

## ВЛИЯНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА НА ПОВЕДЕНИЕ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Дегтярева О.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

### Проаналізовані результати експериментальних досліджень випробувань динамічним навантаженням стиснуто-зігнутих залізобетонних конструкцій.

Железобетон как неоднородный материал обладает начальными дефектами (микротрещинами), которые образуются при процессе его изготовления за счет внутренних напряжений. Дефекты материала являются неотъемлемым структурным элементом конструкции. В процессе эксплуатации происходит появление новых, «залечивание» старых, объединение микротрещин в магистральные трещины.

Начальные дефекты в структуре бетона значительно больше влияют на динамическую, чем на статическую прочность бетона ввиду уменьшения возможностей перераспределения напряжений из-за запаздывания микропластических деформаций [1].

Отличительной особенностью некоторых видов динамических нагрузок является кратковременность их действия –  $10^{-2}$  –  $10^{-5}$  с. Высокоскоростная ударная нагрузка действует в течение  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  с со скоростью 10-15 м/с и более. Напряжения в бетоне возрастают со скоростью свыше  $10^5$  МПа/с [1].

Как правило, кратковременные динамические нагрузки в расчетах до недавнего времени недостаточно учитывались, ввиду того, что статическая прочность бетона ниже динамической. В работе [2] приводятся результаты исследований, выполненных Reinschmidt Kenneth F. и др. Ими были проведены статические и динамические испытания бетонных и железобетонных колонн сечением 12,5 x 12,5 см, гибкостью от 3 до 25. Та часть образцов, которая была выполнена в железобетоне, была армирована четырьмя стержнями или спиральной обмоткой, с общим процентом армирования 3,2 %. Напряженное состояние – центральное и внецентренное сжатие (с эксцентриситетом от 1 до 12,5 см). Результаты испытания (см. табл. 1) показали, что прочность при динамическом нагружении по сравнению со статическим была в 1,29 раза больше для центрально сжатых колонн и в 1,36 раза – для внецентренно сжатых.

В связи с необходимостью проектирования железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию интенсивных кратковременных динамических нагрузок их учет особо актуален в настоящее время. Вследствие непрерывного развития химической, нефтяной, газовой и других отраслей народного хозяйства увеличивается вероятность возникновения и воздействия на конструкции зданий и сооружений случайных кратковременных динамических нагрузок аварийного характера. Усиливается опасность действия на сооружения ударных волн вследствие взрывов обычных взрывчатых веществ при их хранении, транспортировке, в результате террористических актов и т.д. Возникающие при этом специфические нагрузки часто вызывают значительные повреждения конструкций, и даже их полное или частичное разрушение, которое может привести к травмам и гибели людей. Поскольку данные воздействия относятся к аварийным, основное требование, предъявляемое к зданиям и сооружениям, состоит в том, что они должны выдержать без обрушения однократное воздействие кратковременной динамической нагрузки.

Обеспечения восприятия зданиями и сооружениями динамической нагрузки осуществляется по пути повышения динамической несущей способности конструкций путем использования высокопрочных бетонов и арматуры, фибробетона, смешанного армирования, косвенного армирования сжатых зон, более рациональных конструктивных форм и т.п. При этом обычно допускают работу конструкции в стадии работы бетона с трещинами.

Расчет конструкций зданий и сооружений на высокоинтенсивные динамические воздействия в литературных источниках наиболее часто представлен сжато-изгибаемыми конструкциями (колонны, ригеля, несущие и самонесущие стены). Особенностью большинства таких конструкций является то, что они служат опорой для вышележащих конструкций (плит покрытия и перекрытия), и возникновение в них больших деформаций может привести к обрушению части, или всего здания (плоская форма прогрессирующего разрушения – рис. 1) [3].

Новые опытные данные, характеризующие особенности деформирования, трещинообразования и разрушения сжато-изгибаемых элементов на различных стадиях статического и динамического деформирования, способствуют совершенствованию расчетных моделей и приближают теоретические результаты к поведению реальных конструкций.

