УДК 691.54

© Ю. Ю. Галкин, аспирант
© С. А. Удодов, канд. техн. наук, доцент
(Кубанский государственный технологический университет)
© Л. В. Васильева, канд. хим. наук
(Кубанский государственный университет)
© В. Р. Смирнов, инженер
(Кубанский государственный технологический университет)
E-mail: tcmii@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-98-106

© Yu. Yu. Galkin, post-graduate student
© S. A. Udodov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Kuban State Technological University)
© L. V. Vasilyeva, PhD in Sci. Chem.
(Kuban State University)
© V. R. Smirnov, engineer
(Kuban State Technological University)
E-mail: tcmii@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ РАННЕМ НАГРУЖЕНИИ (часть 2)

CHANGE IN THE PROPERTIES OF CEMENT STONE AT EARLY LOADING (Part 2)

Изучено влияние возраста цементного камня к моменту его раннего нагружения на изменение прочности при изгибе и сжатии в сравнении с ненагруженным. В качестве вяжущего применены алюминат-кальциевые цементы с различным содержанием Al_2O_3 . Экспериментальные данные показали прирост прочности на растяжение при изгибе в нагруженных образцах, а полученные графики — уменьшение ее значения с ростом возраста. Приведены уравнения регрессии «возраст образцов к моменту нагружения — прирост прочности при сжатии и изгибе», выполнена проверка гипотезы об их адекватности.

Ключевые слова: раннее нагружение, возраст к моменту нагружения, глиноземистый цемент, высокоглиноземистый цемент, прочность на растяжение при изгибе, прирост прочности.

Сокращения: С — CaO; А — Al_2O_3 ; Н — H_2O .

The article presents the study results analyzing the influence of the cement stone age at the moment of its early loading on the change in strength at bending and compression in comparison with the unloaded cement stone. As a binder, aluminum alumina cements with variable content of Al_2O_3 are used. Experimental data have shown an increase in the tensile strength at bending in loaded samples, and the resulting graphs have shown a decrease in its value with increasing age. Regression equations «age of samples at the moment of loading — the increase in strength at compression and bending» are given, and the hypothesis of their adequacy has been checked.

Keywords: early loading, age at the time of loading, alumina cement, high-alumina cement, tensile strength at bending, strength increase.

Notation: C — CaO; A — Al_2O_3 ; H — H_2O .

Введение

Ускорение темпов строительства зданий и объектов транспортной инфраструктуры зачастую приводит к передаче нагрузки еще до достижения материалом конструкции проектного возраста. Под действием нагрузки, особен-

но в раннем возрасте, помимо упругих деформаций в нем проявляются и неупругие деформации ползучести, существенно влияющие на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций [1]. Длительные деформации имеют сложную природу, которая до

сих пор полностью не изучена [2]. Они являются неотъемлемой частью, следствием раннего нагружения. Описанный еще в 50-е годы прошлого столетия А. В. Саталкиным метод раннего нагружения при строительстве мостов [3] показал свою высокую эффективность, а механизм повышения прочностных характеристик объяснялся тогда уплотнением структуры под нагрузкой. В этом ключе ползучесть, вызывая постепенное накопление пластических деформаций, повышает границу микротрещинообразования и замедляет развитие трещин перед разрушением, что приводит к выравниванию напряженного состояния и синхронизации разрушения бетонных участков разной плотности [4]. Следовательно, условия, при которых происходит нагружение (возраст твердения, длительность и величина нагрузки, прочность материала к моменту передачи нагрузки), оказывают влияние на величину ползучести (что согласуется с обзором [5]), а мера ползучести, в свою очередь, может быть использована для оценки упрочнения, вызываемого предварительным обжатием в раннем возрасте.

