

## Анизотропия прочностных свойств цементного камня при его кратковременном нагружении в раннем возрасте

*Ю.Ю. Галкин, С.А. Удодов, Е.А. Строителева, Г.Ю. Чариков*

*Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), Краснодар*

**Аннотация:** Вопрос повышения прочности цементных бетонов, подвергнутых нагружению на самых ранних этапах представляет одну из приоритетных задач технологии бетона. Обширный объем работ в этом направлении содержит преимущественно данные об изменении прочности при сжатии после раннего нагружения. Задачей работы было изучение прочности на растяжение при изгибе после раннего нагружения и проверка влияния ориентации образцов под нагрузкой. В дополнение предполагалось рассмотреть влияние активных минеральных добавок на этот параметр. Объектом исследования были выбраны образцы на цементно-песчаном тесте, приготовленные на портландцементном вяжущем различных заводов-изготовителей. Путем изменения ориентации образцов при их испытании после раннего нагружения отмечено различие прочностных характеристик при изгибе. Максимум приращения отмечен в плоскости, перпендикулярной направлению сжимающего усилия. При применении минеральной добавки с заменой доли цемента наблюдалось затухание наблюдаемого эффекта.

**Ключевые слова:** анизотропия прочностных свойств, раннее нагружение бетона, цементный композит, прочность при изгибе, минеральная добавка.

Постоянное увеличение скорости строительства обуславливает повышение требований к конструкционным материалам, в частности бетонам, не только в разрезе ранней прочности, но и уменьшении временного интервала с момента формирования до передачи технологических и монтажных нагрузок на самых ранних этапах. Одним из первых, кто подготовил, апробировал в натуре, качественно и количественно смог описать последствия раннего нагружения, был А. В. Саталкин [1]. Воздействию нагрузок подвергались бетонные опоры, а также пролетные строения мостов. Первый производственный опыт был проведен в июле 1951 года при строительстве моста через реку Систу [2]. Позднее аналогичные испытания были поставлены для мостов через реки Гамбри и Суходол.

Испытания железобетонных элементов проводились на статическую и динамическую нагрузки. Достигалось это благодаря нагрузке от двух паровозов, а также их движению по мостам с различной скоростью. Деформации и прогибы фиксировались с помощью тензометров, индикаторов и прогибометров, установленных на наблюдаемых конструкциях.

Диапазон возраста нагружения составлял от двух до одиннадцати суток с момента окончания бетонирования. Опыты показали отсутствие каких-либо опасных и необычных деформаций бетона и дефектов пролетного строения. Нагружение статической нагрузкой паровозов было возможно в срок от трех до семи дней при прочности 38-63% от прочности бетона к моменту нагружения.

Принимая во внимание разницу в величинах напряжений, различие цементов и условий твердения, а также интенсивности нагружения на каждом объекте строительства, А. В. Саталкин приводит допустимую интенсивность нагружения, которая составляет:

- для распалубки железобетонных пролетных строений  $0,2R_b$ ;
- при монтаже железобетонных пролетных строений  $0,3R_b$ ;
- при движении с постоянной скоростью  $0,5R_b$ ;
- при динамическом движении  $0,65R_b$ .

Он рекомендовал раннее нагружение для решения следующих задач строительного производства:

- ускорения строительства;
  - отказа от применения ускорителей твердения и повышения марки цемента;
  - отгрузки элементов с полигона с отпускной прочностью не менее 100%;
  - ступенчатого натяжения арматуры;
-

- устройства сборной и монолитной обделки тоннелей;
- снижения пустотности в гидротехническом бетоне;
- улучшения сцепления блоков по швам.

Позднее, опираясь на приведенные выше положения и развивая их, А. П. Васильев и Г. В. Мурашкин с коллегами провели выпуск опытных железобетонных колонн серии КНР-33-28 [3] на Куйбышевском заводе ЖБИ-7. Производство такого типа колонн позволило резко увеличить прочность бетона на сжатие (прирост достигал 13%), а также существенно уменьшить расход арматуры. Экономический эффект от сокращения армирования на 130 кг/м<sup>3</sup>, по сравнению с традиционным способом изготовления колонн, тогда составил 14 руб/м<sup>3</sup>.

