

Научная статья  
УДК 629.5  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-33-43>

## Анализ методик испытаний гидротехнических бетонов на прочность

Дмитрий Алексеевич Пичугин<sup>1</sup>, Анастасия Алексеевна Сурикова<sup>2</sup>,  
Владимир Алексеевич Суриков<sup>3</sup>✉

<sup>1-3</sup>Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, [surikov.1996@mail.ru](mailto:surikov.1996@mail.ru) ✉

**Аннотация.** Значительный интерес представляют различные способы определения прочности бетона на растяжение. Эти способы, использующие анизотропию хрупких материалов, в частности бетона, по отношению к сжимающим и растягивающим напряжениям, дают возможность на основе выводов теории упругости определять прочность на растяжение при испытании сжимающей нагрузкой, которая может быть передана на образец гораздо легче, чем растягивающие усилия. Результаты испытаний бетона методом сжатия цилиндрических образцов и раздавливания образцов-кубов со стесанными ребрами между двумя круглыми металлическими стержнями, лежащими в одной плоскости, близко совпадают со значениями прочности на растяжение, полученными при прямом растяжении. Для всех исследованных составов величина соотношения прочностей повышается по мере возрастания водоцементного отношения (как для бетонов без добавок, так и с добавками поверхностно-активных веществ). Применение добавок поверхностно-активных органических веществ, не изменяя зависимости соотношения прочностей от времени твердения, придает ей более мягкий характер. Отмечено, что интенсивность снижения величины соотношения прочностей, срок твердения, которому отвечает минимальное ее значение, и дальнейшее увеличение или стабилизация  $R_p / R_{сж}$  зависят от ряда факторов примененного цемента, условий, хранения добавок поверхностно-активных веществ, состава и т. д. Под влиянием различных факторов положение характерных точек кривой зависимости соотношения прочностей от времени твердения может изменяться и подчиняется общей закономерности. Для бетонов и растворов снижение величины соотношений прочностей при переходе от 28 дней к возрасту 90 дней составляет не менее  $10 \pm 25\%$  (а в отдельных случаях и значительно больше), что необходимо учитывать в соответствующих случаях при проектировании сооружений.

**Ключевые слова:** бетон, испытания бетона на прочность, методы испытания бетона, сжатие, растяжение, сжимающая нагрузка

**Для цитирования:** Пичугин Д. А., Сурикова А. А., Суриков В. А. Анализ методик испытаний гидротехнических бетонов на прочность // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 33–43. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-33-43>.

Original article

## Analysis of hydraulic concrete strength test methods

Dmitry A. Pichugin<sup>1</sup>, Anastasia A. Surikova<sup>2</sup>, Vladimir A. Surikov<sup>3</sup>✉

<sup>1-3</sup>Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, [surikov.1996@mail.ru](mailto:surikov.1996@mail.ru) ✉

**Abstract.** Today, methods of determining the tensile strength of concrete are of considerable interest. These methods using the anisotropy of brittle materials and, in particular, concrete, with respect to compressive and tensile stresses, make it possible, based on the findings of the theory of elasticity, to determine the tensile strength when tested with a compressive load, which can be transferred to the sample much more easily than tensile forces. The results of tests of concrete by the method of compression of cylindrical samples and crushing of cube samples with hewn ribs between two round metal rods lying in the same plane closely match the tensile strength values obtained with direct tension. For all studied compositions, the value of the strength ratio increases as the water-cement ratio increases, both for concrete without additives and with additives of surfactants. Using additives of surface-active organic substances without changing the dependence of the strength ratio on the hardening time makes it smoother. It has been found that the fast decreasing value of the strength ratio, hardening period that corresponds to its minimum value, and further increase or stabilization of  $R_p / R_{сж}$  depend on a number of factors of the cement used, storage conditions of surfactant additives, composition, etc. Under the influence of the different factors the position of the characteristic points on the

curve of the strength ratio dependence on the hardening time can change and obey the general pattern. For concretes and mortars, the decrease in the strength ratios in the transition from 28 days to the age of 90 days makes up to 10–25% (and in some cases much more), which must be taken into account in appropriate cases when designing structures.

**Keywords:** concrete, concrete strength testing, concrete testing methods, compression, stretching, compression load

**For citation:** Pichugin D. A., Surikova A. A., Surikov V. A. Analysis of hydraulic concrete strength test methods. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;2:33-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-33-43>.

