

## О влиянии условий твердения на свойства самоуплотняющихся бетонов

Г.В. Несветаев<sup>1</sup>, Ю.И. Корянова<sup>1</sup>, Д.П. Сухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>ООО «Дон-Кубань Строй», Ростов-на-Дону

**Аннотация:** Приведены результаты исследований влияния различных условий твердения, в т.ч. моделирующих условий, в центре массивных монолитных конструкций, на предел прочности на сжатие и растяжение, начальный модуль упругости, кинетику твердения самоуплотняющихся бетонов классов от В 25 до В55. Предложена классификация бетонов по кинетике твердения с применением в качестве критерия времени достижения некоторого уровня от проектной прочности на сжатие при нормальных условиях твердения. Установлена инвариантность возраста и вида бетона в зависимости начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие. Выявлено некоторое отличие зависимости «начальный модуль упругости – предел прочности на сжатие» и отставание темпа нарастания предела прочности на растяжение от темпа нарастания предела прочности на сжатие исследованных бетонов в ранний период твердения относительно традиционных бетонов вибрационного уплотнения. Показано, что в ранний период твердения исследованные бетоны характеризуются более высоким уровнем условного критерия трещиностойкости  $E_0/R_t$ , что свидетельствует, в определенной степени, о более высокой хрупкости исследованных бетонов в этот период.

**Ключевые слова:** самоуплотняющиеся бетоны, предел прочности на сжатие и растяжение, кинетика твердения, модуль упругости, критерий трещиностойкости

При возведении монолитных железобетонных конструкций, в т.ч. массивных и густоармированных, достаточно широко применяются самоуплотняющиеся бетонные смеси (ГОСТ Р 59714-2021, далее - СУБ), обеспечивающие высокий темп бетонирования с минимальными трудозатратами на укладку и уплотнение бетонной смеси [1, 2]. Применение комплекса модифицирующих добавок позволяет получать бетонные смеси и бетоны с уникальными для монолитных конструкций свойствами, в частности, длительной сохраняемостью, низкой расслаиваемостью, регулируемые темпами твердения и высокой прочностью в проектном возрасте [3,4]. В связи с широким применением СУБ при возведении массивных конструкций, в частности, фундаментов, в т.ч. ответственных объектов [5], актуальной задачей является исследование влияния условий твердения СУБ на проектные свойства бетона, поскольку в ранний период твердения в подобных конструкциях отмечаются высокие значения

---

температур и температурных градиентов вследствие тепловыделения бетона [6, 7], которые могут негативно отразиться на структуре и свойствах бетона [8, 9]. Кроме того, температурные градиенты и усадочные деформации могут формировать поле опасных, с точки зрения раннего трещинообразования, напряжений [10-12]. Напряженно-деформированное состояние при этом зависит от многих факторов [13], а моделирование напряженно-деформированного состояния в ранний период твердения с учетом влияния температурно-усадочных деформаций показывает, в ряде случаев, высокую вероятность раннего трещинообразования [14-16]. Возможность раннего трещинообразования подтверждается также экспериментальными данными [7]. Немногочисленность данных о влиянии условий твердения бетонов, полученных из СУБ, на их свойства, определяют актуальность исследований в данной области.

Исследования влияния условий твердения на предел прочности на сжатие и растяжение, кинетику твердения, начальный модуль упругости и условный критерий трещиностойкости, выполнены на тяжелых бетонах, полученных из СУБ с величиной В/Ц 0,55 и 0,4. В составе СУБ присутствовали суперпластифицирующие добавки отечественного производства на основе эфиров поликарбоксилатов с ускоряющим твердение эффектом (далее R) и с замедляющим схватывание эффектом (далее S). Портландцемент – ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Новоросцемент». Подвижность СУБ соответствовала марке РК1 по ГОСТ Р 59714-2021. Диапазон предела прочности на сжатие исследованных бетонов в проектном возрасте при твердении в НУ составил от 34,5 (B27,5) до 69,2 МПа (B55) по схеме Г ГОСТ 18105.

Выдерживание бетонов осуществлялось в нормальных условиях (НУ), в термосе (рис. 1), имитирующем твердение в центре массивных конструкций (Т), в помещении лаборатории (БУ) при температуре среды 22-24 °С и

относительной влажности 53-63 %. Для условий Т и БУ использована форма 200x200x200 мм со вставками, позволяющими получить 8 образцов 100x100x100 мм.

Некоторые свойства исследованных бетонов в проектном возрасте 28 сут. представлены в табл. 1.

Таблица №1

Некоторые свойства исследованных бетонов

В/Ц	Предел прочности на сжатие, МПа (%) и средняя плотность бетона в проектном возрасте при твердении в условиях					
	НУ		Т		БУ	
	R	S	R	S	R	S
0,55	<u>34,5 (100)*</u> 2325	<u>45,1 (100)</u> 2375	<u>33,9 (98,3)*</u> 2246**	<u>39,4 (87,4)</u> 2309	<u>32,3 (93,6)</u> 2333	<u>43,6 (96,7)</u> 2338
0,4	<u>64,8 (100)</u> 2425	<u>69,2 (100)</u> 2435	<u>57,1 (88,1)</u> 2336	<u>66,2 (95,7)</u> 2435	<u>56,9 (87,8)</u> 2425	<u>65,7 (94,9)</u> 2435

Примечание: \* - в скобках - % от НУ; \*\* - средняя плотность бетона

Из представленных в табл. 1 результатов очевидно, что твердение бетона в условиях, отличных от НУ, приводит к снижению предела прочности на сжатие в проектном возрасте до 13 %, что согласуется с известными данными.