Поэтапная передача натяжения была применена и для совершенствования технологии предварительно напряженного сборного железобетона [2, 4]. Ю. А. Мамонтовым отмечалось, что, используя высокую деформативность бетона в раннем возрасте, можно добиться более согласованной работы его с арматурой в зоне передачи напряжений. Чем выше деформативность, тем в более удаленных от торца областях будет происходить заанкеривание арматуры и будут действовать максимальные силы сцепления.

В опытах А. В. Саталкина пригружение бетона повышало сцепление слоев раствора с основанием [1]. Поскольку укладка бетонной смеси ведется послойно, то воздействие при напряжениях, во много меньших предела прочности, может привести к улучшению сцепления слоев и однородности свойств затвердевшего бетона. Обеспечение текучести в сочетании со стабильностью консистенции, а также необходимой адгезией к уложенному слою и низкой деформативностью – одни из основных требований, предъявляемых к бетонным смесям при адаптации их для новейшей технологии 3D печати [5]. Из рабочего «сопла» выдавливается, подобно

---

зубной пасте из тубика, «сметанообразная смесь» бетона с добавками. Строительный материал для возведения несущих элементов конструкции (стен, перекрытий) – это быстротвердеющий реакционно – порошковый бетон, армированный стальной или полимерной микрофиброй [6-8]. Каждый очередной слой выдавливается 3D-принтером поверх предыдущего, благодаря чему формируется определенная конструкция (например, рис. 1 [9]). Технология позволяет значительно ускорить процесс возведения элементов зданий и сооружений [10], и в таких условиях свежеложенный бетон также подвергается раннему нагружению от собственных вышерасположенных слоев, причем имея низкую пластическую прочность.



Рис. 1 - Процесс печати (a) и напечатанный элемент (b)

Из анализа имеющегося опыта видно, что бетон зачастую подвергается раннему нагружению. Как отмечал А. В. Саталкин [1], эффективность такого нагружения может быть обусловлена пластической деформацией его в раннем возрасте (ранней ползучестью), величина которой служит критерием уплотнения и вызываемого им упрочнения структуры. По его наблюдениям (позже это отмечалось также А. В. Косолаповым, Ю. А. Мамонтовым и И. И. Шукеновым) растет и трещиностойкость структуры, подвергнутой раннему кратковременному обжатию в раннем возрасте. Учитывая особую актуальность вопроса повышения изгибных характеристик бетонов, а также имеющиеся результаты экспериментальных работ автора [11-12], целью

---

работы было изучение влияния ориентации образцов при их раннем нагружении на его прочностные характеристики камня при изгибе.

В связи с этим сформулированы следующие задачи:

- 1) получить данные о прочности на растяжение при изгибе при ориентации плоскости изгиба вдоль действующей нагрузки и перпендикулярно ей, провести их анализ и статистическую обработку;
- 2) проверить влияние фактора ориентации на прочность при сжатии;
- 3) оценить влияние содержания цементного теста (путем замены части цемента минеральными добавками) на величину прочности при изгибе после раннего кратковременного нагружения.

Образцы приготавливались из цементно-песчаного раствора состава Ц:П:В = 1:1:0,4. Вяжущее – портландцементы Цем I 42,5 Н заводов «Верхнебаканский» и «Новоросцемент» (таблица №1), мелкий заполнитель – песок ООО «ИСК Будмар» (таблица №2). Подвижность оценивалась расплывом теста с помощью вискозиметра Суттарда, который составил 120-130 мм. Добавление в состав инертного заполнителя обусловлено стремлением уменьшить разброс прочностных показателей ввиду усадочных, а также термических напряжений при гидратации цементного камня, которые могут возникнуть при применении чисто цементного теста.

