

# Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК 624.012.4

DOI: 10.14529/build220201

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ РАЗГРУЗКЕ НА НИСХОДЯЩЕМ УЧАСТКЕ И ПОВТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

**Ю.А. Ивашенко, А.В. Фердер, Е.Н. Серебренникова, А.Ж. Урумбаев**  
*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Приводятся результаты экспериментальных исследований бетона, нагружаемого до образования нисходящего участка на диаграмме «напряжение – деформация», разгрузки с нисходящего участка и последующего повторного нагружения. Испытания проводились на специальном устройстве, имитирующем один раз статически неопределимую конструктивную систему. Установлены факторы, влияющие на формирование диаграмм разгрузки и повторного нагружения. А также приведены эмпирические зависимости, с использованием которых можно вести расчеты конструктивных систем, когда наблюдаются зоны разгрузки. Такие случаи встречаются при многократных повторных нагружениях систем и в случаях возникновения локальных повреждений, возникающих по различным причинам. Обосновывается необходимость таких исследований.

*Ключевые слова: эксперимент, сопротивление бетона нагружению, нисходящий участок диаграммы, разгрузка, повторное нагружение.*

### Введение

Представленные в статье результаты являются продолжением исследований, опубликованных ранее [1]. В указанной статье исследовались закономерности формирования диаграмм «напряжение – деформация» бетона под влиянием переменных режимов нагружения и деформирования. Эти режимы возникают при сопротивлении бетона в статически неопределимых системах под действием режима внешнего нагружения. На диаграммах появляются два характерных участка: первый, восходящий, характеризуемый ростом напряжения и деформации; второй, нисходящий, характеризуемый увеличением деформации и уменьшением напряжения. Характерными точками на диаграмме являются максимальное напряжение – соответствующая деформация и минимальное напряжение – соответствующая деформация. Изучены особенности образования и накопления повреждений (микротрещин) внутри бетона, на основе которых предложен критерий разрушения структуры бетона и определения величины предельной деформации.

Введена характеристика статически неопределимой системы в «точке», в которой анализируется сопротивление бетона и формирование диаграммы «напряжение – деформация».

Эта характеристика названа «жесткостью» системы в точке по определенному направлению. Установлено, что в зависимости от величины «жесткости» системы изменяется величина предель-

ной деформации, определяющей момент прекращения бетоном сопротивляться нагружению (разрушение). Выяснилось, что этот момент может находиться на нисходящем участке и смещаться в зависимости от «жесткости» системы в точке.

Появление нисходящего участка на диаграммах «напряжение – деформация» исследователи наблюдали давно [2–5]. Внимание обращалось на факт появления нисходящего участка и определения его параметров. Результаты исследований использовались в расчетах [6]. Исследования разгрузки с нисходящего участка диаграммы и повторного нагружения в научной литературе авторами не обнаружено. Исследователи много занимались разгрузкой и повторными нагружениями бетона на восходящем участке диаграммы в связи с решением задач динамического сопротивления [7–10] и выносливости [11, 12]. Необходимость изучения сопротивления бетона при разгрузке с нисходящего участка и повторного нагружения обусловлена тем, что конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию опасных природных явлений и техногенных воздействий. Это может быть размыв грунтового основания в результате аварий на водоводах, подтопление территорий природными водами; разрушение части элементов конструкций зданий и сооружений от воздействия взрывов, ударов, а также местной (локальной) нагрузки вследствие нарушения правил эксплуатации, дефектов материалов и от-

## Строительные конструкции, здания и сооружения

дельных конструкций. В связи с этим возникла необходимость в изучении повреждений [13–16], принятии мер безопасности и расчетного обоснования [17–25]. Имеются работы, в которых обосновывается возможность допускать развитие остаточных деформаций локальных разрушений (повреждений) при расчетах конструкций на воздействия аварийного типа [26]. Следует выяснить эти особенности.

При локальных повреждениях строительных конструктивных систем, когда зона повреждений не превышает критический размер [19], система в целом способна сопротивляться внешним воздействиям. В этих случаях в системе возникает «зона разгрузки». Особенность этой зоны состоит в том, что бетон может находиться в состоянии деформирования на нисходящем участке диаграммы и разгружаться после разрушения рядом расположенной зоны локального повреждения. Поскольку система в целом сохраняет способность сопротивляться внешним воздействиям, то экономически целесообразно восстановление поврежденных элементов и продолжение эксплуатации. Это вызывает повторное нагружение элементов в «зоне разгрузки». В связи с этим возникает задача расчета этой зоны и его экспериментального обоснования.

Учитывая вышеизложенное, можно считать, что знания о разгрузке и повторном нагружении бетона в «зонах разгрузки» будут необходимы для оценки состояния этих зон и возможности их последующего повторного нагружения. Это определяет актуальность исследований, приведенных ниже, и получения ответов на следующие вопросы:

1) может ли бетон сопротивляться после разгрузки с нисходящего участка и повторного нагружения;

2) как формируются диаграммы разгрузки и повторного нагружения.

