



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2011, ТОМ 17, НОМЕР 2, 105–113

УДК 624.071.2

(11)-0236-1

## **ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ БАЛОЧНИХ І ВСИЯЧИХ КОМБІНОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**О. М. Болдирев, А. О. Свентіков, А. А. Свентікова**

*Воронезький державний архітектурно-будівельний університет,*

*вул. 20-ліття Жовтня, 84, м. Воронеж, Росія, 394006.*

*E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru*

*Отримана 3 квітня 2011; прийнята 22 квітня 2011.*

**Анотація.** Представлена методика оцінки надійності сталевих балочних і всисячих конструкцій. У основу покладена ідея прямої оцінки: аварійні ситуації для імовірнісного розрахунку приймаються виходячи з нелінійного розрахунку конструкції. Безпосередня імовірнісна оцінка виконана з використанням методу статистичних випробувань у формі модифікованих стратифікованих вибірок. Статистичний облік розвитку пластичних деформацій виконаний на основі запропонованого критерію обмежених пластичних деформацій. Загальна надійність конструктивної системи оцінюється по критерію руйнування матеріалу. Запропонована методика ілюструється на прикладі розгляду однопролітної всисячої системи з вертикальними підвісками. На основі сформованих критеріїв відмови запропонована класифікація технічних станів балочних і всисячих конструкцій.

**Ключові слова:** конструкція, стрижень, гнучка нитка, оцінка, напруження, деформація, пластика, вірогідність.

## **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БАЛОЧНЫХ И ВСИЯЧИХ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**А. М. Болдырев, А. А. Свентиков, А. А. Свентикова**

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,*

*ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Россия, 394006.*

*E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru*

*Получена 3 апреля 2011; принята 22 апреля 2011.*

**Аннотация.** Представлена методика оценки надежности стальных балочных и всисячих конструкций. В основу положена идея прямой оценки: аварийные ситуации для вероятностного расчета принимаются исходя из нелинейного расчета конструкции. Непосредственная вероятностная оценка выполнена с использованием метода статистических испытаний в форме модифицированных стратифицированных выборок. Статистический учет развития пластических деформаций выполнен на основе предложенного критерия ограниченных пластических деформаций. Общая надежность конструктивной системы оценивается по критерию разрушения материала. Предложенная методика иллюстрируется на примере рассмотрения однопролетной всисячей системы с вертикальными подвесками. На основе сформированных критериев отказа предложена классификация технических состояний балочных и всисячих конструкций.

**Ключевые слова:** конструкция, стержень, гибкая нить, оценка, напряжение, деформация, пластика, вероятность.

## EVALUATION OF RELIABILITY OF BEAM AND SUSPENSION COMBINED STRUCTURES

**Boldyrev Alexander, Sventikov Andrey, Sventikova Anastasiya**

*Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering,*

*84, 20th Anniversary of October Str., Voronezh, Russia, 394006.*

*E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru*

*Received 3 April 2011; accepted 22 April 2011.*

**Abstract.** There is presented a technique of evaluating reliability of steel beam and suspension structures based on the idea of the direct assessment: emergency situations for a probabilistic design are considered on grounds of the nonlinear design of a structure. A direct probabilistic estimation was done with the use of the method of statistical tests in the form of modified stratified retrievals. The statistical record of the development of plastic deformations was done on the base of the suggested criterion of small-scale plastic deformations. The general reliability of the constructive system is estimated by the criterion of a material failure. The suggested technique is illustrated by considering a single-span suspension system with vertical suspenders. On the base of the failure criteria formed there was suggested a classification of technical states of beam and suspension structures.

**Keywords:** structure, core, flexible cord, estimation, strain, deformation, plastics, probability.

### Введение

Одной из наиболее важных для строительной отрасли является задача анализа надежной работы стальных конструкций. В настоящей работе рассмотрим оценку напряженно-деформированного состояния балочных и висячих конструкций с учетом развития пластических деформаций.

