

## Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

*К.т.н., доцент Ш.Ш. Исаков;  
к.т.н., преподаватель Ф.Е. Ковалев\*;  
к.т.н., доцент, начальник кафедры В.М. Васкевич;  
инженер В.Ю. Рыжиков,*

*ФВГОУ ВПО Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского МО РФ*

**Ключевые слова:** испытание; контроль; риски; вибрационная диагностика; мониторинг зданий и сооружений; технические состояния; несущие элементы; системы мониторинга

### *Состояние вопроса*

Определение количественных показателей надёжности эксплуатируемых строительных объектов как вероятности  $P=\{0, 1\}$  того, что в заданный момент времени объект будет находиться (или уже находится) в заданном состоянии, в соответствии с действующей нормативной базой (ГОСТ 27751-88, ГОСТ Р 54257-2010) остаётся проблематичным при обследованиях и мониторинге технического состояния зданий и сооружений (рис. 1) [1].

Проблема, прежде всего, заключается в том, что до настоящего времени в нормативной базе не определены количественные показатели снижения несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований при переходе их технического состояния из одной категории (класса) в другую категорию (класс) по мере снижения несущей способности (НС) в процессе длительной эксплуатации зданий и сооружений. Данная ситуация характерна при использовании классификации технических состояний строительных объектов как по их дефектам и повреждениям (критическим, значительным и малозначительным, например, по ГОСТ 15467-79 и РД 22-01.97), так и при использовании классификации технических состояний по СП 13-102 2003 или по видоизменённой классификации в ГОСТ Р 53778-2010, в которых не регламентируются количественные границы снижения НС для каждой из категорий состояний, и поэтому оценивание этих состояний для эксплуатируемых зданий и сооружений приходится на практике выполнять по существу на качественном, а не количественном уровне.

Данное обстоятельство, с одной стороны, существенно снижает объективность оценки технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений, так как на нее влияет субъективизм, квалификация и опыт экспертов, оценивающих состояние обследуемых объектов, а также от сложившихся взаимоотношений между экспертной организацией и Заказчиком (владельцем объекта недвижимости). Заказчик во многих случаях заинтересован в завышении категории технического состояния объекта (особенно с промышленно опасным производством) для снижения затрат на обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений, что является одной из причин катастрофических обрушений строительных объектов с переходом на рыночные отношения в нашей стране.

С другой стороны, отсутствие в нормативной базе показателей снижения несущей способности не позволяет оценивать надёжность эксплуатируемых зданий и сооружений по вероятности  $P=\{0, 1\}$  возникновения событий, каковыми являются конкретные состояния строительных объектов (рис. 1).

Частично данная проблема сглаживается оценкой несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований путем обязательного выполнения прочностных поверочных расчётов несущей способности элементов зданий и сооружений в соответствии с указаниями СП 13-102-2003 и ГОСТ Р 53778-2010 [2]. Однако практикам хорошо известно, что зачастую полная информация о фактических физико-механических характеристиках материала строительных конструкций и грунтовых массивов под подошвой фундаментов, получаемых при обследованиях эксплуатируемых зданий и сооружений, отсутствует. Это существенно снижает достоверность поверочных расчётов даже при использовании современных численных методов, например, метода конечных элементов (МКЭ), ввиду неопределённости того, какие значения физико-механических характеристик следует использовать в МКЭ при заданном шаге границ конечных элементов. При строгом подходе следует учитывать, что в реальных обследованиях

Исаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

зданий и сооружений мы чаще всего оказываемся в условиях «экспресс-диагностирования», которое в ГОСТ 20911-89 характеризуется как оценивание состояния объекта по ограниченной информации, получаемой за установленное время.

Описанное состояние вопроса не способствует ни совершенствованию методологических основ, ни повышению надёжности реальных строительных объектов.



**Рисунок 1. Проблемы практического оценивания состояния несущих элементов строительных объектов**

### Задачи исследования

Преодоление проблем оценивания надёжности эксплуатируемых зданий и сооружений требует решения ряда первоочередных задач, к числу которых целесообразно отнести следующие.

1. Разработка доступных и эффективных **аппаратурных** (а не только расчётно-теоретических) методов диагностирования снижения несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений.

2. Разработка научно обоснованной классификации технических состояний зданий и сооружений и их несущих элементов (конструкций и грунтовых оснований) с количественными

Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

показателями снижения несущей способности в развитие классификаций, используемых в СП 13-102-2003 и ГОСТ Р 53778-2010.

3. На основе решения двух первых задач дальнейшее развитие методологии оценивания надёжности строительных объектов по такому её количественному показателю, как вероятность  $P=\{0, 1\}$  того, что в заданный момент времени строительный объект будет находиться (или уже находится) в заданном состоянии.

4. Обоснование и развитие альтернативных методов оценивания надёжности строительных объектов, в частности, по **риску** того, что объект может приобретать (по различным причинам) неработоспособные состояния в заданный период эксплуатации  $T_s$  [3, 4].

### Результаты решения рассматриваемых задач

На решение 1-й задачи направлены, как известно, разработка и использование современных технических средств в виде переносных приборов неразрушающих методов контроля (НМК), а в последнее время также стационарных автоматизированных систем мониторинга в виде систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 22.1.12-2005 и ГОСТ Р 53778-2010. При этом по регламентации ГОСТ Р 22.1.12-2005 для наиболее ответственных и уникальных зданий и сооружений применение СМИК является обязательным.

Несмотря на то, что указанные ГОСТы появились недавно, сами автоматизированные системы мониторинга для наиболее уникальных строительных объектов, например, гидротехнических сооружений, атомных станций, создаются уже несколько десятилетий.

С началом космической эры системы «испытания и долговременного контроля» стали создаваться в нашей стране на специальных сооружениях наземных космических комплексов, и в частности, на уникальных стартовых сооружениях, предназначенных для пуска ракет космического назначения (РКН) (рис. 2).

С конца 60-х годов XX века в Военно-космической академии (ВКА) им. А.Ф.Можайского была обоснована научная школа проектирования и применения систем «испытания и долговременного контроля», которые традиционно создавались в составе стационарных комплексов вибрационного, геодезического и тензометрического контроля. Системы использовались в комплексе с НМК и визуальным освидетельствованием состояния стартовых сооружений (рис. 2 и 3).

Разработка и применение систем «испытания и долговременного контроля» долгое время относились к закрытой области исследований в нашей стране, и лишь с началом работы Национального Конгресса по комплексной безопасности в строительстве (рис. 1), три конференции которого состоялись в мае 2010, 2011 и 2012 годов (ВВЦ, Москва) появились открытые публикации по опыту применения данных систем в научно-технических сборниках Национального Конгресса [5, 6] и других изданиях [7,8].