Предельная мера ползучести и интенсивность нарастания удельных деформаций во времени под действием постоянной статической нагрузки тем меньше, чем больше степень гидратации цемента к моменту загрузки образцов. Степень гидратации цемента при прочих равных условиях тем выше, чем больше возраст бетона к моменту приложения статической нагрузки [6]. Следовательно, с увеличением возраста бетона к моменту загрузки предельная мера ползучести и интенсивность деформаций ползучести в начальный период времени должны соответственно уменьшаться. Это справедливо и для бетонов нового поколения [7].

Указанные явления А. В. Саталкин [8] объясняет тем, что, во-первых, в бетоне молодого возраста происходит более интенсивное снижение уровня напряжений, и отсюда более интенсивное замедление нарастания деформаций ползучести. Во-вторых, при напряжениях, соответствующих линейной ползучести, происходит уплотнение молодого бетона, которое не только уменьшает его ползучесть, но и повышает прочность. Эффект упрочнения тем больше, чем выше уплотнение. Если длительная нагрузка приводит к значи-

тельному развитию микротрещин, к нарушению сцепления цементного камня с заполнителями, то положительный эффект уплотнения снижается [9]. Метод раннего нагружения бетона [3] был развит в работах [10–11 и мн. др.]. Воздействие на бетон сжимающей нагрузки, приложенной в разном возрасте, не ведет к значительной потере прочности и уменьшению модуля упругости, а, напротив, может значительно повысить их [9, 12–13].

Обжатие бетона в обоймах и замкнутом пространстве вызывает рост прочности бетона и его эксплуатационных качеств, что дает возможность прогнозировать и меньшую ползучесть [14–15]. Эффект обжатия является актуальным при разработке рецептур бетонов с двухстадийным расширением [16–17].

В структурах алюминаткальциевых цементов со временем кристаллизация метастабильных C_2AH_8 и C_3AH_6 приводит к превращению их в термодинамически стабильный кубический C_3AH_6 . При этом высвобождается некоторое количество воды в матрице, вызывая увеличение пористости и снижение прочности, что ограничивает область применения таких цементов [18].

По данным работ авторов [19–20], раннее нагружение может влиять на состав новообразований портландцементного камня, что влечет за собой закономерные изменения прочностных характеристик. Целью настоящей работы был анализ влияния изменения возраста нагружения на предел прочности на растяжение при изгибе и сжатии после выдерживания под нагрузкой для различных групп алюминаткальциевых цементов, а также математическая обработка экспериментальных данных и вывод уравнений приближенной регрессии.

Методика экспериментальных работ

Цель определила следующие принципы проведения экспериментальных работ:

- применение вяжущего, отобранного с одной партии;
- водоцементное отношение для цементных паст принималось константой опыта;
- использование для каждого опыта образцов единого размера;
- определение прочностных показателей по ГОСТ 310.4;

- условия выдержки образцов под нагрузкой и контрольных, к которым нагрузка не была приложена, принимались идентичными;

- усилие нагружения, высчитываемое в процентном отношении от разрушающего для цементного камня к моменту нагружения, выбрано постоянным.

В опытах использовался глиноземистый цемент ГЦ-50 и высокоглиноземистый цемент ВГЦ II-35 производства Пашийского цементно-металлургического завода. Химический и минералогический состав приводятся в табл. 1.

В соответствии с требованиями ГОСТ 969 марочная прочность для глиноземистого цемента достигается обычно уже на третьи сутки. Диапазон значений возраста камня к моменту нагружения для двух исследуемых цементов приведен в табл. 2. Для учета возможного влияния отмеченных выше процессов перекристаллизации на поздних этапах твердения, образцы нагружались, помимо первых трех суток, в возрасте 5, 7 и 14 суток.

Для испытаний на прочность цементного камня на ГЦ-50 после раннего нагружения применялись образцы-призмы 40×40×160 мм. Водоцементное отношение равнялось 0,25, при этом консистенция теста соответствовала тесту нормальной густоты. Величина нагрузки составляла 30 % от прочности к моменту нагружения. Продолжительность выдерживания под нагрузкой составляла семь суток.

