

УДК 620.666.97

## **О МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

**Разин Сергей Николаевич,**

*доктор технических наук, профессор,  
кафедра сопротивления материалов и графики*

**Маклакова Светлана Николаевна,**

*доцент кафедры строительных конструкций*

**Молодкина Ольга Александровна,**

*магистрант 2-го года обучения*

**Евсеева Татьяна Михайловна**

*магистрант 2-го года обучения*

*ФГБОУ ВПО «Костромская сельскохозяйственная академия»,  
г. Кострома*

**Аннотация:** проведен анализ основных факторов, влияющих на прочностные характеристики бетонов. Существующие методики испытаний имеют ряд неточностей, которые требуют дополнительных объяснений и исследований. Проведенный анализ показывает, что получаемые результаты имеют завышенные значения и полностью не отражают действительной картины прочностных характеристик. Каждый из рассмотренных факторов требует более тщательного изучения и внесения уточнений в методику испытаний.

**Ключевые слова:** бетонный образец, напряжение, прочность на сжатие, зерновой состав, размеры и формы образцов, трехосное сжатие.

Основные положения методики определения механических характеристик прочности бетонов при испытаниях контрольных образцов изложены в ГОСТ 10180-2012. Однако, как было установлено, некоторые положения указанного стандарта не вполне отражают особенности деформирования бетона в условиях имеющего место режима граничного трения.

В частности, несмотря на то, что необходимо определять механические характеристики бетона при одноосном сжатии, поскольку основные нормативные документы [1-2, 3-14] основаны на расчетах, в которых использованы именно такие значения характеристик, испытания проводят в условиях трехосных смешанных напряженных состояний. Последние же показывают характеристики прочности существенно выше, чем таковые при одноосном сжатии, что в конечном счете приводит к неоправданному завышению нормативных и расчетных сопротивлений бетона, а следовательно, к снижению надежности проектируемых конструкций.

В связи с этим предложенная в стандарте и, естественно, отработанная методика испытаний требует доработки в части получения более объективных экспериментальных результатов, в большей мере отражающих действительные, используемые в расчетах, характеристики прочности.

Известно, что в настоящее время методы определения механических характеристик прочности достаточно хорошо отработаны в части выполнения последовательности (алгоритма) реализации основных положений, включающих в себя:

- объект испытания;
- испытательное оборудование;
- измерительную технику;
- порядок проведения экспериментов;
- обработку полученных результатов.

Поэтому при проведении экспериментов для каждого из перечисленных составляющих алгоритма необходимо установить наиболее существенные особенности и учесть их в процессе испытаний. По этой причине следует рассмотреть и установить основные факторы, оказывающие влияние на результаты экспериментов на каждом этапе исследования. Причем, если в результате выполнения экспериментов будет установлено, что влияние этих факторов сводится к завышению характеристик прочности, то корректировка методики испытаний совершенно необходима.

**На прочностные характеристики бетонов влияют несколько факторов, одним из которых является зерновой состав заполнителя.**

Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя увеличивает прочность бетона, повышает его модуль упругости (т. е. уменьшает деформации конструкций при приложении нагрузки), снижает ползучесть.

**Зерновой состав заполнителей решающим образом влияет на получение бетона заданной прочности при минимальном расходе цемента.** В бетонной смеси цементное тесто расходуется на обволакивание поверхности зерен и заполнение промежутков (пустот) между ними. В идеальном случае наименьший расход цемента достигается в том случае, когда и удельная поверхность, и пустотность зерен заполнителя стремятся к минимуму.

Удельная поверхность тем меньше, чем больше крупность заполнителя. Соотношение между зёрнами разных размеров в заполнителе должно быть оптимальным, при котором объем пустот и суммарная поверхность зерен требуют минимального расхода цемента для получения нерасслаиваемой бетонной смеси определенной удобоукладываемости, а бетон - заданной плотности и прочности.

