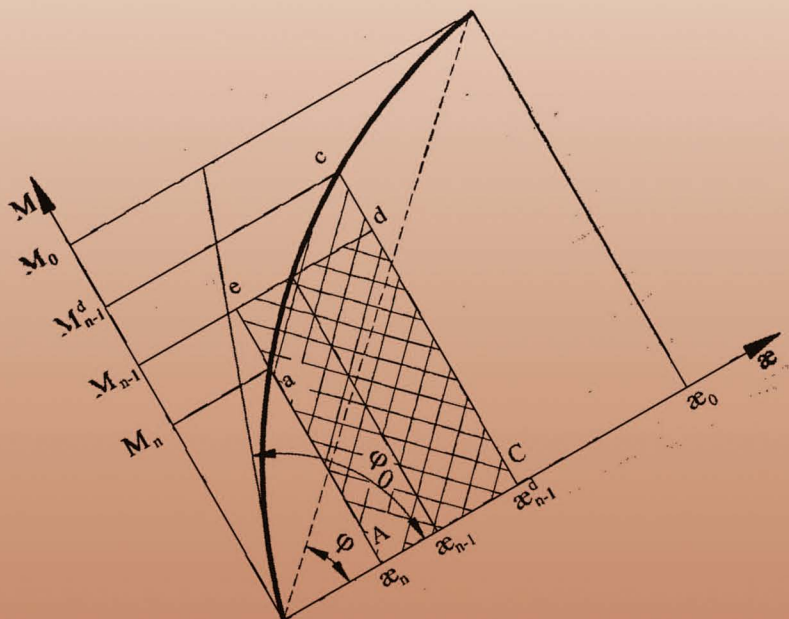


В.И. КОЛЧУНОВ Н.Б. АНДРОСОВА  
Н.В. КЛЮЕВА А.С. БУХТИЯРОВА

# ЖИВУЧЕСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ



**В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова,  
А.С. Бухтиярова**

**ЖИВУЧЕСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ  
ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**



Издательство АСВ  
Москва  
2014

УДК 324.074.4: 621.328

ББК 038

**Рецензенты:**

д-р техн. наук, профессор, директор НИИСФ РААСН *И.Л. Шубин*;  
д-р техн. наук, профессор кафедры ПГС БГТУ им. В.Г. Шухова  
*Г.А. Смоляго*.

**Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С.**

Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях /  
Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2014. – 208 с.

ISBN 978-5-93093-989-7

В монографии авторами рассмотрены вопросы расчета железобетонных балочных, рамно-стержневых и пространственных статически неопределимых конструктивных систем, работающих в условиях приложения проектной и внезапной запроектной нагрузки. Теория решения таких конструктивно и физически нелинейных задач построена на энергетической основе без привлечения аппарата динамики сооружений.

Монография может быть полезна студентам, магистрам и аспирантам строительных специальностей.

ISBN 978-5-93093-989-7

© Издательство АСВ, 2014

© Колчунов В.И. и др., 2014

Научное издание

*Колчунов* Виталий Иванович, *Ключева* Наталия Витальевна,  
*Андросова* Наталья Борисовна, *Бухтиярова* Анастасия Сергеевна

**ЖИВУЧЕСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ  
ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Компьютерная верстка *Е.М. Лютова*

Дизайн обложки *У. Никитина*

Редактор *В.Ш. Мерзлякова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60х90/16. Бумага офс. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл. 13 п.л. Заказ №

ООО «Издательство АСВ»

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511

тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgisu.ru](mailto:iasv@mgisu.ru), <http://www.iasv.ru/>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Общие положения .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Анализ исследований по проблеме конструктивной безопасности и живучести строительных систем.....	12
1.2. Расчетные модели сопротивления железобетона в предельных и запредельных состояниях.....	25
1.2.1. Арматурная сталь.....	32
1.2.2. Бетон .....	35
1.3. Исследования железобетонных физически и конструктивно нелинейных систем.....	37
<b>Глава 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ, МЕНЯЮЩИХ РАСЧЕТНУЮ СХЕМУ .....</b>	<b>42</b>
2.1. Энергетическая основа оценки динамических эффектов в элементах внезапно повреждаемых конструктивных систем.....	42
2.2. Определение приращений напряжений в элементах стержневых статически неопределимых конструкций при внезапных выключениях элементов .....	44
2.3. Определение приращений кривизн в элементах конструкций при внезапных выключениях элементов и простейших диаграммах «момент–кривизна».....	47
2.4. Определение приращений кривизн в элементах конструкций при внезапных выключениях элементов и произвольных параметрах диаграммы «М – $\epsilon$ » .....	52
2.5. Определение приращений динамических кривизн в железобетонных элементах рамно-стержневой статически неопределимой системы с учетом увеличения динамической прочности материалов .....	57