Логично предположить следующее: если бетон разгрузить до появления предельной деформации на нисходящем участке, то он будет обладать некоторым сопротивлением, а для выполнения расчетов в этом случае необходима информация о форме диаграмм разгрузки и повторного нагружения.

### Методика исследований

Подробно методика исследований для получения диаграмм с нисходящим участком приведена в статье [1]. Ее особенность состоит в том, что

нагружение бетона производилось в специальном устройстве (кондуктор) [27], которое является один раз статически неопределимой системой с возможностью регулирования ее «жесткости»  $B_k$ . Введена характеристика  $n_r = B_k/B_0$  (коэффициент стеснения), где  $B_0$  – жесткость бетонного образца. В зависимости от значений  $B_k$  и  $n_r$  появлялся нисходящий участок зависимости «напряжение – деформация» бетона и менялись его параметры. Характерными точками диаграммы приняты:  $\sigma_{\max}$  (максимальное напряжение), соответствующая деформация –  $\varepsilon_R$  и  $\sigma_{\min}$  (минимальное напряжение на конце нисходящего участка), соответствующая деформация –  $\varepsilon_{b,\max}$ . На нисходящем участке установлена точка, соответствующая предельной деформации бетона –  $\varepsilon_{b,ult}$  по характеру изменения внутренних структурных повреждений.

В приведенных исследованиях реализованы следующие программы испытаний образцов бетона  $100 \times 100 \times 400$  мм:

А) при коэффициенте  $n_r = 0,408$  производилась разгрузка с нисходящего участка и их последующее нагружение без кондуктора ( $n_r = 0$ ) до разрушения;

Б) нагружение в кондукторе, разгрузка с нисходящего участка и повторное однократное нагружение в кондукторе до разрушения;

В) нагружение в кондукторе, разгрузка с нисходящего участка и последующее не многократное нагружение в кондукторе до разрушения.

### Результаты испытаний

**Программа «А».** Образцы в виде бетонных призм –  $100 \times 100 \times 400$  мм, изготовленных из состава соответственно (Ц:П:Щ:В/Ц) – 1:2,1:5,2:0,52. Нагружение без кондуктора ( $n_r = 0$ ) показало: прочность 16,6 МПа, модуль упругости – 2,5 МПа, длительность ступени нагружения – 10 мин, максимальная деформация –  $225 \cdot 10^{-5}$ . Нагружение в кондукторе ( $n_r = 0,408$ ) и последующая разгрузка после достижения деформации (225, 265, 298, 320, 337, 350, 412, 475 и  $592 \cdot 10^{-5}$ ) показало следующее. Максимальное напряжение при  $n_r = 0,408$  увеличилось в 1,15 раза по сравнению с  $n_r = 0$ . Повторное нагружение показало уменьшение прочности бетона пропорционально уменьшению напряжений на нисходящем участке (табл. 1). Коэффициент пропорциональности изменился в пределах – 0,8 (при максимальном напряже-

Таблица 1

Сопоставление прочности при повторном нагружении с напряжениями на нисходящем участке

$\sigma_b$	Деформация бетона на нисходящем участке диаграммы $\varepsilon_b, 10^{-5}$								
	225	265	298	320	337	350	412	475	592
Величина напряжения, МПа	18,8	18,0	17,6	17,2	16,6	16,5	14,0	11,2	8,6
Прочность при повторном нагружении, МПа	15,0	14,1	11,2	10,1	10,3	9,6	9,38	6,4	5,2

нии), 0,6 (при минимальном напряжении в конце нисходящего участка).

В сравнении с прочностью бетона при  $n_r = 0$  (нисходящий участок отсутствует) снижение прочности пропорционально коэффициенту в пределах 0,92–0,69.

**Программа «Б».** Нагружение в кондукторе при  $n_r = 0,33$  и  $n_r = 0,93 - 0,96$  образцов состава – 1:2,1:5,2:0,53 (прочность – 16,5 МПа, модуль упругости – 2,4 МПа), разгрузка с нисходящего участка и повторное нагружение в кондукторе до разрушения. Результаты показаны на рис. 1. Следует отметить следующее. Повторное нагружение в кондукторе приводит к появлению «повторного (нового)» нисходящего участка, параметры которого зависели от величины  $n_r$  в большей мере, чем при однократном «первичном» нагружении: при  $n_r = 0,33$  повторный нисходящий участок располагался ниже первичного (рис. 1б), а при  $n_r = 0,93-0,96$  – ниже первичного. На рис. 1в показано сопоставление диаграмм I\*, II\* – соответственно при однократном нагружении при  $n_r = 0,93$  и 0,33, а I, II – повторное однократное нагружение соответственно при  $n_r = 0,93$  и 0,33; III – повторное нагружение без кондуктора ( $n_r = 0$ ).