Вместе с тем опыт применения средств НМК и стационарных автоматизированных систем мониторинга показывает, что идентификация **снижения несущей способности** строительных конструкций и грунтовых оснований непосредственно **аппаратурными** методами (см. задачу 1) для большинства обычных строительных объектов, на которых по регламентации ГОСТ Р 22.1.12-2005 не применяются стационарные системы мониторинга с контролем напряжений в конструкциях и грунтовом основании зданий и сооружений с помощью комплектов ТК (как, например, на уникальных гидротехнических и специальных сооружениях (СС), рис. 2 и 3), остаётся проблемной задачей. Действительно, на сегодняшний день человечеством не изобретены технические средства (приборы) для регистрации непосредственно несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований эксплуатируемых зданий и сооружений, что в свою очередь препятствует решению задач 2-4. Трудоёмкость заключается в том, что несущую способность конструкций и грунтовых оснований в соответствии с теоретическими основами таких областей знаний, как «сопротивление материалов», «строительная механика» и «механика грунтов», мы можем оценивать по одному из двух критериев: либо по фактическим нагрузкам  $P_\phi$ , либо по фактическим напряжениям  $\sigma_\phi$ , которые соответственно не должны превосходить критических нагрузок  $P_{кр}$  и предела прочности материала конструкций и грунтовых массивов  $R$ :

$$P_\phi \leq P_{кр}; \quad (1)$$

$$\sigma_\phi \leq R. \quad (2)$$

Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний



Рисунок 2. Модель стартового сооружения [1]



Рисунок 3. Структурная блок-схема системы «испытания и долговременного контроля» на стартовых сооружениях [1]

На практике использование критерия (1) для оценивания несущей способности элементов зданий и сооружений требует **измерения** фактических нагрузок  $P_{\phi}$ , что, как известно, никогда не производится. Например, на сегодняшний день не существует динамометра, который можно было бы подставить под подошву фундамента какого-либо здания, чтобы узнать, какое давление от веса здания передаётся на грунтовое основание. Поэтому на стадии проектирования и при обследовании зданий и сооружений фактические нагрузки  $P_{\phi}$  (как статические, так и динамические, например, ветровые, от газовой струи РКН, рис. 2) приходится определять **расчётным** путём по известной и трудоёмкой процедуре сбора нагрузок, как правило, с некоторым запасом. Таким образом, точного значения нагрузок  $P_{\phi}$  мы, как правило, не знаем, и **аппаратурными** методами реализовать использование критерия (1) для оценивания несущей способности элементов зданий и сооружений не удаётся.

Использование критерия (2) требует измерения фактических напряжений  $\sigma_{\phi}$ , для чего во время строительства в конструкциях и грунтовом основании необходимо устанавливать тензометры комплекта тензометрического контроля (рис. 3), что в обязательном порядке в соответствии с ГОСТ Р 22.1.12-2005 предусматривается лишь для наиболее ответственных строительных объектов. Кроме того, тензометры обладают малой долговечностью и не подлежат замене или ремонту. Поэтому для большинства зданий и сооружений критерий (2) также нереализуем.

Таким образом, идентификация снижения несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований является актуальной задачей технической диагностики и мониторинга состояния возведённых зданий и сооружений [9, 10, 11].

Многолетний опыт ВКА им. А.Ф.Можайского по применению систем ИДК на СС (рис. 2 и 3) показывает [5-8, 12], что проблема использования критериев (1), (2) при оценивании снижения несущей способности при длительной эксплуатации строительных объектов относится, прежде всего, к случаям статического нагружения, характерного для большинства зданий и сооружений. При воздействии же динамических нагрузок  $P(t)$  возможности идентификации снижения несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований резко возрастают. В основе этого вывода лежит использование известного системного подхода в виде модели «чёрного ящика» [13, 14] (рис. 4), включающей в себя объект с передаточной функцией  $\eta(\omega)$ , преобразующей входное динамическое воздействие  $P(t)$  в реакцию объекта (для зданий и сооружений в вибрационный сигнал)  $V(t)$ :

$$P(t) \times \eta(\omega) = V(t). \quad (3)$$

Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

При этом предполагается, что неизвестная в общем случае передаточная функция  $\eta(\omega)$  содержит в себе информацию о физических свойствах объекта, в том числе в виде параметров его состояния.

### Динамическая система

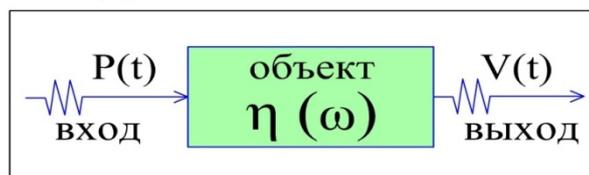


Рисунок 4. Модель «чёрного ящика»

Из алгоритма (3) передаточная функция  $\eta(\omega)$  может быть найдена в случае регистрации входного воздействия  $P(t)$  и выходного вибрационного сигнала  $V(t)$ :

$$\eta(\omega) = \frac{V(t)}{P(t)}. \quad (4)$$

Использование алгоритма (4) в принципе позволяет применять два метода диагностирования состояния зданий и сооружений:

- **тестовый**, когда динамические нагрузки  $P(t)$  искусственно создаются, например, в виде удара или простейшего гармонического воздействия  $P(t) = P^0 \cdot \sin(\omega t)$  с заданными амплитудой  $P^0$  и частотой  $\omega$  с помощью специальных вибрационных установок;
- **функциональный**, когда динамические нагрузки  $P(t)$  являются естественными, либо природного происхождения (ветровые, сейсмические и т.п.), либо технологическими (от работы машин, механизмов или газовой струи РКН, см. рис. 2), либо техногенными (например, от движения наземного и подземного транспорта).

Тестовый метод диагностирования не всегда применим для различных типов зданий и сооружений. Во всяком случае, для очень массивных стартовых сооружений (рис. 2) создание тестовых динамических нагрузок практически исключено. В подобных случаях остаётся применение функциональной вибрационной диагностики. Однако её применение в традиционной постановке по алгоритму (4) наталкивается на непреодолимую проблему регистрации функциональных динамических нагрузок  $P(t)$ , которая в силу фактического условия

$$P(t) = ? \quad (5)$$

не позволяет реализовать алгоритм (4) в практической технической диагностике состояния зданий и сооружений.