Форма зерен заполнителя влияет на удобоукладываемость бетонных и растворных смесей. Предпочтительны в этом отношении зерна округлой или кубовидной формы. Пластинчатые, удлиненные, так называемые лещадные,

зерна заполнителя укладываются в бетоне в строго ориентированном положении, как правило, горизонтальном. Это делает структуру бетона неоднородной, а его свойства — неодинаковыми в разных направлениях. Поэтому содержание зерен лещадной формы ограничивается стандартами.

**Шероховатость поверхности зерен заполнителей влияет на свойства бетонной смеси и прочность бетона.** Бетонная смесь, изготовленная на заполнителях с гладкой поверхностью, например на гравии, обладает хорошей удобоукладываемостью. Смеси на заполнителях с шероховатой поверхностью, в частности на щебне, укладываются хуже, но бетон приобретает большую прочность, чем бетон на гравии. Это объясняется лучшим сцеплением шероховатого заполнителя с цементным камнем. От плотности заполнителей зависит плотность бетона.

По крупности различают мелкий заполнитель (песок), состоящий из частиц размером 0,16–5 мм, и крупный заполнитель (гравий или щебень), размеры частиц в котором изменяются в пределах от 5 до 70 мм. В некоторых случаях, например при бетонировании массивных конструкций, применяют щебень или гравий с крупностью частиц до 150 мм.

Важнейшая характеристика заполнителя для бетона – прочность. Ее оценивают по пределу прочности исходной горной породы, насыщенной водой. Марки породы по этому показателю находятся в пределах М2-М140. Понятие «марка» означает минимальный предел прочности породы при сжатии, выраженный в МПа. Породы, у которых предел прочности меньше 20 МПа, относятся к слабым разновидностям. Содержание слабых разновидностей в щебне ограничивается стандартами. Прочность гравия характеризуют его маркой, определяемой по дробимости путем испытания пробы зерен на сжатие в стальном цилиндре. Чем слабее гравий, тем больше оказывается после такого испытания раздробленных зерен. Их отсеивают сквозь сито с размером отверстий 5 мм и определяют показатель дробимости, который равен отношению содержанию этих зерен в общей массе пробы. Марки гравия по дробимости могут быть от Др8 до Др24. Марка Др8 означает, что после испытания раздробилось не более 8% всей массы гравия. Чем больше число в обозначении марки, тем слабее гравий.

При выборе материалов образцов следует, учитывая значительное по номенклатуре количество классов бетона по прочности на сжатие, руководствоваться, на наш взгляд, наибольшим по объему применения выбранных для испытаний классов. Анализ частоты использования имеющихся классов бетона показывает, что к таковым следует отнести бетоны В15, В20, В25 и В30. Проведя экспертный опрос по 5 предприятиям, производящим строительные элементы, было принято решение по использованию двух классов бетона (В15 и В30), так как, во-первых, этот выбор позволяет охватить интервал применения полученных результатов, а во-вторых, указанные классы бетонов часто используют при изготовлении весьма распространенных строительных элементов (балки, плиты, фермы и т.д.).

Таким образом, в дальнейшем исследованиям подлежит методика определения характеристик прочности на сжатие указанных классов бетонов. Отметим также, что выбранные для исследования классы могут иметь различную структурную и иные характеристики.

Так как одной из главных задач исследования является повышение надежности расчетов, а, следовательно, и надежности строительных элементов и конструкций, то в первую очередь необходимо выполнить анализ существенных факторов, оказывающих наибольшее влияние на результаты испытаний образцов. С этой целью была выполнена экспертная оценка влияния основных действующих факторов. К таким большинство экспертов склонны отнести следующие:

- размеры и форму образцов;
- структуру заполнителя;
- число образцов;
- способ изготовления;
- условия контроля;
- условия испытания;
- схемы испытания;
- обработка и количественная оценка полученных результатов.

Матрица ранжирования по баллам указанных факторов по результатам литературного обзора выглядит следующим образом (см. таблицу 1).