**Программа «В».** Состав бетона предыдущий, а нагружение в кондукторе при  $n_r = 0,93-0,96$ .

Затем разгрузка и многократное повторное нагружение (рис. 2). Видно, что диаграмма повторного нагружения в кондукторе зависит от номера цикла (рис. 2б). Следует отметить понижение максимального напряжения с увеличением номера цикла и формы диаграммы.

Особенности формирования диаграмм разгрузки с нисходящего участка и повторного нагружения установлены путем применения двух факторов. Первый – нагружение, осуществлялось ступенями с выдержками во времени. Ступени нагружения создавались быстро (около – 10 с), чтобы считать их условно-мгновенными, а соответствующие деформации – упругими. Фиксировались продольные и поперечные деформации, что давало возможность вычислять изменение коэффициента поперечной деформации. Второй – фиксировалось время прохождения ультразвука, что позволяло судить об изменениях в структуре бетона.

Установлены следующие особенности формирования диаграмм разгрузки бетона в кондукторе. При условно-мгновенном уменьшении ступени нагрузки уменьшается напряжение и продольная деформация. За время выдержки напряжение увеличивается, а продольная деформация продолжает уменьшаться. Эти явления позволяют предположить, что диаграмма формируется за

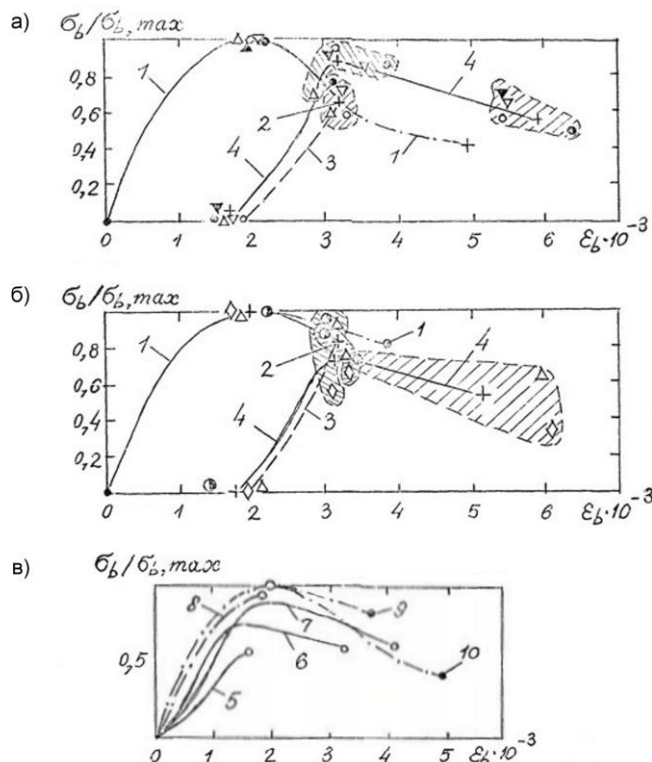


Рис. 1. Диаграммы одноосновчатого бетона при однократном и повторном нагружениях; а) при  $n_r = 0,96$ ; б)  $n_r = 0,33$ ; в) сопоставление диаграмм: 1 – однократное нагружение до разрушения; 2 – точка начала разгрузки; 3 – диаграмма при разгрузке; 4 – диаграмма при повторном однократном нагружении; 5, 6 и 7 – повторное нагружение до разрушения соответственно при  $n_r = 0; 0,33$  и  $0,96$ ; 8, 9, 10 – первичное нагружение до разрушения при  $n_r = 0; 0,33$  и  $0,96$  соответственно

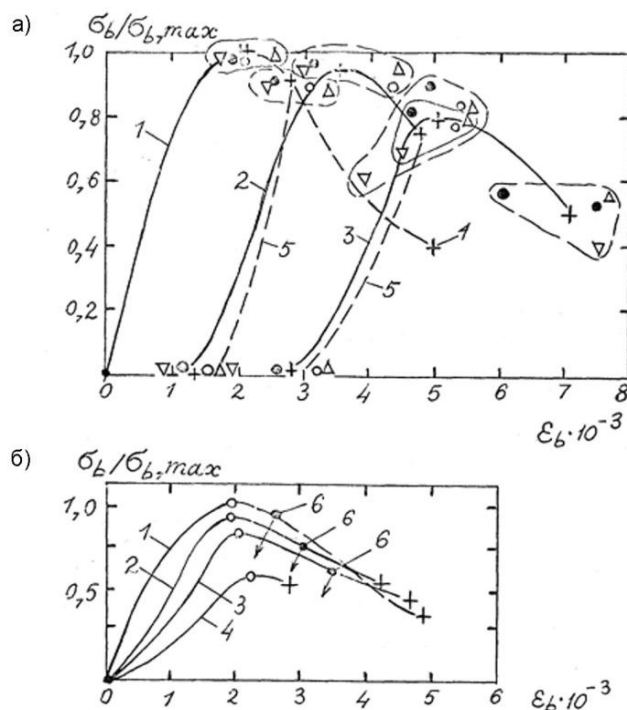


Рис. 2. Малоцикловое нагружение одноосносжатого бетона ( $n_r = 0; 93-0,96$ ): а) диаграммы при нагружении и разгрузке; б) сопоставление диаграмм при нагружении 1, 2, 3, 4 – соответственно первое, второе, третье и четвертое нагружения; 5 – диаграммы разгрузки; 6 – точки начала разгрузки