В этой связи в начале 80-х годов XX века в ВКА им. А.Ф.Можайского возникла идея [12] использования условно **нетрадиционного** метода вибрационной диагностики, основанного на идентификации параметров передаточных функций  $\eta(\omega)$  строительных объектов непосредственно в выходных вибрационных сигналах  $V(t)$  (см. (4)) без регистрации входных динамических нагрузок  $P(t)$ :

$$\eta(\omega) \supset V(t). \quad (6)$$

Для иллюстрации такого метода достаточно рассмотреть какую-нибудь простейшую строительную динамическую систему, например, «жёсткий фундамент – грунт» (рис. 5), на котором установлен какой-либо агрегат (например, турбогенератор), генерирующий динамическую нагрузку гармонического типа:

$$P(t) = P^0 \cdot \sin(\omega t). \quad (7)$$

Математическое описание работы такой системы хорошо известно из работ О.А. Савинова [15] и СНИП [16]. При этом нетрудно видеть, что из решения дифференциального уравнения движения такой системы её передаточная функция  $\eta(\omega)$  описывается зависимостью (5) на Исаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

рисунке 5, а её графическая форма (рис. 5, п. 1.1) характерна для динамических систем с одной степенью свободы с экстремумом на собственной (резонансной) частоте колебаний  $\lambda_z$  при вертикальных колебаниях жёсткого фундамента на грунтовом основании:

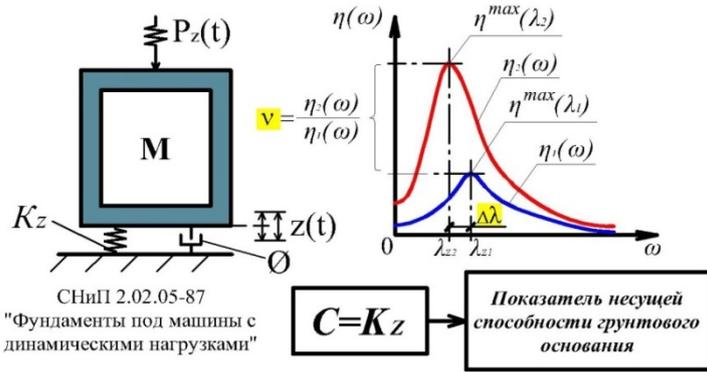
$$\lambda_z = \sqrt{\frac{C}{M}}, \tag{8}$$

где  $C = K_z$  – коэффициент жёсткости грунтового основания [15, 16];

$M$  – масса фундамента с установленным на нём агрегатом.

**1. Система "жёсткое сооружение - грунт".**

**1.1 Вертикальные колебания.**



$$M\ddot{z}(t) + \mathcal{O}K_z\dot{z}(t) + K_z z(t) = P_z(t); \tag{1}$$

$$P_z(t) = P_z^0 \sin \omega t; \tag{2}$$

$$z(t) = A_z^0 \sin(\omega t + \delta); \tag{3}$$

$$A_z^0 = \frac{1}{M \sqrt{(\omega^2 - \lambda_z^2)^2 + \mathcal{O}^2 \lambda_z^4 \omega^2}} P_z^0; \tag{4}$$

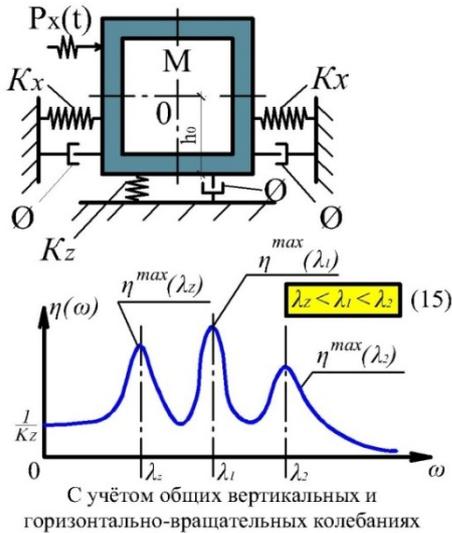
$$\eta(\omega) = \frac{1}{M \sqrt{(\omega^2 - \lambda_z^2)^2 + \mathcal{O}^2 \lambda_z^4 \omega^2}}; \tag{5}$$

$$\lambda = \sqrt{K_z / M}; \tag{6}$$

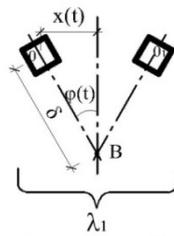
$$M = \text{const}; \tag{7}$$

$$\lambda = f(K); \tag{8}$$

**1.2 Горизонтально-вращательные колебания**



1-ая форма колебаний



$$P_x(t) = P_x^0 \sin \omega t; \tag{9}$$

$$x(t) = A_x^0 \sin(\omega t + \delta_1); \tag{10}$$

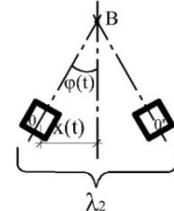
$$\varphi(t) = A_\varphi^0 \sin(\omega t + \delta_2); \tag{11}$$

$$A_x^0 = A_{x1}^{(cm)} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \lambda_x^2)^2 + (\mathcal{O} \omega)^2}}; \tag{12}$$

$$A_{x1}^{(cm)} = (P_x^0 / K_x) \cdot (1 + (K_x h_0 h / K_\varphi)); \tag{13}$$

$$A_{x2}^{(cm)} = (P_x^0 h / K_\varphi) a_\varphi; \tag{14}$$

2-ая форма колебаний



**Рисунок 5. Вертикальные и горизонтально-вращательные колебания**

Подобные теоретические решения всегда используются при проектировании фундаментов под машины с динамическими нагрузками [15, 16]. Для целей же диагностирования состояния, в данном случае грунтового основания с коэффициентом жёсткости  $K_z$ , очевидно, что выявить передаточную функцию  $\eta(\omega)$  (рис. 5) непосредственно в регистрируемом вибрационном сигнале  $z(t)$  (6)

$$V(t) = z(t) = A_z^0 \cdot \sin(\omega t + \delta), \tag{9}$$

где  $A_z^0$  – амплитуда динамического перемещения фундамента;

$\delta$  – сдвиг фазы между динамической нагрузкой  $P_z(t)$  (7) и перемещением  $z(t)$  (9),

практически невозможно, что не позволяет реализовать алгоритм (6). В этой связи возникла идея [12], что непосредственно в вибрационном сигнале  $V(t) = z(t)$  следует стремиться определять не саму передаточную функцию  $\eta(\omega)$ , а какие-либо диагностические признаки ( $D_{\Pi_i}$ ) изменения этой передаточной функции, характеризующие снижение несущей способности (НС) грунтового основания, которую физически можно отождествлять с коэффициентом его жёсткости  $C = K_z$ :

$$НС \equiv K_z. \tag{10}$$

Для большинства строительных объектов характерно то, что их масса  $M$  в течение длительного периода эксплуатации  $T_{\exists}$  остаётся постоянной,

$$M_{t \rightarrow T_{\exists}} = const, \tag{11}$$

если не производились реконструкции и технические перевооружения объекта. Тогда при условии (11) зависимость (8) становится однопараметровой,

$$\lambda_z = f(K_z) = a \cdot \sqrt{K_z}, \tag{12}$$

где  $a = 1/\sqrt{M} = const$ .

Нетрудно видеть, что при условии (11) снижение коэффициента жёсткости  $K_z$  (НС) грунтового основания приводит к снижению собственной частоты колебаний системы «сооружение – грунт»  $\lambda_z$  (12), что влечёт за собой изменение графической формы передаточной функции  $\eta(\omega)$  в виде сдвига резонансного пика влево на некоторую величину  $\Delta\lambda$  и увеличения самого пика в какое-то  $\nu$  раз, как это наглядно представлено на рисунке 5.