### Введение

Железобетон обладает уникальной способностью со временем увеличивать свою прочность, находясь в воде. Вследствие этого железобетон используют в качестве конструкционного материала для постройки не только таких гидротехнических сооружений, как стационарные морские буровые платформы, но и речных стоечных судов. Ключевой характеристикой бетона при расчете и конструировании корпусов судов является его прочность при растяжении и сжатии, которые взаимосвязаны между собой. Взаимосвязь прочности бетона при растяжении и сжатии остается недостаточно изученной. В первую очередь это связано с проблемой испытания бетона на растяжение и отсутствием простого и надежного способа определения этого свойства, а также отсутствием единой методики испытаний, позволяющей сопоставлять результаты испытаний, полученные различными исследователями. Кроме того, существует множество различных факторов, влияющих на прочность при растяжении, таких как качество и свойство инертных заполнителей, влажность материалов и т. д. [1]. При лабораторных экспериментах вследствие значительных затрат труда и времени и особой тщательности при выполнении работ большую сложность составляет изготовление образцов бетона и их испытания на растяжение, по сравнению с испытаниями на сжатие. Основная сложность, оказывающая влияние на получаемые при испытании результаты, заключается в исключении концентрации местных напряжений, возникающих в образцах. Наиболее легко осуществимым является определение прочности бетона на растяжение при изгибе, однако присущие этому методу недостатки не позволяют считать его удовлетворительным для этой цели [2].

Существует достаточное количество заслуживающих интерес способов определения прочности бетона на растяжение. Эти способы дают возможность на основе выводов теории упругости определять прочность на растяжение при испытании сжимающей нагрузкой, например использование анизотропии хрупких материалов. С нашей точки зрения, наиболее интересными являются три метода испытаний, сущность которых изложена в настоящей работе.

### Сжимающая нагрузка бетонного цилиндра

Рассмотрим метод, заключающийся в приложении сжимающей нагрузки к двум взаимно противоположным образующим образца цилиндрической формы (рис. 1). Метод был предложен бразильским ученым Ф. Э. Карнейро. При воздействии вертикальной нагрузки в диаметральной плоскости образца возникают растягивающие напряжения, и цилиндр под действием этой нагрузки разрушается вдоль этой плоскости. Во время испытаний на сжатие между сжимающими опорами лабораторного пресса и бетонным образцом устанавливают сравнительно мягкий прокладочный материал, например фанеру.

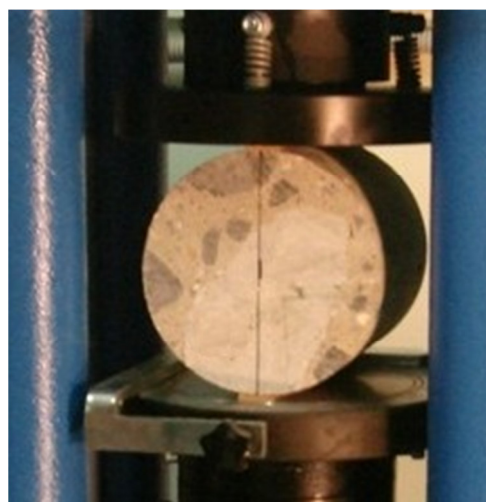


Рис. 1. Определение прочности на растяжение путем испытания бетонного цилиндра сжимающей нагрузкой, приложенной к образующим

Fig. 1. Determining the tensile strength by testing a concrete cylinder with a compressive load applied to the formations

Метод (рис. 1) был включен в международный стандарт в качестве рекомендуемого для определения прочности бетона на растяжение. Определение прочности бетона на растяжение по этому методу основывается на выводах теории упругости о напряжениях в сплошном диске, сжатом по диаметру двумя равными и противоположными силами (задача Герца). Как свидетельствует математический анализ, в этом случае (при условии гомо-

генности материала диска и полного подчинения его закону Гука) возникающие в диске (рис. 2) напряжения выражаются уравнениями

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi t} \left( \frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left( \frac{(R-y)^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)^2}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right); \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left( \frac{(R-y)^2 x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 x}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right), \quad (3)$$

где  $R$  – радиус образца, см;  $t$  – толщина диска образца, см.

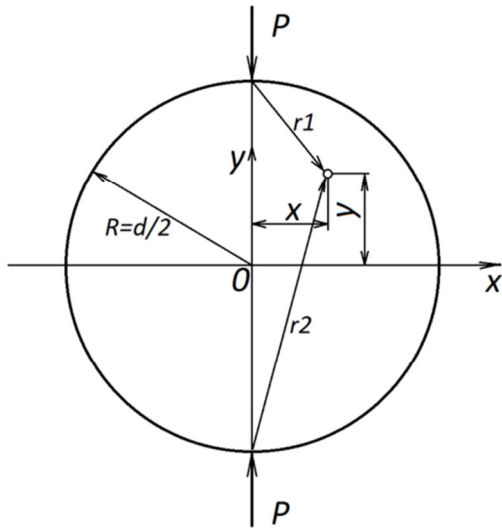


Рис. 2. Обозначения для составляющих напряжений в прямоугольных координатах для сжатого по диаметру диска

Fig. 2. Symbols for the stress components in rectangular coordinates for a diameter-compressed disc

Знак «-» обозначает сжатие, а знак «+» – растяжение:

$$r_1^2 = x^2 + (R-y)^2; \quad r_2^2 = x^2 + (R+y)^2. \quad (4)$$

Для точек, лежащих на перпендикулярном к направлению внешних сил диаметре (на оси  $x$ ), согласно рис. 2:

$$y = 0; \quad r_1 = r_2 = \sqrt{(x^2 + R^2)}. \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в уравнения (1)–(3) и выполнив упрощения, получаем:

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi t d} \left( \frac{16d^2 x^2}{(d^2 + 4x^2)^2} - 1 \right) = \frac{2P}{\pi t d} \left( \frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right)^2;$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t d} \left( \frac{4d^4}{(d^2 + 4x^2)^2} - 1 \right);$$

$$\tau_{xy} = 0.$$

Далее отмечаем, что на оси  $x$  напряжение  $\sigma_x$  всегда положительно (растягивающее); соответствующее вертикальное нормальное напряжение  $\sigma_y$  – отрицательно (сжимающее). Последнее получаем из выражения для  $\sigma_y$ , если подставить в него максимальное значение  $x$ , равное  $d/2$ . Оба напряжения равны нулю на круговом контуре, т. е. в точках на концах горизонтального диаметра, и достигают максимальных значений в центре диска при  $x = 0$ . Эти максимальные напряжения могут быть вычислены по формулам

$$\sigma_{x, x=0} = \frac{2P}{\pi t d};$$

$$\sigma_{y, x=0} = -\frac{6P}{\pi t d}.$$

Значение  $\sigma_y$  приблизительно в два раза больше среднего напряжения сжатия  $P/td$ .

На оси  $y$  при  $x = 0$ ,  $r_1 = R - y$  и  $r_2 = R + y$  получаем:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d};$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left( \frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right);$$

$$\tau_{xy} = 0.$$

Таким образом, в вертикальном сечении, взятом по линии действия внешних нагрузок, растягивающие напряжения, действующие горизонтально, постоянны; напряжения сжатия, действующие в вертикальном направлении, при  $r_1 = 0$  или  $r_2 = 0$  бесконечно велики. Наименьшее по абсолютной величине вертикальное сжимающее напряжение равно  $6P/πtd$  в центре диска.

Эпюры напряжений по горизонтальному и вертикальному сечениям даны на рис. 3.

Рассматривая цилиндр из бетона как некоторое число подобных дисков, отметим, что на вертикальной диаметральной плоскости возникают одинаковые постоянные по величине растягивающие напряжения, равные  $2P/πDL$ , где  $D$  и  $L$  – диаметр и длина цилиндра.

Приведенные выше уравнения представляют точное решение для рассмотренного идеального случая, что полностью подтверждено оптическими методами исследования.

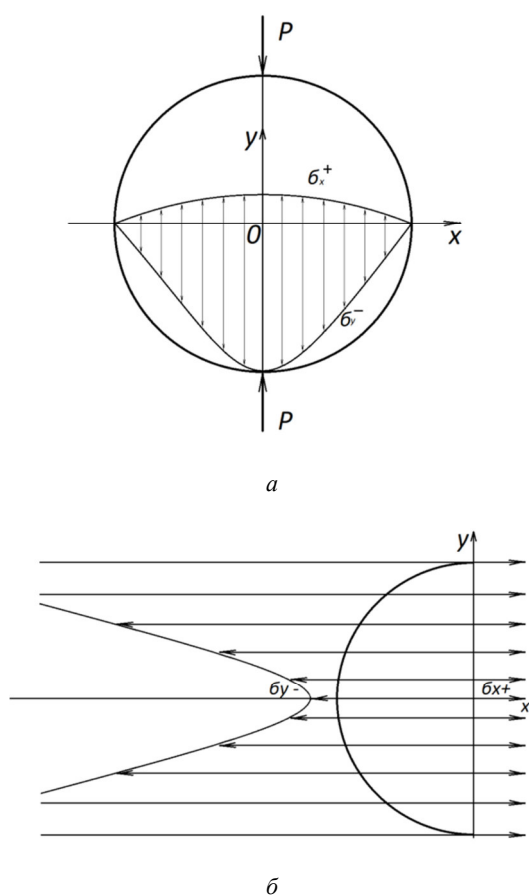


Рис. 3. Распределение напряжений для сжатого по диаметру диска:

$a$  – по горизонтальной плоскости симметрии;  
 $b$  – по вертикальной плоскости симметрии

Fig. 3. Stress distribution for the diameter-compressed disk:  
 $a$  – along the horizontal symmetry plane;  
 $b$  – on a vertical symmetry plane

### Различия в испытаниях бетона

При испытании бетонных цилиндров вполне естественно некоторое отклонение от теоретического решения задачи вследствие того, что условия испытания бетона отличаются от условий идеального случая в следующих отношениях:

1. Выводы теории упругости предполагают наличие однородного материала, в то время как бетон не является однородным. В результате этого действительное распределение напряжений отличается от вычисленного теоретически, хотя это отклонение может быть и невелико.

2. Теория предполагает, что материал полностью подчиняется закону Гука. Это не совсем верно в случае бетона, т. к. величина модуля Юнга для бетона уменьшается с увеличением напряжений. При этом зависимость «деформация – напряжение» имеет тенденцию к разгрузке наиболее напряжен-

ных участков и наложению напряжений на те части образца, где нагрузка меньше. Перераспределение напряжений приводит к увеличению разрушающей нагрузки и, следовательно, будет давать более высокие результаты по прочности.