счет двух процессов: процесса релаксации и восстановления напряжений, обусловленных проявлением «прямой и обратной» быстро натекающей ползучести [28]. Под действием этих процессов диаграмма искривляется в сторону оси деформаций как при разгрузке, так и при повторных нагружениях.

При разгрузке с различных точек нисходящего участка в бетоне наблюдается увеличение коэффициента поперечной деформации и одновременное увеличение времени прохождения ультразвука. Это свидетельствует об увеличении накопления внутренних повреждений в его структуре.

При повторных нагружениях бетона в кондукторе после разгрузки с нисходящего участка отмечались изменения формы диаграмм, аналогичные тем, которые обычно наблюдаются при испытании бетона на многократное повторное нагружение.

Если разгрузка осуществлялась с начала нисходящего участка (около максимального напряжения), то диаграмма повторного нагружения имела выпуклость в сторону оси напряжений. По мере отдаления точки разгрузки к концу нисходящего участка на диаграмме повторного нагружения появлялась кривизна двух противоположных знаков и точка перегиба. Начальный модуль деформации при повторном нагружении существенно снижался по мере отдаления от максимального напряжения (к концу нисходящего участка). А также наблюдалось

снижение коэффициента поперечной деформации и увеличение времени прохождения ультразвука.

### Параметры диаграмм разгрузки и повторного нагружения

Использовались результаты экспериментальных исследований Ю.А. Ивашенко, А.Д. Лобанова (81 образец) однократного и повторного нагружения, а также результаты экспериментальных исследований [29–32].

При определении параметров введены следующие обозначения:

1)  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma'_{\max}$  – максимальное напряжение соответственно при первом и повторном нагружениях (соответствующие деформации –  $\varepsilon_R$  и  $\varepsilon'_R$ );

2)  $\sigma_u$  и  $\sigma'_u$  – минимальное напряжение, соответствующее величине предельной деформации –  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon'_u$ ,

3)  $\varepsilon_{back}$  – деформация, определяющая точку на нисходящем участке, с которой начинается разгрузка;

4)  $\varepsilon_0$  – остаточная деформация после разгрузки ( $\sigma = 0$ ) при первом нагружении;

5)  $\varepsilon_R$  – остаточная деформация в момент начала повторного нагружения (изменение  $\varepsilon_0 - \varepsilon_R = \varepsilon_{ep}$ ).

Ниже приведены эмпирические формулы для вычисления параметров:

а) упругое последствие

$$\varepsilon_{ep} = p(\varepsilon_R - \sigma_{\max}/E_b), \quad (1)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона при первичном нагружении;  $P$  – коэффициент, учитывающий долю восстанавливающейся деформации:

$$P = 0,05 + 0,1 (\varepsilon_u - \varepsilon_{back}) / (\varepsilon_u - \varepsilon_R); \quad (2)$$

б) остаточная деформация

$$\varepsilon_R = (0,94 \omega_{back} - 0,27) \varepsilon_u,$$

где  $\omega_{back} = \varepsilon_{back} / \varepsilon_u$ ;

в) деформация начального уплотнения при повторном нагружении (величина от начала повторного нагружения до точки изменения кривизны диаграммы):

$$\varepsilon_{t_0}^H = \varepsilon_c' = (6,67 \omega_{back} - 2,17) \varepsilon_{ep}; \quad (3)$$

г) максимальное напряжение при повторном нагружении

$$\sigma_{max}' = K_{max}' \cdot \bar{\sigma}_{max}', \quad (4)$$

где  $K_{max}'$  – коэффициент по табл. 2;  $\bar{\sigma}_{max}'$  – максимальное напряжение при повторных нагружениях по ГОСТ 24452-80 длительностью TR (указания в п. 3.9);

д) деформация, соответствующая напряжению  $\bar{\sigma}_{max}'$

$$\varepsilon_R' = \bar{\varepsilon}_R', \quad (5)$$

где  $\bar{\varepsilon}_R'$  – деформация, соответствующая  $\bar{\sigma}_{max}'$  по методике ГОСТ 24452-80 п. 3.9;

е) предельная деформация при повторном нагружении

$$\varepsilon_u' = \chi_u' \cdot \varepsilon_R', \quad (6)$$

где  $\chi_u'$  – коэффициент по табл. 2;

ж) напряжение, соответствующее предельной деформации при повторном нагружении

$$\sigma_u' = \eta_u' \sigma_{max}', \quad (7)$$

где  $\eta_u'$  – коэффициент по табл. 2.