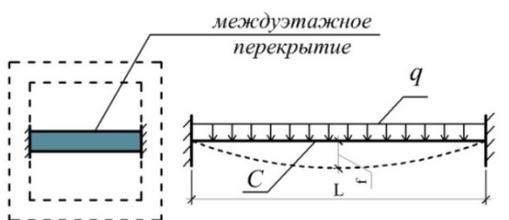
Таким образом, в общем случае мы имеем два диагностических признака снижения НС грунтового основания [5, 7, 12]:

$$D_{\Pi_i} = \left\{ \begin{matrix} \Delta\lambda > 0, \\ \nu > 1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \text{снижение НС} \\ \text{грунтового основания.} \end{matrix} \right. \tag{13}$$

Аналогичные  $D_{\Pi_i}$  (13) можно использовать и для диагностирования снижения НС пролётных конструкций (рис. 6), если в (8) использовать пространственную жёсткость  $C$  конструкции с её собственной частотой колебаний  $\lambda_1$  по 1-й (основной) форме колебаний (рис. 6).

**1. Система "железобетонное перекрытие".**

**1.1 Статическое нагружение.**

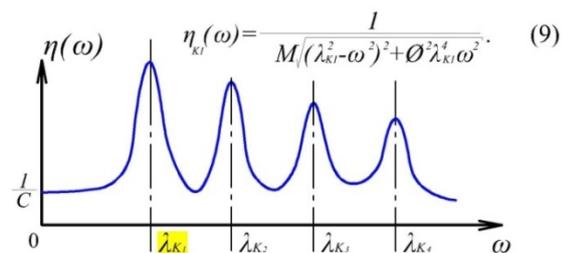
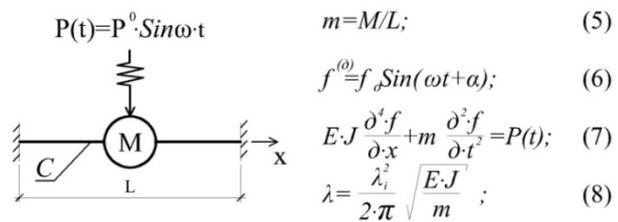


$$M_{np} = \frac{q \cdot L^2}{24}; \tag{1} \quad f^{(cm)} = \frac{M_{np}}{C} \tag{3}$$

$$f^{(cm)} = \frac{1}{16} \cdot \frac{M_{np} \cdot L^2}{E \cdot J}; \tag{2} \quad C = \frac{16 \cdot E \cdot J}{L^2} = ? \tag{4}$$

не известно !!!

**1.2 Динамическое нагружение.**



**Рисунок 6. Колебания пролётных конструкций**

Однако при таких видах динамических воздействий  $P(t)$ , как ветровые нагрузки и газодинамические нагрузки от реактивной струи РКН (рис. 2), формирующихся в виде случайных нестационарных полей пульсаций давления, возникают случайные вибрации  $V(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$  всего сооружения (здания) на грунтовом основании (рис. 5) и его несущих конструкций (рис. 6). Оказывается, что в реализациях случайных вибраций  $V(t)$  выявить  $D_{\Pi_i}$  (13) практически невозможно. Это относится и к случайным вибрациям природного, сейсмического и техногенного характера от движения наземного и подземного транспорта [8]. Однако многолетние исследования ВКА им. А.Ф.Можайского на стартовых сооружениях с помощью систем «испытания и долговременного контроля» (рис. 2, 3) показали, что  $D_{\Pi_i}$  (13) весьма информативно фиксируются в функциях спектральных плотностей (в энергетических спектрах Фурье [17])  $G_{\ddot{V}}(f)$  вибрационных ускорений  $\ddot{V}(t) = \{\ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \ddot{z}(t)\}$  [5, 7, 8, 12].

Нетрадиционный метод выявления снижения НС грунтовых оснований и строительных конструкций по изменению параметров передаточных функций  $\eta(\omega)$  в виде  $D_{\Pi_i}$  (13) в энергетических спектрах вибрационных ускорений зарегистрирован как авторское свидетельство на изобретение (патент) [18]. Сам метод в последнее время интерпретируется как **интегральный** метод диагностирования снижения НС элементов зданий и сооружений [8] в том смысле, что жёсткости грунтовых оснований  $K_z$  (рис. 5) и конструкций  $C$  (рис. 6) в общем случае являются функциями многих физико-механических характеристик, таких как модуль деформаций  $E$ , коэффициент внутреннего трения  $\varphi$ , сцепление и др. для грунта, модуль упругости  $E$ , момент инерции сечений  $I$ , пролёт  $L$ , погонное распределение массы  $m$ , закрепление концов и др. для конструкций:

$$K_z = f(E, \varphi, C, W); \quad (14)$$

$$C = f(E, I, L, m). \quad (15)$$

Поэтому идентификация снижения жёсткостей  $K_z$  и  $C$  (14), (15) является интегральным показателем изменения физико-механических характеристик конструкций и грунтовых оснований [8], определяющих их несущую способность.

Из вышеизложенного очевидно, что наличие самих, пусть и неизвестных (5), функциональных динамических нагрузок  $P(t)$  следует использовать как тест на возбуждение при случайных вибрациях  $V(t)$ , в энергетических спектрах которых по  $D_{\Pi_i}$  (13) возможно диагностировать изменение несущей способности конструкций и грунтовых оснований. В этом смысле такой вибрационный метод диагностирования снижения несущей способности можно идентифицировать как тестово-функциональный [19].

Интегральность такого тестово-функционального метода целесообразно интерпретировать также с учётом возможности комплексного использования вибрационных диагностических систем как «обученных» комплектов вибрационного контроля вместе с другими средствами контроля, например, по аналогии с системами «испытания и долговременного контроля» (рис. 3), что открывает новые перспективы в решении выше сформулированных задач 2-4. Для реализации такого интегрального подхода в ВКА им. А.Ф.Можайского разработан межотраслевой руководящий документ МРД 01-2011 [20], который решением III Национального Конгресса по комплексной безопасности в строительстве (май 2012 года) предложено адаптировать для строительных объектов невоенного и двойного назначения с учётом того, что МРД 01-2011 содержит программно-методическое обеспечение мониторинга состояния зданий и сооружений, в отличие от СП 13-102-2003, ГОСТ Р 22.1.12-2005 и ГОСТ Р 53778-2010.