### Расчет стальных конструкций за пределом упругости

Зависимость между напряжениями и деформациями в материале несущих элементов стальных конструкций опишем в виде кусочно-линейной функции с упрочнением [1, 2]:

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i \cdot (1 - \alpha_\varepsilon); \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_t \cdot \varepsilon_u - \sigma_u \cdot \varepsilon_t}{\varepsilon_u - \varepsilon_t} + \frac{\sigma_u - \sigma_t}{\varepsilon_u - \varepsilon_t} \cdot \varepsilon_i, \quad (2)$$

при  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_t$ ,  $\alpha_\varepsilon = 0$ ;  $\varepsilon_i > \varepsilon_t$ ,  $0 < \alpha_\varepsilon < 1$ ,

где  $E$ ,  $\sigma_t$ ,  $\varepsilon_t$  – модуль упругости, напряжение и относительное удлинение материала;  $\alpha_\varepsilon$  – коэффициент физической нелинейности (отношение секущего модуля упругости к начальному) [1];  $\varepsilon_t$  – относительное удлинение соответствующее достижению напряжений

пределу текучести  $\sigma_t$ ;  $\sigma_u$  – предел временного сопротивления;  $\varepsilon_u$  – относительное удлинение, соответствующее достижению напряжения в материале соответственно пределу временного сопротивления;  $E_s = \frac{\sigma_u - \sigma_t}{\varepsilon_u - \varepsilon_t}$  – секущий модуль упругости.

При расчете висячих конструкций учтем, что гибкие нити всегда находятся в условиях центрального растяжения [3, 11]. Тогда продольные усилия в упруго-пластичном гибком стержне будут определяться следующей системой уравнений:

1) Зона «А» – зона конструктивной нелинейности

$$\Delta \leq 0; H=0. \quad (3)$$

2) Зона «Б» – зона упругих деформаций

$$0 < \Delta \leq \Delta_p; H = \frac{E \cdot A}{l} \cdot \Delta. \quad (4)$$

3) Зона «В» – зона пластических деформаций

$$\Delta_t < \Delta \leq \Delta_u; H = \frac{E \cdot A}{l} \cdot \Delta \cdot (1 - \alpha_\varepsilon), \quad (5)$$

где  $H$  – распор в нити;  $E \cdot A$  – осевая жесткость нити.

4) Зона «Г» – зона разрушения

$$\Delta_u < \Delta; H=0. \quad (6)$$

В качестве основного метода расчета стальных конструкций использован метод конечных элементов в форме метода перемещений, а для учета нелинейных свойств – метод упругих решений [11].

Для тестирования предложенных расчетных положений была проанализирована нелинейная работа однопролетной стальной балки двутаврового сечения и плоскостной висячей системы с вертикальными подвесками, имеющей следующие основные параметры: пролет  $L = 100$  м, стрела провеса  $f = 12,5$  м ( $f/L = 1/8$ ), осевая жесткость несущей нити  $E A_k = 12 \cdot 10^6$  кН, изгибная жесткость балки жесткости  $E J_0 = 2 \cdot 10^7$  кН·м, величина постоянной нагрузки  $q = 20$  кН/м [3]. Характеристики материала гибких нитей принимались по рекомендациям для проектирования висячих конструкций и по результатам натурных исследований стальных канатов [3, 4, 6, 7]: временное сопротивление – 1 400 МПа, условный предел текучести – 750 МПа, относительное удлинение после разрыва – 3 %, модуль упругости –  $1,6 \cdot 10^5$  МПа. Конструкция рассчитывалась на несимметричную временную равномерно распределенную нагрузку значением  $p$ . Расчетная схема и схема нагружения изучаемой висячей системы приведены на рис. 1а.

Анализ полученных данных показал, что в изучаемых системах пластические деформации начинают возникать при прогибах порядка  $1/450 \div 1/400$  пролета. При достижении значений около  $1/240 \div 1/220 L$  в балке жесткости наблюдается значительное возрастание перемещений («течение» деформаций в висячей комбинированной и балочной конструкции нами предложено называть «условным пластическим шарниром».

Уровень остаточных пластических деформаций, соответствующих возникновению «условного пластического шарнира»  $\varepsilon_r = 0,0038$  (рис. 1.в) достаточно близок к предельно-допустимому значению (0,004) (согласно «Рекомендациям по расчету стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций», ЦНИИПроект-стальконструкция, г. Москва, 1985 г. [5]), что

позволяет сделать вывод о достаточной надежности предложенной методики нелинейного расчета.