з) при выполнении условия

$$\varepsilon_R \leq \varepsilon_{back} < \varepsilon_u. \quad (8)$$

Значения  $\bar{\sigma}_{back}'$  и  $\bar{\varepsilon}_R'$  вычисляются по формулам

$$\bar{\sigma}_{max}' = (1,30 - 0,98 \omega_{back}) \sigma_{max}, \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon}_R' = (0,60 / \omega_{back} - 0,05) \varepsilon_R. \quad (10)$$

Ниже приведена табл. 2, в которой значения коэффициентов из опытов определяются в зависимости от изменения скоростей деформирования бетона (режим деформирования). При ступенчатом нагружении скорость деформирования зависит от времени действия ступени нагрузки:

$$U_\varepsilon = \Delta\varepsilon / \Delta t \text{ или более точно}$$

$$U_\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\varepsilon(t_i + \Delta t) - \varepsilon(t_i)}{\Delta t}, \quad (11)$$

Таблица 2

Значения коэффициентов  $K_{max}'$ ,  $\eta_u'$ ,  $\chi_u'$

Изменение скорости деформирования при различном режиме нагружения		Опытные значения коэффициентов при различных величинах $\omega_{back}$						
$\frac{U_r(t_R)}{U_r(t_0)}$	$\frac{U_r(t_n)}{U_r(t_0)}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\geq 4,30$	$\infty$	Значения всех коэффициентов равны 1,00						
3,05	5,25	$\frac{1,05}{0,74/2,22}$						
2,52	4,08	$\frac{1,07}{0,63/2,31}$	$\frac{1,09}{0,79/2,17}$					
1,88	2,70	1,08	$\frac{1,12}{0,67/2,30}$	$\frac{1,16}{0,80/2,15}$				
1,52	2,00		$\frac{1,24}{0,69/2,27}$	$\frac{1,27}{0,81/2,13}$				
1,33	1,68			$\frac{1,40}{0,71/2,26}$	$\frac{1,42}{0,83/2,10}$			
1,27	1,60		$\frac{1,16}{0,57/2,35}$	$\frac{1,28}{0,63/2,31}$	$\frac{1,64}{0,78/2,18}$	$\frac{1,65}{0,84/2,08}$		
1,22	1,53				$\frac{1,44}{0,68/2,28}$	$\frac{1,97}{0,81/2,13}$	$\frac{1,99}{0,86/2,05}$	
$\leq 1,20$	$\leq 1,50$					$\frac{1,67}{0,73/2,25}$	$\frac{2,00}{0,77/2,20}$	$\frac{2,56}{0,83/2,10}$

Примечания: 1) в числителе  $K_{max}'$ ; в знаменателе –  $\eta_u'$  (перед чертой),  $\chi_u'$  (после черты);

2) значения коэффициентов первоначально определяются по значениям  $U_\varepsilon'(t_R) / U_\varepsilon'(t_0)$  с последующей корректировкой  $U_\varepsilon'(t_u) / U_\varepsilon'(t_0)$ ;

3) для промежуточных значений используется линейная интерполяция.

что графически означает угол наклона касательной у зависимости  $\varepsilon_b = \Phi(t)$ .

В табл. 2 даны отношения скоростей деформирования, что определяет их изменения по мере увеличения деформаций (режим):

$U_\varepsilon(t_0)$  – скорость на момент начала нагружения;  $U_\varepsilon(t_R)$  – скорость к моменту достижения максимального напряжения;  $U_\varepsilon(t_u)$  – скорость к моменту достижения предельной деформации.

### Заключение

1. Диаграммы «напряжение – деформация» при разгрузке и повторном нагружении в статически неопределимых конструктивных системах формируются в зависимости от следующих факторов:

- диаграммы первичного нагружения, включая появление нисходящего участка;
- точки на нисходящем участке, с которых осуществляется разгрузка и последующее повторное нагружение;
- изменение скоростей нагружения и деформирования (режима нагружения и деформирования).

2. Составлены эмпирические зависимости, с использованием которых могут быть определены параметры диаграмм разгрузки и повторного нагружения.

3. При повторном нагружении (после разгрузки с нисходящего участка) бетон имеет определённую прочность, которая может быть использована в расчетах.

4. Сведения о прочности бетона и диаграммах повторного нагружения (после разгрузки с нисходящего участка) могут быть использованы для расчетов статически неопределимых систем для «зон разгрузки».

5. Результаты испытания бетона при однократном и повторном нагружениях в кондукторе, являющемся один раз статически неопределимой системой, могут быть использованы для тестирования программ расчета конструктивных систем с учетом нелинейного деформирования.