Рис. 1. - Слева направо: форма ФК 200 со вставками, форма с СУБ в термосе, автоматизированный стенд измерения температуры и деформаций бетона в процессе твердения в термосе

Из представленных на рис. 2 результатов очевидно, что исследованные бетоны характеризуются весьма высоким темпом твердения и относятся по EN 206.1, как показано в табл. 3, к быстротвердеющим. Различие в степени зрелости в возрасте 3 сут. бетонов, твердевших в условиях Т и БУ незначительно отразилось на значениях предела прочности на сжатие в этом возрасте. ГОСТ 25192-2012 и EN 206.1 в качестве критерия кинетики твердения бетона рассматривают относительную прочность на сжатие  $R_2/R_{28}$  в возрасте 2 сут. (табл. 2).

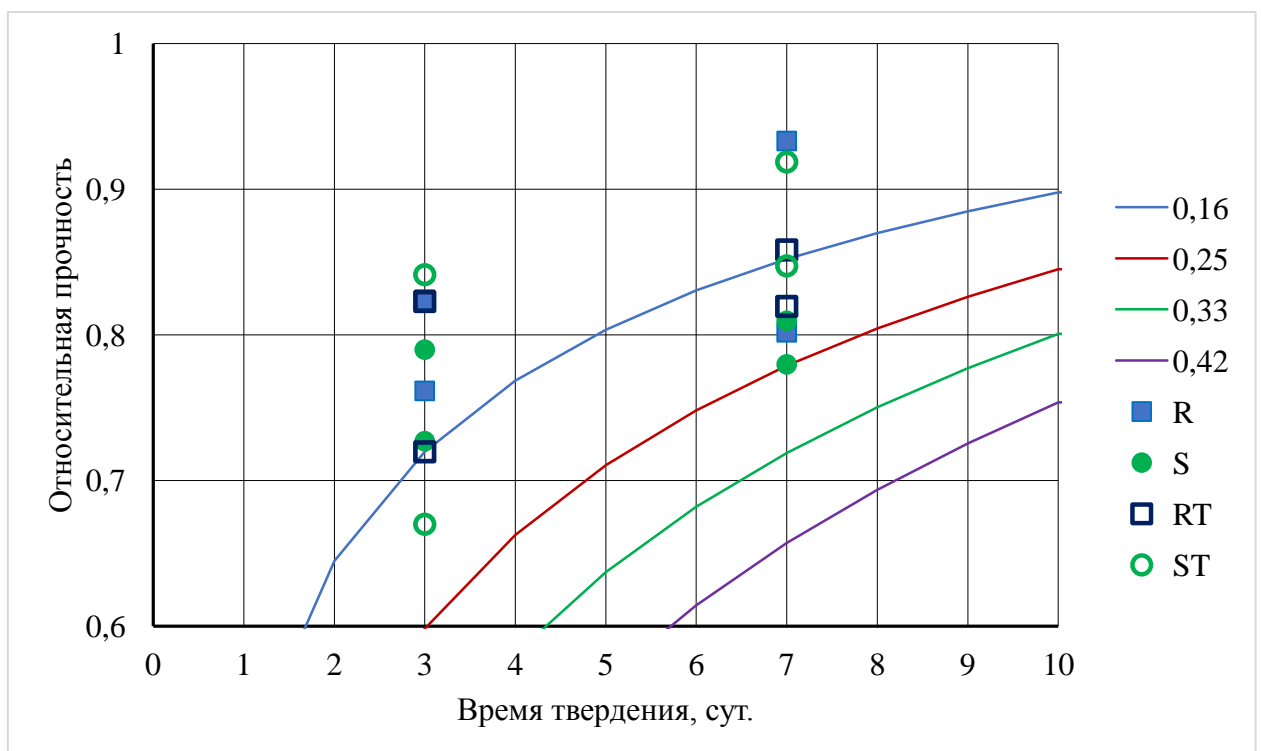


Рис. 2. - Кинетика прочности на сжатие исследованных бетонов  
0,16...0,42 – соответствующие значения параметра “s” по табл. 3 в ф. (1);  
R, S – соответственно быстро и медленно твердеющие бетоны в условиях БУ  
по табл. 1;  
RT, RS - соответственно быстро и медленно твердеющие бетоны в условиях Т  
по табл. 1

Таблица №2

## Классификация бетонов по кинетике твердения

Бетон	Соотношение $R_t/R_{28}$	
	ГОСТ 25192-2012	EN 206.1
Быстротвердеющий	$> 0,4$	$> 0,5$
Среднетвердеющий		0,3 – 0,5
Медленнотвердеющий	$\leq 0,4$	0,15 – 0,3
Очень медленнотвердеющий		$< 0,15$

Классификация по табл. 2 для практических целей особой ценности не представляет. Целесообразно классифицировать бетоны по кинетике твердения, принимая, например, в качестве критерия время достижения некоторого уровня от проектной прочности при нормальных условиях твердения. В основу классификации целесообразно заложить известное описание кинетики твердения формулой EN 1991-1-1:

$$\frac{R_t}{R_{28}} = \exp\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right), \quad (1)$$

где  $R_t$ ,  $R_{28}$  – соответственно, предел прочности бетона на сжатие в возрасте  $t$  и 28 сут.;  $s$  – коэффициент.