3. Теория предполагает плоское напряженное состояние, что не встречается на практике при испытании бетона.

4. Теория предполагает линейное приложение нагрузки вдоль образующей цилиндра, однако в действительности нагрузка распределяется по полосе довольно заметной ширины (примерно 10÷15 мм), что сказывается на величине и характере распределения напряжений. Так, при ширине полосы нагрузки  $a$  (при условии равномерного распределения нагрузки по этой ширине) может быть показано, что, если  $a < d/10$  (что имеет место при практических испытаниях бетонных образцов), напряжения на вертикальной диаметральной плоскости, действующие в горизонтальном направлении, достаточно точно выражаются уравнением

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d} \left( 1 - \frac{d}{2a} (\alpha - \sin \alpha) \right),$$

где  $a$  – угол, охватывающий зону давления от места приложения нагрузки до рассматриваемой точки (рис. 4).

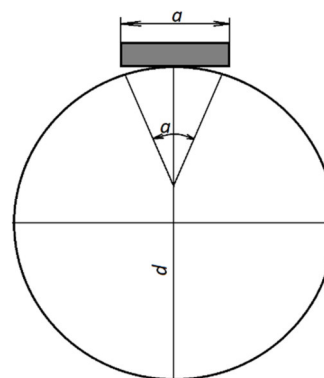


Рис. 4. Передача нагрузки на цилиндр через прокладки

Fig. 4 Transfer of load onto the cylinder via bushes

Влияние подобной нагрузки проиллюстрировано на рис. 5, где напряжения вычислены для  $a/d = 1/12$ . Можно заметить, что в этом случае растягивающие напряжения остаются практически постоянными примерно на трех четвертях плоскости вертикального сечения, но обращаются в сравнительно высокие сжимающие напряжения у верха и низа цилиндра. Максимальное сжимающее напряжение примерно в 18 раз превышает максимальное растягивающее напряжение; это заставляет предполагать, что разрушение может произойти под дей-

ствием местных сжимающих напряжений у места приложения нагрузки, однако на практике этого не наблюдается.

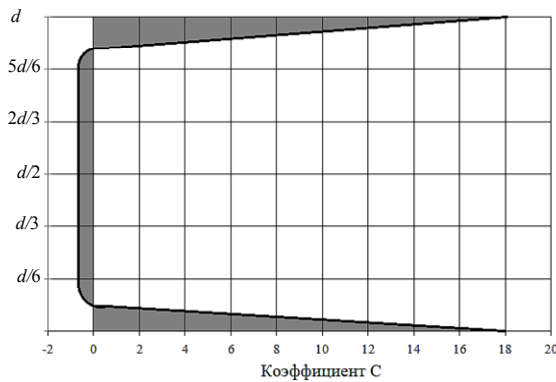


Рис. 5. Распределение напряжений для случая передачи нагрузки через прокладки (горизонтальная составляющая напряжения)

Fig. 5. Stress distribution in case of load transfer through the bushes (a horizontal component of stress)

#### Экспериментальное изучение нового метода испытания бетона

Экспериментальное изучение нового метода испытания бетона для определения прочности на растяжение, проводившееся в испытательной лаборатории, полностью подтвердило возможность его применения для этой цели. Во время исследований рассматривалось три вопроса:

1. Влияние размеров и материала прокладок, посредством которых нагрузка передается на образец, на прочность бетона на растяжение и однородность результатов;
2. Соответствие величины и однородности результатов, получаемых с помощью нового метода, и величины и однородности результатов, получаемых при прямом растяжении и изгибе;
3. Влияние размеров образцов на величину предела прочности по новому методу испытания и однородность получаемых результатов.

Исследования проводились на образцах бетона

состава 1:6 по весу на речном песке и гравии с максимальным размером зерен около 20 мм. Водоцементное отношение (В/Ц) равнялось 0,50. Все образцы испытывались в возрасте 28 дней после хранения во влажных условиях.

Опыты с прокладками из резины, фанеры и стали подтвердили, что материал и в некоторой мере размеры прокладок оказывают влияние на получаемую величину прочности на растяжение и однородность результатов. Это влияние мало по сравнению с тем, которое оказывают прокладки из различного материала при испытаниях бетонных образцов на сжатие, и частично, если не целиком, зависит от того, насколько плотно прокладочный материал прилегает к поверхности бетонного образца и равномерно передает нагрузку. Фанера в этом отношении является вполне удовлетворительным материалом, более подходящим, чем сталь и резина. Стальные прокладки дают наиболее низкие и наименее однородные результаты. Различная ширина прокладок не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. Что же касается толщины прокладок, то, по-видимому, существует некоторая ее величина, отклонение от которой как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения вызывает увеличение получаемых результатов. В настоящее время для производства массовых испытаний могут быть рекомендованы прокладки из фанеры толщиной около 3 мм и шириной около 12 мм.