Таблица №1

Химический состав применяемого цемента

Наименование	Химический состав, %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
«Верхнебаканский» Цем I 42,5 Н ГОСТ 31108	21	4,36	4,16	64,7	0,46	3	0,62
«Новоросцемент» Цем I 42,5 Н ГОСТ 31108	21	4,37	4,16	64,8	0,78	2,8	0,51

Таблица №2

Гранулометрический состав песка

Наименование остатков	Размеры сит, мм					Прошло
	0,63	0,5	0,315	0,25	0,125	
Частные, г	0,4	19	585,4	1155,8	196,4	43
Частные, %	0,02	0,95	29,27	57,79	9,82	2,15
Полные, %	0,02	0,97	30,24	88,03	97,85	100

Для возможности оценки снижения цементного вяжущего применялся микрокремнезем конденсированный уплотненный марки МКУ-85 производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы». Соответствует ТУ 5743-048-02495332-96 и ГОСТ 56178-2014.

После двадцати четырех часов с момента затворения образцы 70×70×70мм освобождались от форм, определялась прочность состава в текущем возрасте испытанием серии из трех контрольных образцов на сжатие. Загружение происходило в стендах сериями по 12 штук. Усилие нагрузки равнялось 10% от разрушающей в текущем возрасте ( $0,1 \times R_{\text{разр}} 1 \text{ сут}$ ). Контрольные образцы располагались рядом с нагруженными, находясь в идентичных с ними температурно-влажностных условиях ( $t=21-22^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi=55-60\%$ ). Помещение выдерживания не имело окон, что исключало влияние сквозняков. На каждой секции стенда устанавливались динамометры образцового сжатия ДОСМ 3-5 для обеспечения постоянства значений нагрузки в серии образцов. Разница в показаниях среди серии из 6 образцов не превышала 3-4%. Спустя сутки выдержки нагруженные образцы извлекались и совместно с контрольными испытывались на растяжение при раскалывании. При этом в случайном порядке выбирались образцы, для которых направление усилия раскола, передающееся через цилиндры пресса, совпадало с направлением приложенной нагрузки. Остальные образцы из

партии испытывались с поворотом образца так, чтобы плоскость, сжатая при раннем нагружении, располагалась относительно усилия раскола перпендикулярно. Полученные данные обрабатывались методами математической статистики, а также производилась оценка наличия грубой ошибки по критерию  $\tau_i \leq \tau_{\text{табл.}}$ .  $T_{\text{табл}}$  при выбранных значениях вероятности и уровне значимости равнялся 1,98. Растяжение при раскалывании определяли по формуле (1).

$$R_{\text{н}} = \gamma \frac{2F}{\pi A}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – масштабный коэффициент, принимаемый 0,87;

$F$  – разрушающая нагрузка, Н;

$A$  – площадь рабочего сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Результаты испытаний прочности образцов, приготовленных после раннего кратковременного нагружения, отражены в таблице 3.

Изменяя ориентацию образца при испытании, судя по таблице 3, видим, что нагрузка приводит к отличию прочностных характеристик в определенном направлении, в данном случае в плоскости, перпендикулярной плоскости нагружения. При этом достигнута максимальная из всех партий однородность значений, что подтверждает низкий коэффициент вариации, равный 2,6% (см. табл. 3). Среднее арифметическое усилия при раскалывании образца с поворотом плоскости повысилось на 25% относительно значения для серии образцов, испытанных в положении, аналогичном выдерживанию под нагрузкой. Оно также превысило величину прочности для контрольного образца на 11,7% (см. табл. 3).

Приготавливались образцы на портландцементе Цем I 42,5 Н «Новоросцемент». Состав принят аналогичным – Ц:П:В=1:1:0,4. Ввиду того, что нормальная плотность цементного теста для выбранного вяжущего меньше, чем у портландцемента «Верхнебаканский», расплыв смеси, измеренный при

---

помощи вискозиметра Сутгарда, составлял 120-130 мм. Размер и количество образцов для испытаний, возраст нагружения и длительность выдерживания, а также методы статистической обработки принимались аналогично образцам на портландцементе «Верхнебаканский». Результаты испытаний, а также их статистическая обработка приведены в таблице 4.

