

С. А. Тимашев

# ИНФРАСТРУКТУРЫ



Часть I

## НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ



Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» УроРАН



Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

С. А. Тимашев

# **ИНФРАСТРУКТУРЫ**

## **Часть I Надежность. Долговечность**

Екатеринбург  
2016

УДК 519.673:656.085:62-192(091)  
ББК 38.72-021  
Т41

Т41 **Тимашев С.А. Инфраструктуры. в 2-х частях. Том I. Надежность и долговечность: – Екатеринбург: Изд-во НИСО УрО РАН, 2016. – 530 с.**

ISBN 978-5-7691-2434-1

Данная монография является первой книгой в отечественной и мировой литературе, целиком посвященной системному изложению проблемы безопасности и надежности инженерно-технических, промышленно-строительных и городских инфраструктур с позиций теоретической и прикладной механики. Она основана на результатах, полученных за последние 40 лет персонально автором и совместно со своими учениками и последователями, и отражает вклад Уральской школы безопасности в это направление междисциплинарных фундаментальных и прикладных исследований.

Монография состоит из двух частей. В первой части представлена краткая история возникновения и развития инфраструктур как материальное воплощение развития человеческой цивилизации, дана постановка основных задач исследования. Приводится описание оригинальных моделей нагрузок и воздействий на здания и сооружения как дискретных по состояниям и непрерывных (диффузионных) Марковских временных процессов, изложены основы теории надежности больших механических систем, впервые преодолено проклятие размерности при решении центральной задачи – оценки надежности многокомпонентных систем под действием комбинации нагрузок и воздействий. Приведены методы описания и оценки надежности инфраструктур как логико-структурных, транспортных систем и вероятностных Байесовских сетей. Даны многочисленные оригинальные примеры расчета надежности и долговечности стержневых, балочных, рамных систем, а также пластинчатых и оболочечных конструкций на всех этапах их жизненного цикла. Подробно описан первый (1977 г) в мировой практике метод оценки материального и нематериального ущерба, связанного с авариями каркасов промышленных зданий и сооружений, основанный на компьютерном моделировании последствий обрушения конструкций. Во второй части монографии даются основы теории и результаты решения актуальных задач диагностики, мониторинга, оптимизации, мейнтенанса и говернанса (коллективного управления) системами взаимозависимых критичных инфраструктур по обобщенным критериям территориального риска. Эти результаты органически связаны с результатами, изложенными в первой части книги.

Книга, которая в целом имеет конвергентный характер, будет полезна специалистам и экспертам в области диагностики, мониторинга, оптимизации, мейнтенанса и управления, целостности и безопасности критичных инфраструктур. Она будет полезна лицам, принимающим решения, операторам и проектировщикам систем взаимозависимых инфраструктур различного назначения, специалистам в области техногенной и экологической безопасности, а также научным работникам, аспирантам, студентам-магистрам и специалистам соответствующих специальностей.

УДК 519.673:656.085:62-192(091)  
ББК 38.72-021

This monograph is the first book worldwide fully dedicated to systemic description of the reliability and safety problem of industrial, civil engineering and urban-type infrastructures from the position of structural and applied mechanics. It is based on the results obtained during the last 40 years by the author himself and in cooperation with his PhD students and followers. It reflects the input of the Ural School of thought in the field of infrastructure safety into this multidisciplinary area of fundamental and applied research.

The book consists of two parts. The first part contains brief history of creation and development of infrastructures as the physical embodiment of human civilization, and formulation of the problems that are considered in the book. Description is given of new types of models of environmental and technological loads and impacts on structures and buildings as discrete and diffusion Markov processes of time. Analytical and experimental (physical and computer) methods of assessing reliability and longevity of infrastructures' components are given. The basics of the theory of large mechanical systems and nets is described, and the curse of dimensionality is overcome when solving the central problem of structural safety – reliability assessment of multi-component nonlinear systems subjected to a combination of random loads and impacts. Multiple specific real life cases are presented of assessing reliability and longevity of I-struts, crane beams, frame systems and pipelines, as well plates and shells. The historically worldwide first (1977) computer modeling method of assessing monetary and human losses during accidents (collapse of parts of the structure) in industrial buildings is described in detail. The second part of the monograph describes the basic theory and deals with solving problems of diagnostics, monitoring, maintenance, resilience and safety (through well organized governance of systems of interdependent critical infrastructures) in accordance with generalized territorial criteria of safety. These results are intrinsically connected with results described in the first part of the book.