Также полученные результаты позволяют говорить об отнесении указанного состояния к так называемому третьему предельному состоянию: по Н. С. Стрелецкому – состояние строительной конструкции с недопустимым уровнем повреждений [9].

### Вероятностный расчет висячих конструкций

В качестве основных количественных характеристик, оценивающих надежность строительной конструкций, используем вероятность безотказной работы  $P$  и вероятность отказа или риск  $P_f = 1 - P$  [8, 9]. Принимая, что случайные величины подчиняются нормальному закону распределения, условие отказа выразим следующим образом [8]:

$$\bar{G} = \bar{R} - \bar{Q} \leq 0; \quad (7)$$

$$P = \int_{-\infty}^0 P_G(G) \cdot dG; \quad (8)$$

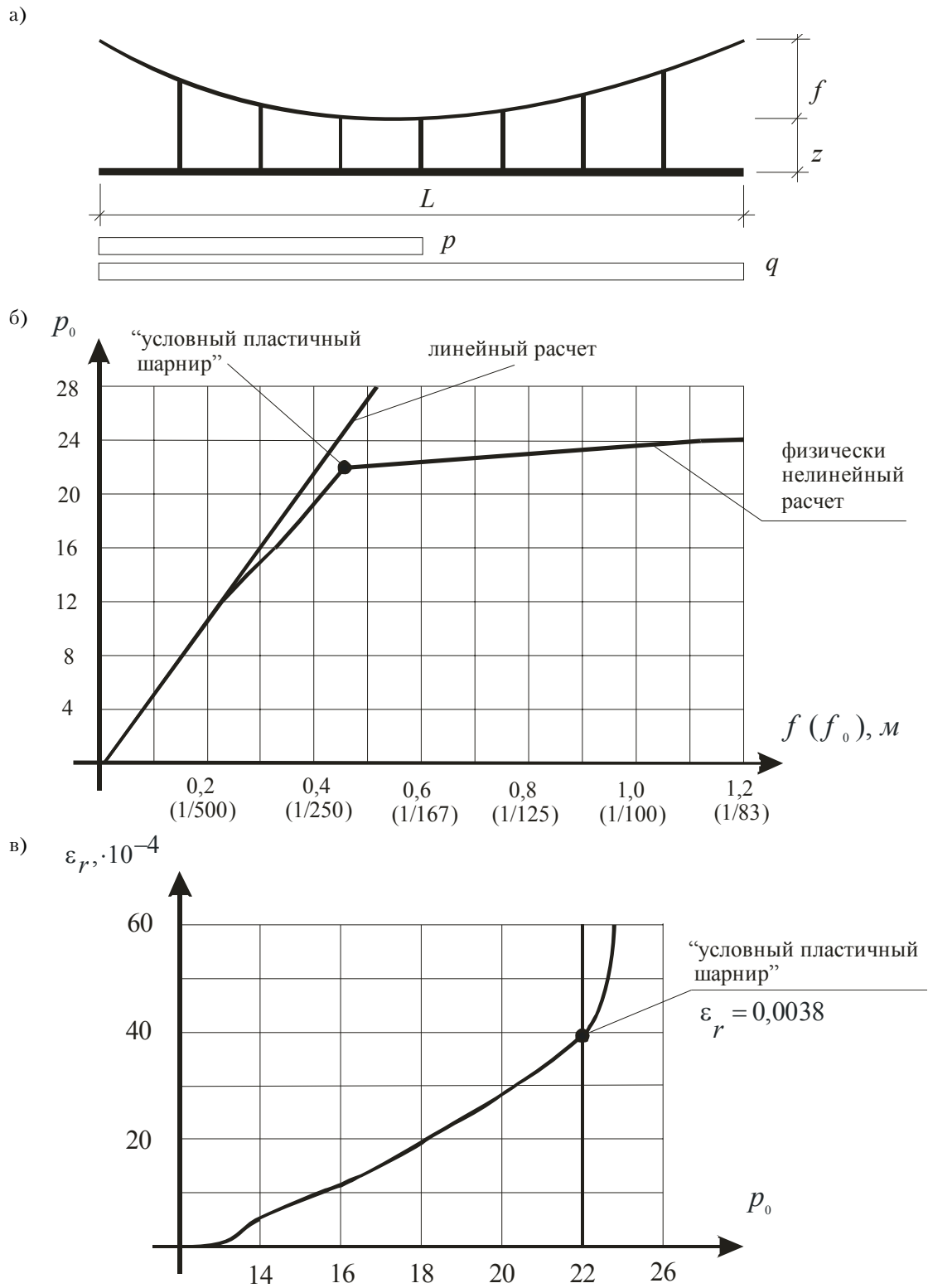
$$P_f = P(G < 0) = \frac{1}{S_G \cdot \sqrt{2\pi}} \times \int_{-\infty}^0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x - G_m}{S_G} \right)^2 \right] \cdot dx; \quad (9)$$