Результаты и обсуждение экспериментальных работ

Сравнение прочностных показателей при сжатии и изгибе приведено на рис. 3–4. Каждая точка прочности на изгиб соответствовала среднему арифметическому, рассчитанному по испытанию трех призм, а прочности на сжатие — шесть половинок. Гарантированная обеспеченность при статистической обработке принима-

лась 95 %, при этом вычисленный коэффициент вариации значений прочности при испытании серий образцов не превышал 5 %.

По диаграммам (рис. 1), видно, что влияние нагрузки в раннем возрасте на предел прочности при сжатии образцов незначительно. Так, диапазон различия значений составил от 0,5 % (опыт № 1) до 10,4 % (опыт № 30). Вероятно, это связано с релаксацией напряжений при протекании ползучести цементного камня.

Прочность на растяжение при изгибе (рис. 2) при нагружении в возрасте первых 48 часов после затворения (опыты № 1–7) демонстрирует рост до 65,8 % (опыт № 5). Отличие в показателях $R_{изг}$ между контрольной и нагруженной серией образцов в возрасте испытаний «7 + 7 = 14 суток» (опыты № 21–25) и «14 + 7 = 21 суток» (опыты № 26–30) находится в диапазоне от 2,63 до 6,3 % и от 2,5 до 6,7 % соответственно.

Из построенных графиков изменения прироста средних арифметических значений прочности в каждом возрасте нагружения (рис. 3), видно, что раннее нагружение оказывает влияние на $R_{изг}$ в большей степени, чем на $R_{сж}$. Прирост в процентном отношении показателей изгиба выше, чем полученных данных по $R_{сж}$. Уже в первые сутки он составил 33 %.

Кривая изменения прироста прочности при сжатии (на рис. 3 изображена красным цветом) находится в области отрицательных значений, т. е. при раннем нагружении алюминатных систем происходит ее снижение.

По мере старения образцов и увеличения их возраста к моменту нагружения эффективность создания сжимающих напряжений в раннем возрасте снижается (этот факт согласуется с данными работы [19]), что выражается в уменьшении величины прироста прочностных показателей. График прироста прочностных показателей при изгибе с увеличением возраста к моменту нагру-

Таблица 1

Химический и минералогический состав применяемых цементов

Наименование	Химический состав, %							Содержание минералов, %	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	CA	CA ₂
«Пашийский МЦЗ»:									
ГЦ-50	8,3	43	7,5	39,7	0,8	0,4	0,7	78	8
ВГЦ II-35	1,5	70	1	28	1	2	0,05	6	88

Таблица 2

Нумерация опытов в зависимости от возраста нагружения

ГЦ-50		ВГЦ II-35	
Возраст передачи нагрузки, сутки твердения	Номера опыта	Возраст передачи нагрузки, сутки твердения	Номера опыта
1	1–5	1	1–5
2	6–10	2	6–10
3	11–15	3	11–15
5	16–20	5	16–20
7	21–25	–	–
14	26–30	–	–

жения имеет минимум, который лежит в интервале от 7 до 8 суток. В этот период наблюдалось некоторое снижение прочности как на растяжение при изгибе, так и при сжатии (рис. 4). Причиной, вероятно, может быть процесс перекристаллизации гексагональных гидроалюминатов в кубические, который протекает со снижением прочности и увеличением пористости [18], что, вероятно, и отразилось на общей картине изменения прочностных показателей.