Сравнение с другими методами проводилось путем параллельных испытаний различных образцов одного и того же бетона: для определения прочности на растяжение по новому методу использовались цилиндры размером 15×30 см, для испытания на осевое растяжение – цилиндры размером 10×45 см, для испытания на изгиб – балки размером 10×10×40 см.

Все образцы испытывались таким образом, что скорость возрастания растягивающих напряжений была постоянной и равной 7 кг/см<sup>2</sup> в минуту. Полученные результаты приведены в табл. 1 (3 образца каждого типа).

Таблица 1

Table 1

#### Результаты сравнительных испытаний

##### Results of the comparative tests

Характеристики бетонных образцов	Средняя прочность, кг/см <sup>2</sup>	Среднее отклонение	
		В кг/см <sup>2</sup>	В %
Прочность на растяжение бетонных цилиндров, испытанных по новому методу	28,5	1,40	5
Прочность на растяжение при осевом растяжении бетонных образцов	19,4	1,35	7
Прочность на растяжение при испытании бетонных балок на изгиб	42,5	2,53	6
Прочность на сжатие при испытании образцов-кубов размером 10×10×10 см бетона того же состава	420,0	14,60	3,5

Средняя величина прочности на растяжение при испытании по новому методу в этих опытах оказалась примерно в 1,5 раза выше, чем при осевом растяжении, и составила около 2/3 от прочности на растяжение при изгибе. По поводу этого различия в результатах можно высказать следующие соображения:

1. Формулы, используемые для вычисления растягивающих напряжений при испытании по новому методу и при изгибе, выведены в предположении, что материал подчиняется закону Гука. Однако для бетона отношение между напряжениями и деформациями отклоняется от этого закона: оно уменьшается с возрастанием напряжений и быстро падает, как только материал приближается к разрушению. Имеющееся при этом место перераспределения напряжений приводит к тому, что значения прочности, полученные по новому методу и при изгибе, несколько выше, чем истинная прочность бетона при растяжении.

2. Образцы, использованные для определения прочности при осевом растяжении, готовились в вертикальном положении, причем бетон укладывался в формы несколькими слоями. Такой способ укладки мог привести к ослаблению зоны контакта между слоями. При этом испытание происходит таким образом, что разрушение возникает в наиболее слабом месте. При испытании цилиндров и балок разрушение происходит по поверхностям, которые при изготовлении были вертикальны, и, следовательно, можно ожидать, что эти испытания дадут результаты, скорее приближающиеся к средней прочности, чем к минимальной.

3. По условиям опыта при испытании на осевое растяжение исследуемый в действительности объем бетона значительно больше, чем объем его при применении двух других методов, что также должно способствовать получению более низких результатов при испытании на осевое растяжение. К этому следует добавить эксцентриситет прило-

жения нагрузки, также способствующий снижению результатов.

4. При испытании по новому методу часть цилиндра, подвергающаяся высоким растягивающим напряжениям, в то же время подвергается и действию сжимающих напряжений, перпендикулярных к растягивающим. Появляющиеся под действием этих двух напряжений деформации можно представить как сумму деформаций, возникающих при независимом действии напряжений. Таким образом, действительная деформация будет значительно больше, чем деформация только от растягивающих напряжений. Поскольку представляется очевидным, что разрушение бетона в такой же мере зависит от деформации, как и от напряжений, то разрушение бетона, как следствие, может иметь место при более низких напряжениях.

Согласно приведенным выше предположениям осевое растяжение будет давать наиболее низкие результаты, а балки – наиболее высокие, что вполне согласуется с опытами.

При испытаниях балки проиллюстрировали наибольшее отклонение значений прочности от ее средней величины, но среднее относительное отклонение результатов для балок отличалось от такого для цилиндров и образцов на осевое растяжение не столь уж значительно. Тем не менее было выявлено, что цилиндры, испытанные по новому методу, дали наименьшее среднее относительное отклонение. Цилиндры, как правило, дают более однородные результаты, чем другие способы определения прочности бетона на растяжение.

Для изучения влияния размеров образцов были изготовлены образцы-цилиндры следующих размеров: 15×30 см, 15×15 см, 15×7,5 см и 10×10 см. Все образцы, хранившиеся в одинаковых стандартных условиях, были испытаны в возрасте 28 дней при одинаковой скорости возрастания нагрузки, равной 7 кг/см<sup>2</sup> в минуту. Результаты испытаний приведены в табл. 2 (3 цилиндра каждого размера).

Таблица 2

Table 2

**Результаты испытаний образцов-цилиндров различных размеров**

**Results of the tests of specimen-cylinders of different sizes**

Размеры цилиндров, см	Средняя прочность, кг/см <sup>2</sup>	Среднее отклонение, кг/см <sup>2</sup>	Среднее отклонение, %
15×30	33,1	1,34	4,0
15×15	32,0	2,54	8,0
15×7,5	33,1	2,60	8,0
10×10	35,9	2,74	7,5

Образцы наибольших размеров дали наиболее однородные результаты, что соответствует данным, получаемым при других методах испытаний бетона. Образцы меньшего размера дают более высокое значение средней прочности.

