

Сулейманова Л.А., д-р техн. наук, проф.,
Погорелова И.А., канд. техн. наук, доц.,
Кириленко С.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

НАУЧНО-ОБОСНОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА И ЕГО ПРОЧНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ

ludmilasuleimanova@yandex.ru

Предложена научно-обоснованная методика, учитывающая увеличение прочности цементного бетона со временем, что влияет на величину предела его длительного сопротивления разрушению, а конкретно, приводит к снижению относительного предела длительной прочности. Это объясняется тем, что при загрузке бетона постоянной нагрузкой в раннем возрасте процесс упрочнения материала превалирует над процессом разрушения, что сказывается на относительном пределе длительной прочности бетона.

Ключевые слова: методика, прочность, предел длительной прочности, бетон, работа, скорость приложения нагрузки, длительность испытания, сопротивление разрушению.

Для обеспечения долговечности железобетонных конструкций очень важно уметь достоверно определять, осуществлять систематический контроль и надежно использовать прочность бетона в конструкциях, эксплуатирующихся при воздействии различных режимов нагрузки и условиях окружающей среды. Предлагается сравнительно простая методика определения прочности бетона, отражающая влияние режима и условий испытания его на прочность. В основу методики положен энергетический подход к оценке потенциальных возможностей бетона, когда его несущая способность определяется количеством работы, которая необходима для разрушения материала единичного объема (предел технических возможностей бетона) [1–7], определяемая по формуле:

$$A_p = \int_0^{\varepsilon_p} R d\varepsilon \cdot \quad (1)$$

При наличии конкретной зависимости $R-\varepsilon$

$$A_p = \eta R_{пр} \varepsilon_p \quad (2)$$

где $R_{пр}$ – призмная прочность при стандартном испытании; ε_p – относительная полная разрушающая деформация образца, которую он претерпевает при $R_{пр}$; η – коэффициент, характеризующий отношение площади под диаграммой «нагрузка–деформация» к площади прямоугольника со сторонами $R_{пр}$ и ε_p . Для удобства в расчетах η принимается равным единице, что не сказывается заметно на конечных результатах при определении относительных величин прочности.

Как подтверждают многочисленные экспериментальные данные (табл. 1 [4, 5],

табл. 2 [9], табл. 3 [10], табл. 4 [11], табл. 5 [12], табл. 6 [13]), A_p является строго определенной и постоянной для данного конкретного вида, состава бетона и вида напряженного состояния при условии отсутствия упрочнения его во времени и не зависит от режима испытания образцов. A_p всегда можно определить при наличии зависимости $R-\varepsilon$, полученной при стандартном режиме испытания призм.

Если знать, как изменяется величина полной относительной деформации бетона в зависимости от длительности приложения нагрузки, т.е. зависимость $\varepsilon_p^t = f(t)$ его прочность можно всегда рассчитать по выражению

$$R_t = \frac{A_p}{\varepsilon_p^t} \quad (3)$$

Правильность такого подхода к определению прочности бетона при различной длительности испытания образцов продемонстрирована на рис. 1, из которого видно, что результаты расчета R_t по формуле хорошо подтверждаются опытами.

Таблица 1

Результаты испытания керамзитобетонных призм при различной продолжительности приложения нагрузки

Длительность испытаний, мин	$R_{пр}$, МПа	$\varepsilon_p \times 10^5$	$A_p = R_{пр} \varepsilon_p$, Дж	Максимальная разница, %
15	17,1	244	0,042	5
60	16	240	0,038	
150	15,6	264	0,041	

Таблица 2

Влияние скорости нагружения на свойства бетона и раствора

Материал	Скорость нагружения, МПа/мин	$R_{пр}$, МПа	$\varepsilon_p \times 10^5$, при $R=0,9R_{пр}$	$\varepsilon_p \times 10^6$, найденное по экстраполяции	$A_p = R_{пр}\varepsilon_p$, Дж	Максимальное отклонение, %
Тяжелый бетон на гравии (Ц= 350кг/м ³ , В/Ц=0,53)	0,052	14,18	865	1060	0,015	1,4
	2,17	15,0	830	990	0,0148	
Керамзитобетон	0,07	15,35	1325	1650	0,0253	4,5
	2,0	16,45	1275	1475	0,0242	
Цементный раствор	0,1	23,0	1620	2050	0,047	11
	2,0	26,6	1520	1950	0,052	
Тяжелый бетон	0,1	23,1	840	1030	0,0238	7
	2,0	25,4	820	1000	0,0254	
Пемзобетон	0,047	6,57	1300	1600	0,0105	6,5
	0,693	6,96	1340	1620	0,0112	
Туфобетон	0,037	12,26	2577	3050	0,0375	3
	0,67	12,53	2520	2900	0,0365	