В табл. 3 представлена возможная классификация бетонов по кинетике твердения на основе предложенного критерия, а именно - времени достижения определенного значения от проектной прочности при нормальных условиях твердения.

Таблица №3

## Предлагаемая классификация бетонов по кинетике твердения при НУ

Бетон	Значение $s$ в ф. (1)	Время, сут., достижения прочности, % от проектной	
		50	70
Особобыстротвердеющий	0,16	1	3
Быстротвердеющий	0,25	2*	5
Нормальнотвердеющий	0,33	3	7
Медленнотвердеющий	0,42	4	9
Очень медленнотвердеющий	0,6	6	11

Примечание: \* - соответствует EN 206.1

На рис. 3 представлено соотношение предела прочности на растяжение и сжатие в возрасте 28 сут. исследованных бетонов от предела прочности на сжатие и условий твердения.

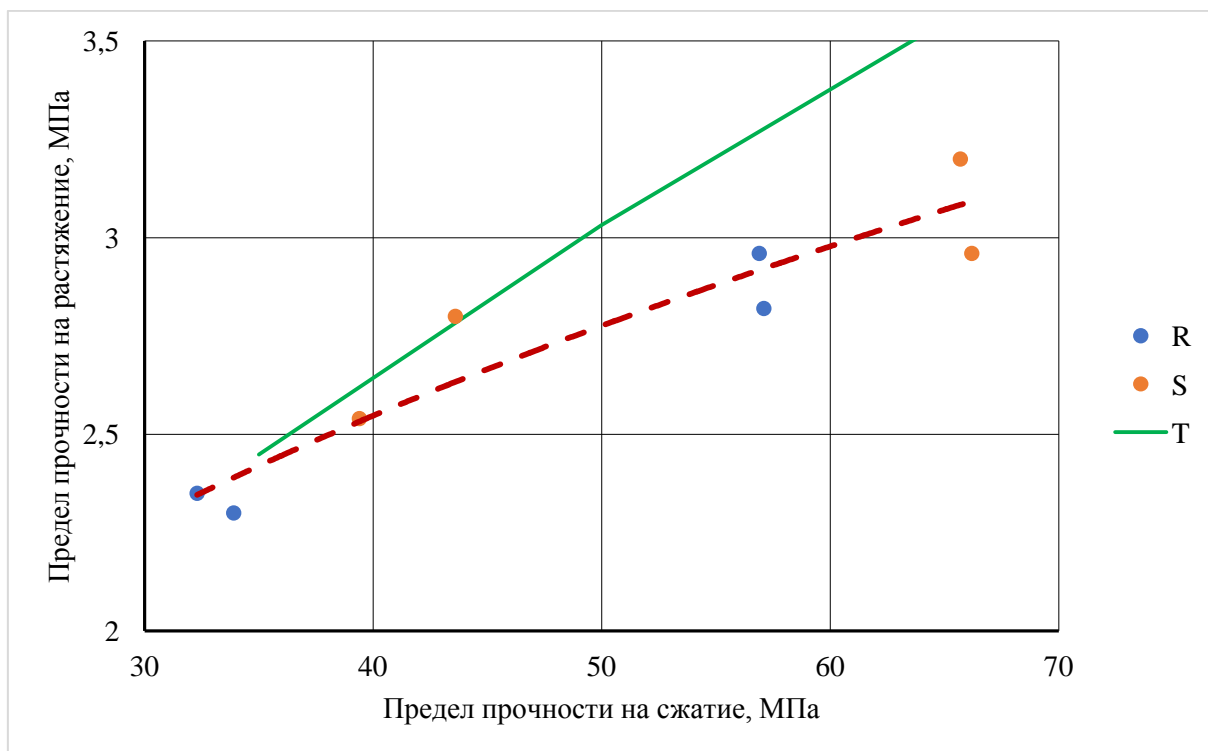


Рис. 3. - Соотношение пределов прочности на сжатие и растяжение исследованных бетонов в проектном возрасте R, S – соответственно, быстро и медленно твердеющие бетоны в условиях БУ и T по табл. 1; T – среднестатистическая зависимость  $R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}$  [2]

Из представленных на рис. 3 результатов очевидно, что в проектном возрасте 28 сут. с повышением предела прочности на сжатие отмечается некоторое (до 14 %) отставание роста предела прочности на растяжение в сравнении со среднестатистическими данными для традиционных бетонов вибрационного уплотнения. В табл. 4 приведены уравнения регрессии, описывающие представленную на рис. 3 зависимость  $R_t = f(R)$  для исследованных групп бетонов в возрасте 28 сут.