Кривая прочности на изгиб хорошо аппроксимируется полиномом 3-й степени с высокой степенью достоверности ($R^2 \geq 0,85$, рис. 3). По-

Рис. 1. Прочность на сжатие образцов в различном возрасте приложения нагрузки (номер опыта — см. табл. 2)

Рис. 2. Прочность на растяжение при изгибе образцов в различном возрасте приложения нагрузки (ГЦ-50, номер опыта — см. табл. 2)

строенная кривая отражает уменьшение прироста прочностных показателей при изгибе с увеличением возраста к моменту нагружения. В результате математической обработки уравнение приближенной регрессии имеет вид:

$$y = -0,0006x^3 + 0,0179x^2 - 0,1703x + 0,48, \quad (1)$$

где x — возраст камня на цементе ГЦ-50 к моменту нагружения; y — прирост прочности на растяжение при изгибе, %.

Осуществим проверку гипотезы об адекватности полученного уравнения для фактора изме-

нения возраста к моменту нагружения по критерию Фишера по формулам [21]

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}; \quad (2)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}; \quad (3)$$

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F_{табл}, \quad (4)$$

где $S_{ад}^2$ — дисперсия адекватности; S_y^2 — дисперсия воспроизводимости; y_i — эксперименталь-

Рис. 3. Изменение прироста прочности (ΔR) в зависимости от возраста нагружения (цемент ГЦ-50, «Пашийский МЦЗ»)

Рис. 4. Прочность на сжатие образцов в различном возрасте приложения нагрузки (номер опыта — см. табл. 2)

ные значения прироста прочности на растяжение при изгибе, %; $\hat{y}_i$ — расчетные значения прироста прочности на растяжение при изгибе, %; n — количество измерений; F — критерий Фишера (для $P = 0,05$ равен 5,25 [21]).

В результате вычислений находим

$$F = \frac{0,001933}{0,018676} = 0,103 \leq 5,25.$$

Условие (4) выполняется, следовательно, гипотезу об адекватности уравнения регрессии (1) можно считать верной.

Диапазон снижения прочности на сжатие в нагруженных образцах изменяется в пределах от 1 до 3 %, что указывает на незначительное влияние раннего нагружения на изменение предела прочности при сжатии алюминатных цемента.

Методика исследований прочностных характеристик после нагружения в раннем возрасте образцов на высокоглиноземистом цементе ($Al_2O_3 \geq 70$ %, см. табл. 1) в части значения нагрузки и ее длительности, а также количества образцов принималась аналогично проведенной для ГЦ-50. Водоцементное отношение составляло 0,25. Диалюминат кальция CA_2 в первые трое суток гидратирует быстро, и в дальнейшем рост прочности замедляется [22], поэтому возраст нагружения выбирался с 1 до 5 суток (табл. 2). Значение коэффициента вариации значений прочности при изгибе и сжатии для каждого опыта не превышало 5 %.

На рис. 4 и 5 представлены сравнительные диаграммы средних значений прочности, полу-

ченных в каждом опыте, при сжатии и изгибе соответственно. Максимальное изменение $R_{сж}$ нагруженных образцов относительно контрольных составляло не более 2 %. Увеличение прочности на растяжение при изгибе, наблюдаемое для образцов на ГЦ-50 после предварительного сжатия в раннем возрасте (рис. 2), имело место и при применении ВГЦ II-35. Область максимальных значений относится к минимальному возрасту к моменту передачи нагрузки — первым двум суткам (опыты № 1–8). Максимальный прирост прочности на растяжение при изгибе среди серий нагруженных образцов в сравнении с контрольными (без нагрузки) отмечался в опыте № 6 ($\Delta R = 23,2$ %).

С увеличением возраста к моменту приложения нагрузки разница $R_{изг}$ между контрольными и нагруженными сокращалась, а на поздних этапах — наблюдалось даже ее уменьшение в образцах с ранним нагружением. На рис. 6 изображена совокупность средних значений разницы прочности (ΔR) между нагруженными и ненагруженными образцами, вычисленных для каждого возраста нагружения по пяти значениям. Линии тренда, построенные к рядам данных, иллюстрируют отмеченную тенденцию к уменьшению прироста прочностных показателей при раннем нагружении с увеличением возраста к моменту приложения нагрузки. Изменения прочности при сжатии на всем диапазоне не превышают 5 % (см. рис. 6).

