



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Библиотека научных разработок и проектов МГСУ

А.Г. Тамразян, С.Г. Есаян

МЕХАНИКА ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

Москва 2012

УДК 539.3
ББК 22.251
Т 17

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Р е ц е н з е н т ы:

заместитель генерального директора ОАО НИЦ «Строительство»,
академик, первый вице-президент РИА, профессор, доктор технических наук
А.И. Звездов,
директор архитектурно-строительного института «Госуниверситет-УНПК» г. Орел,
академик РААСН, профессор, доктор технических наук
В.И. Колчунов

Монография рекомендована научно-техническим советом МГСУ

Т 17 Тамразян, А.Г. Механика ползучести бетона : монография / А.Г. Тамразян, С.Г. Есаян ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — Москва : МГСУ, 2012. — 524 с. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ).

ISBN 978-5-7264-0664-0

Рассмотрены и получены статические и динамические характеристики реологических моделей наследственно стареющих твердо деформируемых материалов (бетона) как вязко-упругих, упруго-пластических, вязко-упруго-пластических сред. Выдвинуты концепции новых направлений развития феноменологических теорий линейной и нелинейной ползучести, упруго-пластичности и колебания вязко-упругих систем. Разработан метод решения интегральных уравнений теорий ползучести, эффективность которого показана решением разных практических задач.

Определена целесообразность построения теории колебания вязко-упругих систем на основе меры вязкости материала. Это направление значительно расширяет круг применения теории колебания вязко-упругих стареющих систем для решения проблем динамики сооружений.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов технических вузов, а также для магистрантов, обучающихся строительным специальностям.

**УДК 539.3
ББК 22.251**

ISBN 978-5-7264-0664-0

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Глава 1. Ползучесть бетона.....	9
1.1. Изменение деформаций бетонного элемента в зависимости от времени.....	9
1.2. Природа ползучести бетона.....	12
1.3. Мера ползучести бетона.....	18
1.4. Порядок лабораторных испытаний ползучести бетона....	20
1.5. Релаксация напряжений в бетоне.....	28
1.6. Мера релаксации взрослеющего бетона.....	30
Глава 2. Основные уравнения линейной теории ползучести бетона.....	32
2.1. Рабочие гипотезы теории ползучести бетона.....	32
2.2. Аналитическая связь между длительно действующими напряжениями и деформациями. Ядро вязкости.....	33
2.3. Ядро релаксации.....	36
2.4. Взаимосвязь между мерой ползучести, мерой релаксации, ядром ползучести и ядром релаксации.....	38
2.5. Основные уравнения теории линейной ползучести бетона в общем случае напряженного состояния.....	40
Глава 3. Нестареющие со временем реологические модели. Наследственная теория ползучести бетона.....	47
3.1. Элементы вязко-упругой реологической модели.....	47
3.2. Реологическая модель Максвелла.....	50
3.3. Реологическая модель Фойгта.....	52
3.4. Реологическая модель Кельвина.....	54
3.5. Мера ползучести и ядро вязкости нестареющей вязко-упругой модели. Наследственная теория ползучести бетона.....	57
3.6. Мера релаксации и ядро релаксации нестареющей реологической модели.....	62
3.7. Взаимосвязь между ядрами вязкости и релаксации.....	63
Глава 4. Реологическая модель теории старения бетона.....	65
4.1. Взрослеющая со временем упругая пружина.....	65
4.2. Стареющий со временем элемент вязкости.....	67

4.3.	Составление реологической модели теории ползучести старения бетона.....	69
4.4.	Ядро ползучести вязко-упругой модели старения.....	71
4.5.	Другой вариант вязко-упругой реологической модели старения.....	74
4.6.	Мера релаксации и ядро релаксации вязко-упругой реологической модели старения.....	78
Глава 5. Реологическая вязко-упругая модель наследственного старения. Теория ползучести наследственного старения.....		82
5.1.	Составление реологической модели наследственного старения.....	82
5.2.	Усиление влияния характерных особенностей взросления бетона в структуре реологической вязко-упругой модели наследственного старения.....	91
5.3.	Мера и ядро релаксации вязко-упругой модели наследственного старения.....	98
5.4.	Сравнительный анализ существующих уравнений ползучести.....	101
5.5.	Сравнение меры ползучести реологической модели наследственного старения с опытными данными.....	106
Глава 6. Решение основных интегральных уравнений теории ползучести бетона.....		110
6.1.	Метод решения интегральных уравнений ползучести с общим ядром вязкости.....	110
6.2.	Решение интегральных уравнений Вольтерра второго рода с ядром вязкости вязко-упругой модели наследственного старения.....	119
6.3.	Релаксация напряжения в бетонном стержне.....	120
6.4.	Кручение двухслойной цилиндрической оболочки с внешним армированием с учетом ползучести бетона.....	122
6.5.	Мера и ядро релаксации стареющей вязко-упругой модели...	129
6.6.	Моделирование армированных стареющих вязко-упругих композитных стержней.....	132
6.7.	Устойчивость вязко-упругого бетонного стержня в условиях нелинейной ползучести.....	135
6.8.	Устойчивость сжато-изогнутой балки из стареющего вязко-упругого материала.....	140