2.6. Определение времени приложения импульсного запроектного воздействия и динамической прочности материалов.....	60
<b>Глава 3. УЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА, СТАЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ.....</b>	<b>63</b>
3.1. Зависимость нарастания прочности ненагруженного бетона от времени .....	63
3.2. Практический метод расчета длительной прочности бетона .....	69
3.3. Практический метод расчета динамической прочности бетона .....	76
3.4. Практический метод расчета динамической прочности стали .....	80
<b>Глава 4. РАСЧЕТ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....</b>	<b>85</b>
4.1. Общие положения и рабочие гипотезы .....	85
4.2. Критерии оценки развития неравновесных процессов нагруженного и коррозионно повреждаемого железобетонного элемента.....	90
4.3. Расчет параметра живучести конструктивно нелинейных статически неопределимых конструкций .....	96
4.3.1. Моделирование статически неопределимых балочных систем .....	96
4.3.2. Рамные конструктивные системы .....	103
4.4. Расчет живучести коррозионно повреждаемых рам с приобретенными односторонними связями.....	111
<b>Глава 5. РАСЧЕТ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....</b>	<b>120</b>
5.1. Расчет параметра живучести в пространственных системах с линейно выключающимися связями.....	120

5.2. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях ..	124
5.3. Анализ живучести железобетонных пространственных покрытий из панелей-оболочек КСО ..	142
5.4. К оценке живучести железобетонных конструкций с высоким уровнем предварительного напряжения .....	147
5.5. Теоретические исследования длительной прочности сборных железобетонных оболочек ..	154

**Глава 6. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО РАСЧЕТНОГО АППАРАТА .....**

6.1. Расчет динамических догрузений в конструктивно нелинейных стержневых системах при внезапных структурных перестройках.....	162
6.1.1. Фрагмент пространственной системы с шарнирным опиранием ригелей на крайние колонны.....	162
6.1.2. Фрагмент пространственной системы с жестким опиранием ригелей на крайние колонны .....	176
6.2. Сопоставление расчетных и опытных значений параметров живучести для некоторых типов конструктивных систем.....	184

**Глава 7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ АДАПТАЦИОННО-ПРИСПОСОБЛЯЕМЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ .....**

<b>Заключение .....</b>	<b>200</b>
<b>Литература .....</b>	<b>202</b>

*Светлой памяти д.т.н.,  
профессора, чл.-корр. РААСН  
Георгия Александровича Гениева  
посвящается....*

## **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В связи с вступлением в силу Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» меняется правовая база строительной отрасли. Несмотря на то что Закон «О техническом регулировании» предписывает техническим регламентам статус прямого действия, рассматриваемый технический регламент не является таковым. С 01.07.2010 г. введен в действие Перечень нормативных документов (национальных стандартов и сводов правил) (98 наименований), в результате применения которых на обязательной основе должно быть обеспечено соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Последующие два года были даны на актуализацию, дополнение и улучшение этих документов.

Согласно регламенту от уровня ответственности здания или сооружения, если здание или сооружение повышенного уровня ответственности, необходимо разработать расчет на отказ при выключении одного из элементов системы (должна быть учтена аварийная расчетная ситуация, в том числе предельных состояний при этой ситуации, возникающей в связи со взрывом, столкновением, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций). Нормативные документы, через которые обеспечивается выполнение этого требования технического регламента, не только не утверждены, но отдельные из них и не разработаны.

В настоящее время известны разные подходы к созданию методов расчета и совершенствованию нормативной базы по проектированию зданий и сооружений с учетом возможного лавинообразного обрушения от запроектных воздействий. Существующие модели деформационного расчета конструктивных систем, применяемые для определения параметров предельных состояний, вполне могут быть адаптированы для анализа живучести. В то же время на этом пути возникают сложности как концептуально-методического, так и расчетно-нормативного характера. Во-первых, заранее невозможно определить зону, характер и величину запроектного воздействия. Во-вторых, не всегда такие воздействия носят однопараметрический характер. В других случаях теория и методы расчета существенно

усложняются, поскольку требуется выполнить динамический расчет минимум дважды нелинейной системы в условиях неопределенности воздействия. Наконец, нормирование таких воздействий невозможно без накопления статистической информации по результатам натурных измерений при чрезвычайных ситуациях. Последнее обстоятельство является непростой задачей и требует длительного времени для ее решения.