Таблица №4

Зависимости  $R_t = f(R)$  для исследованных бетонов

Бетон	Формула	$R^2$
R	$R_t = 0,58 \cdot R^{0,396}$	0,955
S	$R_t = 0,8 \cdot R^{0,322}$	0,8
R, S	$R_t = 0,615 \cdot R^{0,385}$	0,888

На рис. 4 представлены значения предела прочности на растяжение исследованных бетонов от предела прочности на сжатие и продолжительности твердения.

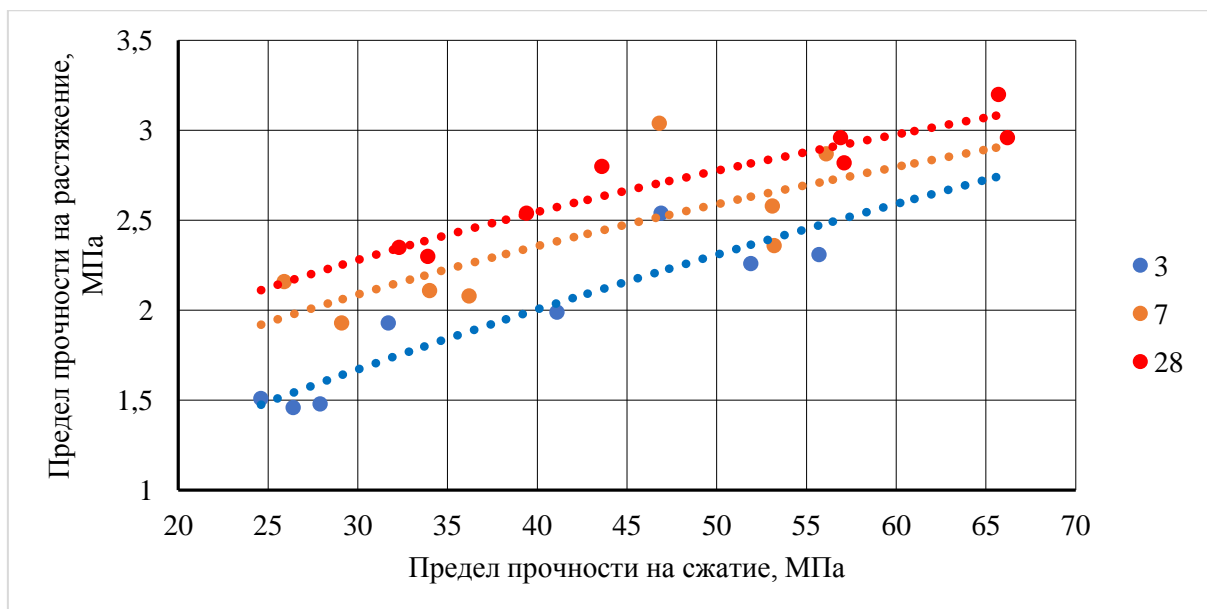


Рис. 4. - Соотношение пределов прочности на сжатие и растяжение исследованных бетонов

3,7 и 28 – возраст, сут., условия твердения БУ, Т по табл. 1

Из представленных на рис. 4 результатов, очевидно, что имеет место отставание в нарастании предела прочности на растяжение для исследованных бетонов в раннем возрасте. В табл. 5 приведены уравнения регрессии, описывающие представленные на рис. 4 зависимости  $R_t = f(R)$  для исследованных бетонов в зависимости от продолжительности твердения.

Зависимости  $R_t = f(R)$  для исследованных групп бетонов с учетом продолжительности твердения

Продолжительность твердения, сут.	Формула	$R^2$
3	$R_t = 0,195 \cdot R^{0,632}$	0,834
7	$R_t = 0,497 \cdot R^{0,422}$	0,8
28	$R_t = 0,615 \cdot R^{0,385}$	0,888

На рис. 5 представлено соотношение предела прочности на растяжение и сжатие  $R_t/R$  для бетонов в возрасте 3 и 7 сут. в сравнении с соотношением  $R_t/R$  в проектном возрасте 28 сут. Очевидно, что в ранний период темп нарастания предела прочности на растяжение отстает от темпа нарастания предела прочности на сжатие, что свидетельствует, в определенной степени, о более высокой хрупкости исследованных бетонов в ранний период твердения.

