

УДК 666.94.017:536.712:620.18

С. В. КОРОБКОВ, К. А. ПЬЯНКОВА, Д. Д. ВЧЕРАШНИЙ

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

Аннотация. В приведённом ниже исследовании были получены результаты механических свойств образцов цементного камня, твердеющих в условиях градиентов температур. Целью данных исследований являлось экспериментальное изучение влияния градиентов температур ($T = +60 - (-20) \text{ }^\circ\text{C}$) на механические свойства твердеющего цементного раствора с водоцементным отношением $V/C = 0,26$. В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что градиент температур оказывает весомое влияние на твердение цементных образцов. Набор прочности цементных образцов-кубиков для разных точек испытания происходит с разной интенсивностью. Также заметим, что увеличение сроков прогрева до 8 часов даёт значительный рост и последующие накопления прочностных показателей образцов, причем при увеличении времени до 10 часов наблюдается максимальный рост прочности. Ещё наблюдается тенденция к немонотонному накоплению прочности некоторых образцов. Ожидается, что с дальнейшим ростом времени твердения тенденция немонотонного упрочнения проявится в большей степени. Можно полагать, что немонотонное упрочнение обусловлено эффектами теплопереноса. Изучение данных процессов поможет лучше понять степень негативного воздействия на бетонные конструкции градиента температур и в последующем разработать меры увеличения их срока эксплуатации.

Ключевые слова: градиент температур, цементный камень, теплоперенос, механические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

При бетонировании несущих конструкций здания в зимнее время применяются различные методы бетонирования, но ни один из этих методов не учитывает градиент температур в локальных областях конструкции, который оказывает существенное влияние на механизмы твердения бетона [1–2]. В связи с тем, что при выполнении бетонных работ на строительной площадке в зимнее время процесс выдерживания смеси отсутствует, в результате этого после укладки бетонной смеси возникают градиенты температур, которые в свою очередь запускают процесс миграции влаги в конструкции. Влага переносится от более нагретых зон к более холодным. Данный процесс ведет к неблагоприятным последствиям, таким как переувлажнение зон конструкции с последующим ухудшением механических свойств. Наиболее опасным является неравномерность температурных полей, наблюдаемые по всему сечению конструкции, и данное явление пагубно влияет на набор прочности бетона [3–4]. Факт в том, что даже если показатель температурного градиента не велик, он все же изменяет физико-механические свойства бетона, такие как: пористость, влажность, прочность и др. [5–6]. В бетонах основным связующим является цементный камень на основе портландцемента. Структурообразование цементного камня на начальных стадиях твердения – это сложный многостадийный процесс. Представляет определенный интерес изучение закономерностей твердения цементного раствора с разным водоцементным отношением (V/C) в условиях градиентов температур.

Целью данных исследований являлось экспериментальное изучение влияния градиентов температур ($T = +60 - (-20) \text{ }^\circ\text{C}$) на механические свойства твердеющего цементного раствора с водоцементным отношением $V/C = 0,26$.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для более детального изучения изменения механических свойств бетона под воздействием температурного градиента был поставлен эксперимент на установке, позволяющей контролировать температурные градиенты [7]. Данная установка дает нам возможность установить и поддерживать в течение определенного времени температурное поле, действующее на горизонтально расположенный образец.

Экспериментальная установка включает в себя камеру с отрицательной температурой, приспособление для установки образцов, деревянную опалубку, источник нагрева, контрольно-измерительные приборы (рис. 1).