В настоящей работе рассматриваются вопросы конструктивной безопасности строительных систем. Их решение в будущем позволит подготовить предложения к включению в качестве дополнения в СНиПы и СП «Бетонные и железобетонные конструкции», «Каменные и армокаменные конструкции», «Стальные конструкции», «Деревянные конструкции», «Алюминиевые конструкции» раздела «Особенности расчета конструкций на живучесть».

В рамках рассматриваемого подхода кроме традиционных методов расчета по предельным состояниям следует выполнять расчет живучести зданий и сооружений при запроектных воздействиях. В основу расчета железобетонных конструкций на запроектные воздействия положены следующие положения.

Рассматриваются эксплуатируемые железобетонные статически неопределимые стержневые конструкции с элементами сплошного или составного сечения (балки, рамы), покрытия из панелей-оболочек КСО, пространственные рамно-стержневые конструкции. В результате такого воздействия в конструкциях из двухкомпонентных материалов типа железобетона возможен мгновенный переход конструктивной системы в запредельное состояние. Он может характеризоваться мгновенным (хрупким) разрушением отдельных элементов, сечений или узлов конструктивной системы. При этом опасным становится не только разрушение какого-либо конкретного элемента при переходе заданной  $n$  раз статически неопределимой системы в систему  $n - 1$  раз статически неопределимую (первый этап), но и возникающий при этом эффект импульсного воздействия на другие элементы конструкции. В этих элементах могут также мгновенно возникнуть запредельные состояния второй или первой группы. В последнем случае возможно как локальное, так и прогрессирующее (лавинообразное) разрушение всей системы – переход  $n - 1$  раз статически неопределимой системы в изменяемую систему (второй этап). В процессе разрушения на первом и втором этапах изменяются конструктивная и расчетная схемы системы.

Внешние, так называемые средовые, физические, химические, физико-химические, температурные и другие воздействия, влияю-



щие на структуру, и все виды силового и средового сопротивления бетона проявляются повреждениями конструкций. Эти повреждения сопровождаются уменьшением ресурса силового сопротивления конструкций и их отказами по первому или по второму предельным состояниям. В первом случае это приводит к разрушению конструкций, а для статически неопределимых систем – к внезапным догрузкам и структурному изменению несущего остова сооружений; во втором – к снижению жесткости конструкций, развитию больших деформаций, затрудняющим или исключающим дальнейшую эксплуатацию строительных объектов.

Возникает новая теоретическая задача о разработке методов расчета сооружений с последовательно изменяющимися конструктивной и расчетной схемами за счет эволюционного накопления повреждений и внезапного выключения связей. Таким образом, моделируется локальное или прогрессирующее (лавинообразное) разрушение конструктивной системы.

Задача моделирования прогрессирующего (лавинообразного) разрушения стержневой системы сводится к отысканию локального начального отказа в одном из наиболее напряженных сечений системы и последовательности распространения этого отказа (последовательности выключения новых связей) с учетом уменьшения степени статической неопределимости системы, а также с учетом динамического эффекта, вызванного внезапностью включения первой и последующих от разрушения связей.

При этом для разработки методов защиты от прогрессирующих разрушений важным является не только ответ на вопрос о недопустимости наступления предельного состояния в том или ином элементе, но и ответ на вопрос, каков будет характер разрушения конструктивной системы, если оно все же наступило: разрушение одного элемента, нескольких элементов или прогрессирующее разрушение всей конструкции. Такой анализ позволит дополнить основные положения метода предельных состояний и, тем самым, повысить безопасность эксплуатации систем при запроектных воздействиях: стихийных и экологических авариях, непредвиденных нагрузках, случаях применения некачественных материалов, изготовленных с дефектами элементов и т.п.

*Основные рабочие гипотезы расчета на запроектное воздействие:*

– запроектное воздействие на конструктивную систему при внезапном мгновенном выключении из работы элемента характеризуется либо некоторым интегральным результатом накопления по-

вреждений в ее элементах, либо локальным или прогрессирующим обрушением конструктивной системы;

– под мгновенным разрушением элемента из двухкомпонентного упруго-хрупкого материала будем понимать разрушение, продолжительность реализации которого исчисляется десятками и сотыми долями секунды;

– силовое сопротивление статически неопределимой системы со средовыми повреждениями и прогрессирующими разрушениями, вызванными внезапными структурными изменениями системы, можно представить единой математической зависимостью, отражающей кинетику неравновесных процессов повреждений и изменения характеристик силового сопротивления поврежденного железобетона;