The book, which is of convergent by nature, will be useful for specialists and experts in the fields of diagnostics, monitoring, maintenance, control/management optimization, risk-analysis and safety of infrastructures. It would be useful to decision makers, operators and designers of different types of interdependent infrastructures, specialists in the field of industrial and ecological safety, as well as to researchers, PhD, Masters' and Engineering profile students.

Рекомендовано к изданию ученым советом НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» и Объединенным Ученым Советом по физико-техническим наукам УрО РАН

Рецензенты: д.т.н., чл.-корр. РАН *Н.А. Махутов*,  
д.т.н., засл. деятель наук РФ *В.В. Москвичев*

Научный редактор: кандидат технических наук *А.В. Бушинская*  
Редактор: *Л.А. Урядова*

ISBN 978-5-7691-2434-1

© С. А. Тимашев, текст, 2016  
© С. А. Тимашев оформление обложки, 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
PREFACE .....	12
ВВЕДЕНИЕ .....	15
INTRODUCTION .....	26
<b>ГЛАВА 1. ИНФРАСТРУКТУРЫ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПРОБЛЕМЫ, МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ .....</b>	<b>34</b>
1.1. Краткая история развития инфраструктур .....	34
1.2. Некоторые определения .....	42
1.3. Классификация инфраструктур .....	47
1.4. Базовые характеристики инфраструктур .....	49
1.5. Особенности современных инфраструктур .....	54
1.6. Мейнтенанс инфраструктур .....	55
1.7. Говернанс и критичные инфраструктуры .....	58
1.8. Управление региональным техногенным риском по обобщенным критериям ..	61
1.9. Математические модели инфраструктур и методы их исследования .....	63
1.10. Нерешенные проблемы инфраструктур .....	68
<b>ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ КАК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>73</b>
2.1. Стохастические модели внешних воздействий .....	73
2.2. Нагрузки, возникающие при транспортировании и монтаже .....	73
2.3. Практические способы представления природных и технологических нагрузок (на каркасы промышленных зданий) как случайных процессов .....	75
2.4. Представление снеговой нагрузки в виде нестационарного однородного МПРГ .....	80
2.5. Корреляционная функция снеговой нагрузки .....	86
2.6. Представление ветровой нагрузки в виде стационарного однородного МПРГ ..	89
2.7. Корреляционная функция ветровой нагрузки .....	93
2.8. Описание изнашивающего воздействия коррозии, эрозии и кавитации .....	97
2.9. Представление вертикальных крановых нагрузок в виде трехмерного случайного процесса .....	98
2.10. Статистическая квазислучайная модель процесса коррозии стали в промышленной атмосфере .....	106
2.11. Марковская модель процесса коррозии .....	113
2.12. Модель процесса коррозии, зависящего от уровня напряжений .....	114
2.13. Представление метеорологических и технологических нагрузок в виде диффузионных марковских процессов .....	115
2.13.1. Снеговая нагрузка .....	116
2.13.2. Ветровая нагрузка .....	116
2.13.3. Технологическая нагрузка .....	117
2.13.4. Комбинация случайных нагрузок .....	118
2.14. Учет изменений статистических свойств нагрузок из-за глобального изменения климата (потепления) .....	118

<b>ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ ИНФРАСТРУКТУР</b> .....	<b>124</b>
3.1. Краткая история создания основ теории и методов расчета конструкционной надежности .....	124
3.2. Системный подход к проблеме надежности механических систем .....	135
3.3. Основные понятия и определения .....	139
3.4. Основные схемы расчета надежности деформируемых систем .....	141
3.5. Методы расчета надежности дискретных систем .....	147
3.6. Матричные методы оценки надежности .....	164
3.7. Общий подход к оценке надежности БМС на воздействие сочетания случайных нагрузок и процессов деградации .....	170
3.7.1. Практическая методика оценки надежности многокомпонентных систем при действии нескольких случайных нагрузок и случайной коррозии ...	171
3.7.2. Алгоритм расчета надежности системы при марковской модели коррозии .....	172
3.7.3. Алгоритм расчета надежности системы при квазислучайной модели коррозии .....	173
3.7.4. Практическая методика оценки надежности рамных систем .....	174
3.7.5. Критерии отказа рамных систем, в том числе работающих в упругопластической области .....	174
3.7.6. Об учете приспособляемости рамных систем .....	176
3.7.7. Основные формулы метода расчета надежности рамных систем при активном нагружении .....	177
3.7.8. Метод учета случайности разгрузки при оценке надежности упругопластических рамных систем .....	177
3.7.9. Методы построения допустимых областей для рамных систем при различных условиях их работы .....	178
3.7.10. Учет случайного предела текучести в элементах конструкции .....	179
3.7.11. Учет случайных несовершенств геометрии элементов рамной системы ...	181
3.8. Исследование статистических характеристик случайных траекторий нагрузок .....	184
3.8.1. Допустимая область возможных стохастических траекторий в пространстве внешних нагрузок .....	185
3.8.2. Построение начального распределения вероятностей нахождения траекторий нагружения вне допустимой области .....	186
3.8.3. Алгоритм моделирования марковских ПРГ методом Монте-Карло .....	187
3.9. Полумарковские модели .....	190
3.10. Методы диффузионных марковских процессов .....	193
3.10.1. Постановка задачи .....	193
3.10.2. Вывод системы уравнений для определения моментов распределения долговечности .....	196
3.10.3. Переход от долговечности к надежности системы .....	198
3.10.4. Возможные методы решения системы (3.10.25) .....	201
3.10.5. Способы понижения мерности исходной задачи .....	201
3.11. Методы оценки надежности распределенных систем .....	202
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b> .....	<b>210</b>
4.1. Классификация методов .....	210
4.2. Моделирование однородного стационарного гауссовского поля .....	211