На основании полученных результатов возможно использовать для определения прочности на растяжение по новому методу цилиндры размером 10×10 см при максимальной крупности заполнителя до 20 мм, но при этом использование ци-

линдров большего размера предпочтительнее, т. к. они дают более однородные результаты.

### Методы оценки прочности бетона на растяжение

Рассмотрим другой метод оценки прочности бетона на растяжение: путем раздавливания образца между двумя круглыми металлическими стержнями, лежащими в одной плоскости. В методе, предложенном чехословацким инженером М. И. Вейцманом, определение предела прочности при растяжении от сжимающих усилий производится на образцах-кубах со стесанными ребрами (рис. 6).

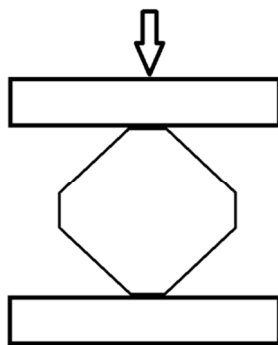


Рис. 6. Определение прочности на растяжение путем испытания бетонного куба сжимающей нагрузкой

Fig. 6. Determining the tensile strength by testing a concrete cube with a compressive load

В основе этого метода лежит задача теории упругости о напряжениях в квадратной пластинке, сжатой по диагонали двумя равными и противоположными силами. Кривая напряжений, полученная с помощью поляризационно-оптического метода

исследований, показывает, что вблизи от точки приложения сжимающей силы имеется пик растягивающих напряжений, значительно изменяющий общую картину напряженного состояния по сравнению с теоретической. Однако этот пик напряжений исчезает, если нагрузка передается не на ребро, а на плоскость, образующуюся в результате стесывания ребра. Для центральной части образца, где растягивающие напряжения достигают максимума, обе кривые полностью совпадают. Максимальные растягивающие напряжения для квадратной пластинки могут быть найдены из выражения

$$\sigma_p = 0,3668 \frac{P}{bh},$$

где  $P$  – нагрузка;  $b$  – толщина пластинки;  $h$  – половина диагонали.

При использовании в опытах бетонных кубов со стороной  $a$  предел прочности на растяжение может быть определен по формуле

$$R_p = 0,5187 \frac{P}{a^2}.$$

Экспериментальная проверка этого простого и удобного метода испытаний подтвердила, что он дает не менее точные результаты, чем два предыдущих метода.

Если испытания проводятся на прессе с шарнирными опорами, то отклонения от строгой параллельности плоскостей нагрузки весьма мало сказываются на результатах. В табл. 3–5 приводятся некоторые сравнительные данные, полученные при различных методах испытаний растворов и бетонов нескольких составов.

Таблица 3

Table 3

### Результаты испытаний цементного раствора 1:3 нормальной консистенции

#### Test results on 1:3 cement mortar of normal consistency

Марки цемента	Сжатие (образцы-кубы 10×10×10 см)				Изгиб (балки 10×10×50 см)				Образцы-кубы 10×10×10 см			
	$R_{сж}$ , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		$R_{пр}$ , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		$R_b$ , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение	
	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %
350	612	544	44,4	8,17	65,7	66,4	1,2	1,81	33,4	34,8	1,2	3,45
	516				67,3				33,2			
	550				64,3				36,6			
450	866	869	4,6	0,53	105,2	98,4	3,6	3,66	48,2	50,3	1,8	3,58
	874				99,6				50,1			
	860				91,5				52,9			
650	782	800	31,6	3,96	91,2	90,8	5,0	5,56	48,3	47,1	2,3	4,89
	770				95,4				47,2			
	880				85,6				44,3			

Таблица 4

Table 4

Результаты испытаний бетона на гравии Ц = 335 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц = 0,55

Test results of the concrete on gravel Ц = 335 kg/m<sup>3</sup>, В/Ц = 0.55

Марки цемента	Сжатие (образцы-кубы 10×10×10 см)				Изгиб (балки 10×10×50 см)				Образцы-кубы 10×10×10 см			
	R <sub>сж</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		R <sub>рн</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		R <sub>н</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение	
	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %
350	215	213	3,0	1,41	30,1	28,0	1,4	5,00	14,4	15,2	0,7	4,60
	209				27,0				15,0			
	216				27,0				16,3			
450	260	273	13,0	4,77	33,7	36,5	1,9	5,20	19,0	19,7	0,4	1,27
	267				37,9				19,9			
	293				37,9				20,1			
650	303	310	11,7	3,77	30,8	32,0	1,5	4,69	16,6	17,0	0,4	2,35
	300				34,3				16,9			
	328				31,0				17,6			

Таблица 5

Table 5

Результаты испытаний бетона на гравии Ц = 450 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц = 0,37