Таблица №3

Прочность на растяжение при раскалывании образцов (ПЦ «Верхнебаканский»)

Схема приложения нагрузки	Ориентация образца при испытании на изгиб	Усилие при раскалывании и образца, кН	$R_{ti}$ , МПа	$R_{ti}$ среднее, МПа	Коэфф. вариации $V_s$ , %	$m, \pm$	
		17,1	1,934	1,924	2,6	0,02	
		16,6	1,877				
		17,4	1,968				
		16,9	1,911				
		17,6	1,990				
		16,5	1,866				
		13,0	1,470	1,530	4,1	0,03	
		12,8	1,448				
		13,7	1,549				
		14,3	1,617				
		13,8	1,561				
		13,6	1,538				
	Контрольные без нагрузки		14,8	1,674	1,723	5,1	0,04
			15,1	1,708			
			16,1	1,821			
			15,0	1,696			
			16,2	1,832			
			14,2	1,606			



Таблица №4

Прочность образцов после раннего нагружения (ПЦ «Новоросцемент»)

Схема приложения нагрузки	Ориентация образца при испытании на изгиб	Усилие при раскальван ии образца, кН	$R_{it}$ , МПа	$R_{it}$ среднее, МПа	Кoeff. вариации $V_C$ , %	$m, \pm$
		21,9	2,477	2,283	5,7	0,05
		19,3	2,183			
		20,6	2,330			
		19,6	2,217			
		20,9	2,364			
		18,8	2,126			
		16,7	1,889	1,911	5,1	0,04
		17,0	1,923			
		16,2	1,832			
		18,1	2,047			
		15,8	1,787			
		17,6	1,990			
	Контрольные без нагрузки	17,3	1,956	1,962	5,3	0,04
		16,7	1,889			
		18,9	2,137			
		16,8	1,900			
		16,5	1,866			
		17,9	2,024			

Как видно из таблицы 4, значения прочности были в достаточной степени однородны - коэффициент вариации не превышал 5,7%, а также отсутствовали грубые ошибки. Как и в первом случае, при испытании на растяжение при раскальвании образцов с поворотом плоскости на  $90^0$  получен максимальный результат по прочности. Разница при повороте плоскостей составила около 19%, а превышение над контрольным равнялось 16%. Наименьшее значение среднего арифметического получилось в серии образцов, испытанных в таком же положении, как и при выдерживании под нагрузкой.

Наблюдаемая анизотропность прочностных свойств при изгибе связана, вероятно, с происходящими физико-химическими процессами, которые в условиях сжатия и протекающих при этом деформаций ползучести цементного камня могут приводить к локальному уплотнению его составляющих, уменьшению пористости [13], перераспределению усилий [14], сближению слоев геля гидросиликатов кальция (CSH) [15, 16], а также диффузии влаги.

Вопрос упрочнения в данном конкретном случае должен быть изучен с позиции изменения доли аморфной и кристаллической структуры под нагрузкой и без нее, а также морфологии гидратных продуктов. Особую важность представляет поиск и установление «структурных особенностей» для серий образцов с повышенной прочностью и уточнение возможности влияния рецептурно-технологических факторов на прирост прочности при изгибе для композитов, подвергаемых раннему нагружению.

Интерес представляло также получение данных об изменении прочности на сжатие нагруженных образцов при различной их ориентации при испытании. Данный параметр изучался на цементно-песчаном растворе состава Ц:П:В=1:1:0,4. Применяемый портландцемент - портландцемент Цем I 42,5 Н завода «Верхнебаканский». Методика приготовления, передачи нагрузки и выдерживания образцов соответствовала применяемой выше для образцов, испытанных на прочность на растяжение при раскалывании. Прочность на сжатие определялась по ГОСТ 10180 с масштабным коэффициентом 0,85 по формуле (2).