### Литература

1. Ivashenko, Y. *Experimental studies on the impacts of strain and loading modes on the formation of concrete «stress-strain» relations* / Y. Ivashenko, A. Ferder // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 209. – P. 234–239.
2. Whitney, C. *Plastic Theory of Reinforced Concrete Design* / C. Whitney // *Proceedings ASCE*. – 1940.
3. Hadley, H. *When Concrete becomes Discrete* / H. Hadley // *Civil Engineering*. – 1950. – Vol. 20. – № 4.
4. Larson, F.R. *A time-temperature relationship for rupture and creep stress* / F.R. Larson, J.A. Miller // *Transactions ASME*. – July, 1952. – P. 765.
5. Cowan, H. *Inelastic Deformation of Concrete* / H. Cowan // *Civil Engineering*. – 1952. – Vol. 171, № 4518.

6. *CEB-Comite EVRO-INTER NATIONALO DU BETON. Bulletin D information № 203. – CEB-FJB Model CODA, 1990.*

7. Баженов, Ю.М. *Бетон при динамическом нагружении* / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 270 с.

8. Бондаренко, В.М. *Деформативность и прочность бетона при длительном динамическом нагружении* / В.М. Бондаренко // *Структура, прочность и деформации бетона*. – М.: НИИЖБ, 1972. – С. 175–182.

9. Евграфов, Г.К. *Деформации высокопрочных бетонов при многократно-повторной нагрузке* / Г.К. Евграфов, М.Н. Малько // *Бетон и железобетон*. – 1961. – № 11. – С. 8–9.

10. Берг, О.Я. *Исследования прочности железобетонных конструкций при воздействии на них многократно повторных нагрузок* / О.Я. Берг // *Исследования железобетонных мостовых конструкций*. – М.: Госстрасиздат, 1956.

11. Каранфилов, Т.С., Волков, Ю.С. *Обзор исследований по прочности и деформативности бетона при многократном приложении нагрузки* / Т.С. Каранфилов, Ю.С. Волков // *Исследования и расчеты гидротехнических сооружений на действие динамических нагрузок*. – М.: Гидропроект, № 10, 1963. – С. 25–28.

12. *Справочник проектировщика. Сборные железобетонные конструкции. Академия строительства и архитектуры СССР, НИИЖБ*. – М.: Госстройиздат, 1959. – 640 с.

13. Ройтман, А.Г. *Деформации и повреждение зданий* / А.Г. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.

14. Руфферт, Г. *Дефекты бетонных конструкций (перевод с немецкого)* / Г. Руфферт. – М.: Стройиздат, 1987. – 112 с.

15. *Повреждения зданий (перевод с английского)* / под ред. И.А. Петрова. – М.: Стройиздат, 1982. – 144 с.

16. Рибицки, Р. *Повреждения и дефекты строительных конструкций: пер. с нем.* / Р. Рибицки. – М.: Стройиздат, 1982. – 432 с.

17. *Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях*. – М.: Москомархитектура, 2002.

18. *Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения*. – М.: Москомархитектура, 2002.

19. Ивашенко, Ю.А. *Лавинообразное разрушение конструктивных систем* / Ю.А. Ивашенко // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2012. – № 17 (276). – С. 26–27.

20. Шильд, Е. *Предотвращение повреждений конструкций в жилищном строительстве (перевод с немецкого)* / Е. Шильд, Р. Освальд. – М.: Стройиздат, 1980. – Т. 1. 192 с.; Т. 2. 186 с.

21. Еремеев, П.Г. *Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных соору-*

жений при аварийных воздействиях // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2006. – № 2. – С. 65–71.

22. Клюева, Н.В. К анализу живучести, внезапно повреждаемых железобетонных пространственных конструкций / Н.В. Клюева, В.И. Колчунов, М.Ю. Прокуров // *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. – М., 2006. – Вып. 10. – С. 222–228.

23. Еремеев, П.Г. Защита большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения / П.Г. Еремеев // *Пространственные конструкции зданий и сооружений* – М., 2009. – Вып. 12. – С. 209–213.

24. ASCE 7-02 «Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002 edition», American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2002.

25. UFC 4-010-02. «Unified Facilities Criteria (UFC). Design (FOUO); DOD Minimum Antiterrorism Standoff Distances for Buildings», Department of Defense USA, 2002.

26. Попов, Н.Н. Особенности расчета конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев // *Бетон и железобетон*. – 1985. – № 6. – С. 15–16.

27. А. с. SU 1381365A1. Устройство для испытания на сжатие образцов горных пород

и строительных материалов / Ю.А. Ивашенко, А.Д. Лобанов. – № 4066518/25-28, заявл. 03.05.1986; опубл. 15.03.1988, Бюл. № 10.