4.3. Методы экспериментальной компьютерной оценки надежности распределенных систем . . . . .	213
4.4. Методика статистического анализа полей начальных несовершенств и прогибов оболочек . . . . .	215
4.5. Структурный метод оценки надежности больших механических систем . . . . .	224
4.6. Оценка надежности больших механических систем с помощью форсированного компьютерного эксперимента . . . . .	232
4.7. Метод форсированных испытаний механических систем на долговечность и надежность . . . . .	235

## **ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ИНФРАСТРУКТУР КАК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ . . . . .**

<b>5.1. Структурные методы . . . . .</b>	<b>247</b>
5.1.1. Основные (простые) структурные модели . . . . .	247
5.1.2. Сложные структурные модели . . . . .	250
<b>5.2. Системный подход к оценке надежности КИ на основе их иерархического представления . . . . .</b>	<b>264</b>
5.2.1. Марковская кластеризация . . . . .	265
5.2.2. Иерархическое представление сети . . . . .	266
5.2.3. Оценка надежности сети на основе ее иерархического представления . . . . .	270
<b>5.3. Обобщенная вероятностная модель ВКИ в виде сетевого потока . . . . .</b>	<b>272</b>
5.3.1. Модель с многофункциональными узлами . . . . .	275
5.3.2. Формулировка оптимизационной задачи . . . . .	277
5.3.3. Учет взаимозависимости критичных инфраструктур . . . . .	279
<b>5.4. Метод оценки надежности сложных инфраструктур с помощью байесовских сетей . . . . .</b>	<b>280</b>
5.4.1. Общее выражение для полной совместной вероятности распределения в БС . . . . .	283
5.4.2. Структурные свойства БС . . . . .	283
5.4.3. Процедура распространения (ПР) информации . . . . .	284
5.4.4. Преимущества БС перед другими методами . . . . .	284
5.4.5. Процедура распространения вероятности (информации) в БС . . . . .	284
5.4.6. Использование специальных программных средств в задачах оценки риска . . . . .	285
5.4.7. Коэффициенты Байеса . . . . .	288
5.4.8. Моделирование эксплуатационного риска. Модель для редких катастрофических событий . . . . .	290
5.4.9. Моделирование надежности систем . . . . .	291
5.4.10. Приложения БС к прогнозированию отказов функционирующих инфраструктур . . . . .	294

## **ГЛАВА 6. НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ . . . . .**

<b>6.1. Надежность линейно-упругих стальных рам . . . . .</b>	<b>299</b>
6.1.1. Оценка надежности статически определимой одноэтажной однопролетной рамы на действие двух нагрузок (снег, ветер) . . . . .	299
6.1.2. Статически определимая рама со случайной прочностью . . . . .	308
6.1.3. Оценка надежности однопролетной рамы на действие трех нагрузок (снег, ветер, мостовой кран) . . . . .	310