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – масштабный коэффициент;

$F$  – разрушающая нагрузка, Н;

$A$  – площадь рабочего сечения образца, мм<sup>2</sup>.

---

Результаты испытаний и обработка методами математической статистики приведены в таблице 5.

Таблица №5

Прочность образцов после раннего нагружения (ПЦ «Верхнебаканский»)

Схема приложения нагрузки	Ориентация образца при испытании на сжатие	Усилие при сжатии, кН	R, МПа	R среднее, МПа	Кoeff. вариации Vc, %	m, ±
		102,5	11,325	10,869	4	0,187
		97,3	10,751			
		95,3	10,530			
		99,6	11,005			
		103,0	11,380			
		92,4	10,209			
		111,5	12,320	11,867	6	0,296
		101,6	11,226			
		109,1	12,054			
		97,8	10,806			
		110,2	12,176			
		115,3	12,740			
	Контрольные без нагрузки	117,7	13,005	12,437	7	0,330
		109,6	12,110			
		110,4	12,198			
		99,4	10,983			
		118,8	13,126			
		116,6	12,883			

Анализ показал, что нагружение на 1 сутки усилием, составляющим 10% от разрушающего в текущем возрасте, привело к уменьшению прочности на сжатие образцов относительно ненагруженных (контрольных). Среднее значение по 6 образцам серии меньше почти на 4,6%. Испытание на прочность с изменением ориентации граней кубов относительно сжатия увеличило разницу со значением контрольного состава до 12,5%. Все полученные данные вошли в доверительный интервал.

Следовательно, ориентация образца даже при кратковременном (в течение суток) раннем нагружении оказала влияние на дальнейшую работу материала. Улучшение прочности при изгибе при раннем нагружении силикатных систем (т.е. портландцементов) также отмечалось автором в [11, 12]. Так, изменяя положение под нагрузкой, в опытах с портландцементными композитами стало возможным повышение прочности на изгиб от 16 до 25% (см. табл. 3, 4). Говоря о пределе прочности при сжатии, различия между нагруженными и контрольными здесь оказались менее существенными (4,6%), а с поворотом граней – произошло даже уменьшение  $R_{сж}$  на 12,5%.

Для оценки влияния минеральных добавок на прочность при изгибе, доля которых в производстве цементных композитов с каждым годом растет, в цементно-песчаных смесях состава Ц:П:В=1:1:0,4 10%, 15 и 20% цемента заменялось микрокремнеземом МКУ-85. Образцы-кубы с ребром 70мм через сутки с момента формования загружались усилием  $0,1 R_{сж}$  ( $R_{сж}$  определялось по результатам испытаний трех образцов) и выдерживались под нагрузкой в течение 24 часов. Далее проходили испытания на растяжение при раскалывании по ГОСТ 10180 при различном положении нагруженных образцов (вдоль и перпендикулярно направлению кратковременной нагрузки). Результаты испытаний, а также построение кривых аппроксимации показаны на рис. 2.

С увеличением содержания минеральной добавки происходит снижение прочности в нагруженных образцах, причем наиболее чувствительными к нему оказались образцы, раскалываемые в направлении усилия предварительного сжатия. При содержании микрокремнезема 20% от массы вяжущего падение прочности в сравнении с контрольными составило 31%. Потеря прочности в образцах, раскалываемых с поворотом плоскости на  $90^0$ , была меньше ( $\Delta_R=15,1\%$ ), что может объясняться отмечаемой выше

---

разницей в прочности при изменении положении образца при испытании (табл. 3, 4).

