

DOI: 10.12737/23890

Никулин А.И., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

О ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ИМПУЛЬСНОМ СЖАТИИ

nikulin137@yandex.ru

Для определения параметров диаграмм динамического неоднородного сжатия бетона используется гипотеза о постоянстве энергетического критерия разрушения этого материала. Предложена эмпирическая зависимость для нахождения коэффициента динамической прочности бетона при неоднородном сжатии с учетом времени его нагружения до разрушения. Для некоторых классов тяжёлого бетона приведены конкретные значения параметров для этой зависимости. С помощью составленной программы расчета выявлено существенное влияние продолжительности импульсного нагружения на параметры диаграмм динамического неоднородного сжатия бетона. Некоторые результаты расчетов представлены в статье.

Ключевые слова: динамическая прочность, импульсное нагружение, неоднородное сжатие, энергетический критерий разрушения, диаграмма динамического сжатия бетона, численный эксперимент.

Согласно действующему Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений в практику проектирования введено требование о том, чтобы основные несущие конструкции могли выдержать без обрушения однократное (импульсное) воздействие сверхкратковременной динамической нагрузки [2, 7, 13]. Это становится возможным исходя из многочисленных экспериментальных данных [1, 4, 6, 12, 16], которые показывают, что прочность бетона при высокоскоростном нагружении существенно превышает значения, найденные в условиях стандартных одноосных испытаний, продолжительность которых исчисляется часами и минутами.

Как отмечается в ряде публикаций [2, 5, 13, 15], повышенная ударная прочность бетона связана с проявлением мгновенных внутренних сил его вязкого сопротивления, непосредственно воспринимающих внешнее воздействие и тормозящих развитие поперечных деформаций, являющихся физической причиной его разрушения.

Так, например, в монографии Ю.М. Баженова [1], для получения зависимости $R_b^d = f(\tau)$ были испытаны более 500 образцов различных бетонов. Образцы нагружали на пневмодинамических установках, усилия регистрировали с помощью электронной аппаратуры. Минимальное время сжатия до разрушения составляло 0,001 с.

Сопротивление бетона динамическому импульсному сжатию в этих экспериментах оценивалось коэффициентом динамического упрочнения K_d , который, являясь безразмерным критерием, позволил обобщить результаты исследования бетонов различной прочности.

Как показано в работе [1], график зависимости коэффициента K_d от времени нагружения образцов (τ) вплоть до их полного разрушения является нелинейным, и для его аналитической интерпретации может использоваться уточненная эмпирическая формула, предложенная в статье [9]:

$$K_d = 1,58 - 0,4 \lg \tau + 0,129 (\lg \tau)^2 - 0,0149 (\lg \tau)^3. \quad (1)$$

При этом зависимость (1) справедлива для интервала времени нагружения $\tau = 1 \div 2000$ мсек.

Полученные экспериментальные результаты совпадают с данными других исследователей: Д.И. Гладкова [4], О.П. Квирикадзе [6], Г.И. Попова [12], В.А. Рахманова, Е.Л. Розовского, И.А. Цупкова [14], К.А. Цветкова [16].

Однако, у зависимости (1), несмотря на её повышенную точность при сопоставлении с усреднёнными опытными данными, есть существенный недостаток, заключающийся в отсутствии учёта конкретных деформативно-прочностных свойств бетонов. Так, в ряде исследований [2, 5, 10, 13, 15] отмечается, что бетоны низкой и высокой прочности по-разному ведут себя (деформируются) при одноосных импульсных динамических нагрузках. Например, численными исследованиями в работе [10] установлено, что с увеличением класса бетона коэффициент его динамической прочности при центральном сжатии K_d снижается с 2,879 для В10 до 1,478 для В100. Такие результаты получены с помощью энергетического подхода к разрушению бетона, впервые предложенного проф. В.М. Бондаренко [3] и получившего своё дальнейшее развитие в монографии С.И. Меркулова [8], где учёт режимности нагружения выполнен на ос-

нове постулата об инвариантности величины потенциальной энергии деформирования материала к моменту разрушения.

Представляется, что аналогичный подход можно применить для определения динамической прочности бетона, находящегося в услови-

ях неоднородного напряженного состояния, характеризующегося сверхмалым временем внецентренного сжатия или изгиба образца до разрушения (рис. 1). При этом кривая 3 соответствует меньшему времени сжатия образца до разрушения по сравнению с кривой 2.