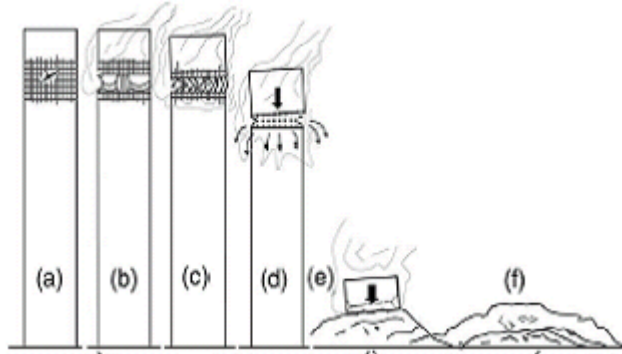


Рис. 1. Плоское разрушение [3]: (a) – начальное повреждение вертикальных или горизонтальных несущих элементов; (b) – частичное или полное расчленение и падение; (c) – переход потенциальной энергии в кинетическую; (d) – удар расчлененных и падающих элементов конструкции на сохранившуюся часть конструкции; (e) – разрушение оставшихся вертикальных несущих конструкций; (f) – прогрессирующее разрушение в вертикальном направлении

В работе [4] приводятся экспериментальные данные и расчет собственных колебаний железобетонного пространственного каркаса градирни до и после усиления колонн каркаса.

Проведенные исследования показали, что в процессе эксплуатации происходит снижение частот собственных колебаний железобетонного каркаса (табл. 2, рис. 2) [4]. Эти изменения вызваны деструктивными процессами в бетоне и нарушением целостности конструкций и узлов. Данные о динамических параметрах являются основанием для прогноза изменения технических характеристик объекта и его эксплуатационных свойств.

Фрагментация поврежденного трещинами бетона, подвергнутого воздействию растягивающих напряжений [5], происходит, когда относительный объем пустот достигает критической величины  $\xi^*$ . Если поврежденный трещинами материал подвергнуть воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности пластических деформаций  $\epsilon_u^*$ . При растяжении фрагментированный материал описывается как порошок, движение которого происходит в соответствии с уравнениями среды, лишенной напряжений.

В таблице 3 [5] приведены физико-механические характеристики бетона и стали, а также параметры модели деформирования и разрушения бетона при динамическом нагружении.

Таблица 1

Сравнение результатов статических и динамических испытаний колонн [2]

Характеристика бетона	Серия образца	Средняя скорость деформации в 1/сек	Средняя скорость возрастания напряжения в кг/см <sup>2</sup> /сек	Продолжительность нагружения в сек	Отношение динамической прочности к статической	Отношение начального динамического модуля деформации к статическому	Отношение динамического модуля к статическому при $\epsilon = 0,001$
Бетон средней прочности	1	0,00364	223	0,9	1,1	1,02	1,12
	2	0,531	$5,4 \cdot 10^4$	0,0043	1,57	1,07	1,32
	3	10,1	$12 \cdot 10^5$	0,00025	1,84	1,1	1,47
Высокопрочный бетон	1	0,00296	554	0,86	1,13	1,06	1,07
	2	2,86	$5,7 \cdot 10^5$	0,001	1,53	1,16	1,17
	3	6,69	$10,6 \cdot 10^6$	0,0048	1,85	1,24	1,33

Таблица 2

Результаты расчета и экспериментальные данные о частотных характеристиках колонн [4]

№ формы колебаний	Собственный период колебаний, с				
	Схема 1 расчет	Схема 2		Схема 3 расчет	Схема 4 расчет
		расч.	экспер.		
1	1,35	1,64	1,66	1,89	2,11
2	1,99	2,28	2,31	2,47	2,95
3	2,16	2,54	2,58	2,8	3,2
4	4,05	5,29	5,45	5,18	5,7
5	4,29	5,68	5,79	5,4	5,8
6	5,03	5,93	6,13	5,55	6,67
7	5,08	5,95	6,15	5,75	6,85