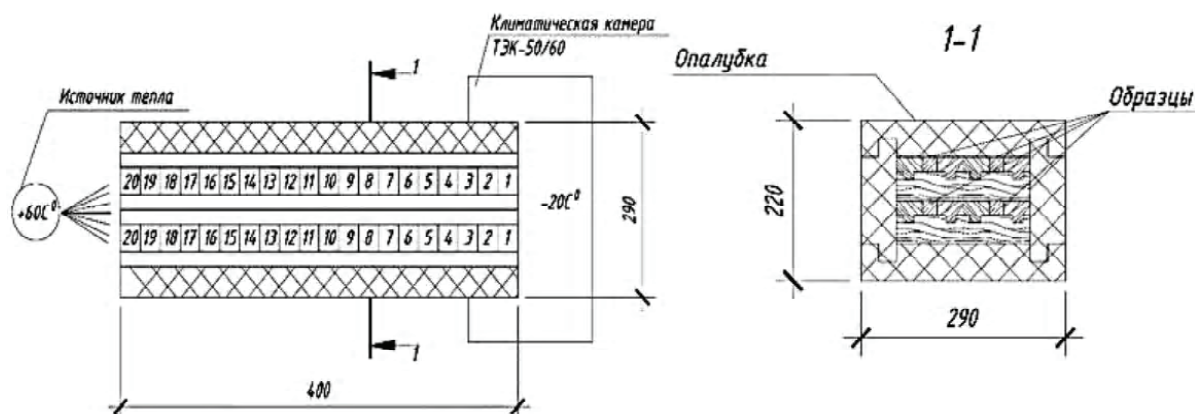


Рисунок 1 – Схема установки регулируемых температурных градиентов с нумерацией цементных кубиков в образце-бруске: 1÷20 – номера образцов.

Материалом исследования выступает цементный камень, изготовленный из портландцемента без минеральных добавок марки ЦЕМ I 42,5Н Топкинского цементного завода (Кемеровская область, г. Топки).

Процедура изготовления цементного теста проходила в лаборатории кафедры ТСП ТГАСУ в следующей последовательности.

1. Взвешенное количество вяжущего в объеме 800 г погружали в заранее увлажненную чашу в виде сферы. Для дозирования воды в чаше со смесью устраивалось углубление, в нее выливали требуемый объем воды, чтобы получить называемое цементное тесто. Данный объем воды заранее определен ($V/Ц = 0,26$, из этого количество воды составляет 208 мл). Далее следует процесс перемешивания в течение 5 минут.

2. Происходит заполнение опалубки цементным тестом с последующим вибрированием на виброплощадке.

3. После образец в опалубке был разделен на 20 равных кубиков размером $20 \times 20 \times 20$ мм с помощью мелкоячеистых сеток с целью сохранения массопереноса водного раствора между образцами в условиях градиентов температур.

4. Полученные заформованные образцы проходили стадию выдержки, которая длилась 4 часа при естественных условиях, то есть при комнатной температуре. После образцы помещались в проектное положение установки по изменению температурных градиентов (рис. 2). Один торец опалубки находится под воздействием источника тепла ($+60$ °С), другой торец опалубки помещен в рабочий объем морозильной камеры на 6 см, тем самым подвергаясь охлаждению с заданным режимом до -20 °С. Таким образом, образцы под номерами 1, 2 и 3 находились при отрицательной температуре.

Далее рост температуры до отметки в $+60$ °С производился в течение 2 часов, после этого образцы выдерживались при постоянной температуре в течение 6, 8 и 10 часов (рис. 3, а–в). При этом замеры температуры проводились через каждый час, и на протяжении этого времени каждый час производились измерения температуры образцов в программе «Конфигуратор М110», которая предназначена для считывания изменения температуры и записи в программу «Microsoft Excel». Обмен между прибором и программой происходит с помощью программного комплекса «Овен». На основе полученных температурных данных были построены графики температурного поля.



Рисунок 2 – Опалубка в проектное положение в установке регулируемых температурных градиентов.