– разрушение конструктивной системы определяется таким набором пластических шарниров, которые превращают конструкцию в кинематически изменяемую систему. Если минимально возможное число пластических шарниров (простейших схем разрушения) охватывает ограниченную часть элементов системы, то возникает локальная схема разрушения; если минимально возможное число пластических шарниров охватывает большинство ключевых элементов системы – возникает прогрессирующее разрушение конструктивной системы;

– выключение связи произойдет в том случае, когда усилие в этой связи достигнет предельного значения, характеризуемого наступлением явления текучести в этой связи при изгибе (пластический шарнир с ограниченной ветвью деформирования) или хрупкого разрушения (условный хрупко-пластический шарнир – разрыв связи в двухкомпонентном материале);

– на начальном этапе нагрузка, при действии которой не происходит выключения связей (например, собственный вес), считается постоянной. Остальная нагрузка изменяется пропорционально одному параметру, т.е. является параметрической;

– при мгновенном переходе заданной  $n$  раз статически неопределимой стержневой конструктивной системы из двухкомпонентного материала в  $n - 1$  раз статически неопределимую систему полная удельная энергия системы не изменяется;

– при построении расчетных схем конструктивно нелинейных систем места расположения образующихся шарниров или выключающихся связей при заданной однопараметрической нагрузке на раму определяются по экстремальным значениям моментов или усилий в узлах и стержнях рамы;

– запредельное состояние конструктивной системы при мгновенном выключении из работы элемента характеризуется либо некоторым интегральным результатом накопления повреждений в ее элементах, характеризующихся остаточным резервом живучести, либо локальным или прогрессирующим разрушением конструктивной системы;

– переход  $n - 1$  раз статически неопределимой системы в запредельное состояние при мгновенном выключении из работы элемента (узла, связи) в исходной  $n$ -системе характеризуется теми же критериями, что и при обычном кратковременном режиме нагружения, но с учетом изменения пределов прочности материалов, определяемых продолжительностью внешнего воздействия;

– при построении расчетной схемы для анализа живучести пространственной рамно-стержневой конструктивной системы в запредельных состояниях применен принцип многоуровневых расчетных схем, сформулированный в монографии [25]. При этом самый верхний уровень соответствует пространственной расчетной схеме всей конструктивной системы, нижний – позволяет оперировать параметрами сложного напряженного состояния отдельных зон фрагментов рассматриваемой конструктивной системы, выходные интегральные параметры которого «закрываются» на расчетную схему верхнего уровня.

Для расчета железобетонных стержневых систем по нормальным и наклонным сечениям приняты базовые положения современных деформационных расчетных моделей, используемых для оценки кратковременного и длительного сопротивления бетона и железобетона. При этом в используемом в работе варианте деформационной расчетной модели эксплуатируемых железобетонных конструкций приняты следующие *расчетные допущения*:

– теоретические диаграммы состояния бетона и арматуры принимаются в виде некоторой произвольной нелинейной зависимости, а обобщенная диаграмма, характеризующая состояние сечения при мгновенном нагружении, в первом приближении описывается квадратной параболой или более общей полиномиальной зависимостью;

– длительная прочность бетона эксплуатируемого сооружения определяется с учетом процесса нарастания прочности бетона во времени и процесса снижения прочности, находящегося в напряженном состоянии бетона;

– учитывается изменение динамической прочности бетона и стали в момент внезапного запроектного воздействия;

– учитывается коррозионное повреждение бетона (снижение прочности бетона), арматуры (уменьшение площади поперечного сечения стержней);

– коррозионное повреждение сечения конструкции моделируется сечением слоистой структуры, в котором верхний слой является поврежденным с пониженной прочностью;

– критерием трещинообразования является достижение фибровым волокном растянутой зоны сечения предельного сопротивления растяжению  $\bar{R}_{bt}$  и соответствующей величины относительной деформации при неоднородном растяжении  $\varepsilon_{btu}$ ;

– критерием исчерпания прочности является достижение фибровым волокном сжатой зоны сечения предельного сопротивления сжатию  $\bar{R}_b$  и соответствующей величины относительной деформации при неоднородном сжатии  $\varepsilon_{btu}$ .

В последующих главах рассмотрено решение некоторых задач на основе изложенного подхода.

# Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

## 1.1. Анализ исследований по проблеме конструктивной безопасности и живучести строительных систем

Действующая нормативная база и практика обеспечения конструктивной безопасности зданий и сооружений большей частью базируется на результатах научных исследований, выполняемых в 60–70-е гг. прошлого столетия. В современных условиях, когда многократно возросли воздействия техногенного и природного характера, значительное количество существующих в России зданий и сооружений изношено на 50–70%, а десятки тысяч объектов исчерпали свой ресурс, необходимы новые знания о методах защиты зданий и сооружений от указанных, так называемых запроектных воздействий.

Традиционное решение задач конструктивной безопасности основывается на методе предельных состояний. Активизации исследований в области конструктивной безопасности строительных конструкций способствовал ряд разрушений, аварий и техногенных катастроф в России и во всем мире. Это свидетельствует об актуальности проблемы новых исследований по теории конструктивной безопасности и живучести сооружений и эксплуатации для предупреждения опасных аварийных последствий [120, 17, 58].

В последние годы выполнен ряд исследований, связанных не только с проблемой *конструктивной безопасности* как характеристики неразрушимости несущей системы при эксплуатации объекта недвижимости, но и с решением проблемы *живучести* как характеристики сопротивляемости конструктивной системы прогрессирующему разрушению при внезапных запроектных воздействиях. Есть необходимость в их анализе и обобщении.

Существует несколько подходов к решению проблемы противодействия прогрессирующему разрушению [91, 46, 59, 138, 1, 70]: обеспечение ключевых элементов от разрушения путем увеличения их прочности или применение защитных мероприятий; повышение общей структурной целостности, пластичности, неразрезности, добавление лишних связей; расчеты на адаптационную приспособляемость при воображаемом удалении каждого несущего элемента. Последний подход является наиболее распространенной формой защиты эксплуатируемых зданий и сооружений, так как при этом расчетом

проверяются все опасные варианты локальных повреждений. При этом возникает вопрос, как выполнять расчет, чтобы при обеспечении защиты от прогрессирующего разрушения получилось экономически приемлемое техническое решение. Для этого в первую очередь необходимо достаточно строго анализировать поведение конструктивной системы при удалении в ней ключевых несущих элементов.

Необходимость развития исследований живучести конструктивных систем зданий и сооружений связана и с принятием Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и необходимостью актуализации нормативных документов к этому регламенту. Согласно регламенту, если здание или сооружение имеет повышенный уровень ответственности, необходимо выполнять расчет на отказ при выключении одного из элементов системы (должна быть учтена аварийная расчетная ситуация, в том числе предельное состояние при этой ситуации, возникающее в связи со взрывом, столкновением, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций). То есть, по существу, речь идет о расчете зданий и сооружений на живучесть при отказе ключевого элемента сооружения от внезапного запроектного воздействия. Реализация этой задачи невозможна без создания теоретических основ и обоснования предложений по расчету живучести конструктивных систем и включения их во вновь актуализируемые нормативные документы. Очевидно, что разработка теории живучести сооружений связана с накоплением соответствующих статистических данных об особенностях аварий сооружений при отказе отдельных конструкций или их элементов, анализом данных результатов обследования эксплуатируемых сооружений, а главное – целенаправленно поставленными экспериментальными исследованиями.

В настоящее время вопросы исследования и, тем более, вопросы нормирования параметров живучести зданий и сооружений носят в большинстве своем постановочный фрагментарный характер. Некоторый анализ уже выполненных исследований сделан в работах [17, 58, 91, 46, 59, 138, 70, 137]. Из этого анализа следует, что в России и других европейских странах конструктивная безопасность зданий и сооружений в различной постановке и на разной концептуально-методологической основе обеспечивается нормами этих стран [121 – 123, 88, 157, 149, 145, 154, 153, 144]. В основу этих нормативных документов положен метод расчета конструкций по предельным состояниям. В связи с ежегодным увеличением техногенных и природных катастроф и соответственно с все увеличивающимся разрывом между уровнем защиты, обеспечиваемым нормативными требова-

ниями, и уровнем опасности. США, Канада, Англия и некоторые другие европейские страны в свои стандарты [157, 149, 145, 154, 153, 144] в той или иной мере внесли дополнения, направленные на учет самой возможности и потенциальных последствий аварийных воздействий и, как следствие, прогрессирующего обрушения, а также предусмотрели отдельные мероприятия по обеспечению кратковременной (на период эвакуации) безопасности людей. Эти дополнения содержат повышенные требования к ключевым несущим элементам системы, отвечающим за их конструктивную безопасность и живучесть, а также методы создания резервных путей передачи усилий при внезапном выключении наиболее нагруженных несущих элементов конструктивной системы. В России, несмотря на принятый закон ФЗ-384, аналогичные дополнения к нормам содержатся пока только в городских нормативных документах г. Москвы [121 – 123, 88], но ограничиваются эти дополнения лишь частными конструктивными требованиями по предотвращению прогрессирующего обрушения зданий. В обязательном перечне стандартов и сводов правил к техническому регламенту по безопасности зданий и сооружений такие документы отсутствуют.