Таблица 1

**Матрица ранжирования факторов**

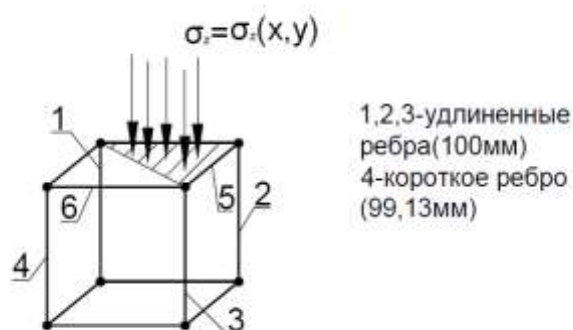
№ п\п	Наименование фактора	Порядковый номер эксперта								Общее число баллов
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Размеры и форма образцов	8	7	6	7	8	8	7	8	59
2	Структура заполнителя	6	5	5	5	6	4	5	5	41
3	Число образцов	7	8	7	6	7	6	6	6	53
4	Способ изготовления	5	3	3	4	4	5	3	3	30
5	Условия контроля	3	4	4	3	5	7	4	4	34
6	Условия испытания	4	6	8	8	3	3	8	7	47
7	Схемы испытания	1	2	2	2	2	2	1	2	14
8	Оценка результатов	2	1	1	1	1	1	2	1	10

Таким образом, на взгляд специалистов-экспертов, наибольшее влияние на полученные результаты при испытаниях оказывают факторы под номерами 1 и 2. Поэтому их изучению следует уделить первостепенное значение, причем влияние выбранных факторов следует рассматривать в порядке полученного ранга.

Номинальные размеры и форма образцов приведены в нормативных документах. Стандарт регламентирует, что номенклатура образцов для испытаний на сжатие должна содержать 5 типов кубических или цилиндрических образцов с длиной ребра (или диаметра) от 70 до 300 мм. При этом за базовый тип принят кубический образец с размером ребра 150 мм.

Поскольку стандартом регламентированы только номинальные размеры образцов без указания допусков на линейные размеры, форму и взаимного расположения поверхностей, то были приняты в качестве основных допуски на линейные размеры по 14 качеству точности. Тогда допуск на линейный размер 100 мм следует принять равным 870 мкм, а допуск на размер 150мм – 1000 мкм. Отметим, что указанные допуски являются минимальными, так как был принят минимальный уровень качества при назначении допусков на свободные линейные размеры. В случае принятия за базовые качества точности №15,16,17 и 18 допуски на линейные размеры существенно возрастают.

Принимая во внимание сказанное и исходя из приведенных значений допусков наименьшая длина, например, кубического образца с наименьшим значением длины 100 мм может составить 99,13 мм, а наибольшая -100,44мм. Учитывая реальные размеры зерен заполнителя при наиболее невыгодном варианте нагружения площадь контакта образца с плитой испытательной машины может составлять от 50 до 100% общей площади опорной грани образца.



*Рисунок 1. Неблагоприятная схема нагружения образца при нормативных допусках на линейный размер*

Поскольку линейная деформация в зоне 3-х ребер может принимать значения до  $\varepsilon_z = 0.87\%$ , а предельные деформации для бетона при сжатии в среднем составляют  $\varepsilon_z = 0.2\%$ , то это означает, что плита пресса при нагружении может не коснуться припорной площади вблизи ребра №4, хотя произойдет разрушение основной части испытуемого образца, нагруженного по схеме рис. 3.1.

Таким образом, при нормированных значениях допусков на линейные размеры образцов практически всегда имеет место внецентренное приложение нагрузки. Поскольку при испытаниях образцов с размерами ребер (или

образующих для цилиндрических образцов) 150, 200 и 300 мм относительная величина эксцентриситета будет больше (допуски на линейные размеры возрастают нелинейно), то предпочтение при исследованиях в любом случае следует отдавать образцам с малыми размерами ребер. Поэтому выбор образцов с размерами ребер 100 и 150 мм и был обусловлен в основном вышеуказанными причинами.