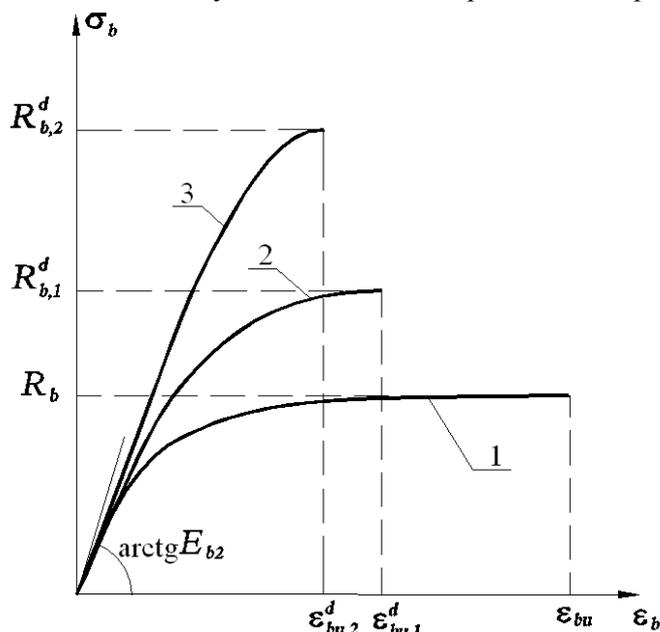


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетона при неоднородном статическом (кривая 1) и динамическом сжатии с учетом различного времени нагружения внецентренно сжатых или изгибаемых образцов (кривые 2 и 3)

Для аналитического описания диаграмм неоднородного сжатия бетона при статическом нагружении используем предложенную в работе [11] зависимость следующего вида:

$$\sigma_b = \frac{E_{b2}\varepsilon_b(1 + D_{b2}\varepsilon_b)}{1 + C_{b2}\varepsilon_b}, \quad (2)$$

где E_{b2} , D_{b2} , C_{b2} – начальный модуль упругости и параметры нелинейности деформирования бетона при неоднородном сжатии, рассчитываемые по методике [11]; σ_b , ε_b – текущие значения напряжений и относительных деформаций сжатия.

Для аналитического описания диаграммы динамического неоднородного сжатия бетона также используется зависимость (2), у которой параметры нелинейности (D_{b2}^d , C_{b2}^d) и функционально зависимые переменные (σ_b^d , ε_b^d) имеют соответствующий индекс принадлежности (d).

Принимаем следующие гипотезы и допущения для определения параметров диаграмм динамического неоднородного сжатия бетона при различных скоростях нагружения:

– рассматривается неоднородное сжатие бетонных образцов (что соответствует, например, сжатой зоне нормального сечения изгибаемого

элемента) в условиях постоянной скорости увеличения напряжений (МПа/сек);

– величина удельной энергии деформирования бетона при неоднородном сжатии непосредственно перед его разрушением является константой, не зависящей от скорости нагружения образца;

– начальные модули упругости бетона при статическом и динамическом неоднородном сжатии равны между собой;

– касательные модули деформаций в предельной точке диаграмм статического и динамического неоднородного сжатия равны нулю.

Аналитическое отображение принятых гипотез приводит к следующей системе уравнений:

$$E_{b2} = E_{b2}^d, \quad (3)$$

$$D_{b2}^d = -\frac{R_b^d}{E_{b2}^d(\varepsilon_{bu}^d)^2}, \quad (4)$$

$$C_{b2}^d = \frac{E_{b2}^d}{R_b^d} - \frac{2}{\varepsilon_{bu}^d}, \quad (5)$$

$$\int_0^{\varepsilon_{bu}} \sigma_b d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_{bu}^d} \sigma_b^d d\varepsilon_b^d, \quad (6)$$

где E_{b2}^d , D_{b2}^d , C_{b2}^d – начальный модуль упругости и параметры нелинейности деформирования бетона при неоднородном динамическом сжа-

тии; R_b^d , ϵ_{bu}^d – соответственно, предельная прочность и величина предельной относительной деформации бетона при неоднородном динамическом сжатии.