Между тем за последние два десятилетия в этом направлении выполнен ряд теоретических и экспериментальных исследований, в их числе работы Российской академии архитектуры и строительных наук [59, 138, 19, 141], Госуниверситета – УНПК (ОрелГТУ) [71, 64, 62, 4, 94, 72, 93, 56], Московского государственного строительного университета [137, 119, 3, 1], Московской академии коммунального хозяйства и строительства [22, 84], Московского государственного университета путей сообщения [141, 62], ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [91, 46], Брестского государственного технического университета [103, 139, 104], Национального авиационного университета Украины [79, 78] и других организаций.

Необходимо отметить, что Российской академией архитектуры и строительных наук совместно с Госуниверситетом – УНПК в рамках научно-образовательного центра «Исследование энерго-, ресурсоэффективных конструктивных систем с высоким уровнем конструктивной безопасности и живучести» за последнее десятилетие выполнен и накоплен опыт специально поставленных экспериментально-теоретических исследований в рамках рассматриваемой проблемы. В этом направлении проведены исследования В.М. Бондаренко [19, 22], Г.А. Гениевым [33], В.И. Колчуновым, Вл.И. Колчуновым, Н.В. Ключевой, А.И. Демьяновым, О.А. Ветровой, К.А. Шуваловым [67, 68, 30, 29, 75, 65, 61], Е.А. Скобелевой, С.И. Горностаевым [76], Я.Е. Колчиным, Н.О. Прасоловым [69, 74], Д.В. Кудриной [75],

Е.В. Осовских, П.А. Афоным [93, 95], Х.З. Башировым, Д.В. Казаковым [56], В.С. Федоровым [141], К.П. Пятикрестовским [113], В.А. Гордоном [43]. Эти исследования были направлены на изучение силового сопротивления различных типов железобетонных статически неопределимых конструктивных систем в запредельных состояниях, вызванных внезапным (хрупким) разрушением отдельных элементов, сечений, узлов конструктивной системы. Основной целью проведенных испытаний являлось экспериментальное обоснование теории динамических догрузений конструктивных систем, в том числе и при одновременном проявлении силовых и коррозионных запроектных воздействий, и создание на этой основе методов синтеза адаптационно приспособляемых к таким воздействиям сооружений. При этом новые методики проведения этих исследований защищены патентами РФ [97–100].

Программа специально подготовленных экспериментальных исследований включила испытания и анализ схем разрушения и опытных параметров живучести следующих групп конструктивных систем (*табл. 1.1*):

– первая группа – фрагменты трехпролетных неразрезных балок из сборных железобетонных элементов сплошного и составного сечения с преднапрягаемой арматурой и без (схема 1 – конструкция балки сплошного сечения, схема 2 – конструкция балки составного сечения, схема 3 – конструкция балки сплошного сечения с преднапряженной арматурой);

– вторая группа – фрагменты двухпролетных неразрезных плоской и пространственной рам из сборных железобетонных элементов сплошного и составного сечения (схема 4 – конструкция рамы с элементами сплошного сечения, схема 5 – конструкция рамы с элементами слоистого сечения, схема 6 – конструкция плоской рамы с предварительно напряженными элементами сплошного сечения, схема 7 – конструкция пространственной рамы с элементами слоистого сечения, схема 8 – конструкция плоской рамы с гибкой раскрепленной связями крайней стойкой);

– третья группа – ненапряженные и предварительно напряженные балки сплошного и составного сечения (схема 9 – балка ненапряженная составного сечения, схема 10 – предварительно напряженная балка составного сечения из двух железобетонных элементов, соединенных упруго-хрупкопластическим податливым швом сдвига, схема 11 – железобетонные балочки составного сечения для определения модуля сдвига зоны контакта, схема 12 – железобетонная балка составного сечения при действии внецентренно приложенной нагрузки);



– четвертая группа – фрагменты пространственных конструкций и их отдельные узлы (схема 13 – конструкция платформенного стыка для зданий из панельных элементов, схема 14 – фрагмент натурного пространственного покрытия из преднапряженных панелей-оболочек КСО размерами 3×24 м, преднапряженными оболочками-вставками размерами 3×6 м, схема 15 – фрагмент двугранной складки в составе складчатого покрытия с дефектами и повреждениями, схема 16 – ребристая плита складки с коррозионными повреждениями бетона и арматуры).