Рис. 5. Прочность на растяжение при изгибе образцов в различном возрасте приложения нагрузки (ВГЦ II-35, номер опыта — см. табл. 2)

Рис. 6. Изменение прироста прочности (ΔR) в зависимости от возраста нагружения (цемент ВГЦ II-35, «Пашийский МЦЗ»)

Зависимость прироста прочностных показателей при изгибе аппроксимируется в виде полинома. В результате математической обработки уравнение приближенной регрессии имеет следующий вид:

$$y = 0,0157x^2 - 0,1496x + 0,3254, \quad (5)$$

где x — возраст камня на цементе ВГЦ II-35 к моменту нагружения; y — прирост прочности на растяжение при изгибе, %.

В результате вычислений находим (критерий Фишера для $P = 0,05$ равен 9,7):

$$F = \frac{0,00135}{0,01015} = 0,1333 \leq 9,7.$$

Условие (4) выполняется, следовательно, гипотезу об адекватности уравнения регрессии (5) можно считать верной.

Выводы

1. На основе анализа источников можно утверждать, что раннее нагружение цементных систем позволяет повысить скорость затухания ползучести.

2. Раннее нагружение позволяет увеличить прочность на растяжение при изгибе образцов на глиноземистом цементе, причем максимум приращения наблюдается у образцов с минимальным возрастом твердения, в котором прикладывается нагрузка.

3. При переходе к высокоалюминатным цементам ($Al_2O_3 \geq 70\%$) указанная зависимость качественно сохраняется; количественно эффект несколько снижается.

4. Прочность при сжатии после раннего нагружения изменяется незначительно как на алюминатных, так и на высокоалюминатных цементах.

5. Приведены уравнения регрессии зависимости «возраст к моменту нагружения — $\Delta R_{изг}$ », показана их адекватность.

Библиографический список

1. Brooks J. J. Concrete and masonry movements. Oxford: Elsevier. 2015. 599 p.
2. Müller H. S., Eckhardt J.-D., Haist M. New experimental approach to study creep and shrinkage mechanisms of concrete on the nano-scale level // Mechanics and physics of creep, shrinkage and durability mechanics. Proc. of 9th inter. conference. ASCE. 2013. 507 p.
3. Саталкин А. В., Сенченко Б. А. Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. М.: Автотрансиздат, 1956. 216 с.
4. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений. М.: АСВ, 2004. 424 с.