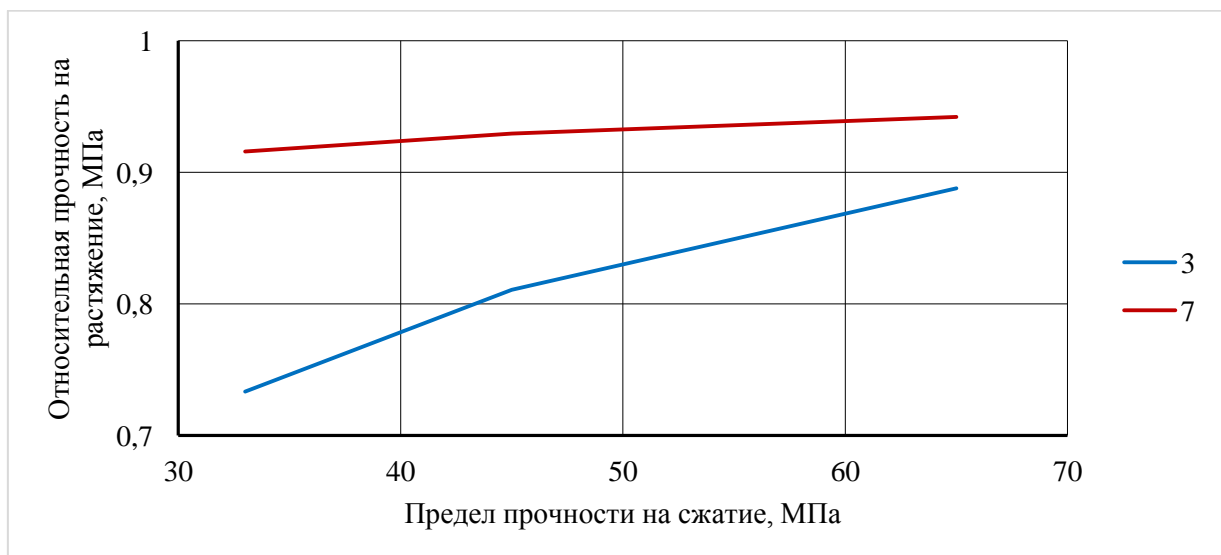


Рис. 5. - Зависимость относительного предела прочности на растяжение от предела прочности на сжатие и возраста бетона  
 3, 7 – возраст бетона, сут.



На рис. 6 представлена зависимость начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие в проектном возрасте.

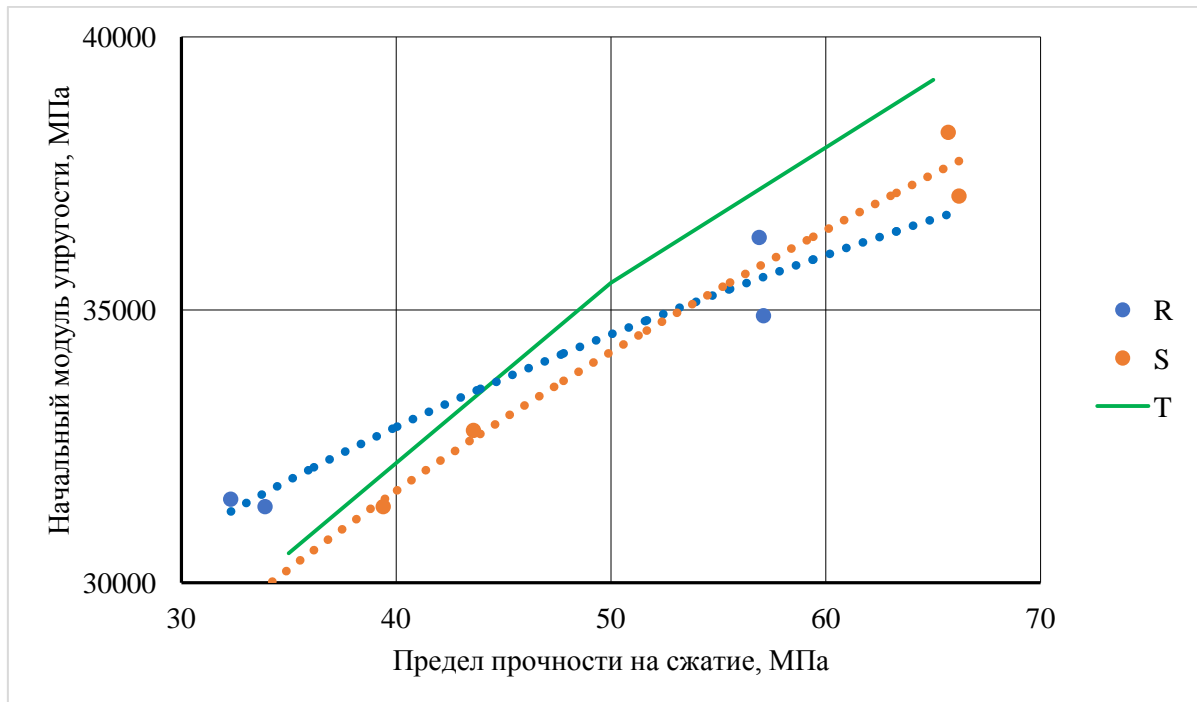


Рис. 6. - Зависимость начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие

R, S – соответственно, бетон быстро и медленно твердеющий;

T – среднестатистическая зависимость  $E_0 = 1000 \cdot \frac{0,04 \cdot R + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + 0,04 \cdot R}}$ , R – кубиковая

прочность бетона [14]

Из представленных на рис. 6 результатов очевидно некоторое различие в зависимости  $E_0 = f(R)$  для исследованных бетонов в сравнении с традиционными бетонами вибрационного уплотнения. В табл. 6 представлены зависимости  $E_0 = f(R)$  для исследованных бетонов в проектном возрасте 28 сут.