Испытаниями установлен ряд принципиальных особенностей деформации и разрушения железобетонных конструктивных систем с внезапно выключающимися в них элементами (связями). Важнейшие из них следующие. Установлено, что внезапное приложение к нагруженной статически неопределимой системе запроектного воздействия вызывает динамические догружения во всех элементах системы. При этом наибольшие догружения возникают на первой полуволне колебаний. Интенсивность этих догружений зависит от топологии конструкции [74], схемы и уровня приложенной проектной нагрузки, схем и интенсивности армирования элементов, граничных условий [68, 30, 29]. Важными параметрами, определяющими интенсивность динамических догружений физически нелинейных железобетонных конструкций являются уровень нагружения конструктивной системы проектной нагрузкой [67, 29, 75], скорость запроектного воздействия [61], уровень преднапряжения конструкций, класс бетона, прочностные и деформативные характеристики материалов [30, 75, 95].

При этом установлено, что опасным становится не только разрушение выключающегося из работы системы несущего элемента, но и возникающий при этом эффект импульсного воздействия на другие элементы конструкции. В результате чего эти элементы могут также достигать предельного состояния. В последнем случае возможно как локальное, так и прогрессирующее (лавинообразное) разрушение всей системы. В процессе разрушения изменяются конструктивная и расчетная схемы конструктивной системы. Для оценки таких изменений конструктивной системы в работах [70, 67, 75] предложена методика количественной оценки живучести с помощью параметра живучести  $\lambda$ . В качестве такого параметра принята величина действующей на нее нагрузки, равная величине нагрузки, при которой в рассматриваемой конструктивной системе начинается процесс структурных преобразований, вызывающих последовательное изменение ее статической неопределимости от выключения первой связи до превращения системы в изменяемую [70, 64, 62].

Имеющиеся отдельные исследования, посвященные живучести многоэтажных и высотных зданий при запроектных воздействиях, условно можно разделить на два направления. Первое – это экспериментально-теоретические исследования на основе моделирования фрагментов каркасов многоэтажных зданий [4, 94, 78]. Ко второму направлению относятся исследования, в которых разработаны специальные многоуровневые компьютерные модели, адаптирующие особые воздействия на существующее здание, например взрыв или падение самолета и удар автотранспорта [93, 45, 129, 128]. Тем не менее динамическое поведение многоэтажных зданий при локальных повреждениях изучено крайне недостаточно. Нет теоретически обоснованных методов практического расчета многоэтажных зданий на прогрессирующее разрушение с учетом особенности их работы в запредельных состояниях. Отечественное высотное строительство сравнимо, по времени своего существования, с Западным и, тем более, со строительством Китая [111, 112]. Однако до сих пор единых норм и правил проектирования таких объектов в России практически не разработано. Можно лишь отметить заметное увеличение интереса к научным исследованиям по данному вопросу в отечественной строительной науке в последнее десятилетие. Здесь можно отметить работы В.Н. Аликина, П.В. Алявдина, А.М. Белостоцкого, В.М. Бондаренко, Г.А. Гениева, А.С. Городецкого, П.Г. Еремеева, Е.К. Ивановой, В.А. Игнатьева, Н.Н. Кружкова, Т.Г. Маклаковой, В.П. Назарова, С.Н. Карпенко, Б.С. Расторгуева, В.И. Травуша, А.Н. Мамина, А.В. Александрова, К.П. Пятикрестовского, В.В. Тура, И.Н. Серпика, А.Г. Тамразяна и др. В большинстве этих исследований конструктивно нелинейные расчетные модели строятся до и после внезапного выключения связи, однако влияние динамических догрузений на остальные неразрушенные элементы конструктивной системы в этих работах почти не рассматриваются.

Возникновение запредельных состояний возможно на любом этапе эксплуатации конструкции, в том числе и после длительного воздействия факторов, снижающих прочностные характеристики материалов конструкции [18, 26]. В этой связи при расчете конструктивной безопасности и живучести сооружений возникает проблема учета коррозионной диспозиции при одновременном проявлении силового сопротивления конструктивных элементов. Коррозионные повреждения сопровождаются уменьшением ресурса силового сопротивления конструкций и их отказами по первому или по второму предельным состояниям. В первом случае это приводит к разрушению конструкций, а для статически неопределимых систем и к вне-

запным догружениям и изменению расчетных схем сооружений; во втором – к снижению жесткости конструкций, развитию больших деформаций и трещин, затрудняющим или исключаящим дальнейшую эксплуатацию строительных объектов.