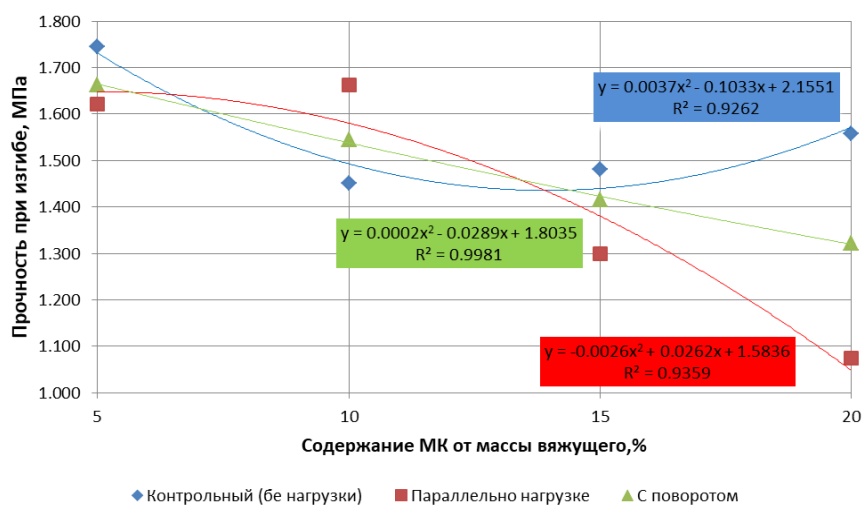


Рис. 2 - Изменение прочности при изгибе от содержания микрокремнезема

Снижение прироста прочности в нагруженных образцах может объясняться уменьшением «реакционноспособного вяжущего» (портландцемента), который, вероятно, деформируется под нагрузкой с упрочнением. Линия тренда прочности контрольного образца имеет спад в области от 10 до 15%, а затем вновь возрастает, что может быть связано с более плотным наполнением цементной матрицы и повышением прочности. При раннем нагружении происходит деформация ползучести, которая может вызывать касательные напряжения при сближении слоев геля CSH, сдвиги его частиц, а также изменение пористости и диффузию влаги, особенно на ранних этапах твердения. Снижение прироста прочности со снижением содержания вяжущего может указывать на пропорциональную зависимость «ΔR-количество цемента». Данный рецептурный фактор должен быть исследован дополнительно.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- Установлено влияние на прочностные показатели при изгибе ориентации образцов под нагрузкой;

- В процессе обработки результатов отмечен рост  $R_{изг}$  в плоскости, перпендикулярной действующей нагрузке;
- Предел прочности на сжатие при изменении ориентации образцов меняется незначительно (отличие составило не более 4,6%);
- При замене части цемента активной минеральной добавкой эффект прироста прочностных показателей уменьшается, а влияние ориентации образца в этом случае становится менее значительным.

### Литература:

1. Саталкин А.В., Сенченко Б. А. Раннее загрузке бетона и железобетона в мостостроении. М.: Автотрансиздат, 1956. 216 с.
  2. Мамонтов Ю. А., Мамыркулов М. И. Совершенствование технологии предварительно напряженного железобетона // Технологии бетонов. 2008. №7. С. 58 – 57.
  3. Васильев А. П., Матков Н. Г., Мурашкин Г. В., Бутенко С. А., Афанасьев И. В. Колонны из бетона, твердеющего под давлением // Бетон и железобетон. 1983. -№11. С. 11 – 12.
  4. Шукенов И. И., Чалабаев Б. М., Еркинбеков А. Е. Стенд для ступенчатого отпуска предварительных напряжений в процессе тепловой обработки при производстве железобетонных конструкций // Технологии бетонов. 2009. №2. С. 39 – 40.
  5. Абрамян С.Г., Илиев А.Б., Липатова С.И. Современные строительные аддитивные технологии. Часть 2 // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4748/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4748/).
  6. Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф., Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №12 (63). С.71-96.
-