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{x - G_m}{S_G} \right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (10)$$

где  $\bar{R}$  – обобщенная прочность;  $\bar{Q}$  – обобщенная нагрузка;  $\bar{G}$  – обобщенная несущая способность (или резерв прочности);  $P_G(G)$  – интегральная функция распределения несущей способности;  $\Phi$  – интеграл вероятности Гаусса;  $\beta = (x - G_m)/S_G$  – характеристика безопасности А. Р. Ржаницина.

Отметим, что для конструкций с нелинейными свойствами наиболее точным подходом к оценке их риска является использование методов статического моделирования [8, 9]. При этом методе оценка вероятности отказа осуществляется по частоте события:

$$Q > R. \quad (11)$$



**Рисунок 1.** Тестовый пример расчета системы с вертикальными подвесками: а – расчетная схема и схема загрузки; б – график изменения максимальных прогибов системы; в – график изменения максимальных остаточных деформаций.

Численная реализация данного метода заключается в выполнении достаточно большого числа испытаний по схеме Бернулли, т. е. на каждом испытании генерируются случайные реализации всех исходных величин. После этой генерации выполняется детерминированный расчет строительной конструкции и проверка условия (12). Если условие выполняется, то исходом данного испытания считается отказ. Частота появления отказа  $\nu$  рассматривается как оценка вероятности  $P_f$ :

$$\nu = \frac{k}{m} \approx P_f, \quad (12)$$

где  $k$  – число отказов;  $m$  – общее число испытаний.

В настоящей работе приняты следующие условия возникновения отказов в несущих элементах конструкции:

1. Нарушение условия непревышения напряжений в элементах предела текучести ( $\sigma_i \leq \sigma_y$ ). Данное условие будем называть *отказом по упругим деформациям*.
2. Нарушение условия непревышения напряжений значений в элементах напряжениям, соответствующим остаточным деформациям при возникновении пластического шарнира ( $\sigma_i \leq \sigma_{lim}$ ). Данное условие будем называть *отказом по ограниченным пластическим деформациям*.
3. Нарушение условия непревышения напряжений в элементах предела временного сопротивления ( $\sigma_i \leq \sigma_u$ ). Данное условие будем называть *отказом по разрушению материала*.

Отметим, что первый вид отказа является базовым для сравнительной вероятностной оценки напряженно-деформированного состояния стальных конструкций. Второй вид отказа является некоторым промежуточным между отказом по упругим деформациям и отказом по разрушению и характеризует развитие пластических деформаций со статистических позиций, а отказ по разрушению материала в комбинации с принципом единичного разрушения (допустимости разрушения в конструкции только одного элемента) характеризует вероятность возникновения ситуации так называемого прогрессирующего разрушения.

### Тестирование вероятностной оценки напряженно-деформированного состояния

Тестирование предложенной вероятностной оценки напряженно-деформированного состояния стальных конструкций выполним на примере изучения рассмотренной выше висячей конструкции с вертикальными подвесками. В исследованиях было принято, что разброс значений эксплуатационной нагрузки (постоянной и временной) составлял 40 %; сопротивлений стальных прокатных элементов (балок жесткости) – 10 %; а канатов (несущих нитей и подвесок) – 7 %.