Многолетними усилиями отечественных и зарубежных научных школ строительного материаловедения (работы С.Н. Алексеева, Ф.М. Иванова, С.Н. Леоновича, В.В. Петрова, А.И. Попеско, Н.К. Розенталя, В.П. Селяева, И.Г. Овчинникова, Г.В. Мурашкина, В.Т. Ерофеева, С. Atkins, M.F. Dan, A.C. Estes, T. Hakkinen, V. Hogg, K.-Y. Lin, M.B. Roberts и др.) сегодня достигнут высокий уровень исследований по развитию теории средового сопротивления бетона и арматуры. С другой стороны, сегодня имеются значимые достижения в теории силового сопротивления железобетона. В России и странах СНГ они связаны главным образом с работами В.М. Бондаренко [26, 21], Вл.И. Колчунова, П.И. Васильева, Г.А.Гениева, Н.И. Карпенко, В.И. Мурашева, Е.Н. Пересыпкина и их последователей. В том числе в технической теории сцепления арматуры с бетоном широко известны труды А.А. Веселова, А.А. Оатула, М.М. Холмянского, Т. Kanakubo, В. Martin-Perez, T. Rabczuk, A. Yasojima и др. Это создает хорошую основу для развития коррозионной диспозиции силового сопротивления и живучести строительных конструкций при запроектных воздействиях. Физической основой создания такой теории, как показано в работе [18], может стать специфическая посылка В.М. Бондаренко о феноменологическом единообразии кинетики неравновесных процессов повреждений и развития нелинейных деформаций, а также о константности режимных, физико-механических и термодинамических факторов внешних воздействий на бетон [18, 21].

Междисциплинарный характер рассматриваемой проблемы обусловил малоизученность задач совместного проявления средового и силового сопротивления железобетона в предельных и, тем более, запредельных состояниях (В.М. Бондаренко, И.Г. Овчинников, А.И. Попеско, В.В. Петров, А. Castellani, D. Coronelli и др.). До сих пор мало исследованы особенности коррозионного сцепления арматуры с бетоном. В ущерб надежности проектных решений или же с неоправданным запасом комплексный подход к оценке силового сопротивления железобетонных элементов силовым и агрессивным средовым воздействиям заменяется преимущественно решением отдельных, хотя и важных, задач частного характера (А.А. Землянский, Л.М. Пухонто, Б.А Ягупов, G. Horrigmoe и др.).

При расчете параметра живучести конструктивной системы  $\lambda$  появляется необходимость определения коэффициента динамичности в конкретном расчетном сечении элементов конструктивной системы. Наиболее достоверные значения этого коэффициента могут быть получены проведением нелинейного динамического расчета, который является крайне сложным для практического применения. В этой связи в работе [39] вместо полного динамического расчета рекомендуется выполнять квазистатический расчет на энергетической основе для определения коэффициента динамичности в элементах конструктивной системы.

Он имеет простой физический смысл: показывает, на сколько раз нужно умножить статическую нагрузку, чтобы получить такое же значения динамического перемещения. Очевидно, что определение величины коэффициента динамичности является ключевой задачей практического расчета конструкций на прогрессирующее разрушение. В этой связи формулировки решений класса теоретических задач живучести в рамках обозначенной проблемы о динамическом деформировании физически и конструктивно нелинейных систем из железобетона в предельных состояниях базируются на энергетическом подходе без привлечения аппарата динамики сооружений и представляются перспективными.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что исходя из имеющейся на сегодняшний день нормативной базы и крайне ограниченного числа целенаправленных экспериментальных исследований проблему живучести, по-видимому, не следует выносить за пределы метода предельных состояний, и, может быть, ввести новое (для железобетона) третье предельное состояние. Это позволит уже в ближайшее время нормировать третье предельное состояние с позиции локального и прогрессирующего разрушения при одновременном проявлении средовых и силовых запроектных воздействий.

## **1.2. Расчетные модели сопротивления железобетона в предельных и запредельных состояниях**

Большинство известных методов расчета железобетонных конструкций сплошного и составного сечения базируются на общих положениях и подходах механики твердого деформируемого тела [20, 53, 51, 90, 143] и основных закономерностях работы составных конструкций [88, 124].