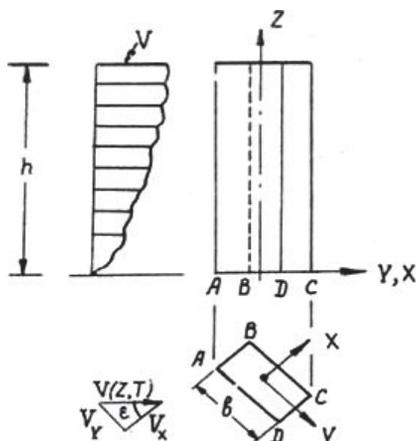


Рис. 3. Схема представления динамического давления на специальное сооружение

$$\sigma = g(\varepsilon(t), k_1, k_2, \dots) + \int_0^t h(\varepsilon(\tau), d_1, d_2, \dots) f(t - \tau) d\tau,$$

где σ, ε — скалярные компоненты напряжения и деформации соответственно, измеряемые при одноосном растяжении или сжатии образца.

Для каждого i -го испытания уравнение σ записывается в виде

$$\sigma_i = g(\varepsilon_i, k_1, k_2, \dots) + h(\varepsilon_i, d_1, d_2, \dots) \sum_{j=1}^N C_j e^{R_j t}.$$

С учетом полученных результатов параметрической идентификации и необходимых испытаний определяются физические критерии подобия несущих конструкций специальных сооружений и расчетных моделей несущих конструкций, получивших повреждения: по перемещениям, трещиностойкости и остаточным деформациям.

Так, критерий подобия по поврежденности имеет вид

$$k_{f_2} = \frac{(f_i - f_{el})^m}{(f_i - f_{el})^{con}} \cdot \frac{(f_{dest})^{con}}{(f_{dest})^m},$$

где f_i — нагрузка на несущую конструкцию, соответствующая i -нагрузению;

f_{el} — нагрузка, соответствующая упругим перемещениям в несущей конструкции;

f_{dest} — нагрузка, соответствующая разрушению несущей конструкции.

Критерии подобия по остаточным деформациям, перемещениям и напряжениям будут иметь вид:

– по остаточным деформациям

$$k_{\varepsilon, i} = \frac{\varepsilon_{i, ост}^m}{\varepsilon_{i, ост}^{con}};$$

– по остаточным перемещениям

$$k_{f, i} = \frac{f_{i, ост}^m}{f_{i, ост}^{con}},$$

– по остаточным напряжениям

$$k_{\sigma, i} = \frac{\sigma_{i, ост}^m}{\sigma_{i, ост}^{con}}.$$

Формируются зоны с критическими параметрами поврежденности, которые позволят идентифицировать предельные состояния по эксплуатационной пригодности.

На втором этапе производится расчет параметров остаточной прочности и остаточных деформаций поврежденных несущих конструкций. При этом применяется комплексный подход на основе численных расчетов параметров напряженно-деформированного состояния несущих конструкций с учетом деградации бетона и образования откола при распространении ударной волны в бетоне [3].

Исходя из разработанных критериев подобия выделяются следующие задачи.

Прямая задача (проектировочная) — по известным экспериментальным данным испытаний моделей конструкций и критериям подобия определяют параметры повреждений, остаточной прочности, трещиностойкости и деформаций несущей конструкции:

– по перемещениям

$$M_{con} = \frac{A_m}{A_{con}} \cdot \frac{l_{con}^2}{l_m^2} \cdot \frac{M_m}{k_y} \cdot \frac{E_{m,el}}{E_{con,el}} \cdot \frac{I_m}{I_{con}};$$

– по трещиностойкости

$$y_{t,i}^{con} = \frac{R_{bt,seri}^m}{R_{bt,seri}^{con}} \cdot \frac{I_{red,i}^m}{I_{red,i}^{con}} \cdot \frac{y_{t,i}^m}{k_{cr,i}}; \quad \sigma_{s,i}^{con} = \frac{\sigma_{s,i}^m}{k_{a,i}} \cdot \frac{E_i^{con}}{E_i^m} \cdot \frac{l_{t,i}^m}{l_{t,i}^{con}};$$

– по остаточным деформациям

$$r^m = \frac{y_{max}^m \cdot r_{el}^m - r^m \cdot y_{el}^m}{y_{max}^{con} \cdot r_{el}^{con} - r^{con} \cdot y_{el}^{con}} \cdot \frac{r_{el}^{con}}{k_{\epsilon,res}} \cdot \frac{r_{el}^{con}}{r_{el}^m}.$$

Обратная задача (поверочная) — по известным экспериментальным данным испытаний моделей конструкций и параметрам поврежденности материалов и конструкций определяют параметры остаточной прочности и деформаций:

– по перемещениям

$$M_{con} = \frac{A_m}{A_{con}} \cdot \frac{l_{con}^2}{l_m^2} \cdot \frac{M_m}{k_y} \cdot \frac{E_{m,el}}{E_{con,el}} \cdot \frac{I_m}{I_{con}};$$

– по остаточным деформациям

$$r^m = \frac{y_{max}^m \cdot r_{el}^m - r^m \cdot y_{el}^m}{y_{max}^{con} \cdot r_{el}^{con} - r^{con} \cdot y_{el}^{con}} \cdot \frac{r_{el}^{con}}{k_{\epsilon,res}} \cdot \frac{r_{el}^{con}}{r_{el}^m}.$$

На третьем этапе выполняется расчет несущих конструкций напряженно-деформированного состояния несущих конструкций СС СК на действие эксплуатационных динамических нагрузок при пуске РКН. При этом учитываются следующие факторы: процесс накопления повреждений и остаточных деформаций, а также снижение прочностных характеристик бетона и арматуры в процессе интенсивного запуска РКН.