Таблица №6

Зависимости  $E_0 = f(R)$  для исследованных бетонов

Продолжительность твердения, сут.	Формула	$R^2$
R	$E_0 = 14286 \cdot R^{0,226}$	0,935
S	$E_0 = 8826 \cdot R^{0,347}$	0,974

На рис. 7 представлена зависимость начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие и возраста бетона.

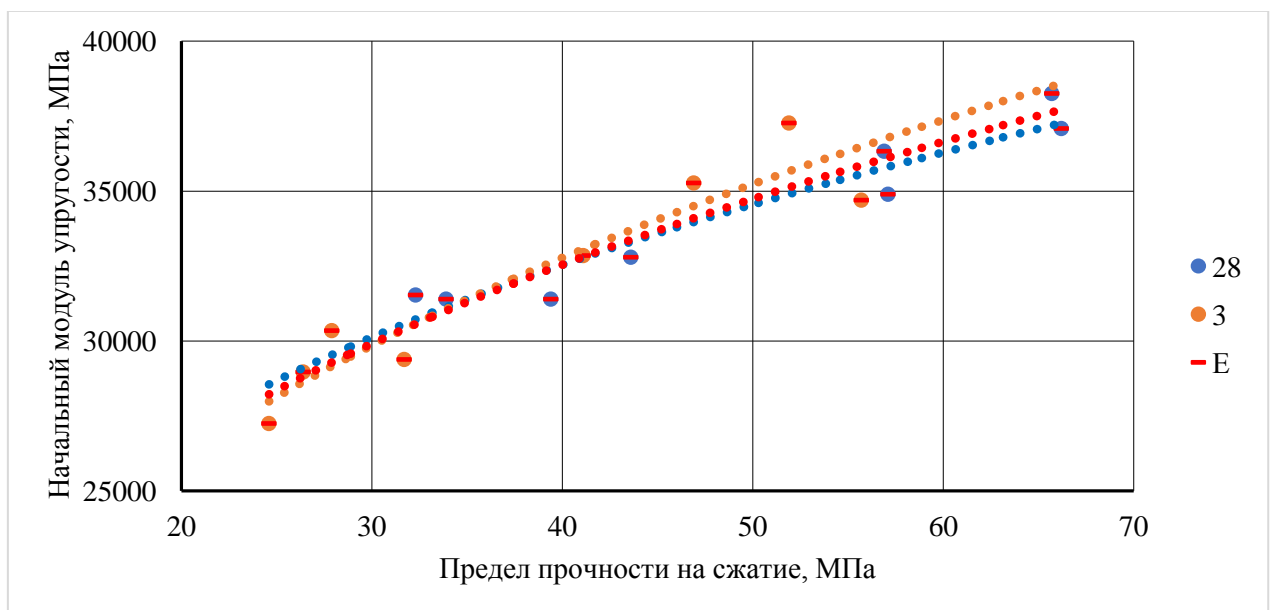


Рис. 7. - Зависимость начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие и возраста бетона

3, 28 – соответственно возраст 3 и 28 сут.; E – общая зависимость для 3 и 28

Из представленных на рис. 7 результатов очевидно, что зависимость  $E_0 = f(R)$  для исследованных бетонов практически инвариантна к возрасту, условиям твердения и виду бетона (R, S). В табл. 7 представлены зависимости  $E_0 = f(R)$  для исследованных групп бетонов в зависимости от продолжительности твердения (3 и 28 сут.).

Таблица №7

Зависимости  $E_0 = f(R)$  для исследованных групп бетонов

Продолжительность твердения, сут.	Формула	$R^2$
3	$E_0 = 9909 \cdot R^{0,324}$	0,892
28	$E_0 = 12077 \cdot R^{0,269}$	0,921
3,28	$E_0 = 11048 \cdot R^{0,293}$	0,906

Поскольку трещиностойкость бетона определяется уровнем растягивающих напряжений в результате собственных или вынужденных деформаций, то оценку трещиностойкости вследствие температурных градиентов можно представить в виде:

$$\frac{\sigma_t}{R_t} = \frac{\varepsilon(\Delta T) \cdot E}{R_t}, \quad (2)$$

где  $\sigma_t$ ,  $R_t$  – соответственно величина растягивающего напряжения и предела прочности бетона на растяжение;  $E$  – модуль деформаций,  $E = \nu \cdot E_0$  ( $E_0$  – начальный модуль упругости,  $\nu$  – коэффициент, зависящий от вида и класса бетона, уровня нагружения);  $\varepsilon(\Delta T)$  – деформация, вызванная температурными градиентами.

Тогда соотношение  $\Delta T \cdot E_0 / R_t$  в принципе можно рассматривать, как некоторый уловный критерий трещиностойкости бетона, что хорошо известно.

Согласно [15], возникающие вследствие температурного градиента напряжения определяются, как:

$$\sigma_T = \frac{k_r \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 + \varphi)}, \quad (3)$$

где:  $k_r$  - степень ограничения на верхней поверхности плиты (0,83 [9]);

$\Delta T$  - перепад температуры между центром и верхней поверхностью плиты в момент времени  $\tau$ , °С;

$\varphi$  - коэффициент ползучести бетона.