На рис. 2 приведены графики изменения характеристики безопасности  $\beta$  от интенсивности нагрузки. Из анализа приведенных результатов следует, что уровень характеристики  $\beta$  для критерия упругих деформаций составляет около 3,2, а для критерия ограниченно пластических деформаций – 1,85. К одним из наиболее распространенных норм по индексу надежности относятся британские нормы [9, 10], согласно которым уровень риска аварии  $R$  (характеристики безопасности) оценивается по следующей зависимости:

$$R = 3,5 - C - D, \quad (15)$$

где  $C$  – параметр населенности;  $D$  – конструктивный параметр.

Для нормальных условий (NORMAL) посещения здания нормативный уровень риска имеет значение  $1,3 \div 2,5$ , а для повышенных условий (FULL)  $2,3 \div 3,5$  [9, 10]. Следовательно, полученные нами результаты имеют хорошую сопоставимость с указанными нормами, что указывает на допустимость предложенных вероятностных расчетных положений.

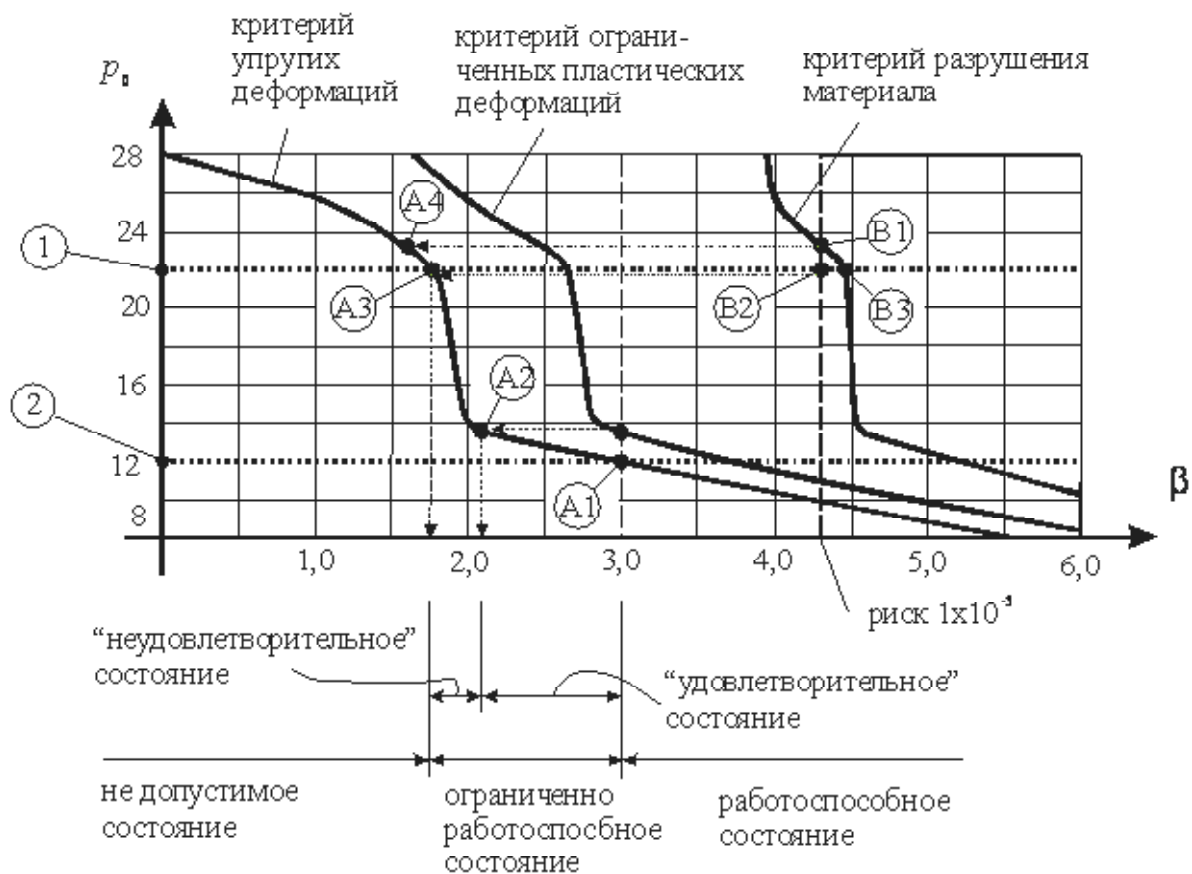
Исходя из сопоставления характеристики безопасности при отказе по упругим деформациям (т.А1) и при отказе по ограниченно пластических деформациям (т.А2) установлено, что статистический коэффициент учета развития пластических деформация для висячей системы с вертикальными подвесками составляет около 1,1. Отметим, что согласно СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» аналогичный коэффициент имеет значение порядка  $1,12 \div 1,13$ . Выявленный факт объясняется более развитой по длине балки в висячей системе зоны развития пластических деформаций по сравнению с традиционной балочной конструкцией.