На четвертом этапе производится расчет несущих конструкций с повреждениями на действие эксплуатационных динамических нагрузок. Анализ представленных программных комплексов систем автоматизированного проектирования (САПР) ANSYS, LC DINA, Dlubal RFEM 5.29, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 и др. позволил разделить их использование по характеру и интенсивности приложения нагрузок, параметрам повреждений и разрушений, а также возможности

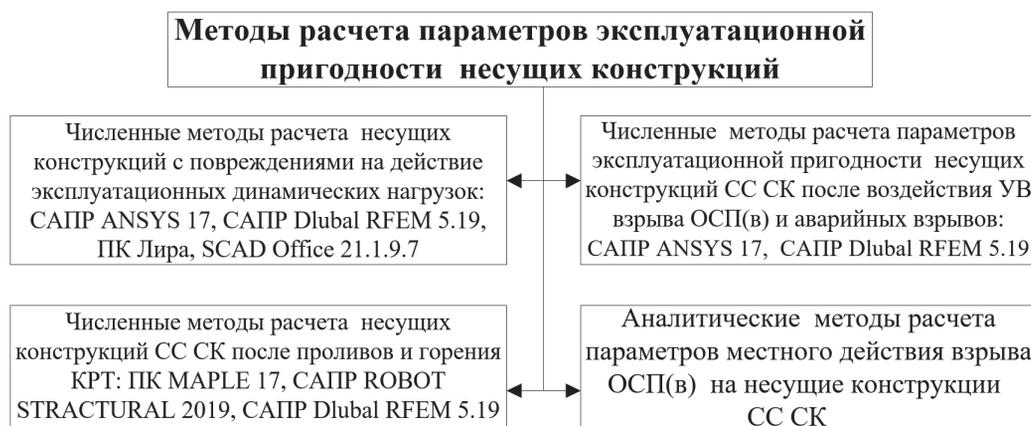


Рис. 4. Схема применения численных методов расчета специальных сооружений

определения остаточных деформаций и учету их в последующих расчетах остаточного ресурса. Схема применения численных методов расчета специальных сооружений в условиях аварийных нагрузок и воздействий представлена на рис. 4.

Предлагаемый комплексный подход позволяет снизить время проведения обследования поврежденных специальных сооружений и при необходимости спланировать ремонтно-восстановительные работы в минимальном объеме для обеспечения эксплуатационной пригодности.

Вывод

Разработана модель оценки параметров эксплуатационной пригодности несущих конструкций специальных сооружений после аварийных нагрузок и воздействий. Предлагаемая модель учитывает комплексный подход к оценке параметров эксплуатационной пригодности с учетом параметрической идентификации материалов и критериев подобия несущих конструкций специальных сооружений.

Список источников

1. ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Российский институт стандартизации, 2024, 104 с.
2. Мандрица Д.П., Глуханов А.В. Методика расчета остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений по степени их физического износа // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2012. № 637–1. С. 10–13.
3. Андросова Н.Б. Исследование живучести коррозионно-повреждаемых железобетонных балочных и рамных конструкций в заданных состояниях: автореф. диссертация канд. тех. наук. Орел, 2009. 21 с.
4. Ланкина Ю.А., Митрошин И.А., Сарайкин А.С. Современные методы диагностики технического состояния строительных конструкций // Ogarev-online. 2014. Спецвыпуск. URL: <https://journal.mrsu.ru/arts/sovremennye-metody-diagnostiki-tekhnicheskogo-sostoyaniya-stroitelnykh-konstrukcij> (дата обращения: 21.02.2025).

5. Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 5 (31). С. 6–11.

6. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. М.: Стандартинформ, 2017. 28 с.

7. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.

References

1. GOST 31937–2024. Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2024, 104 p.
2. Mandritsa D.P., Glukhanov A.V. Methodology for calculating the residual resource of load-bearing structures of buildings and structures according to the degree of their physical wear // Proceedings of the A.F. Mozhaisky Academy of Fine Arts. Saint Petersburg: Mozhaisky Academy of Fine Arts, 2012. No 637–1. Pp. 10–13.
3. Androsova N.B. Investigation of the survivability of corrosively damaged reinforced concrete beam and frame structures in extreme conditions: abstract dissertations of the Candidate of Technical Sciences. Orel, 2009. 21 p.
4. Lankina Yu.A., Mitroshin I.A., Saraiкин A.S. Modern methods of diagnostics of the technical condition of building structures // Ogarev-online. 2014. Special issue. URL: <https://journal.mrsu.ru/arts/sovremennye-metody-diagnostiki-tekhnicheskogo-sostoyaniya-stroitelnykh-konstrukcij> (date of accesses: 21.02.2025).
5. Stepanov V.B. Methodology for determining the opening width of corrosion cracks for assessing the technical condition of reinforced concrete structures // Engineering and Construction Magazine. 2012. No 5 (31). Pp. 6–11.
6. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Special effects. M.: Standartinform, 2017. 28 p.
7. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions. M.: Standartinform, 2015. 23 p.