6.1.4. Статически определяемая геометрически несовершенная рама под воздействием снеговой и ветровой нагрузки. . . . .	312
6.1.5. Трижды статически неопределимая рама со случайной прочностью (две нагрузки – снег и ветер) . . . . .	313
6.1.6. Оценка надежности двухпролетной рамы на действие двух нагрузок . . .	316
6.1.7. Нелинейно-упругие рамы. . . . .	316
6.1.8. Надежность рам, работающих в упругопластической стадии с учетом разгрузки . . . . .	317
6.1.9. Получение представительного ансамбля реализаций нагружения одноэтажных рам снеговой и ветровой нагрузками . . . . .	321
6.1.10. Статистические характеристики выбросов двумерного марковского ПРГ . . . . .	322
6.2. Надежность стохастически корродирующих рам при действии комбинаций случайных нагрузок. . . . .	323
6.2.1. Трижды статически неопределимая рама (случай двух нагрузок). . . . .	323
6.2.2. Трижды статически неопределимая рама (случай трех нагрузок). . . . .	325
6.2.3. Трижды статически неопределимая рама (работа в упругопластической стадии) . . . . .	325
6.3. Построение допустимой области в пространстве нагрузок на арктические трубопроводы. . . . .	327
6.3.1. Оценка напряженного состояния надземного трубопровода . . . . .	327
6.3.2. Оценка изгибных продольных напряжений в надземном трубопроводе . . .	329
6.3.3. Зависимость допустимой области от степени дефектности трубопровода . . . . .	331
6.3.4. Алгоритм построения допустимых областей в пространстве нагрузок и воздействий на трубопровод. . . . .	333
6.4. Оптимизация статически неопределимых рам по критерию надежности . . . . .	339
6.5. Надежность железобетонных рам при действии комбинации случайных нагрузок. . . . .	341
6.5.1. Постановка задачи. . . . .	341
6.5.2. Допустимые области в пространстве нагрузок для сечений и железобетонной рамы в целом . . . . .	341
6.6. Долговечность железобетонной рамы при действии комбинации случайных нагрузок. . . . .	345
6.6.1. Расчет долговечности рамы при действии одной марковской нагрузки различной природы . . . . .	345
6.6.2. Расчет долговечности рамы при действии двух марковских нагрузок . . .	351
6.6.3. Совместное действие нескольких марковских нагрузок и нагрузок в виде случайной величины . . . . .	355
6.6.4. Учет распределений прочности и площадей поперечных сечений бетона и арматуры . . . . .	356
6.7. Численные результаты расчетов долговечности и надежности многоэтажной железобетонной рамы . . . . .	356
6.7.1. Случай одной марковской нагрузки (эталонная задача) . . . . .	358
6.7.2. Случай двух марковских нагрузок. . . . .	360
6.7.3. Две марковские нагрузки и нагрузка в виде случайной величины . . . . .	361
6.8. О расчетных значениях нагрузок и их сочетаниях . . . . .	361
6.9. Техничко-экономическая целесообразность применения разработанного метода расчета . . . . .	364

6.10. Надежность и долговечность сварных подкрановых балок при действии подвижной нагрузки как распределенных систем . . . . .	365
6.10.1. Постановка задачи. . . . .	366
6.10.2. Анализ циклов напряжений от подвижной нагрузки в произвольном сечении балки . . . . .	369
6.10.3. Определение плотности распределения случайной крановой нагрузки . . . . .	378
6.10.4. Стохастическая долговечность подкрановой балки . . . . .	380
6.10.5. Функция надежности подкрановой балки . . . . .	386
6.11. Алгоритмы оценки начальной надежности двутавровых стержневых элементов. . . . .	391
6.11.1. Постановка задачи. . . . .	391
6.11.2. Двутавровый стержневой элемент (отказ по прочности) . . . . .	392
6.11.3. Центральнo-растянутый двутавр. . . . .	396
6.11.4. Надежность изгибаемого двутавра . . . . .	399
6.11.5. Надежность двутаврового стержневого элемента (по критерию потери устойчивости). . . . .	403
6.11.6. Формулы оценки надежности двутавров как распределенных систем. . . . .	405
6.11.7. Численное исследование начальной надежности ДСЭ. . . . .	407

## **ГЛАВА 7. СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПЛАСТИНОК И ОБОЛОЧЕК. . . . . 419**

7.1. Экспериментальная оценка долговечности и надежности трехслойных пластинок, испытывающих воздействие случайных пульсаций поперечной нагрузки . . . . .	419
7.2. Надежность оболочки при действии сочетания нагрузок в виде марковских ПРГ по критерию устойчивости . . . . .	423
7.3. Долговечность и надежность несовершенной оболочки, толщина которой является случайной функцией времени. . . . .	425
7.4. Оценка надежности оболочки, находящейся в условиях случайной ползучести . . . . .	428
7.5. Надежность оболочек с учетом случайного характера их геометрических параметров . . . . .	432