Таблица 3

Результаты испытания растворных балочек 4×4×30 см на изгиб

№ п/п	$R_{изг}$, МПа при скорости нагружения, МПа/с			Прогибы в мм при скорости нагружения, МПа/с			$A_p = R_{изг}f$, Дж, при скорости нагружения, МПа/с		
	200	0,1	0,001	200	0,1	0,001	200	0,1	0,001
1	6,15	5,15	4,8	0,04	0,052	0,058	0,394	0,427	0,445
2	6,1	5,0	4,55	0,048	0,06	0,068	0,47	0,48	0,495
3	6,05	5,3	5,15	0,042	0,05	0,053	0,405	0,423	0,436
4	5,5	4,5	4,0	0,03	0,041	0,046	0,264	0,295	0,294
5	7,0	5,65	5,05	0,055	0,073	0,086	0,62	0,66	0,69
6	5,4	4,55	4,25	0,04	0,051	0,056	0,345	0,37	0,38
7	7,2	5,6	5,0	0,06	0,09	0,11	0,69	0,8	0,88
8	7,2	6,2	5,7	0,048	0,061	0,069	0,55	0,6	0,63
9	5,8	5,15	5,0	0,039	0,046	0,049	0,36	0,375	0,39
Среднее значение	6,3	5,23	4,83	0,0447	0,0582	0,066	0,45	0,49	0,51

Таблица 4

Результаты испытания газобетона на сжатие

Скорость нагружения, МПа/с	$R_{пр}$, МПа	$\varepsilon_p \times 10^3$	$A_p = R_{пр}\varepsilon_p$, Дж
0,1	5,9	2,6	0,0154
0,05	5,5	2,2	0,0121
0,025	5,85	2,6	0,0152
0,001	4,95	3,0	0,0149

Таблица 5

Результаты испытания различных видов полимербетона на сжатие

Материал	A_p в Дж при режиме нагружения		Отклонение результатов, %
	Кратковременное нагружение со скоростью 60 МПа в мин	Длительное действие постоянной нагрузки, превышающей $R_{дл}$	
ФА	0,21	0,192	9
ФА-д	0,25	0,295	18
ФАМ	0,36	0,33	8
ФАМ-д	0,34	0,39	15

Таблица 6

Результаты испытания тедзамитобетона на сжатие

Скорость нагружения, МПа/с	$R_{пр}$, МПа	$\epsilon_p \times 10^3$	$A_p = R_{пр}\epsilon_p$, Дж	Максимальное отклонение, %
0,13	18	278	0,05	8
925	22,5	240	0,054	