5. Циловани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Мецниереба, 1979. 231 с.
6. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
7. Ромкин Д. С. Экспериментальные и теоретические исследования мер ползучести и усадки высокопрочных бетонов в различном возрасте // Вестник ОСН РААСН. 2009. Вып. 13. С. 88–95.
8. Саталкин А. В. Изменение структуры и свойств цементного камня и бетона при твердении их под нагрузкой // Труды совещания по химии цемента. М.: Госстройиздат, 1956. С. 154–172.
9. Бабич Е. М., Макаренко Л. П. Экспериментальные исследования изменения модуля упругости бетонных образцов при различной интенсивности сжимающих нагрузок // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1966. № 7. С. 29–30.
10. Байбурун А. Х. Технология ускоренного возведения монолитных конструкций в зимних условиях // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2009. № 2. С. 72–73.
11. Головнев С. Г. Раннее нагружение уложенного в зимнее время бетона // Бетон и железобетон. 1985. № 12. С. 12–14.
12. Коркишко А. Н. Прочность бетона при постепенном нагружении // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 10. С. 75–78.
13. Иноземцев Ю. П., Варламов В. П., Будникова П. П. Деформационное упрочнение бетонов. Механизм явления и кинетика гидратообразования // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 10. С. 53–55.
14. Кубанейшвили А. С., Пирадов А. Б., Юртин А. М. Физико-механические свойства бетона, твердеющего под давлением в замкнутом пространстве // Бетон и железобетон. 2004. № 5. С. 11–13.
15. Гамбаров Г. А., Мартиросов Г. М. Прочность бетона в напряженной обойме при длительном нагружении // Бетон и железобетон. 1975. № 6. С. 30–31.
16. Потапова Ю. И. Оптимизация состава бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Строительство — 2015»: Современные проблемы строительства. Ростовский гос. строит. ун-т, Союз строителей южного федерального округа, Ассоциация строителей Дона. 2015. С. 525–527.
17. Жильникова Т. Н., Корянова Ю. И., Несветаев Г. В. Интегральные показатели влияния рецептурно-технологических факторов на структурообразование цементного камня бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т. 43. № 4. С. 153–166.
18. Han B., Wang P., Ke C., Yan W., Wei Y., Li N. Hydration behavior of spinel containing high alumina cement from high titania blast furnace slag // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 79. Pp. 257–264. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.019>.
19. Галкин Ю. Ю., Удодов С. А., Васильева Л. В. Изменение свойств цементного камня при раннем нагружении (часть 1) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 131–138.
20. Галкин Ю. Ю., Удодов С. А. Фазовый анализ структуры цементного камня, изолированного при его раннем нагружении // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. № 1. URL: <https://t-s.today/PDF/21SAT5118.pdf> (доступ свободный).
21. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.
22. Moon J., Oh J., Balonis M., Glasser F., Clark S. M. Pressure induced reactions amongst calcium aluminate hydrate phases // Cement and concrete research. 2011. Vol. 41. Pp. 571–578.

References

1. Brooks J. J. *Concrete and masonry movements*. Oxford, Elsevier Publ., 2015, 599 p.
2. Müller H. S., Eckhardt J.-D., Haist M. New experimental approach to study creep and shrinkage mechanisms of concrete on the nano-scale level. Mechanics and physics of creep, shrinkage and durability mechanics. *Proc. of the 9-th Int. conference*. ASCE, 2013, 507 p.
3. Satalkin A.V., Senchenko B.A. *Rannee nagruzhenie betona i zhelezobetona v mostostroenii* [Early loading of concrete and reinforced concrete in bridge construction]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1956, 216 p.
4. Puhonto L. M. *Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstrukcij inzhenernykh sooruzhenij* [Durability of reinforced concrete structures of engineering structures]. Moscow, ASV Publ., 2004, 424 p.
5. Cilosani Z. N. *Usadka i polzuchest' betona* [Shrinkage and creep of concrete]. Tbilisi, Mecniereba Publ., 1979, 231 p.
6. Sheykin A. E., Chehovskiy Yu.V., Brusser M. I. *Struktura i svojstva cementnykh betonov* [Structure and properties of cement concretes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 344 p.
7. Romkin D. S. *Ehksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya mer polzuchesti i usadki vysokoproschnykh betonov v razlichnom vozraste* [Experimental and theoretical studies of measures of creep and shrinkage of high-strength concrete at various ages]. *Vestnik OSN RAASN – Bulletin of OSN RAASN*, 2009, vol. 13, pp. 88–95.