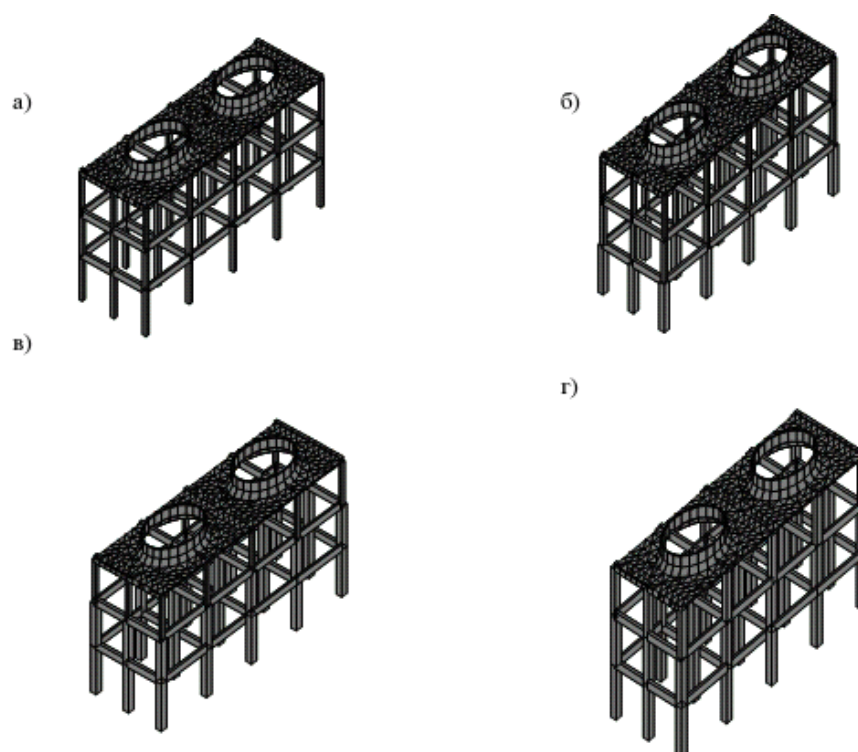


Рис. 2. Расчетная схема каркаса градирни [4]: а) без усиления; б) колонны первого яруса; в) усилены колонны первого и второго ярусов; г) усилены все колонны каркаса  
 В работе [6] исследуется поведение сжато-растянутых полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении в условиях напряженно-деформированного состояния (сжатие – растяжение).

Таблица 3

Физико-механические характеристики соударяющихся тел и параметры, используемые в модели мелкозернистого бетона [5]

Параметр	Бетон	Сталь	Смесь
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	2,2	7,85	3,3
$\mu_0$ , ГПа	17,0	82,0	1,7
$c_0$ , см/мкс	0,233	0,457	0,258
$\gamma_0$	2	2	2
$q$	1,51	1,49	1,5
$\sigma_{\min}$ , ГПа	0,0077	0,6	0,13
$\sigma_{\max}$ , ГПа	0,216	–	–
$k$	0,82	–	–
$\nu$	0,256	–	–
$R_0$ , мкм	2,5	–	–
$R_*$ , мкм	11,6	–	–
$N_0 \cdot 10^{-7}$ , см <sup>-3</sup>	64,0	–	–
$\eta_1$ , ГПа·мкс	7000	–	–
$\eta_2$ , ГПа·мкс	800	–	–
$\rho_0$ , ГПа	0,00924	–	–
$S_{01}$ , ГПа	0,0924	–	–
$\beta$	1	–	–
$\alpha_0$	1,01	1,0006	–
$\xi_*$	0,013	0,3	0,23
$e_*$	0,15	1,5	0,5

Анализ результатов, проведенных автором работы [6] экспериментальных исследований, показал, что увеличение величины растягивающих деформаций образца перпендикулярно трещине приводит к значительному росту деформаций в арматуре как в трещине, так и на участках между трещинами. Арматура, воспринимающая растягивающие напряжения, нарушает структуру бетона, что приводит к снижению прочности полос бетона между трещинами (рис. 3 [6]).

Несущую способность сжато-изогнутых железобетонных элементов можно повысить, применив усиление элементов слоем сталефибробетона в сжатой и растянутой зонах [7]. Анализируя результаты проведенных экспериментов изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных и сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении сделаны следующие выводы:

1. Несущая способность железобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении повышается с применением зонного армирования из стальной фибры как в сжатой, так и растянутой зонах. В целях повышения несущей способности железобетонных элементов рекомендуется применять зонное армирование из стальной фибры в сжатой зоне, высоту фибрового армирования при этом целесообразно принимать 1/3 от высоты сечения элемента.

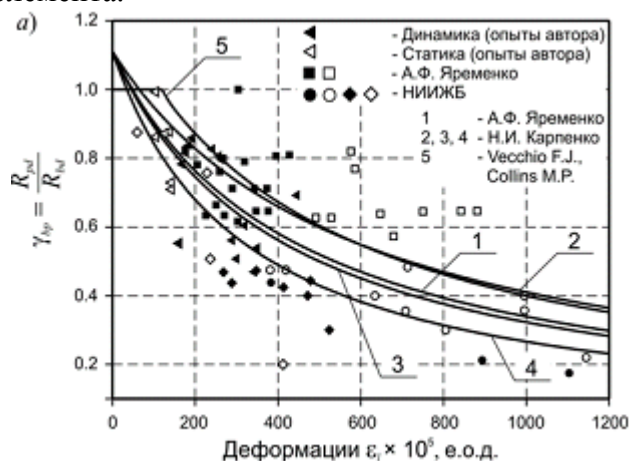


Рис. 3. Изменение прочности растянуто-сжатых полос бетона между трещинами в зависимости от деформаций образца перпендикулярно трещине [6]