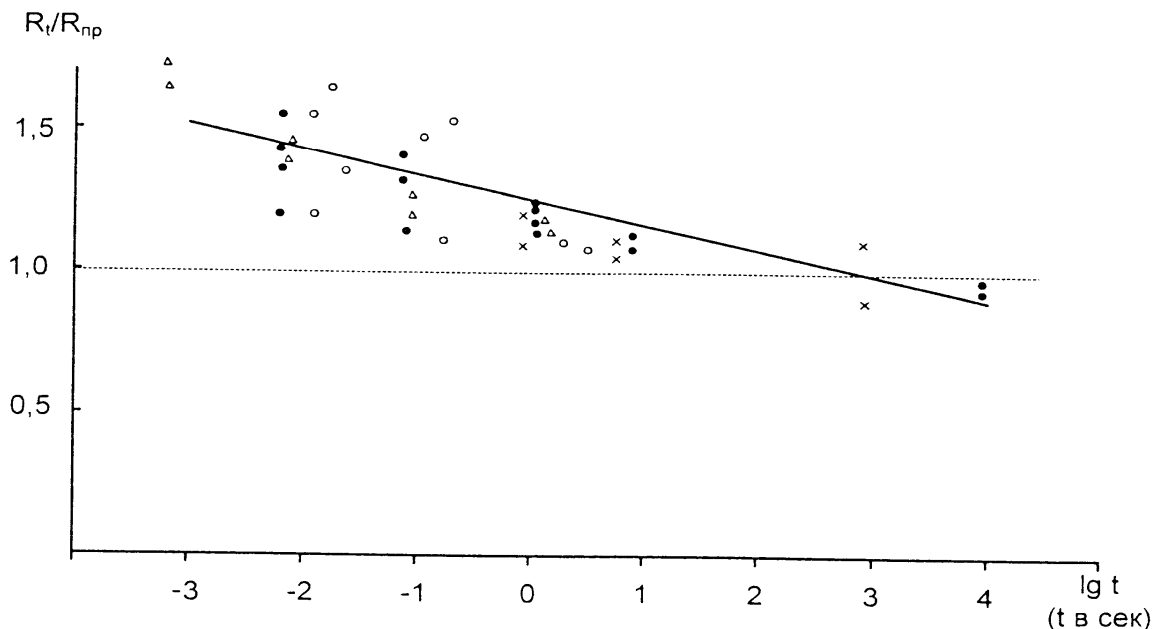


Рис. 1. Расчетная зависимость относительной прочности керамзитобетона от продолжительности испытания образцов (по предлагаемой методике):
 × – опытные данные авторов; ● – данные [14]; Δ – данные [15]; ○ – данные [16]

Зависимость $\epsilon'_p = f(t)$ для каждого конкретного бетона предлагается определять по следующей методике.

Бетонные призмы загружаются постоянной нагрузкой, равной примерно $(0,8...0,85)R_{пр}$ на обычных прессах и выдерживаются в течение 10...20 мин. При этом замеряются деформации призм как сразу после нагружения, так и в течение 10...20 мин. Строится зависимость $\epsilon'_p = f(t)$ в обычных и логарифмических координатах (рис. 2, 3).

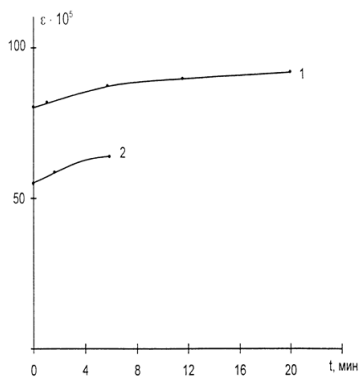


Рис. 2. Изменение относительной деформации керамзитобетона (1) и тяжелого бетона (2) со временем при постоянном $R = 0,8R_{пр}$

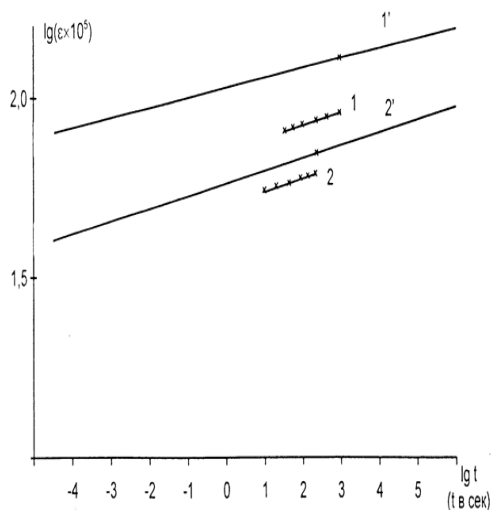


Рис. 3. График изменения относительных деформаций образцов в зависимости от длительности их испытаний (в логарифмических координатах). Опытные значения деформаций при $R = 0,8R_{пр}$:
 1 – для керамзитобетона; 2 – для тяжелого бетона.
 Расчетные значения разрушающих деформаций:
 1' – для керамзитобетона; 2' – для тяжелого бетона

Аналогичный принцип положен в основу методики определения предела длительной прочности бетона.

В данном случае удобно рассмотреть поведение под нагрузкой полимербетона (табл. 5). На рис. 4 представлена зависимость $R-\varepsilon$, полученная при кратковременном и длительном испытаниях полимербетона ФА.

По формуле (2):

$$A_{\text{разр}} = 488 \times 430 \times 10^{-5} = 0,21 \text{ Дж.}$$

Зададимся несколькими значениями R (например, как минимум, тремя - четырьмя) - 10,0; 15,0; 20,0; 21,5 МПа. При принятых значениях R рассчитываем величины A с учетом длительного действия нагрузки:

$$A_1 = 100 \times 140 \times 10^{-5} = 0,014 \text{ Дж,}$$

$$A_2 = 150 \times 230 \times 10^{-5} = 0,0345 \text{ Дж,}$$

$$A_3 = 200 \times 400 \times 10^{-5} = 0,08 \text{ Дж,}$$

$$A_4 = 215 \times 490 \times 10^{-5} = 0,106 \text{ Дж.}$$

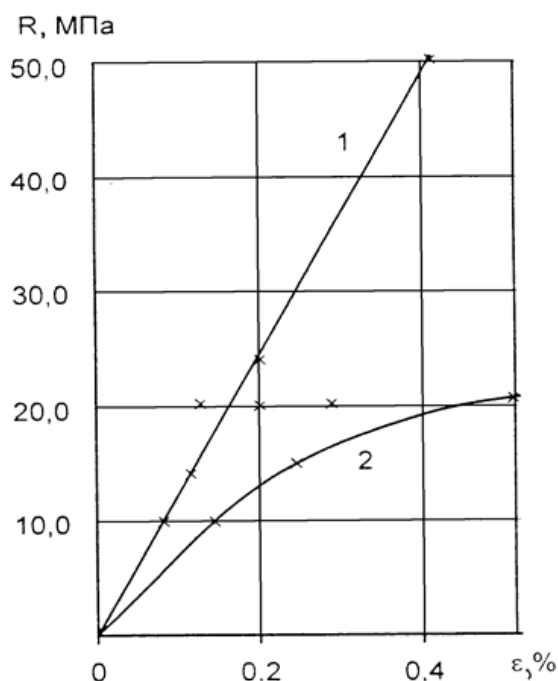


Рис. 4. Зависимость кратковременных (1) и полных (2) относительных деформаций полимербетона от напряжений

На основе полученных данных строим зависимость $R-A$ (рис. 5), в соответствии с которой расчетная величина $R_{\text{дл}}$, для полимербетона равна 25,0 МПа или $0,51R$, а опытная - $0,5R$, т.е. опыт хорошо подтверждает расчет. Упрочнение полимербетона во времени отсутствует, а, следовательно, и работа, необходимая для разрушения материала, является постоянной величиной. В то же время процесс разрушения материала вследствие его ползучести прогрессирует со временем.

А это значит, что при загрузении полимербетона ($R = 0,5R_{\text{пр}}$) он разрушится через весьма длительное время. Если же нагрузка на него будет превышать $R_{\text{дл}}$, то разрушение наступит в более короткие сроки.

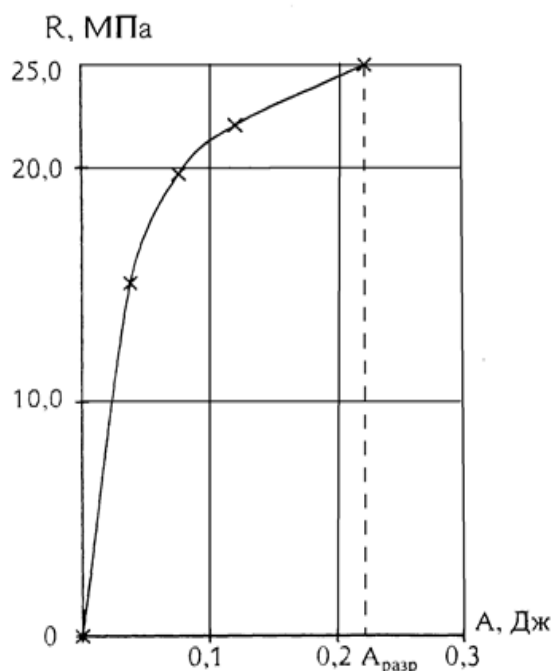


Рис. 5. Зависимость $R-A$ для полимербетона ФА

Для убедительности длительная прочность определена для различных видов полимербетона (табл. 7).

Таблица 7

Результаты испытания полимербетонов

Вид полимербетона	$R_{\text{пр}}$, МПа	Относительные деформации при ползучести при $R = 0,5R_{\text{пр}}$, $\varepsilon \cdot 10^5$	Полные относительные длительные деформации при $R = 0,5R_{\text{пр}}$, $\varepsilon \cdot 10^5$	Значения $R_{\text{дл}}/R_{\text{пр}}$	
				Определены по методике автора	Опытные
ФА-д	65,0	35	125	0,71	0,6
ФАМ-д	96,0	20	130	0,63	0,6
ФАМ	84,6	85	210	0,57	0,55
ФА	48,8	105	230	0,51	0,5

Из табл. 7 видно, что значения $R_{\text{дл}}$, определенные по вышеизложенной методике, имеют удовлетворительную сходимость с опытными данными.

В соответствии с предлагаемой методикой определяется такой уровень длительной нагрузки (условие $A = A_{\text{разр}}$), при котором образец разрушится через определенный

длительный промежуток времени. Следовательно, относительный предел длительной прочности бетона должен приниматься несколько ниже этого уровня, например для ФАМ-д (96 МПа) – 0,6; ФАМ (84,6 МПа) – 0,55; ФА (48,8 МПа) – 0,5 и т.д.

Полимербетон и цементный бетон отличаются только видом вяжущего, что естественно отражается на их свойствах. Но оба материала в принципе не отличаются по структуре, а поэтому физическая сущность процесса разрушения этих материалов одина, как и методика определения предела длительной прочности, что и подтверждают наши эксперименты.