Следует отметить также, что для цилиндрических образцов, вследствие технологии их изготовления, контактные поверхности требуют дополнительной обработки, которую часто не выполняют в производственных условиях, тем самым внося дополнительные погрешности при определении характеристик прочности.

При окончательном выборе номинальных размеров образцов необходимо обратить внимание на номинальные размеры кубических образцов, регламентированные ГОСТ 10180-2012. Указанный стандарт в качестве основного руководящего материала в этой части содержит таблицу.

Таблица 2

**Масштабные коэффициенты**

Кубический образец (сторона куба)	70	100	150	200	250	300
$k_{w_0}$	0.85	0.95	1.0	1.05	1.08	1.10
$k_w$	1.00	0.89	0.85	0.81	0.79	0.77

В таблице, размещенной в стандарте, содержится 2 строки приведенной табл. 2. Третья строка, рассчитанная и введенная дополнительно, была определена перерасчетом 2-ой строки, когда за исходную величину коэффициента  $k_w = 1$  была принята величина, соответствующая размерам куба с ребром 70 мм, а не 150мм, как это принято согласно ГОСТ 10180-2012. Пересчет был основан на том факте, что при увеличении размера ребра кубического образца наибольшую прочность должен иметь образец с наименьшим размером, поскольку в большем объеме образца неизбежно присутствуют и большее количество дефектов материала, которые снижают его прочность. Поэтому был выполнен пересчет величин коэффициента  $k_w$ , чтобы количественные значения коэффициентов  $k_w$  отражали бы по возможности уменьшение прочности при увеличении размера образца. За окончательные расчетные величины коэффициентов снижения характеристик прочности испытуемого образца принимали отношения последовательных значений  $k_w$  для образца с наименьшим размером к  $k_{w_0}$  для образцов с текущими размерами ( $k_{w_0} = 0,85$ ). Это позволило расположить все коэффициенты строго в порядке убывания прочности образца при увеличении его размеров.

В свою очередь такая интерпретация изменения (понижения) характеристик прочности бетона позволила спрогнозировать понижение прочности конкретных

строительных элементов (стойки, колонны) при увеличении их размеров свыше 300 мм, как это обозначено в ГОСТ 10180-2012.

Экстраполируя полученные результаты с использованием различных видов экстраполирующих функций были построены графики изменения текущих характеристик прочности бетона при использовании его в строительных элементах, поперечное сечение которых имеет хотя бы один размер более 300 мм.

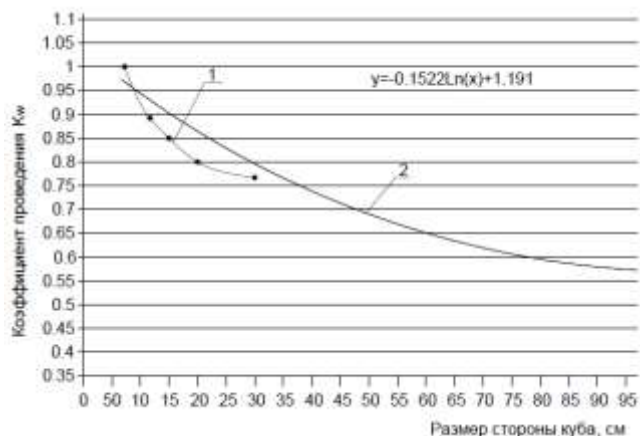


Рисунок 2 - Экстраполяция графика изменения характеристик прочности в рамках логарифмической зависимости