## **ГЛАВА 8. КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УЩЕРБОВ ПРИ АВАРИЯХ ИНФРАСТРУКТУР. . . . . 437**

8.1. Классификация ущербов и убытков при авариях и катастрофах . . . . .	439
8.2. Метод оценки статистических характеристик величин ущербов от отказов компонент строительных инфраструктур . . . . .	447
8.2.1. Постановка задачи . . . . .	447
8.2.2. Основные идеи метода . . . . .	447
8.2.3. Исследование механизма развития аварийной ситуации . . . . .	448
8.2.4. Задачи баллистики . . . . .	449
8.2.5. Полная группа событий при отказе-аварии . . . . .	451
8.2.6. Зоны и вероятности поражения . . . . .	453
8.2.7. Задачи проникания . . . . .	455
8.2.8. Определение времени разрушения . . . . .	456
8.2.9. Способ подсчета величины ущерба . . . . .	457
8.2.10. Определение «единичных» ущербов . . . . .	459



8.2.11. Моделирование отказовых (аварийных) ситуаций . . . . .	462
8.2.12. Критерии адекватности моделирования . . . . .	463
8.2.13. Статистические оценки величины ущербов . . . . .	463
8.2.14. Достоинства и недостатки метода. Возможные обобщения . . . . .	465
8.3. Решение задач баллистики . . . . .	465
8.3.1. Общая схема постановки и решения задач баллистики . . . . .	465
8.3.2. Баллистическая задача для подкрановой балки . . . . .	466
8.3.3. Баллистическая задача для железобетонной, алюминиевой плиты покрытия и стального профнастила . . . . .	472
8.3.4. Баллистическая задача для фермы . . . . .	473
8.4. Вероятности поражения оборудования . . . . .	483
8.4.1. Построение зоны поражения подкрановой балки . . . . .	483
8.4.2. Определение вероятности поражения оборудования при падении подкрановой балки . . . . .	486
8.4.3. Построение зоны поражения железобетонной плитой или профилированным настилом . . . . .	486
8.4.4. Вероятности поражения оборудования при падении плиты и профнастила . . . . .	486
8.4.5. Построение ЗП фермой . . . . .	487
8.4.6. Вероятность поражения оборудования при падении фермы . . . . .	487
8.4.7. Построение ЗП железобетонной и стальной колонной . . . . .	487
8.4.8. Вероятность поражения колонной . . . . .	488
8.5. Решение задач проникания . . . . .	488
8.5.1. Постановка задачи . . . . .	488
8.5.2. Задачи проникания, пробития и пластического деформирования (погнутия) . . . . .	489
8.5.3. Переход от результатов решения задач проникания к таблице ремонтов . . . . .	490
8.6. Определение величин «единичных» ущербов . . . . .	492
8.6.1. Единичные стоимости конструкций «в деле» и трудозатраты на строительные-монтажные работы . . . . .	492
8.6.2. Единичные стоимости восстановления конструкций при их обрушении . . . . .	493
8.6.3. Единичные стоимости устранения отказов, не связанных с авариями . . . . .	493
8.6.4. Единичные стоимости восстановления оборудования . . . . .	493
8.6.5. Единичная стоимость простоя оборудования . . . . .	493
8.7. Оценка ущерба от полной группы событий . . . . .	494
8.7.1. Ущерб при обрушении балки . . . . .	494
8.7.2. Ущерб при обрушении плиты и профнастила . . . . .	495
8.7.3. Ущерб при обрушении фермы . . . . .	495
8.7.4. Ущерб при обрушении колонны . . . . .	496
8.8. Статистические характеристики величин ущербов . . . . .	496
8.8.1. Ущерб при обрушении подкрановой балки . . . . .	496
8.8.2. Ущерб при обрушении железобетонных плит покрытия . . . . .	500
8.8.3. Ущерб при обрушении алюминиевых плит покрытия . . . . .	501
8.8.4. Ущерб при обрушении профилированного настила . . . . .	503
8.8.5. Ущерб при обрушении фермы . . . . .	505
8.8.6. Ущерб при обрушении колонны . . . . .	507
8.9. Некоторый анализ и обобщение полученных результатов . . . . .	508
8.9.1. Математическое ожидание числа единиц неэкономических потерь . . . . .	509

8.9.2. Экономические подходы к оценке стоимости жизни .....	510
8.9.3. Возможные направления дальнейших исследований .....	510
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	513
CONCLUSION .....	514
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	515