Увеличение прочности цементного бетона со временем учитывается предлагаемой научно-обоснованной методикой и влияет на величину предела его длительного сопротивления разрушению, а конкретно, приводит к снижению относительного предела длительной прочности. Это объясняется тем, что при загрузке бетона постоянной нагрузкой в раннем возрасте процесс упрочнения материала превалирует над процессом разрушения, что и сказывается вышеуказанным образом на относительном пределе длительной прочности бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гладков Д.И., Сулейманова Л.А. Поведение бетона под нагрузкой и оценка его потенциальных возможностей // В сб.: Эффективные конструкции и материалы зданий и сооружений. Белгород, БелГТАСМ, 1999. С. 13–21.
2. Гладков Д.И., Сулейманова Л.А. Закономерности сопротивления бетона различным разрушающим факторам // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. №5. Ч.1. С. 254–262.
3. Гладков Д.И., Сулейманова Л.А. Прочность – интегральная характеристика бетона // В сб.: Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Р-н/Дону: РГСУ, 2004. Т.2. С. 113–118.
4. Гладков Д.И. Физико-химические основы прочности бетона и роль технологии в ее обеспечении. Белгород: Изд-во БГТУ, 2004. 293 с.
5. Gladkov D.I., Suleimanova L.A., Nesterov A.P. Strength has an integral characteristic of concrete // Proceedings of the International Conference on Cement Combinations for Durable Concrete 2005 International Congress – Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities. Ser. “Cement Combinations for Durable Concrete – Proceedings of the International Conference” sponsors: Institution of Civil Engineers, American Concrete Institute, Japan Society of Civil Engineers, University of Dundee, UK; editors: Dhir R.K., Harrison T.A., Newlands M.D., University of Dundee, Concrete Technology Unit. Dundee, Scotland, 2005. С. 701–707.
6. Сулейманова Л.А., Сулейманов А.Г., Ерохина И.А. Общая закономерность получения материалов с высокими качественными показателями // Проблемы экологии: наука, промышленность, образование: сб. докл. III Междунар. Научн.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ 2006. № 15. С. 155–163.
7. Сулейманова Л.А. Энергия связи – основа конструктивных и эксплуатационных характеристик бетонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 9. С. 91–99.
8. Сулейманова Л.А. Поведение бетона под нагрузкой, механизм его разрушения и оценка этого процесса // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 68–75.
9. Квирикадзе О.П. О зависимости между деформациями бетона и скоростью нагружения. – Тбилиси, из-во АН ГССР, 1962. 126 с.
10. Грушко И.М., Глущенко Н.Ф., Ильин А.Г. Структура и прочность дорожного цементного бетона. Харьков, Изд-во ХГУ, 1965. 136 с.
11. Шкербелис К.К., Калнайс А.А., Тетерс Г.А. Прочность и жесткость армированных элементов из газобетона // Бетон и железобетон. 1960. № 4. С. 185–189.
12. Залан Л.Н. Исследование конструктивных свойств мелкозернистого фурфуролацетонового полимербетона с учетом ползучести. – Воронеж, 1969 г. 14 с.
13. Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1973. 133 с.
14. Евсеева С.Н. Исследование прочности и деформативности некоторых видов конструктивного легкого бетона и его компонентов в интервале скоростей нагружения от статических до динамических. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.23.01) – Ереван, 1974. 28 с.
15. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2002. 500 с.
16. Пирадов К.А. и др. Проблемные вопросы и перспективы физико-химической механики железобетона // Бетон и железобетон. №2. 2000. С. 15–16.

Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kirilenko S.V.

EVIDENCE-BASED METHOD OF IDENTIFICATION OF LIMIT OF LONG-TERM STRENGTH OF CONCRETE AND ITS STRENGTH AT VARIOUS SPEEDS OF THE APPLIED LOAD

Increasing of strength of cement concrete in course of time is taken into account by proposed evidence-based method and affect the value of the limit of its long-term fracture resistance, and specifically reduces the relative limit long-term strength. This is explained by the fact that when occurs an uploading a concrete with a constant load at early age, material hardening process prevails over the the process of destruction, which affects the relative limit long-term strength of the concrete.

Key words: *method, strength, limit of long-term strength, concrete, work, the speed of load application, duration of the test, the fracture resistance.*

Судейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительства и городского хозяйства.

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

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

E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

Погорелова Инна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.

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

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

E-mail: innapogorelova@yandex.ru

Кириленко Сергей Вячеславович, аспирант 2-го года обучения

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

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

E-mail: ermalau@yandex.ru