На рис. 8 представлена зависимость условного критерия трещиностойкости от предела прочности на сжатие и возраста бетона. При расчете условного критерия трещиностойкости  $E_0/R_t$  значения  $E_0$  принимались для исследованных бетонов по формулам табл. 7, значения  $R_t$  принимались по формулам табл. 5. Для традиционных бетонов вибрационного уплотнения без суперпластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов значения  $E_0$  и  $R_t$  принимались по среднестатистическим зависимостям [2, 15]

$$E_0 = 1000 \cdot \frac{0,04 \cdot R + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + 0,04 \cdot R}}, \quad (4)$$

$$R_t = 0,29 \cdot R^{0,6} \quad (5)$$

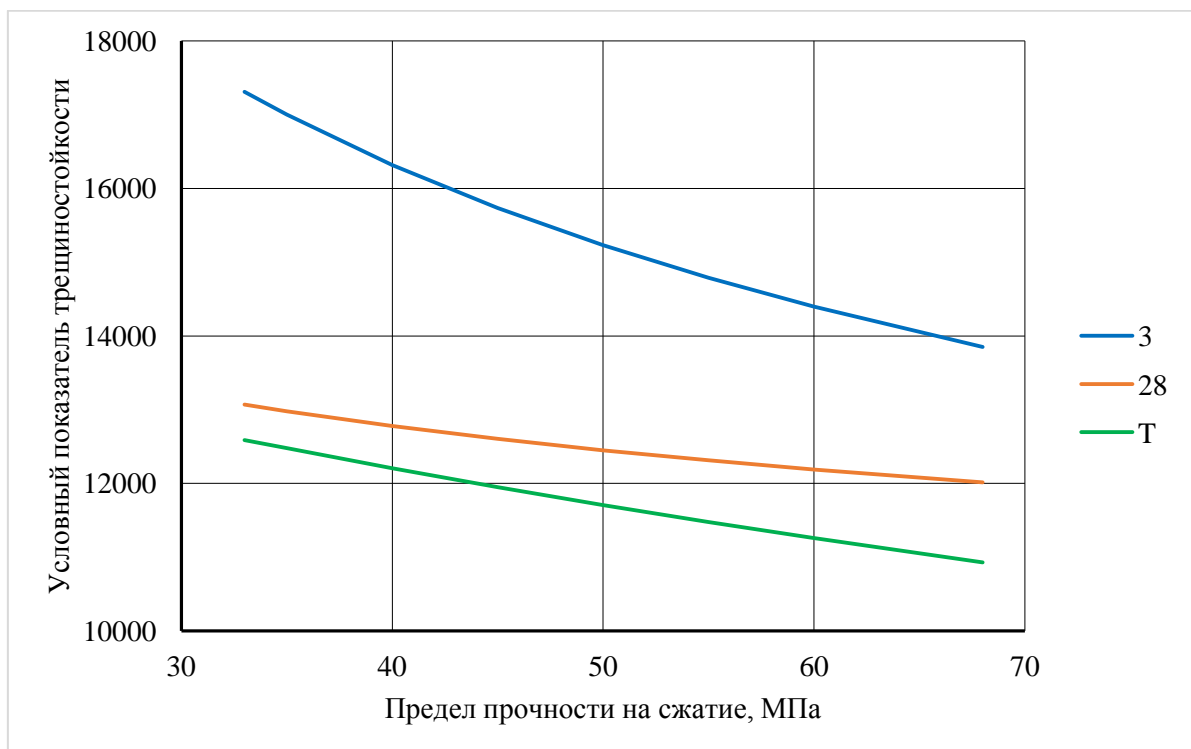


Рис. 8. - Зависимость условного критерия трещиностойкости от предела прочности на сжатие и возраста бетона  
3, 28 – возраст бетона

Из представленных на рис. 8 результатов, очевидно, что в ранний период твердения исследованные бетоны характеризуются более высоким уровнем условного критерия трещиностойкости, что свидетельствует, в определенной степени, о более высокой хрупкости исследованных бетонов в ранний период твердения. Поскольку этот период характеризуется высокими значениями тепловыделения и, закономерно, возможным развитием высокого уровня температурных градиентов и напряжений [11], следует на стадии разработки регламентов бетонирования тщательно прорабатывать вопросы предотвращения раннего трещинообразования.

### Заключение

Предложена классификация бетонов по кинетике твердения с применением в качестве критерия времени достижения некоторого уровня прочности на сжатие от проектной при нормальных условиях твердения. Установлена инвариантность возраста и вида бетона в зависимости начального модуля упругости исследованных бетонов от предела прочности на сжатие. Выявлено незначительное, в пределах 7%, отличие значений начального модуля упругости исследованных бетонов и качественное отличие зависимости «начальный модуль упругости – предел прочности на сжатие» относительно традиционных бетонов вибрационного уплотнения. Отмечено отставание темпа нарастания предела прочности на растяжение от темпа нарастания предела прочности на сжатие в ранний период твердения. Показано, что в ранний период твердения исследованные бетоны характеризуются более высоким уровнем условного критерия трещиностойкости  $E_0/R_t$ , что свидетельствует, в определенной степени, о более высокой хрупкости исследованных бетонов в этот период.