При анализе надежности висячих покрытий по критерию разрушения материала выделены следующие расчетные точки: В1 – разрушение какого-либо элемента при уровне естественного риска, что характеризует момент создания аварийной ситуации прогрессирующего разрушения; В2 – возникновение пластического шарнира при уровне естественного риска, что характеризует эксплуатационную надежность покрытия в целом; В3 – разрушение какого-либо элемента при уровне нагрузки возникновения пластического шарнира. Отметим, что точки В2 и В3 характеризуют третье предельное состояние по Н. С. Стрелецкому.

Анализ полученных данных показал, что в висячей конструкции с вертикальными подвесками вероятность создания аварийной ситуации прогрессирующего разрушения меньше, чем возникновения пластического шарнира. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для данного типа висячих систем фактор прогрессирующего разрушения является малозначительным по сравнению с учетом развития пластических деформаций.

Исходя из проведенных исследований, предлагается следующая классификация состояний висячих конструкций:

1 – «работоспособное» или «нормальное» состояние – стадия развития упругих дефор-



**Рисунок 2.** Результаты оценки надежности висячей системы с вертикальными подвесками: т.1 – возникновение пластического шарнира; т.2 – возникновение пластических деформаций; т.А1 – расчетная точка по упругим деформациям; т.А2 – расчетная точка по ограниченным пластическим деформациям; т.А3 – расчетная точка по возникновению «условного пластического шарнира»; т.А4 – расчетная точка разрушения материала (единичного разрушения элемента); т.В1 – расчетная точка по разрушению материала при уровне естественного риска (аварийная ситуация); т.В2 – расчетная точка возникновения пластического шарнира при уровне естественного риска; т.В3 – расчетная точка по разрушению материала при уровне нагрузки возникновения пластического шарнира.

мацій характеризується отсутствием снижения несущей способности, уровень риска при этом менее естественного уровня риска: до расчетной точки А1 (упругих деформаций);

2 – «ограниченно работоспособное» – характеризуется снижением несущей способности, оно в свою очередь подразделяется на следующие два состояния:

а – «удовлетворительное» состояние – снижение несущей способности находится в «безопасных» пределах, на данной стадии происходит снижение до некоторого условно принятого уровня безопасного риска, согласно расчета по ограниченным пластическим деформациям: до расчетной точки А2 (ограниченных пластических деформаций);

б – «неудовлетворительное» – стадия стабилизации коэффициента безопасности до возникновения «условного пластического шарнира» (расчетная точка А3) или до разрушения какого-либо элемента (расчетная точка А4), на данной стадии необходимо проведение ремонтных работ по восстановлению несущей способности строительной конструкции;

3 – «недопустимое», на этой стадии конструкция эксплуатироваться не может.

В табл. 1 приведены сравнительные данные индексов надежности, вероятности отказа и безо-

пасной работы для предложенных категорий состояния висячих систем.

Отметим, что начало перехода состояния висячих систем в недопустимое состояние соответствует уровню риска порядка  $0,0401 \div 0,0446$ . Согласно «Рекомендаций по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам» (ЦНИИПромзданий Госстроя СССР), данный показатель имеет значение 0,15, что говорит о необходимости установления для висячих конструкций более высоких требований по обеспечению их надежности.