Последнее равенство (6) отражает гипотезу

$$\frac{E_{b2}\epsilon_{bu}}{C_{b2}} \left\{ \frac{D_{b2}\epsilon_{bu}}{2} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2}\epsilon_{bu})}{C_{b2}\epsilon_{bu}}\right) \right\} = \frac{E_{b2}^d\epsilon_{bu}^d}{C_{bu}^d} \left\{ \frac{D_{b2}^d\epsilon_{bu}^d}{2} + \left(1 - \frac{D_{b2}^d}{C_{b2}^d}\right) \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2}^d\epsilon_{bu}^d)}{C_{b2}^d\epsilon_{bu}^d}\right) \right\}. \quad (7)$$

В полученной системе четырёх уравнений (3), (4), (5), (7) неизвестными являются пять параметров (E_{b2}^d , D_{b2}^d , C_{b2}^d , R_b^d , ϵ_{bu}^d). В качестве недостающего пятого уравнения принимаем эмпирическую зависимость для нахождения коэффициента динамической прочности бетона при неоднородном сжатии K_{d2} , качественный вид которой представлен на рис. 2:

$$K_{d2} = \frac{R_b^d}{R_b} = \frac{l_{b2}^d + k_{b2}^d \cdot t_d}{1 + n_{b2}^d \cdot t_d + m_{b2}^d \cdot t_d^2}, \quad (8)$$

где R_b – прочность бетона при неоднородном статическом сжатии; R_b^d – динамическая прочность бетона при заданном времени действия (t_d) постоянно увеличивающейся сжимающей нагрузки; l_{b2}^d , k_{b2}^d , n_{b2}^d , m_{b2}^d – коэффициенты

об инвариантности величины удельной энергии деформирования бетона при сжатии непосредственно перед его разрушением. В результате интегрирования зависимости (6) получаем следующее выражение:

уравнения, получаемые экспериментально-теоретическим путём для изгибаемых или внецентренно сжатых образцов из бетона одной прочности.

В таблице 1 на основании обобщения ограниченного объема экспериментальных и расчетных данных, приведенных в работах [1, 4, 6, 14, 16], представлены значения коэффициентов уравнения l_{b2}^d , k_{b2}^d , n_{b2}^d , m_{b2}^d для некоторых классов тяжелого бетона. Параметр l_{b2}^d представляет собой максимально возможный по величине коэффициент динамической прочности бетона $K_{d2} = R_b^d / R_b$, который соответствует мгновенному неоднородному сжатию бетона до его разрушения, т.е. при $t_d = 0$.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (8) для некоторых классов тяжелого бетона при динамическом неоднородном сжатии

№ п/п	Класс бетона	Параметр l_b^d	Параметр k_b^d	Параметр n_b^d	Параметр m_b^d
1	B10	6,471	985,751	962,303	$1,9544 \cdot 10^{-2}$
2	B30	5,246	644,857	636,349	$7,0931 \cdot 10^{-3}$
3	B50	4,555	487,880	483,200	$3,9028 \cdot 10^{-3}$
4	B60	4,283	431,934	428,768	$2,6408 \cdot 10^{-3}$
5	B80	3,865	401,032	398,699	$1,9462 \cdot 10^{-3}$
6	B100	3,505	386,682	384,940	$1,4532 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы 1 следует, что динамические пределы прочности при неоднородном сжатии у бетонов различных классов существенно различаются. Так, для низкопрочного бетона класса B10 динамический предел прочности R_b^d более чем в 6 раз превышает аналогичную величину при статическом сжатии R_b . У высокопрочного бетона класса B100 это превышение существенно меньше (в 3,5 раза). Следовательно, с увеличением класса бетона коэффициент его динамической прочности при неоднородном сжатии K_{d2} понижается с 6,471 для B10 до 3,505 для B100.

Совместное решение уравнений (3), (4), (5), (7), (8) позволяет определить параметры зависи-

мости (2), описывающей диаграмму неоднородного динамического сжатия бетона при заданном времени действия импульсного нагружения ($t_d = 0,001 \dots 0,1$). Учитывая нелинейный характер составленных уравнений, для их численного решения используется итерационная процедура, которая реализована в составленной программе расчета «Beton_6D». В качестве примера в таблице 2 приведены результаты расчетов искомых параметров диаграмм статического и динамического неоднородного сжатия бетона класса B30 при различном времени нагружения изгибаемых образцов до их разрушения.