Вместе с тем с учётом того, что в СП 13-102-2003 и ГОСТ Р 53778-2010 имеются разночтения по классификации технических состояний зданий и сооружений (рис. 7), то приходится признать, что выше сформулированная задача 2 ещё далека от своего разрешения. Требуются совместные усилия сообщества специалистов в данной области для принятия обоснованного и согласованного решения по приемлемой для практики классификации технических состояний зданий и сооружений. Однако это не повод для того, чтобы не предпринимать попытки к решению задач 3 и 4 с целью совершенствования методик оценивания надёжности эксплуатируемых строительных объектов. В этой связи в рамках МРД 01-2011 [15] Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

специалистами академии предпринята попытка использования методических указаний РД 03-418-01 [21] применительно к оцениванию риска возникновения неработоспособных (в том числе аварийных) состояний (рис. 7) зданий и сооружений с допущением того, что число  $N$  таких состояний в заданный период эксплуатации строительного объекта  $T_э$  (годы) не должно превышать единицы ( $N = 1$ ) (см. задачу 4), и тогда вероятность  $\Pi$  такого события в соответствии с РД 03-418-01 [21] равна:

$$\Pi = \frac{N}{T_э} = \frac{1}{T_э}. \quad (16)$$

### ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

зданий и сооружений		инженерно-технических систем
СП 13-102-2003	ГОСТ Р 53778-2010	ГОСТ 27.002-89
исправное	нормативное (проектное)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">1) работоспособное (при отсутствии отказов)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">2) неработоспособное (при наличии отказов)</div>
работоспособное	+	
ограниченно работоспособное	+	
недопустимое	—	
аварийное	+	

← НАГРУЗКИ

**Рисунок 7. Категории технических состояний**

Методологически очевидно, что вероятность риска  $\Pi$  (16) должна быть взаимосвязана со степенью снижения несущей способности (НС) (10), (13)-(15) элементов зданий и сооружений, которая в свою очередь должна быть основным аргументом при оценивании вероятности  $P = \{0, 1\}$  того, что в заданный момент времени строительный объект будет находиться в заданном состоянии в соответствии с ГОСТ 27751-88:

$$P = f(НС). \quad (17)$$

В этой связи в академии выполнен анализ большого числа статистических данных [5, 6] по поведению СС (рис. 2) при многолетних запусках РКН (так, по открытым данным в интернете с 1965 года по апрель 2011 года в нашей стране было выполнено 364 пуска тяжёлой РКН типа «Протон»). Это позволило получить экспертные оценки зависимости

$$P = f(\eta), \quad (18)$$

представленной на рисунке 8 кривой ABCD, аппроксимация которой степенной функцией дала результат в виде кривой AB'C'D' на рисунке 8:

$$P = \eta^6 - 1, \quad (19)$$

где  $P$  – вероятность обрушения сооружения;

$$\eta = [НС]/(НС)_ф;$$

$[НС]$  – требуемая (проектная) несущая способность элементов сооружения;

$(НС)_ф$  – фактическая несущая способность элементов сооружения в течение заданного периода эксплуатации  $T_э$ .

Полученная таким образом зависимость (19) отражает искомую зависимость (17) [6].

В случаях снижения фактической НС

$$(НС)_ф \rightarrow 0, \quad (20)$$

параметр  $\eta$  возрастает в пределах от 1 до  $\infty$ . Однако в случаях, когда  $(НС)_ф > [НС]$  (когда имеется запас по НС), параметр  $\eta$  принимает значения меньше 1.

Из физического смысла очевидно, что при значениях параметра  $\eta$

$$\eta = [HC]/(HC)_\phi \leq 1 \quad (21)$$

вероятность  $P$  (19) обрушения (выхода из строя грунтового основания или конструкций) сооружения должна быть равна нулю, что и представлено на номограмме рисунка 8.

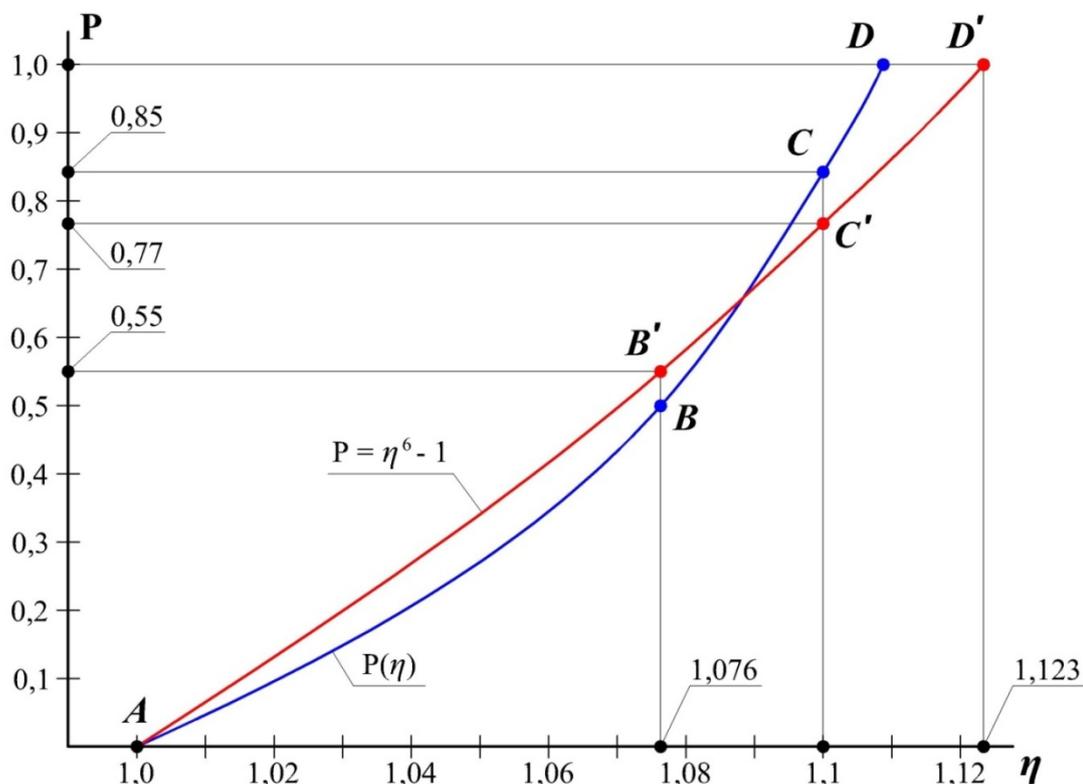


Рисунок 8. Графики функции по зависимости (19) и по экспертной оценке  $P(\eta)$

Анализ вышеуказанных многолетних статистических данных для стартовых сооружений (рис. 2) показал, что вероятность обрушения конструкций (например, плит перекрытий газохранилищ), равная единице ( $P=1$ ), по полученной зависимости (19) (см. рис. 8) наступает при увеличении параметра  $\eta$  до 1,123, то есть при снижении фактической несущей способности конструкций  $CC$   $(HC)_\phi$  примерно до 11,2%.