Results of tests of concrete on gravel Ц = 450 kg/m<sup>3</sup>, В/Ц = 0.37

Марки цемента	Сжатие (образцы-кубы 10×10×10 см)				Изгиб (балки 10×10×50 см)				Образцы-кубы 10×10×10 см			
	R <sub>сж</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		R <sub>рн</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение		R <sub>н</sub> , кг/см <sup>2</sup>		Среднее отклонение	
	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %	Частное	Среднее	В кг/см <sup>2</sup>	В %
350	538	545	9,0	1,65	60,4	65,6	4,2	6,4	33,2	35,6	2,3	6,45
	556				72,5				38,9			
	540				67,5				34,2			
450	599	605	6,6	10,90	70,2	73,1	2,9	3,97	44,3	40,1	2,3	5,65
	607				75,5				37,6			
	614				73,4				40,2			
650	875	881	5,4	0,60	94,7	96,1	2,0	2,08	49,3	48,3	2,2	4,55
	890				94,0				52,4			
	875				101,0				45,2			

Значения прочности на растяжение, полученные по новому методу, во всех случаях очень близко совпадают со значениями прочности на растяжение, полученными при прямом растяжении. Однородность полученных результатов не ниже и даже выше, чем при прямом растяжении или изгибе.

Таким образом, оба рассмотренных метода могут быть использованы для определения прочности бетона на растяжение и изучения вопросов, связанных с этим свойством. Несколько завышенное значение прочности на растяжение, которое полу-

чается при методе Карнейро и может быть получено при методе Вейцмана при значительной крупности заполнителя (в приведенных выше опытах максимальная крупность гравия и щебня не превышала 10÷15 мм), не является препятствием к их применению, т. к., во-первых, всегда может быть установлен соответствующий коэффициент перехода, а во-вторых, при исследованиях прочности бетона на растяжение не всякий раз нужно знать ее истинное значение. Однако в последнем случае важен ответ на вопрос: всегда ли коэффициент



перехода является постоянным или нет. Наши исследования доказали его практическую стабильность во времени между 28 и 180 днями.

Испытание образцов производилось в сроки 28, 90 и 180 дней. В последний срок на растяжение и сжатие испытывались образцы-цилиндры разме-

ром 15×15 см, испытываемые перед тем на водонепроницаемость.

В остальные сроки испытания проводились раздавливанием образцов-кубов размером 10×10×10 см. До испытаний все образцы находились в камере влажного хранения. Результаты испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 6

Table 6

**Изменение соотношения прочности на растяжение и сжатие с возрастом бетона**

**Changing the tensile and compressive strength ratio with age of concrete**

В/Ц	Добавка поверхностно-активных веществ	Соотношение прочности бетона, %		
		28 дней	90 дней	180 дней
0,50	Без добавки	9,5	7,7	7,8
	СНВ*	9,5	9,3	9,3
	ССБ**	8,8	8,5	8,3
0,60	Без добавки	10,6	9,0	9,0
	СНВ	10,8	10,6	9,2
	ССБ	9,6	9,5	9,3
0,70	Без добавки	10,1	9,1	9,0
	СНВ	12,6	10,6	10,5
	ССБ	11,1	10,6	9,7

\*СНВ – смола нейтрализованная воздухововлекающая.

\*\*ССБ – сульфитно-спиртовая барда.

Для всех исследованных составов величина соотношения прочностей повышается по мере возрастания В/Ц как для бетонов без добавок, так и с добавками поверхностно-активных веществ. При этом увеличение соотношения прочностей для бетонов с высокими В/Ц наблюдается не только для 28-дневного возраста, но и во все последующие сроки испытаний.

**Добавка СНВ**

Введение в бетонные смеси добавок СНВ вызывает заметное повышение величины соотношения прочностей, по сравнению со смесями без добавок, во все сроки испытаний. Наиболее благоприятное действие в этом отношении добавки СНВ оказывают на более тощие бетонные смеси.

Введение в бетонные смеси добавок ССБ оказывает иное действие. Введение ССБ в жирные бетонные смеси снижает величину соотношения прочностей в 28-дневном возрасте по сравнению со смесями без добавок. На тощие бетонные смеси добавка ССБ такого отрицательного действия не оказывает. В последующие сроки твердения величина соотношения прочностей у бетонов с добавкой ССБ остается такой же, как и у бетонов

без добавок (см. табл. 6).

Одной из возможных причин такого различия в действии добавок ССБ и СНВ в этом отношении, очевидно, является то, что введение ССБ повышает водоотделение бетонной смеси, что при прочных плотных заполнителях приводит к ухудшению контакта их с цементным камнем и, как следствие этого, отрицательно сказывается на прочности бетона на растяжение, в особенности в ранние сроки твердения, в то время как введение добавок СНВ снижает величину водоотделения, что улучшает качество сцепления цементного камня с заполнителями.

Для бетонов с добавками поверхностно-активных веществ этой зависимости не наблюдается. Величина относительного снижения соотношения прочностей у бетонов как с добавками ССБ, так и с добавками СНВ приблизительно одна и та же и заметно меньше, чем у бетонов без добавок поверхностно-активных веществ [3].