28. Ивашенко, Ю.А. Теоретическое моделирование диаграммы бетона с нисходящим участком на основе применения уравнений механического состояния теории ползучести / Ю.А. Ивашенко, А.Д. Лобанов // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1985. – № 3. – С. 4–9.

29. Гвоздев, А.А. Длительное сопротивление железобетонных конструкций при неоднородной деформации / А.А. Гвоздев, Е.Ш. Жимагулов, А.В. Шубик // *Бетон и железобетон*. – 1982. – № 5. – С. 42–43.

30. Бамбура, А.Н. Влияние режима нагружения на прочностные деформативные характеристики трехкомпонентного бетона / А.Н. Бамбура, Н.В. Журавлева // *Строительные конструкции*. Киев: НИИСК, 1983. – Вып. 36. – С. 90–93.

31. Wang, P.T. Stress-Strain Curves of Normal and weight Concrete in Compression / P.T. Wang, S.P. Shah, A.E. Naaman // *JACJ*, № 11, Proc. V, 75, 1978, P. 603–611.

32. Dilger, W. Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates / W. Dilger, R. Koch, R. Koalczyk // *ACI Journal*. – 1984. – № 1. – P. 73–81.

**Ивашенко Юлий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivashenkoia@susu.ru

**Фердер Анна Владимировна**, магистрант кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ferderav@susu.ru

**Серебренникова Елена Николаевна**, магистрант кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), serebrennikovaen@susu.ru

**Урумбаев Амир Жанатович**, магистрант кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), urumbaevamir@yandex.ru

Поступила в редакцию 26 марта 2022 г.

DOI: 10.14529/build220201

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON CONCRETE DEFORMATION DURING UNLOADING AT A DESCENDING SECTION AND RELOADING

**Yu.A. Ivashenko**, ivashenkoia@susu.ru

**A.V. Ferder**, ferderav@susu.ru

**E.N. Serebrennikova**, serebrennikovaen@susu.ru

**A.Zh. Urumbaev**, urumbaevamir@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

The results are presented for the experimental research on concrete, loaded to the formation of a descending section on the *stress-strain* diagram, unloading from the descending section, and subsequent reloading. The tests have been conducted on a special device, simulating a one-time statically indeterminate structural system. The factors influencing the formation of unloading and reloading diagrams are determined. Also, empirical dependencies have been given, using which

it is possible to make calculations of structural systems when unloading zones are observed. This happens when systems are not repeatedly reloaded and in cases of local damage occurring for various reasons. The necessity for such studies is substantiated.

*Keywords: experiment, resistance of concrete to loading, descending section of the diagram, unloading, reloading.*

### References

1. Ivashenko Yu.A., Ferder A.V. [Experimental Studies on the Impacts of Strain and Loading Modes on the Formation of Concrete “Stress-Strain” Relations]. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 209, pp. 234–239. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.008.
2. Whitney C. [Plastic Theory of Reinforced Concrete Design]. *Proceedings ASCE*, 1940.
3. Hadley H. [When Concrete becomes Discrete]. *Civil Engineering*, 1950, vol. 20, no. 4.
4. Larson F.R., Miller J.A. [A Time-Temperature Relationship for Rapture and Creep Stress]. *Transactions ASME*, 1952, no. 74, pp. 765–771.
5. Cowan H. [Inelastic Deformation of Concrete]. *Civil Engineering*, 1952, vol. 171, no. 4518.
6. [CEB-FIP Model CODE. Bulletin D Information no. 203]. CEB-Comite EURO-INTERNATIONAL DU BETON Publ., 1990. 462 p.
7. Bazhenov Yu.M. *Beton pri dinamicheskom nagruzhении* [Concrete under Dynamic Loading]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970. 270 p.
8. Bondarenko V.M. [Deformability and Strength of Concrete under Long-Term Dynamic Loading]. *Struktura, prochnost' i deformatsii betona* [Structure, Strength and Deformation of Concrete]. Moscow, NIIZhB Publ., 1972. pp. 175–182. (in Russ.)
9. Evgrafov G.K., Mal'ko M.N. [Deformations of High-Strength Concretes under Repeated Loading]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1961, no. 11. pp. 8–9. (in Russ.)
10. Berg O.Ya. [Investigation of the Strength of Reinforced Concrete Structures when Exposed to Multiple-Repeated Loads.]. *Sb. Issledovaniya zhelezobetonnykh mostovykh konstruksiy* [Collection of Works Research of Reinforced Concrete Bridge Structures]. Moscow, Gosstraszidat Publ., 1956, pp. 6–109. (in Russ.)
11. Karanfilov T.S., Volkov Yu.S. [Review of Studies on the Strength and Deformability of Concrete under Repeated Load Application]. *Issledovaniya i raschety gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na deystviye dinamicheskikh nagruzok* [Research and Calculations of Hydraulic Structures for the Action of Dynamic Loads]. Moscow, Gidroyekt Publ., 1963, no. 10, pp. 25–28. (in Russ.)
12. *Spravochnik proyektirovshchika. Sbornyye zhelezobetonnyye konstruksii* [Designer's Handbook. Precast Concrete Structures.]. *Akademiya stroitel'stva i arkhitektury SSSR, NIIZhB* [Academy of Construction and Architecture of the USSR, Research Institute of Reinforced Concrete]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959, 640 p.
13. Roytman A.G. *Deformatsii i povrezhdeniya zdaniy* [Deformations and Damage to Buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1987. 160 p.
14. Ruffert G. *Defekty betonnykh konstruksiy* [Defects in Concrete Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 112 p.
15. Petrova I.A. (Ed.) *Povrezhdeniya zdaniy* [Building Damage]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 144 p.
16. Ribitski R. *Povrezhdeniya i defekty stroitel'nykh konstruksiy* [Damage and Defects of Building Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 432 p.
17. *Rekomendatsii po zashchite zhilykh karkasnykh zdaniy pri chrezvychaynykh situatsiyakh* [Recommended Practice for the Protection of Frame Residential Buildings in Emergencies]. Moscow, Moskomarkhitektura Publ., 2002.
18. *Rekomendatsii po zashchite vysotnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya* [Recommendations for the Protection of High-Rise Buildings from Progressive Collapse]. Moscow, Moskomarkhitektura Publ., 2002. 61 p.
19. Ivashenko Yu.A. [Avalanching Destruction of Structural Systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2012, no. 17 (276), pp. 26–27. (in Russ.)
20. Shil'd E., Osval'd R. *Predotvrashcheniye povrezhdeniy konstruksiy v zhilishchnom stroitel'stve* [Prevention of Damage to Structures in Residential Construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, vol. 1. 192 p. and vol. 2. 186 p.
21. Eremeyev P.G. [Prevention of Avalanche-Like (Progressive) Collapse of Load-Bearing Structures of Unique Large-Span Structures in Case of Emergency Impacts]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures], 2006, no. 2, pp. 65–71. (in Russ.)
22. Klyuyeva N.V., Kolchunov V.I., Prokurov M.Yu. [To the Analysis of Survivability of Suddenly Damaged Reinforced Concrete Spatial Structures]. *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2006, iss.10, pp. 222–228. (in Russ.)