8. Satalkin A. V. *Izmenenie struktury i svoystv tsementnogo kamnya i betona pri tverdenii ikh pod nagruzkoy* [Change in the structure and properties of cement stone and concrete when hardening them under load]. *Trudy soveshchaniya po khimii tsementa* [Proc. of workshop on cement chemistry]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956, pp. 154–172.
9. Babich E. M., Makarenko L. P. *Ehksperimental'nye issledovaniya izmeneniya modulya uprugosti betonnykh obraztsov pri razlichnoy intensivnosti szhimayushchikh nagruzok* [Experimental studies of changes in the modulus of elasticity of concrete samples at different intensities of compressive loads]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* – *News of higher schools. Construction and architecture*, 1966, no. 7, pp. 29–30.
10. Bayburin A. Kh. *Tekhnologiya uskorenogo vozvedeniya monolitnykh konstruktsey v zimnikh usloviyakh* [Technology of accelerated erection of monolithic structures in winter conditions]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* – *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2009, no. 2, pp. 72–73.
11. Golovnev S. G. *Ranee nagruzhenie ulozhennogo v zimnee vremya betona* [Early loading of the concrete laid in winter]. *Beton i zhelezobeton* – *concrete and reinforced concrete*, 1985, no. 12, pp. 12–14.
12. Korkishko A. N. *Prochnost' betona pri postepennoy nagruzhennii* [Strength of concrete with gradual loading]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* – *News of higher schools. Construction and architecture*, 1980, no. 10, pp. 75–78.
13. Inozemtsev Yu. P., Varlamov V. P., Budnikova P. P. *Deformatsionnoe uprochnenie betonov. Mekhanizm yavleniya i kinetika gidratoobrazovaniya* [Deformation hardening of concrete. Mechanism of the phenomenon and kinetics of hydrate formation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* – *News of higher schools. Construction and architecture*, 1989, no. 10, pp. 53–55.
14. Kubaneyshvili A. S., Piradov A. B., Yuryatin A. M. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva betona, tverdeyushchego pod davleniem v zamknutom prostranstve* [Physical and mechanical properties of concrete hardening under pressure in confined space]. *Beton i zhelezobeton* – *concrete and reinforced concrete*, 2004, no. 5, pp. 11–13.
15. Gambarov G. A., Martirosov G. M. *Prochnost' betona v napryazhennoy oboyme pri dlitel'nom zagruzhennii* [Strength of concrete in a tight cage with a long load]. *Beton i zhelezobeton* – *concrete and reinforced concrete*, 1975, no. 6, pp. 30–31.
16. Potapova Yu. I. *Optimizatsiya sostava betonov dlya inektirovaniya s dvukhstadiynym rasshireniem* [Optimization of concrete composition for injection with two-stage expansion]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Stroitel'stvo — 2015»: Sovremennyye problemy stroitel'stva* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. "Construction-2015": Modern problems of construction]. Rostov State Construction University. Union of builders of the Southern Federal region, Association of builders of the Don Publ., 2015, pp. 525–527.
17. Zhil'nikova T. N., Koryanova Yu. I., Nesvetaev G. V. *Integral'nye pokazateli vliyaniya retsepturno-tekhnologicheskikh faktorov na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya betonov dlya inektirovaniya s dvukhstadiynym rasshireniem* [Integral indicators of the influence of prescription and technological factors on the formation of cement concrete cement for injection with a two-stage expansion] *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* – *Bulletin of Dagestan state technical University. Technical sciences*, 2016, vol. 43, no. 4, pp. 153–166.
18. Han B., et al. Hydration behavior of spinel containing high alumina cement from high titania blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 2016, vol. 79, pp. 257–264. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.019>.
19. Galkin Yu. Yu., Udodov S. A., Vasil'eva L. V. *Izmenenie svoystv tsementnogo kamnya pri rannem nagruzhennii (Chast' 1)* [Change in the properties of cement stone at early loading (Part 1)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* – *Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 131–138.
20. Galkin Yu. Yu., Udodov S. A. *Fazovyy analiz struktury tsementnogo kamnya, izolirovannogo pri ego rannem nagruzhennii* [Phase analysis of the structure of cement stone isolated at its early loading]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»* – *Internet-journal "Transport construction"*, 2018, no. 1. Available at: <https://t-s.today/PDF/21SAT5118.pdf>.
21. Ahnazarova S. L., Kafarov V. V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii* [Methods for optimizing the experiment in chemical technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 327 p.
22. Moon J., Oh J., Balonis M., Glasser F., Clark S. M. Pressure induced reactions amongst calcium aluminate hydrate phases. *Cement and concrete research*, 2011, vol. 41, pp. 571–578.