6.9.	Устойчивость трубы под воздействием внешнего равномерного давления с учетом ползучести бетона.....	146
6.10.	Устойчивость прямоугольных жестких пластинок в условиях ползучести.....	151
6.11.	Напряженно-деформированное состояние железобетонной изгибаемой балки с учетом ползучести и старения бетона.....	154
Глава 7. Решение основных интегральных уравнений теории ползучести бетона при объемном напряженном состоянии.....		159
7.1.	Решение основного уравнения теории ползучести бетона в условиях объемного напряженного состояния.....	159
7.2.	Релаксация напряжений при плоском напряженном состоянии.....	164
7.3.	Релаксация напряжений при объемном напряженном состоянии.....	171
7.4.	Напряженно-деформированное состояние вязко-упругой армированной плиты.....	177
7.5.	Решение основных интегральных уравнений теории ползучести старения бетона.....	182
Глава 8. Нелинейная теория ползучести бетона.....		186
8.1.	Пластические свойства бетона. Коэффициент поперечного расширения при пластической деформации.....	186
8.2.	Нелинейная ползучесть бетона.....	197
8.3.	Теории нелинейной ползучести бетона.....	197
8.4.	Релаксация напряжений бетонного стержня с учетом вязко-упруго-пластического наследственно стареющего свойства бетона.....	199
8.5.	Напряженно-деформированное состояние сжатого железобетонного стержня с учетом нелинейной ползучести бетона.....	205
8.6.	Жесткость и напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов с учетом нелинейной ползучести бетона.....	209
8.7.	Кручение железобетонной цилиндрической трубы с учетом нелинейной ползучести бетона.....	213
8.8.	Решение основного интегрального уравнения теории нелинейной ползучести с общим ядром вязкости.....	217

8.9.	Функция напряжения для бетонов прочностью $R=10\div 60\text{МПа}$	222
Глава 9. Динамические характеристики и колебания вязко-упругой реологической модели теории ползучести наследственного старения бетона.....		233
9.1.	Значение подбора реологической модели для построения теории колебания вязко-упругих сред.....	233
9.2.	Свободные колебания вязко-упругой модели наследственного старения.....	237
9.3.	Фазовый портрет движения вязко-упругой модели наследственного старения.....	254
9.4.	Вынужденные колебания вязко-упругой модели наследственного старения бетона под гармонической силой.....	262
9.5.	Колебания вязко-упругой модели наследственного старения под периодической вынуждающей силой.....	277
9.6.	Колебания вязко-упругой модели наследственного старения под произвольно меняющейся вынуждающей силой....	289
9.7.	Продольные колебания вязко-упругого бетонного стержня, моделированного наследственным старением...	297
9.8.	Поперечные колебания вязко-упругой балки из стареющего материала.....	309
9.9.	Продольные колебания вязко-упругого наследственно стареющего армированного бетонного стержня.....	314
Глава 10. Колебание и мера ползучести вязко-упругих сред.....		319
10.1.	Мера ползучести как основа теории колебания вязко-упругих сред	319
10.2.	Интегро-дифференциальные уравнения колебаний вязко-упругих сред.....	322
10.3.	Колебания среды с мерой ползучести теории упругой наследственности бетона.....	330
10.4.	Колебания судна на воздушной подушке	333
10.5.	Динамическая устойчивость вязко-упругого стержня.....	341
10.6.	Колебания среды с мерой ползучести теории старения бетона.....	349
10.7.	Колебания среды с мерой ползучести теории наследственного старения бетона.....	350
10.8.	Колебания вязко-упругой среды с полным учетом ее старения.....	353

10.9.	Начальные условия движения вязко-упругих сред.....	360
10.10.	Мера вязкости и степень свободы конструктивных систем.....	366
10.11.	О системах с несколькими степенями свободы.....	368
10.12.	Колебания вязко-упругой тяжелой балки на упругом основании от подвижной нагрузки.....	371
10.13.	Продольные колебания железобетонного стержня.....	376
Глава 11. Моделирование упруго-пластических процессов.....		384
11.1.	Введение.....	384
11.2.	Элементы упруго-пластической модели.....	385
11.3.	Напряженно-деформированное состояние упруго-пластической модели.....	387
11.4.	Кривая деформации упруго-пластического материала при растяжении-сжатии и ее кусочно-линейное моделирование.....	391
11.5.	Разгрузка упруго-пластического образца. Закономерность изменения напряженного состояния обратным ходом.....	395
11.6.	Эффект Баушингера при испытании на сжатие-растяжение.....	403
11.7.	Петля гистерезиса одного цикла упруго-пластического колебательного движения.....	405
11.8.	Потенциальная энергия упруго-пластической деформации...	410
11.9.	Модель идеально упруго-пластического тела Прандтля...	417
11.10.	Упруго-пластическая модель схематизированной диаграммы растяжения с линейным упрочнением.....	420
11.11.	Моделирование схематизированной диаграммы со степенным упрочнением.....	424
11.12.	Стареющая модель упруго-пластичности.....	428
Глава 12. Моделирование вязко-упруго-пластических сред.....		433
12.1.	Введение.....	433
12.2.	Модель вязко-упруго-пластического старения.....	435
12.3.	Примеры вязко-упруго-пластического деформирования с применением уравнений модели вязко-упруго-пластического старения.....	439
12.4.	Вязко-упруго-пластическая модель наследственного старения (ВУПмНС).....	443

12.5.	Релаксация напряжения железобетонного и железобетонного стержня, с учетом вязко-упруго-пластического, наследственно стареющего свойства бетона.....	451
12.6.	Обобщенное реологическое уравнение вязко-упруго-пластичности.....	456
	Заключение.....	458
	Библиографический список.....	464
	Приложение.....	472
	Summary.....	481