---

## Литература

1. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко А.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // Строительные материалы, 2006, № 10. - С. 13-17.
2. Давидюк А. Н., Маилян Д.Р., Несветаев Г.В. Самоуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций // Технологии бетонов, 2011, № 1-2. – С. 57-59.
3. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы, 2021, № 12. – С. 48-54.
4. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр» // Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса, 2017. – С. 875-883.
5. Калиновская Н.Н., Осос Р.Ф., Кучук Е.В. Бетонирование фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона // Технологии бетонов, 2017, №3-4. – С. 15-19
6. Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В. Трещиностойкость массивных бетонных конструкций в строительный период с учетом температурных воздействий // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова, 2019, №8. – С. 30-38.
7. Bjøntegaard Øyvind Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures – State of the art, FA 3 Technical performance, SP 3.1 Crack free concrete structures. - COIN Project report no 31 – 2011. – 142 p.

8. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона // Инженерный вестник Дона, 2021, №10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228)
  9. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. – USA: American Concrete Institute, 2007. – 32 p.
  10. Добрецова И.В., Галактионов Д.Е. Температурный режим и термонапряженное состояние массивных железобетонных элементов конструкций АЭС при их возведении // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: доклады и выступления Седьмой научно-технической конференции, 2013. - С. 55-60.
  11. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов // Инженерно-строительный журнал, 2018, № 2 (78). - С. 128–135.
  12. Semenov K., Kukolev M., Zaichenko N., Popkov S., Makeeva A., Amelina A., Amelin P. Unsteady temperature fields in the calculation of crack resistance of massive foundation slab during the building period // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. Springer, Cham, 2019. - pp. 455-467.
  13. Aniskin N., Nguyen T. C. Influence factors on the temperature field in a mass concrete // E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 97. URL: [doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021)
  14. Корянова Ю.И., Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Сухин Д.П. К вопросу моделирования температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных плит // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691)
  15. Kumar Mehta P., Monteiro P. J. M. Concrete, microstructure, properties and materials. – USA: Mc Graw Hill, 2001. – 239 p.
-

16. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплого экрана реактора АЭС // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421

### References

1. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Shejnfel`d A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko A.V. Stroitel`ny`e materialy`, 2006, № 10. pp. 13-17.
2. Davidyuk A. N., Mailyan D.R., Nesvetaev G.V. Teknologii betonov, 2011, № 1-2. pp. 57-59.
3. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Neczvet D.D. Stroitel`ny`e materialy`, 2021, № 12. pp. 48-54.
4. Murtazaev S.A.Yu., Sajdumov M.S., Alasxanov A.X., Murtazaeva T.S.A. Vy`sokoprochny`e betony` povu`shennoj zhiznesposobnosti dlya konstrukcij fundamentov MFK «Axmat-Taue`r» [High-strength concretes of increased vitality for the structures of foundations of the MFC "Akhmat-Tower"], Fundamental`ny`e osnovy` stroitel`nogo materialovedeniya. Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo oglajnkongressa, 2017. pp. 875-883.
5. Kalinovskaya N.N., Osos R.F., Kuchuk E.V. Teknologii betonov, 2017, №3-4. pp. 15-19.
6. Makeeva A.V., Semenov K.V., Makeev A.A., Amelina A.V. Vestnik BGTU imeni V.G. Shuxova, 2019, №8. pp. 30-38.
7. Bjøntegaard Øyvind Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures - State of the art, FA 3 Technical performance, SP 3.1 Crack free concrete structures. COIN Project report no 31 - 2011. 142 p.



8. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Suxin D.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228)

9. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. USA: American Concrete Institute, 2007. 32 p.

10. Dobreczova I.V., Galaktionov D.E. Temperaturny`j rezhim i termonapryazhennoe sostoyanie massivny`x zhelezobetonny`x e`lementov konstrukcij AE`S pri ix vozvedenii [Temperature regime and thermal stress state of massive reinforced concrete elements of NPP structures during their construction], Hidroe`nergetika. Novy`e razrabotki i texnologii: doklady` i vy`stupleniya Sed`moj nauchno-texnicheskoj konferencii, 2013. pp. 55-60.

11. Struchkova A.Ya., Barabanshnikov Yu.G., Semenov K.V., Shajbakova A.A. Inzhenerno-stroitel`ny`j zhurnal, 2018, № 2 (78). pp. 128-135.

12. Semenov K., Kukolev M., Zaichenko N., Popkov S., Makeeva A., Amelina A., Amelin P. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. Springer, Cham, 2019. pp. 455-467.

13. Aniskin N., Nguyen T. C. E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 97 URL: [doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021)

14. Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V., Chepurnenko A.S., Suxin D.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691)

15. Kumar Mehta P., Monteiro P. J. M. Concrete, microstructure, properties and materials. USA: Mc Graw Hill, 2001. 239 p.

16. Agaxanov E`.K, Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Kulinich I.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421)