Таким образом, введение добавок поверхностно-активных веществ в бетонную смесь (в пределах исследованных сроков испытаний) уменьшает снижение соотношения прочностей при переходе от 28 дней к более поздним срокам твердения.

## Выводы

1. Величина отношения прочности на растяжение к прочности на сжатие не является постоянной для различных сроков твердения, изменяется с возрастом раствора или бетона. Как в бетонах, так и в растворах величины соотношения прочностей имеют наибольшее численное значение в начальные сроки твердения (1÷3 дня); по мере увеличения возраста величина соотношения постепенно уменьшается, достигая в определенном возрасте минимума, и затем несколько повышается или стабилизируется в более поздние сроки твердения.

2. Интенсивность снижения величины соотношения прочностей, срок твердения, которому отвечает минимальное ее значение, и дальнейшее увеличение или стабилизация  $R_p / R_{сж}$  зависят от ряда факторов примененного цемента, условий, хранения добавок поверхностно-активных веществ, состава и т. д. Под влиянием этих факторов положение характерных точек кривой зависимости соотношения прочностей от времени твердения может изменяться, так что в действительности существует целое семейство кривых, подчиняющихся общей закономерности.

3. Применение добавок поверхностно-активных органических веществ, не изменяя зависимости соотношения прочностей от времени твердения по существу, придает ей более плавный характер.

4. Для бетонов и растворов без добавок поверхностно-активных веществ на портландцементе при

твердении во влажной среде наибольшее значение величины соотношения прочностей имеет место в начальные сроки твердения – 1÷3 дня, при дальнейшем твердении величина соотношения постепенно падает, приближаясь к минимальному значению, которого оно достигает к возрасту около 90 дней; в дальнейшем величина соотношения прочностей остается практически постоянной, обнаруживая тенденцию к незначительному повышению. Снижение величины соотношения прочностей на растяжение и сжатие (до 90-дневного возраста) и повышение ее в последующем, после достижения минимального значения, имеют затухающий характер.

5. Для бетонов и растворов снижение величины соотношений прочностей при переходе от 28 дней к возрасту 90 дней составляет не менее 10÷25 % (а в отдельных случаях и значительно больше), что необходимо учитывать в соответствующих случаях при проектировании корпусов судов.

6. Введение добавок поверхностно-активных веществ оказывает влияние как на величину соотношения прочностей, так и на изменение ее со временем. Воздуховывлекающие добавки типа СНВ повышают величину соотношения прочностей во всех возрастах, а также придают изменению соотношения прочностей во времени более плавный характер. Положительное влияние добавок этого типа наиболее ярко проявляется в тощих смесях.

## Список источников

1. Пичугин Д. А. О развитии технологии серобетонного судостроения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2007. № 2 (37). С. 114–117.

2. Шижканова В. Н., Путилова М. Н. Особенности структуры мелкозернистого бетона и его преимущества //

Наука и образование: новое время. 2018. № 3 (10). С. 14–16.

3. Лукутцова Н. П., Матвеева Е. Г., Фокин Д. Е. Исследование мелкозернистого бетона, модифицированного наноструктурной добавкой // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В. Г. Шухова. 2010. № 4. С. 6–11.

## References

1. Pichugin D. A. O razvitií tekhnologii serobetonogo sudostroeniia [On developing sulfur-concrete shipbuilding technology]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 2 (37), pp. 114-117.

2. Shishkanova V. N., Putilova M. N. Osobennosti struktury melkozernistogo betona i ego preimushchestva [Characteristics of fine-grained concrete structure and its

advantages]. *Nauka i obrazovanie: novoe vremia*, 2018, no. 3 (10), pp. 14-16.

3. Lukutsova N. P., Matveeva E. G., Fokin D. E. Issledovanie melkozernistogo betona, modifitsirovannogo nanostrukturnoi dobavkoi [Examining fine-grained concrete modified with nanostructural additive]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V. G. Shukhova*, 2010, no. 4, pp. 6-11.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 29.04.2022; принята к публикации 11.05.2022  
The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 29.04.2022; accepted for publication 11.05.2022

## Информация об авторах / Information about the authors

**Дмитрий Алексеевич Пичугин** – кандидат технических наук; доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; jdap@rambler.ru

**Dmitry A. Pichugin** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Equipment; Astrakhan State Technical University; jdap@rambler.ru

**Анастасия Алексеевна Сурикова** – магистрант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; [nastya.surikova.97@bk.ru](mailto:nastya.surikova.97@bk.ru)

**Владимир Алексеевич Суриков** – магистрант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; [surikov.1996@mail.ru](mailto:surikov.1996@mail.ru)

**Anastasia A. Surikova** – Master’s Course Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Equipment; Astrakhan State Technical University; [nastya.surikova.97@bk.ru](mailto:nastya.surikova.97@bk.ru)

**Vladimir A. Surikov** – Master’s Course Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Equipment; Astrakhan State Technical University; [surikov.1996@mail.ru](mailto:surikov.1996@mail.ru)