23. Eremeyev P.G. [Protection of Large-Span Structures from Avalanche-Like (Progressive) Collapse]. *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy* [Spatial Structures of Buildings and Structures]. Moscow, 2009, iss. 12, pp. 209–213. (in Russ.)
24. [Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures]. *Revision of ASCE 7-98*, Reston, Virginia, Published by the American Society of Civil Engineers, 2002. 408 p.
25. [Minimum Antiterrorism standoff Distances for Buildings]. Unified Facilities Criteria (UFC), Design (FOUO), DOD, Department of Defense USA, 2002.
26. Popov N.N., Rastorguyev B.S. [Features of the Calculation of Structures for the Action of Short-Term Dynamic Loads]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1985, no. 6, pp. 15–16. (in Russ.)
27. Ivashenko Yu.A., Lobanov A.D. [The Device for Compression Testing of Samples of Rocks and Building Materials]. Patent USSR, no. 1381365, 1988.
28. Ivashenko Yu.A., Lobanov A.D. [Theoretical Modeling of a Concrete Diagram with a Descending Section Based on the Application of the Equations of the Mechanical State of the Theory of Creep]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Proceedings of Universities. Construction and Architecture], 1985, no. 3, pp. 4–9. (in Russ.)
29. Gvozdev A.A., Zhimagulov E.Sh., Shubik A.V. [Long-term Resistance of Reinforced Concrete Structures under Inhomogeneous Deformation]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1982, no. 5, pp. 42–43. (in Russ.)
30. Bambura A.N., Zhuravleva N.V. [Influence of Loading Mode on Strength and Deformation Characteristics of Three-Component Concrete]. *V sb.: Stroitel'nyye konstruksii* [In the Collection Building Structures]. Kiyev, 1983, iss. 36, pp. 90–93. (in Russ.)
31. Wang P.T., Shah S.P., Naaman A.E. [Stress-Strain Curves of Normal and weight Concrete in Compression]. *JACJ*, 1978, vol. 75, no. 11, pp. 603–611.
32. Dilger W., Koch R., Koalczyk R. [Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates]. *ACI Journal*, 1984, no. 1, pp. 73–81.

Received 26 March 2021

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования деформаций бетона при разгрузке на нисходящем участке и повторном нагружении / Ю.А. Ивашенко, А.В. Фердер, Е.Н. Серебренникова, А.Ж. Урумбаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.14529/build220201

#### FOR CITATION

Ivashenko Yu.A., Ferder A.V., Serebrennikova E.N., Urumbaev A.Zh. Experimental Research on Concrete Deformation During Unloading at a Descending Section and Reloading. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.). DOI: 10.14529/build220201