7. Shatornaya A.M., Chislova M.M., Drozdetskaya M.A., Ptuhina I.S.(2017) Efficiency of 3D printers in Civil Engineering. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 9(60). Pp. 22-30.
  8. Мухаметрахимов Р. Х., Вахитов И. М. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D – принтера // Известия КГАСУ. 2017. №4 (42). С. 350 – 359.
  9. Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V. (2018) 3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach. Construction and building materials. 2018. V. 165. Pp. 218 – 231.
  10. Герасимова В.О., Любин Н.С., Петрова В.С. Технология 3D-печати в строительстве и архитектуре // Инженерный вестник Дона. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5737/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5737/).
  11. Galkin Yu., Udodov. S. (2018) Bending strength and phase composition of cement stone, subjected to loading at an early stage. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. doi.org/10.1051/matecconf/201819303031;
  12. Galkin Yu.Yu., Udodov S.A., Vasil'eva L.V. (2017). The phase composition and properties of aluminate cements after early loading. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7. pp. 114–122. doi: 10.18720/MCE.75.11.
  13. Максимова И. Н., Акчурин Т. К., Макридин Н. И., Тараканов О. В, Тамбовцева Е. А. К вопросу о корреляции усадки и прочности бетонов // Интернет – вестник ВолГАСУ. 2015. вып. 3 (39). Дата обращения 12.02.2018.
  14. Кириллов А. П., Багрий Э. Я., Завялов В. Н. Ползучесть бетона в условиях двухосного сжатия // Бетон и железобетон. 1990. №11. С. 13 – 14.
  15. Александровский С.В., Багрий В.Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях. М.: Стройиздат, 1970. С. 6-12.
  16. Гончаров Е.Е. Моделирование ползучести бетона в дифференциальной форме с использованием реологических моделей // Технологии бетонов, 2014. №11. С.53-55.
-

## References

1. Satalkin A.V., Senchenko B. A. Rannee zagruzhenie betona i zhelezobetona v mostostroenii [Early loading of concrete and reinforced concrete in bridge construction]. M.: Avtotransizdat, 1956. 216 p.
2. Mamontov Yu. A., Mamyrkulov M.I. Tekhnologii betonov. 2008. №7. pp. 58 - 57.
3. Vasilyev A.P., Matkov N.G., Murashkin G.V., Butenko S.A., Afanasyev I.V. Beton i zhelezobeton. 1983. №11. pp. 11 - 12.
4. Shukenov I.I., Chalabaev B.M., Erkinbekov A.E. Tekhnologii betonov. 2009. №2. pp. 39 - 40.
5. Abramyan S.G., Iliev A.B., Lipatova S.I. Inzenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4748/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4748/).
6. Demidenko A.K., Kulibaba A.V., Ivanov M.F. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2017. №12 (63). pp.71-96.
7. Shatornaya A.M., Chislova M.M., Drozdetskaya M.A., Ptuhina I.S. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 9 (60). pp. 22-30.
8. Mukhametrakhimov R. Kh., Vakhitov I. M. Izvestiya KGASU. 2017. №4 (42). pp. 350 - 359.
9. Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V. Construction and building materials. 2018. V. 165. pp. 218-231.
10. Gerasimova V.O., Lyubin N.S., Petrova V.S. Inzenernyj vestnik Dona. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5737/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5737/).
11. Galkin Yu., Udodov. S. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. doi.org/10.1051/mateccconf/201819303031;
12. Galkin Yu.Yu., Udodov S.A., Vasil'eva L.V. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7. pp. 114–122. doi: 10.18720 / MCE.75.11.





13. Maksimova I. N., Akchurin T. K., Makridin N. I., Tarakanov O. V., Tambovtseva E. A. Internet – vestnik VolGASU. 2015. vol. 3 (39). application date 12.02.2018.
14. Kirillov A. P., Bagriy E. Ya., Zavyalov V. N. Beton i zhelezobeton. 1990. №11. pp. 13 - 14.
15. Aleksandrovskiy S.V., Bagriy V.Ya. Polzuchest' betona pri periodicheskikh vozdeystviyakh [Concrete creep with occasional impacts]. М .: stroiizdat, 1970. pp. 6-12.
16. Goncharov E.E. Tekhnologii betonov. 2014. №11. pp.53-55.