### Выводы

1. Предложена статистическая оценка напряженно-деформированного состояния балочных и висячих комбинированных конструкций, а также критерии отказа и статистический коэффициент учета развития пластических деформаций.

2. На основе вероятностного анализа напряженно-деформированного состояния предложена классификация технических состояний балочных стальных конструкций. Установлена необходимость установления к висячим конструкциям повышенных уровней надежности: характеристика безопасности должна составлять не менее 2,3, что соответствует вероятности отказа не более 0,0107.

Таблица 1. Характеристики категорий состояний висячих систем

№	Категория состояния	Характеристика категорий состояния		
		характеристика безопасности	вероятность безотказной работы	вероятность отказа
1	работоспособное	более 3,0	более 0,9987	менее 0,0013
2	ограниченно работоспособное			
2.а	«удовлетворительное»	$3,0 \div 2,3$	$0,9987 \div 0,9893$	$0,0013 \div 0,0107$
2.б	«неудовлетворительное»	$2,3 \div 1,75$	$0,9893 \div 0,9599$	$0,0107 \div 0,0401$
3	недопустимое	менее 1,75	менее 0,9599	более 0,0401

## Литература

1. Илюшин, А. А. Сопrotивление материалов / А. А. Илюшин, В. С. Ленский. – М.: Физматгиз, 1959. – 371 с.
2. Ржаницин, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
3. Кирсанов, Н. М. Висячие покрытия производственных зданий / Н. М. Кирсанов. – М.: Стройиздат, 1990. – 128 с.
4. Шимановский, В. Н. Расчет висячих конструкций за пределом упругости / В. Н. Шимановский, А. А. Соколов. – К.: Будівельник, 1975. – 104 с.
5. Рекомендации по расчету стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций / ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова. – М., 1985. – 49 с.
6. Рекомендации по выбору типов и расчету прочности стальных канатов, применяемых в строительных металлических конструкциях / ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова, М., 1991. – 32 с.
7. Дядькин, С. Н. Выбор канатов в качестве вант для автодорожного моста через Обь в районе Сургута / С. Н. Дядькин, В. А. Николаев, Б. Д. Мариков // Транспортное строительство. – 1999. – № 10. – С. 21–27.
8. Райзер, В. Д. Теория надежности в строительном проектировании / В. Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.
9. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А. В. Перельмутер. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 256 с.
10. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Г. Шпете. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
11. Свентиков, А. А. Нелинейный расчет висячих стержневых конструкций / А. А. Свентиков // Пространственные конструкции зданий и сооружений: (Исследование, расчет, проектирование и применение): Сб. статей / Ассоциация «Пространственные конструкции»; Белгородская государственная технологическая академия строительных материалов. – М.-Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1996. – Вып. 8. – С. 72–82.
12. Hansen, R. J. Human Response to Wind Induced Motion / R. J. Hansen, J. W. Reed, E. H. Vanmarcke // Proceedings ASCE. Journal of the Structural Division. – 1973. – Vol. 98, N ST7. – P. 1589–1605.
13. Holicky, M. Vagueness of Serviceability Requirements / M. Holicky, L. Ostlund // Proceeding the International Conference «Design and Assessment of Building Structures». – Prague, 1996. – Vol. 2. – P. 81–89.
14. Mrazik, A. Teoria spol`ahlovosti ocel`ovych konstrukcili / A. Mrazik. – Bratislava: VEDA, 1987. – 360 s.