Представленный методический приём в виде использования зависимостей типа (17), (18), с одной стороны, демонстрирует пример того, как на практике (задача 3) может быть реализовано оценивание количественного показателя надёжности зданий и сооружений по вероятности  $P$  выхода их из строя в соответствии с требованиями ГОСТ 27751-88 и ГОСТ Р 54257-2010 по «надёжности строительных конструкций и оснований». С другой стороны, конкретно полученная зависимость (19), строго говоря, пригодна только для данного типа строительных объектов в виде уникальных стартовых сооружений (рис. 2), для которых в распоряжении экспертов оказалась достаточно состоятельная выборка статистических данных как по длительности эксплуатации  $T_3$  в (16) (46 лет), так и по числу циклов технологических воздействий на стартовые сооружения в виде пусков РКН типа «Протон»-364. С учётом того, что в течение  $T_3 = 46 \text{ лет}$  (с 1965 по 2011 годы) не имел места ни один аварийный пуск РКН типа «Протон» с её аварийным взрывом и разрушением  $CC$  (рис. 2) (абсолютный рекорд по надёжности в мировой космонавтике: невыведение космических аппаратов на заданные орбиты не в счёт), то фактическая вероятность риска обрушения стартовых сооружений по показателю  $\Pi$  (16) (задача 4) составляет:

$$\Pi = 1/46 = 0,0217 = 2,17 \cdot 10^{-2}. \quad (22)$$

Вместе с тем при использовании количественных показателей надёжности  $\Pi$  (16) и  $P$  (17)-(19) возникает вопрос о том, как поддерживать требуемый уровень несущей способности зданий и сооружений, не доводя его до предельного значения  $\eta = 1,123$  (см. рис. 8), и как это математически учитывать в практике эксплуатации строительных объектов.

Одним из возможных методических подходов, используемых в разработанном в академии МРД 01-2011 [15], может быть применение теоретических основ эксплуатации зданий и сооружений, разработанных профессором ВКА им. А.Ф.Можайского М.Д.Бойко, разработавшим в академии ещё в 50-х годах прошлого века курс «Эксплуатация зданий и сооружений» [22, 23]. В данном подходе [20, 22, 23] используется стратегия поддержания эксплуатационной пригодности зданий и сооружений, отображаемая в графо-аналитическом виде (рис. 9), как случайный процесс снижения несущей способности элементов зданий и сооружений в течение заданного срока эксплуатации  $T_3$  и повышения несущей способности за счёт периодического выполнения ремонтно-восстановительных работ (РВР) с финансовыми затратами на их выполнение  $\Delta C_i$ . В МРД 01-2011 [20] представлена методика оптимизации графо-аналитической зависимости  $\Delta C_i = f(T_3, \text{объём РВР})$  (рис. 9) в сочетании с вероятностью обрушения  $P$  строительного объекта, определяемой по зависимостям типа (17)-(19) (рис. 8). Подобная методика может быть использована для оптимизации эксплуатационных затрат на поддержание функциональной готовности не только специальных сооружений (СС, рис. 2), например, военного и двойного назначения, но и для обычных зданий и сооружений, поднадзорных ЖКХ, а также для объектов с промышленно опасными производствами.

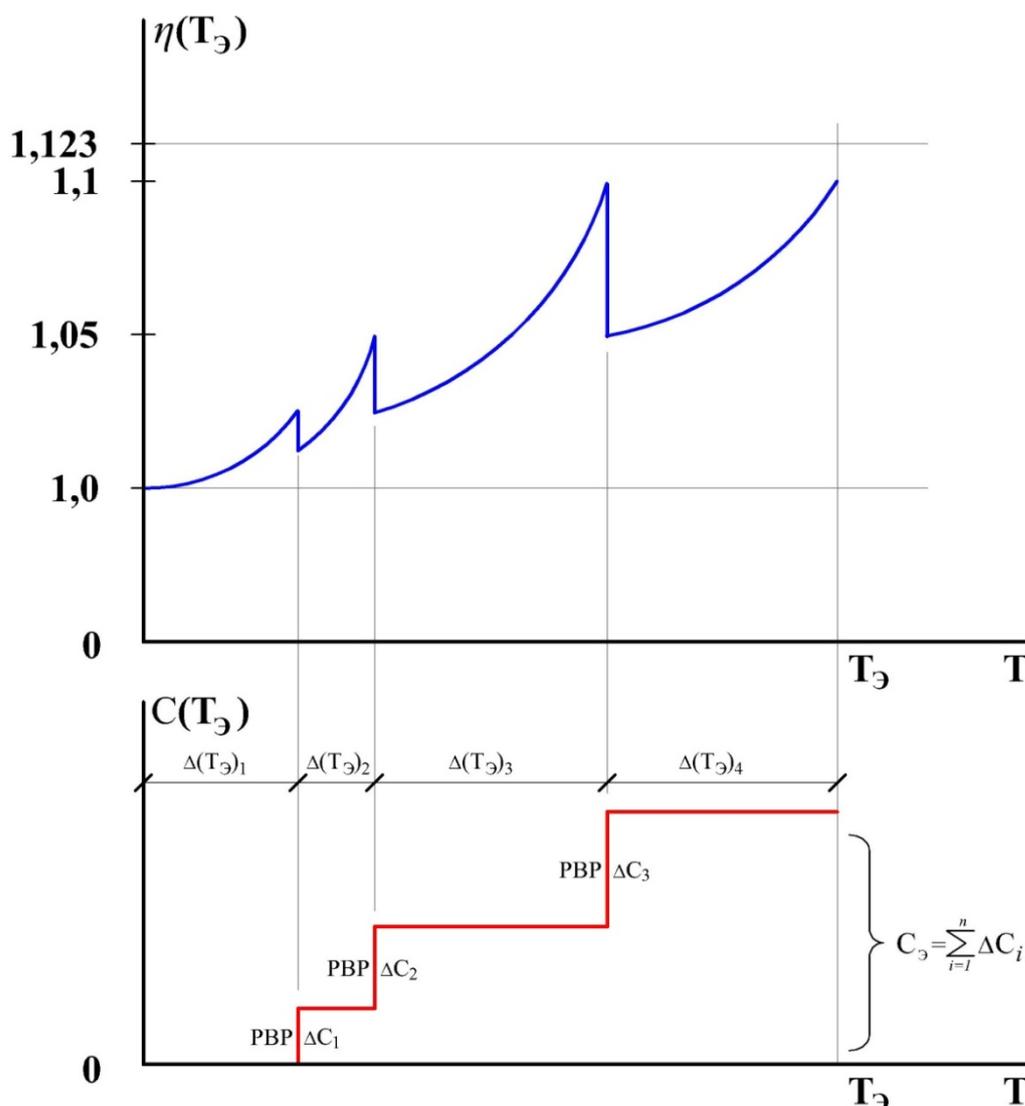


Рисунок 9. Пример зависимостей  $\eta(T_3)$  и  $C(T_3)$

## Выводы

Полученные результаты исследований обеспечивают решение актуальной научно-практической задачи по диагностированию технического состояния строительных конструкций и грунтовых оснований по критерию снижения их несущей способности **аппаратурными** методами тестово-функциональной вибрационной диагностики для зданий и сооружений, подверженных воздействию динамических (в том числе случайных по пространству и времени) нагрузок. При этом показано, что разработанный метод тестово-функциональной вибрационной диагностики реализует интегральный подход к оцениванию снижения несущей способности элементов строительных объектов, обобщённо учитывающий вклад всех физико-механических характеристик материала конструкций и грунтовых массивов (10), (13)-(15) в формирование их несущей способности, обусловленной «стабильностью – нестабильностью» жёсткости несущих элементов зданий и сооружений.