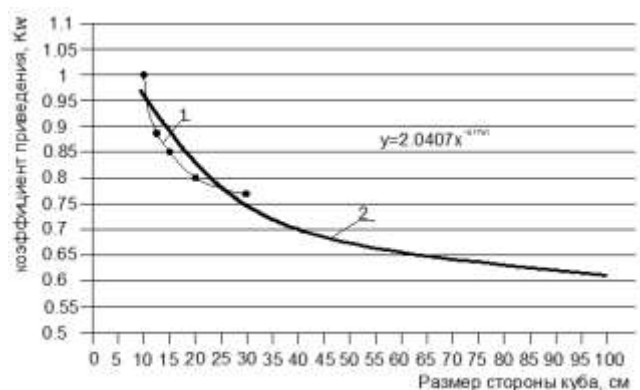
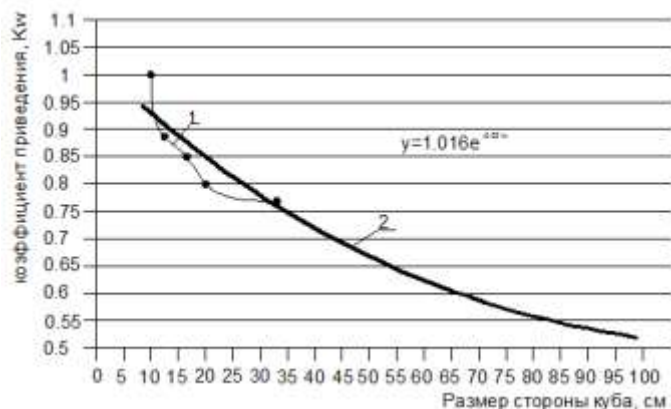


Рисунок 3 - Экстраполяция графика изменения характеристик прочности в рамках степенной зависимости



*Рисунок 4 - Экстраполяция графика изменения характеристик прочности в рамках экспоненциальной зависимости*

На указанных рисунках приведены табличные данные (кривая 1), которые соответствуют экспериментальным результатам по определению масштабных коэффициентов согласно ГОСТ 10180-2012. Поскольку табличные данные приведены в конечных значениях и не содержат ни интервалов изменения масштабных коэффициентов, ни величин их среднеквадратичных отклонений, то можно лишь весьма приблизительно оценить пороги рассеяния коэффициентов приведения. В частности, так как класс бетона по прочности на сжатие, согласно нормативным документам, принято определять с доверительной вероятностью 0,95%, то нами указаны лишь пределы изменения каждого значения табличных данных при  $z = 1.96$ .

Кривые 2 (рис. 2-4) получены расчетом с использованием различных видов аппроксимации (степенной, экспоненциальной и логарифмической). Так как координаты каждой точки на этой кривой являются расчетными, то они фактически могут считаться реперными точками, имеющими единственное вычисленное значение.

Анализ логарифмической зависимости (рис.2) показал, что совпадение расчетных и табличных значений  $k_w$  на начальных участках кривых достаточно значительно отличаются друг от друга (до 5% в относительных единицах), но затем, начиная с размера образца со стороной 150 мм, эта разница нивелируется, и несовпадение не превышает величин 2...3%.

Анализ степенной зависимости (рис. 3) показал, что в этом случае картина совпадения количественных реперных значений весьма схожа с логарифмической зависимостью. В качестве основного фактора отметим, что расчетная кривая степенной зависимости (для значений размеров 500 мм и выше) проходит существенно (примерно на 10...15%) выше, чем кривая, определяющая логарифмическую аппроксимацию. Для определения фактического положения экспериментальной кривой следует провести весьма значительный объем экспериментов, начиная с образцов размером 500x500x500 и заканчивая на уровне 1000x1000x1000. Этот объем экспериментов значителен, поэтому ограничимся только теми данными, которые дает действующий стандарт. При этом, учитывая вполне объективный возрастающий интерес к строительству зданий и сооружений повышенного уровня ответственности можно рекомендовать для расчетов как по 1-ой, так и по 2-ой группе предельных состояний к использованию значения  $k_w$ , полученных при логарифмической аппроксимации кривой изменения масштабного коэффициента.

Если рассмотреть экспоненциальную расчетную зависимость изменения коэффициента  $k_w$ , то в первую очередь стоит обратить внимание на то, что отклонения расчетной и табличной кривых имеют большие отклонения как на



участках для образцов с малыми (до 200 мм) размерами, так и на участке с размерами до 1000 мм.