## References

1. Pyushin, A. A.; Lenskiy, V. S. Strength of materials. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 371 p. (in Russian)
2. Rzhantsin, A. R. Theory of reliability calculation of building materials. Moscow: Stroiizdat, 1978. 239 p. (in Russian)
3. Kirsanov, N. M. Hanging coverage of industrial buildings. Moscow: Stroiizdat, 1990. 128 p. (in Russian)
4. Shimanovskiy, V. N.; Sokolov, A. A. Design of suspension structures out of limit of elasticity. Kyiv: Budivelnik, 1975. 104 p. (in Russian)
5. Guidance for strength calculation of steel structures by the criteria of small-scale plastic deformations. Moscow, 1985. 49 p. (in Russian)
6. Guidance to select the types and calculate the strength of steel cables used in building metal structures. Moscow, 1991. 32 p. (in Russian)
7. Dyadkin, S. N.; Nikolaev, V. A.; Marikov, B. D. The choice of cables for bracing wires of the highway bridge over the Ob' near the city of Surgut. *Transport engineering*, 1999, No. 10, p. 21–27. (in Russian)
8. Raiser, V. D. Reliability theory in the construction design. Moscow: Izd-vo ASB, 1998. 304 p. (in Russian)
9. Perelmuter, A. V. Selected problems building structure reliability and safety. Moscow: Izd-vo ASB, 2007. 256 p. (in Russian)
10. Shpete, G. Reliability of bearing building structures. Moscow: Stroiizdat, 1994. 288 p. (in Russian)
11. Sventikov, A. A. Nonlinear design of suspension core structures. *Space frames of buildings and structures: (Investigation, calculation, design and application): Collected papers*. Vol. 8. Moscow-Belgorod: Izd-vo BelGTASM, 1996, p. 72–82. (in Russian)
12. Hansen, R. J.; Reed, J. W.; Vanmarcke, E. H. Human Response to Wind Induced Motion. *Proceedings ASCE. Journal of the Structural Division*, 1973, Vol. 98, N ST7, p. 1589–1605.
13. Holicky, M.; Ostlund, L. Vagueness of Serviceability Requirements. *Proceeding the International Conference «Design and Assessment of Building Structures»*, Prague, 1996, Vol. 2, p. 81–89.
14. Mrazik, A. Teoria spol`ahlovosti ocel`ovych konstrukcili. Bratislava: VEDA, 1987. 360 s.



**Болдирев Олександр Михайлович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри металевих конструкцій та зварки в будівництві, Президент Воронежського державного архітектурно-будівельного університету, член-кореспондент Російської академії архітектури та будівельних наук, академік Міжнародної академії наук вищої школи. Наукові інтереси: підвищення надійності зварних металоконструкцій, управління кристалізацією металу шва при зварюванні плавленням.

**Свентіков Андрій Олександрович** – к.т.н., доцент кафедри металевих конструкцій та зварки в будівництві Воронежського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: просторові покриття будівель і споруд, висячі стержневі системи підвищеної жорсткості з використанням гнучких елементів.

**Свентікова Анастасія Андріївна** – аспірант кафедри металевих конструкцій та зварки в будівництві Воронежського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: балочні сталеві конструкції, імовірнісний розрахунок з урахуванням розвитку пластичних деформацій.

**Болдырев Александр Михайлович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций и сварки в строительстве, Президент Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, академик Международной академии наук высшей школы. Научные интересы: повышение надежности сварных металлоконструкций, управление кристаллизацией металла шва при сварке плавлением.

**Свентиков Андрей Александрович** – к.т.н., доцент кафедры металлических конструкций и сварки в строительстве Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: пространственные покрытия зданий и сооружений, висячие стержневые системы повышенной жесткости с использованием гибких элементов.

**Свентикова Анастасия Андреевна** – аспирант кафедры металлических конструкций и сварки в строительстве Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: балочные стальные конструкции, вероятностный расчет с учетом развития пластических деформаций.

**Boldyrev Alexander** – Dr. Sc. (Eng.), professor, Head of the department «Metal Structures and Welding in Construction», President of Voronezh State Architecture and Civil Engineering University, correspondent member of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Sciences, Academician of the International Academy of Sciences of Higher School. Scientific interests: growth of welded metal structure reliability, control of crystallization of a seam metal in fusion welding.

**Sventikov Andrey** – Ph.D. (Eng.), associate professor of the department «Metal Structures and Welding in Construction» of Voronezh State Architecture and Civil Engineering University. Scientific interests: spatial coverage of buildings and structures, suspension core systems of a higher rigidity with the use of flexible components.

**Sventikova Anastasiya** – graduate student of the department «Metal Structures and Welding in Construction» of Voronezh State Architecture and Civil Engineering University. Scientific interests: beam steel structures, a probabilistic design regarding plastic deformations.