Использование указанных аппаратурных методов в современных системах мониторинга инженерных конструкций (СМИК) по регламентации ГОСТ Р 22.1.12-2005 и ГОСТ Р 53778-2010 позволяет существенно повысить эффективность оценивания надёжности эксплуатируемых зданий и сооружений по количественным показателям вероятности возникновения заданных состояний строительных объектов.

На примере уникальных стартовых сооружений (рис. 2) при использовании прототипов современных СМИК в виде систем «испытания и долговременного контроля» (рис. 3) показано, что наличие многолетней состоятельной выборки статистических данных позволяет получать обоснованные зависимости для определения и прогнозирования снижения количественных показателей надёжности эксплуатируемых строительных объектов как вероятности  $P=\{0, 1\}$  обрушения конструкций объекта по мере снижения их несущей способности (17)-(19) (рис. 8) и вероятности  $P$  риска возникновения неработоспособных (в том числе аварийных) состояний (16), (22) зданий и сооружений.

Полученные результаты исследований реализованы в межотраслевом руководящем документе, разработанном в ВКА имени А.Ф.Можаевского, МРД 01-2011 «Методические рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния несущих элементов зданий и сооружений» [20], позволяющем разрабатывать программно-методическое обеспечение мониторинга технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений по критериям снижения несущей способности их элементов (конструкций и грунтового основания) с определением количественных показателей их надёжности и риска возникновения неработоспособных и аварийных состояний.

## Литература

1. Рогонский В. А., Костриц А. И., Шеряков В. Ф. Эксплуатационная надёжность зданий и сооружений. СПб: Стройиздат СПб, 2004. 272 с.
2. Обследование и испытание зданий и сооружений. Поверочные расчёты: Метод. Указания / Сост. В. А.Соколов, Л. Н.Синяков, Д. А.Страхов. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 68 с.
3. Солдатенко Т. Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов её обследования // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 52-61.
4. Соколов В. А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечётких множеств // Инженерно-строительный журнал. 2010. №5(15). С. 31-37.
5. Козин А. П., Исхаков Ш. Ш., Васкевич В. М., Ковалев Ф. Е. Методы вибрационного и тензометрического диагностирования состояния несущих конструкций и грунтовых оснований специальных сооружений при воздействии динамических нагрузок // Сб. науч. трудов №9 (Предотвращение аварий зданий и сооружений). М., 2010. С. 404-414.
6. Исхаков Ш. Ш., Васкевич В. М., Ковалев Ф. Е., Рыжиков В.Ю. Проблемы оценивания надёжности зданий и сооружений на стадии их эксплуатации // Сб. науч. трудов №10 (Предотвращение аварий зданий и сооружений). М., 2011. С. 210-221.
7. Исхаков Ш. Ш., Ковалев Ф. Е. Принципы идентификации параметров входных и выходных процессов при мониторинге зданий и сооружений, подверженных динамическим воздействиям // Сб. докладов Международных научных чтений (Белые ночи – 2008). Ч. 2. СПб: МАНЭБ, 2008. С. 343-346.

Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний

8. Исхаков Ш. Ш., Васкевич В. М., Ковалев Ф. Е. Адаптация результатов вибрационного мониторинга массивных специальных сооружений к сейсмическим исследованиям динамики зданий и сооружений в плотной застройке городов // Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах: коллективная монография. Гл. 19. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 220-234.
9. Boldyrev G. G., Valeev D., Idrisov I., Krasnov G. A System for Static Monitoring of Sports Center Structures. Proceedings of the 7th International Workshop Structural Health Monitoring. Editor Fu-Kuo Chang, Stanford Univesity. Vol. 1, 2009. Pp. 374-382.
10. Grosse C. U., Finck F., Kurz J., Reinhard H.-W. Monitoring Techniques Based on Wireles AE Sensors for Large Structures in Civil Engineering. Proc. EWGAE 2004 symposium in Berlin. DGZfP: Berlin, BB90, 2004. Pp. 843-856.
11. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: a literature review. Report No. LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NV, 1996. 127 p.
12. Исхаков Ш. Ш. Вибрационная диагностика сооружений в условиях низкой информативности данных по параметрам случайных входных воздействий. Тезисы докладов. Программа Всесоюзной конференции по транспортным сооружениям. Л., 1988. С. 2.
13. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
14. Кондаков Н. И. Логический словарь-справочник. М.: Наука, 1975. 717 с.
15. Савинов О. А. Фундаменты под машины. Л., М.: Стройиздат, 1955. 292 с.
16. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками / Госстрой СССР. М., 1988. 52 с.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
18. А. с. RU(21) 2008 147445/28(13)А. Метод функциональной вибрационной диагностики изменения несущей способности грунтового основания и строительных конструкций зданий и сооружений / Н.Н. Гусев, Ш.Ш. Исхаков. – №2008147445; заявл. 01.12.2008; опубл. 2010, Бюл. №16 ФГУ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 3 с.
19. Исхаков Ш. Ш. Вибрационная тестово-функциональная диагностика состояния строительных конструкций при мониторинге зданий и сооружений для предупреждения чрезвычайных ситуаций / Монография. ВКА им. А.Ф.Можайского. СПб, 2011. 164 с.
20. МРД 01-2011. Методические рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния несущих элементов зданий и сооружений / ВКА им. А.Ф.Можайского. СПб, 2012. 110 с.
21. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов / Ростехнадзор России. М., 2002. 28 с.
22. Бойко М. Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. Л.: Стройиздат, 1975. 334 с.
23. Бойко М. Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений. Л.: Стройиздат, 1986. 256 с.

*\* Федор Евгеньевич Ковалев, Санкт-Петербург, Россия*

*Тел. моб.: +7(911)028-09-69; эл. почта: kovaleff81@mail.ru*

© Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю., 2012

doi: 10.18720/MCE.33.10

## Estimating reliability of buildings and structures according to the methods of the risk of unserviceability

**Sh.Sh. Iskhakov,  
F.E. Kovalev,  
V.M. Vaskevich,  
V.Yu. Ryzhikov,**

*Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia  
+7(911)028-09-69; e-mail: kovaleff81@mail.ru*

### Key words

testing; control; risks; vibration diagnostics; monitoring buildings and structures; technical condition; bearing elements; monitoring system

### Abstract

This paper analyzes the main problems of estimating the reliability of buildings and structures. The first of these is the lack of quantitative reduction of bearing capacity of structures and subgrade in the transition of their technical condition from one category to another. The second is the lack of instrumental methods for estimating the bearing capacity.