Таблица 2

Параметры диаграмм динамического неоднородного сжатия тяжелого бетона класса В30 при различном времени нагружения изгибаемых образцов вплоть до их разрушения

Время нагружения, сек	Параметр R_b^d , МПа	Параметр ε_{bu}^d	Параметр E_{b2}^d , МПа	Параметр D_{b2}^d	Параметр C_{b2}^d
1200	22,0	0,00355	96110	-18,191	3804,815
1,0	22,44	0,00349	96110	-19,196	3709,491
0,1	23,74	0,00332	96110	-22,357	3446,733
0,01	34,94	0,00242	96110	-62,006	1924,726
0,001	79,20	0,00138	96110	-433,987	-237,902

Представленные в таблице 2 результаты показывают, что при уменьшении времени нагружения изгибаемых образцов с 1200 сек до 1,0 сек изменения динамических величин прочности бетона при неоднородном сжатии R_b^d и соответствующей относительной предельной деформации ε_{bu}^d оказались незначительными (< 2%). Дальнейшее сокращение времени нагружения изгибаемого образца (до 0,01 сек) приводит уже к более заметным результатам: прочность R_b^d повысилась на 58,8 %, а предельная относительная деформация ε_{bu}^d уменьшилась на 46,7 %. Для ещё более короткого интервала приложения разрушающей нагрузки на изгибаемый образец (0,001 сек) прочность бетона R_b^d возросла в 3,6 раза, а предельная относительная деформация уменьшилась в 2,57 раза.

Таким образом, на основе принятых гипотез и предпосылок разработана методика расчета динамической прочности бетона при различном времени нагружения элементов, включая определение параметров аналитических зависимостей, описывающих диаграммы неоднородного сжатия бетона при импульсном динамическом нагружении в условиях постоянной скорости увеличения напряжений в испытываемых до разрушения образцах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 292 с.
2. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпяк О.Г., Югов Н.Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. Нортхэмптон-Томск. 2004. 433 с.
3. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. 324 с.
4. Гладков Д.И. Сопrotивление бетона разрушению // Известия вузов. Строительство. 2004. № 8. С. 47–53.
5. Забегаев А.В. К построению общей модели деформирования бетона // Бетон и железобетон. 1994. № 6. С. 23–26.
6. Квирикадзе О.П. Влияние скорости загрузки на деформации и прочность бетона // Ползучесть строительных материалов и конструкций: Сб. научн. трудов; Под ред. А.Р. Ржаницына. М.: Стройиздат, 1964. С. 269–276.
7. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях: Научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.
8. Меркулов С.И. Основы теории реконструкции железобетона: монография. Курск: Изд-во КГТУ, 2009. 248 с.
9. Никулин А.И. Прочность бетона при динамическом импульсном растяжении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 6–10.
10. Никулин А.И., Али Фадиль А.Х. Прочность бетона при импульсном динамическом сжатии с учетом времени нагружения // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2014. С. 92–98.
11. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Предельная прочность изгибаемых железобетонных элементов на основе применения энергетического критерия разрушения бетона // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2014. С. 98–107.
12. Попов Г.И. Железобетонные конструкции, подверженные действию импульсных нагрузок. М.: Стройиздат, 1986. 128 с.
13. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Особенности расчета конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок // Бетон и железобетон. 1985. № 6. С. 15–16.
14. Рахманов В.А., Розовский Е.Л., Цупков И.А. Влияние динамического воздействия на прочностные и деформативные свойства тяжелого бетона // Бетон и железобетон. 1987. № 7. С. 19–20.

15. Тамразян А.Г., Хетагуров А.Т. К влиянию свободной воды на динамическое поведение бетона // Бетон и железобетон. 2002. № 3. С. 8–10.

прочностных и деформативных свойств бетона при динамическом нагружении в условиях одноосного и двухосного сжатия // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 109–120.

16. Цветков К.А. Основные результаты экспериментально-теоретических исследований

Nikulin A.I.

ABOUT THE DYNAMIC CONCRETE STRENGTH UNDER NON-UNIFORM PULSING COMPRESSION

To determine the parameters of the concrete non-uniform compression dynamic diagrams the hypothesis of the constancy of the energy criterion of destruction of this material is used. An empirical relationship for finding the dynamic strength of concrete in non-uniform compression coefficient taking into account the time it is loaded to failure was suggested. For some heavy concrete classes specific parameters for that addition are given. With the compiled calculation program a significant effect on the duration of the pulse parameters of the dynamic loading of concrete non-uniform compression diagrams was revealed. Some calculation results are presented in the article.

Key words: *dynamic strength, impulse loading, non-uniform compression, energy fracture criterion, the concrete compression dynamic diagram, numerical experiment.*

Никulin Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: nikulin137@yandex.ru