Таким образом, из предложенных зависимостей наиболее удовлетворяющей необходимым требованиям следует считать логарифмическую расчетную зависимость, которая, во-первых, с достаточной степенью достоверности описывает данные экспериментов в зоне малых размеров, а во-вторых, некоторое занижение масштабного коэффициента ( $k_w$ ) практически завышает коэффициенты запаса по механической прочности, а, следовательно, повышает надежность проектируемых конструкций. Хотя, безусловно, по сравнению с имеющимися табличными данными некоторая неопределенность сохраняется.

Условия испытаний образцов должны приниматься полностью соответствующими изложенным в нормативных документах, кроме требования, чтобы опорные поверхности образца полностью прилегали одна к другой. Это связано с тем, что даже при повышенной точности изготовления образцов достичь указанного условия не удастся по нескольким причинам.

Во-первых, стандарт не приводит поверочной схемы установки образцов. Это означает, что касание контактирующих поверхностей можно проверять любым образом. Обычно в таких случаях используют щупы с различной толщиной. Тогда проверка полного касания заключается в установке щупа определенного размера, и этот щуп должны проходить по всему периметру зазора. Одинаковость зазора гарантирует одновременность касания опорной плиты с образцом по всей контактной поверхности. Однако, в соответствии с технологией изготовления образцов при их затвердении в форме, зерна заполнителя размером 5 мм вследствие усадки бетона будут являться выпирающими неровностями (типа шероховатости) над поверхностью цементного камня. В первом приближении, считая усадку равной около 1%, выступание зерен заполнителя будет составлять около 1 мм, что говорит о необоснованном завышении точности измерения длин ребер образцов.

Во-вторых, установленные нормативом размеры форм для изготовления контрольных образцов бетона указаны как номинальные, то есть без установления допусков на размеры и форму рабочих поверхностей. Поэтому предложенные экспериментальные формы устраняют этот недостаток, ведущий к нарушению условий проведения испытаний.

Таким образом, принятие в качестве исследуемых объектов образцов с рекомендуемыми размерами и соответствующими размерами зерен заполнителя продиктовано необходимостью получения результатов испытаний с повышенной точностью.

При проведении испытаний общие нормативные требования должны быть соблюдены в полном объеме, поскольку их выполнение не требует проведения каких-либо сложных исполнительных операций. Что касается конкретных требований к выполнению операций при испытании на сжатие, то по вышеизложенным особенностям соблюдение условия полного прилегания

плоскостей контактирующих поверхностей было выполнено другими способами, позволяющими контролировать центральность приложения нагрузки и симметричность распределения деформаций и напряжений относительно главных центральных плоскостей инерции площади поперечного сечения исследуемого образца.

#### **Список литературы:**

1. ГОСТ 10180-12. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Госстрой СССР, 1989-38с.
2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. М.: Госстрой СССР, 1980-10с.
3. ГОСТ 20213 – 89. Фермы железобетонные. Технические условия.
4. ГОСТ 28737 – 90. Балки фундаментные железобетонные для стен зданий.
5. ГОСТ 18979 – 90. Колонны железобетонные для многоэтажных зданий.
6. ГОСТ 27006 – 86. Бетоны. Правила подбора состава.
7. ГОСТ 48105 – 2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
8. ГОСТ 8267 – 93. Щебень из природного камня.
9. ГОСТ 8736 – 93. Песок строительный. Технические условия.
10. ГОСТ 30515 – 97. Цементы. Общие технические условия.
11. ГОСТ 310.4 – 81. Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии.
12. ГОСТ 23464 – 79. Цементы. Классификация.
13. ГОСТ 22685 – 89. Формы для изготовления контрольных образцов бетона.
14. ГОСТ 26633 – 91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия (табл. 1а – В/Ц= 0,60 – подвижные, В/Ц=0,40)