2. Разрушение железобетонных балок с зонным армированием из стальной фибры в растянутой зоне происходит вследствие разрушения сжатой зоны бетона с образованием нескольких нормальных трещин по длине зоны чистого изгиба элемента. Разрушение железобетонных балок с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне происходит вследствие текучести рабочей арматуры, развития нормальных трещин по высоте сечения и частичного разрушения сжатой зоны бетона.

3. Деформативность железобетонных балок с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне ниже, чем у балок с зонным армированием в растянутой зоне.

4. При применении сжимающей нагрузки для экспериментальных образцов наблюдается небольшое понижение несущей способности для балок с зонным армированием из стальной фибры в растянутой зоне и некоторое повышение несущей способности для балок с фибробетоном в сжатой зоне. Величина максимальных перемещений при этом для балок уменьшается.

В работе [8] приведены результаты расчета собственных колебаний железобетонной колонны, усиленной наращиванием сечения. Конструкция усиленной колонны состояла из старого бетона, бетона обоймы и промежуточного слоя. Исследования показали, что промежуточный слой обладает весьма сложной формой, и сцепление старого слоя с новым происходит, в основном, за счет механического воздействия [4].

Расчеты частот собственных колебаний колонн проведены по двум расчетным схемам. В первом случае конструкция колонны представлена объемной моделью. Здесь конструкции старой колонны, промежуточного слоя и обоймы имеют свои жесткость и прочность, определенные из эксперимента. В расчетной схеме второй модели промежуточный слой представлен стержневой системой. Жесткость и прочность стержневой заменяющей системы определялись интегральными параметрами, характеризующими промежуточный слой. Результаты расчета представлены в таблице 4 [8].

Таблица 4

Частоты собственных колебаний усиленной колонны [8]

№ п/п	Частота колебаний при полнотелом сечении, Гц	Частота колебаний, полученные экспериментально, Гц	Частота колебаний при замене промежуточного слоя на стержневые элементы, Гц
1	20,843	21,00	21,4167
2	25,994	25,00	26,5153
3	114,930		114,780
4	118,647		116,194
5	140,667		135,82
6	199,643		178,588

### **Выводы**

1. В результате анализа имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что прочность, жесткость и характер разрушения конструкции при кратковременном динамическом нагружении зависят от: вида материала; его прочностных, жесткостных и геометрических и структурных показателей; параметров динамической нагрузки.

2. Необходимо продолжить исследования поведения железобетонных конструкций на стадии трещинообразования при кратковременном динамическом нагружении с целью повышения их долговечности и надежности.

### **Summary**

**The experimental results of the dynamic loading influence on the behavior of the stressed-bended reinforced concrete structures.**

### **Литература**

1. Парфенов А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. - Уфа, 2004. – 20 с.
2. Корчинский И.Л., Беченева Г.В. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях. Пособие для проектировщиков. – М.: Стройиздат, 1966. – 212 с.
3. Алмазов В.О. Проектирование сооружений с учетом аварийных воздействий // Вестник МГСУ. Спецвыпуск, 2010. - № 1. – С. 151-159.

4. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Васильева Е.В. Влияние жесткости колонн на динамические параметры пространственного железобетонного каркаса в процессе ремонта // Вестник ТГАСУ, 2006. - № 1. – С. 164-169.

5. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Кабанцев О.В. и др. Расчет прочности бетонных и железобетонных колонн при контактном взрыве цилиндрического заряда открытого взрывчатого вещества // Вестник ТГАСУ, 2006. - № 2. – С. 5-20.

6. Галяутдинов З.Р. Прочность сжато-растянутых полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении // Вестник ТГАСУ, 2007. - № 2. – С. 153-157.

7. Уткин Д.Г. Экспериментальные исследования сжато-изогнутых железобетонных элементов зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении // Вестник ТГАСУ, 2008. - № 3. – С. 156-164.

8. Васильева Е.В. Расчет собственных колебаний железобетонной колонны, усиленной наращиванием сечения // Вестник ТГАСУ, 2007. - № 2. – С. 153-157.