On the base of the great theoretical and practical experience in special facilities the authors propose the monitoring capabilities of the bearing elements of such structures under the static and dynamic loads. Using the integral method of diagnosing the state of dynamically loaded buildings based on the search for diagnostic features to reduce the carrying capacity of structures and foundation soil in the transfer function of the object from a known model of "black box" is suggested.

These results open new perspectives for research diagnosis of buildings and structures under dynamic loads. The proposed method has been tested and has been implemented in the cross-sectoral guidance document MRD 01-2011 "Guidelines for screening and monitoring of the technical state of load-bearing elements of buildings and structures", developed at the Mozhaisky Military Space Academy.

### References

1. Rogonskiy V. A., Kostrits A. I., Sheryakov V. F. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost zdaniy i sooruzheniy* [The operational reliability of buildings and structures]. Saint-Petersburg: Stroyizdat, 2004. 272 p. (rus)
2. Sokolov V. A., Sinyakov L. N., Strakhov D. A. *Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy. Poverochnye raboty: metodicheskie ukazaniya* [Inspection and testing of buildings and structures. Checking calculations: Guidelines]. Saint-Petersburg: Publishing of SPSPU, 2007. 68 p. (rus)
3. Soldatenko T. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 7. Pp. 52-61. (rus)
4. Sokolov V. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 5 (15). Pp. 31-37. (rus)
5. Kozin A. P., Iskhakov Sh. Sh., Vaskevich V. M., Kovalev F. E. *Sbornik nauchnykh trudov No. 9 (Predotvrashchenie aviary zdaniy i sooruzheniy)* [Collection of scientific works No. 9 (Prevention of Accidents buildings)]. Moscow: OOO «VELD» and other, 2010. Pp. 404-414. (rus)
6. Iskhakov Sh. Sh., Vaskevich V. M., Kovalev F. E., Ryzhikov V. Yu. *Sbornik nauchnykh trudov No. 10 (Predotvrashchenie aviary zdaniy i sooruzheniy)* [Collection of scientific works No. 10 (Prevention of Accidents buildings)]. Moscow: OOO «VELD» and other, 2011. Pp. 210-221. (rus)
7. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F. E. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnykh nauchnykh chteniy (Belye nochi-2008)* [Collection of the International Scientific Readings (White Nights - 2008)]. Part 2. Saint-Petersburg: MANEB, 2008. Pp. 343-346. (rus)
8. Iskhakov Sh. Sh., Vaskevich V. M., Kovalev F. E. *Seismologicheskie issledovaniya v arkticheskikh i priarkticheskikh regionakh: kollektivnaya monografiya* [Seismological research in the Arctic and subarctic regions: collective volume]. Vol. 19. Ekaterinburg: UrORAN, 2011. Pp. 220-234. (rus)
9. Boldyrev G. G., Valeyev D., Idrisov I., Krasnov G. A. System for Static Monitoring of Sports Center Structures. *Proceedings of the 7th International Workshop Structural Health Monitoring*. Editor Fu-Kuo Chang, Stanford Univesity. 2009. Vol. 1. Pp. 374-382.

Iskhakov Sh.Sh., Kovalev F.E., Vaskevich V.M., Ryzhikov V.Yu. Estimating reliability of buildings and structures according to the methods of the risk of unserviceability

10. Grosse C. U., Finck F., Kurz J., Reinhard H.-W. Monitoring Techniques Based on Wireless AE Sensors for Large Structures in Civil Engineering. *Proc. EWGAE 2004 symposium in Berlin*. DGZfP: Berlin, BB90. 2004. Pp. 843-856.
11. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: a literature review*. Report No. LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NV. 1996. 127 p.
12. Iskhakov Sh. Sh. *Vibratsionnaya diagnostika sooruzheniy v usloviyakh nizkoy informativnosti dannykh po parametram slucheynykh vkhodnykh vozdeystviy. Tezisy dokladov. Programma Vsesoyuznoy konferentsii po transportnym sooruzheniyam* [Vibration diagnostics facilities in low-informative data on the parameters of random input actions. Abstracts. Program Union conference on transport facilities]. Leningrad, 1988. P. 2. (rus)
13. Bolotin V. V. *Primenenie metodov teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy* [The use of methods of the theory of probability and reliability theory in the analysis of structures]. Moscow: Stroyizdat, 1971. 255 p. (rus)
14. Kondakov N. I. *Logicheskiy slovar-spravochnik* [Logical vocabulary Directory]. Moscow: Nauka, 1975. 717 p. (rus)
15. Savinov O. A. *Fundamenty pod mashiny* [Foundations for machines]. Leningrad, Moscow: 1955. 292 p. (rus)
16. SNiP 2.02.05-87. *Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami* [Foundations machines with dynamic loads]. Moscow, 1988. 52 p. (rus)
17. Bendat J., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchaynykh protsessov* [Measurement and analysis of random processes]. Moscow: Mir, 1974. 464 p. (rus)
18. A. s. RU (21) 2008. 147445/28(13)A. Gusev N. N., Iskhakov Sh. Sh. *Metod funktsionalnoy vibratsionnoy diagnostiki izmeneniya nesushchey sposobnosti gruntovogo osnovaniya i stroitelnykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Vibration testing method of functional changes subgrade bearing capacity and construction of buildings and structures]. No. 2008147445. 01.12.2008. Published in 2010. 3 p. (rus)
19. Iskhakov Sh. Sh. *Vibratsionnaya testovo-funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya stroitelnykh konstruktaiy pri monitoring zdaniy i sooruzheniy dlya preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy* [Vibration test-functional diagnostics of building structures in the monitoring of buildings and structures to prevent emergencies]. Monograph. Saint-Petersburg: Mozhaiskiy Military Space Academy, 2011. 164 p. (rus)
20. MRD 01-2011. *Metodicheskie rekomendatsii po obsledovaniyu i monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh elementov zdaniy i sooruzheniy* [Guidelines for screening and monitoring of the technical state of bearing elements of buildings and structures]. Saint-Petersburg: Mozhaiskiy Military Space Academy, 2012. 110 p. (rus)
21. RD 03-418-01. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnykh proizvodstvennykh obektov* [Guidance on the risk analysis of hazardous production facilities]. Moscow: Gostekhnadzor, 2002. 28 p. (rus)
22. Boyko M. D. *Diagnostika povrezhdeniy i metody vosstanovleniya ekspluatatsionnykh kachestv zdaniy* [Diagnosis of damage and recovery methods performance of buildings]. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 334 p. (rus)
23. Boyko M. D. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont zdaniy i sooruzheniy* [Maintenance and repair of buildings and structures]. Leningrad: Stroyizdat, 1986. 256 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 76-88**