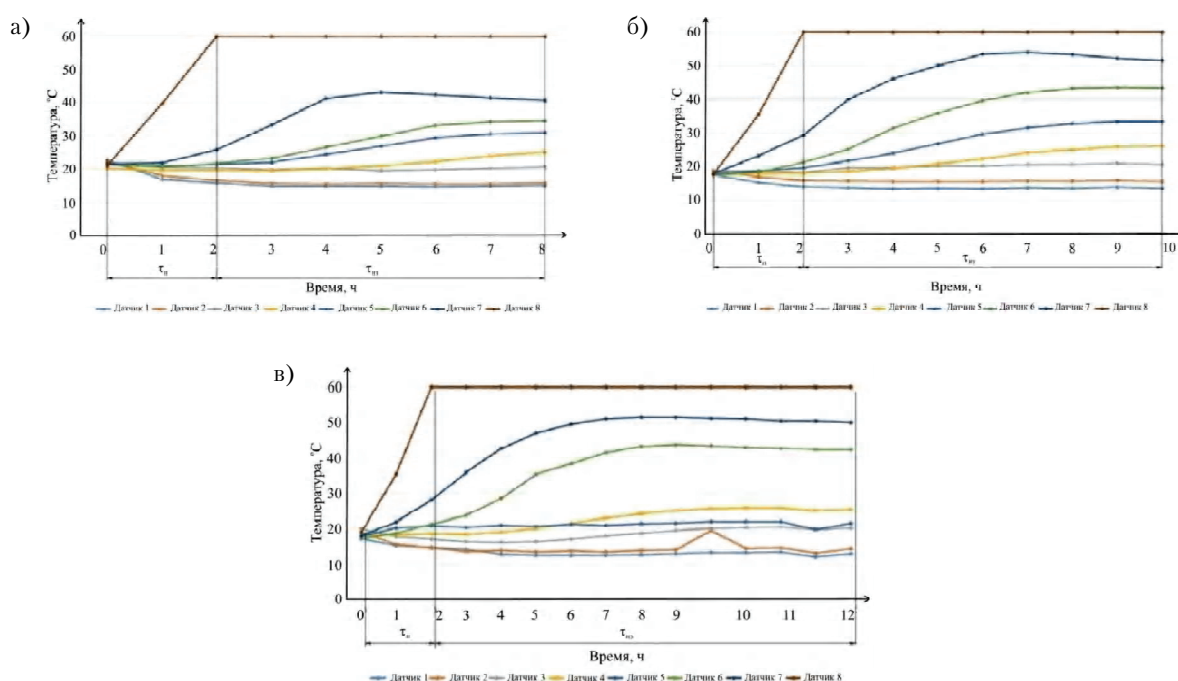


Рисунок 3 – Графики изменения температуры в цементных образцах-кубиках в процессе их выдерживания: а) в течение 6 часов; б) в течение 8 часов; в) в течение 10 часов; τ_p – подъем температуры, $\tau_{из}$ – изотермический прогрев.

По истечении заданного времени выдерживания в условиях градиента температур образцы-кубики извлекались из опалубки, взвешивались и измерялись для определения плотности образцов. Далее образцы подвергались механическим испытаниям для определения прочности, модуля упругости, предела текучести. Испытания проводились с применением испытательной гидравлической системы INSTRON 3382 в «Научно-исследовательском материаловедческом центре коллективного пользования ТГАСУ». Результаты испытаний выводились в программе «Microsoft Excel» для дальнейшей их обработки и построения графиков «напряжение-деформация» ($\sigma - \epsilon$) – рис. 4–6. По составленным в программе графикам «напряжение-деформации» были получены механические свойства цементного камня с В/Ц = 0,26 (табл. 1–3).

Из рис. 4–6 видно, что набор прочности образцов для разных точек испытания происходит с разной интенсивностью. В условиях тепло- и массопереноса наблюдаются различные показатели прочности по длине образца, что подтверждает теоретические предпосылки [8]. Также по графикам можно отследить, что с увеличением времени твердения пластическая область сокращается. К тому же повышение температуры прогрева и увеличение времени прогрева приводит к сокращению начальной переходной области на кривых.

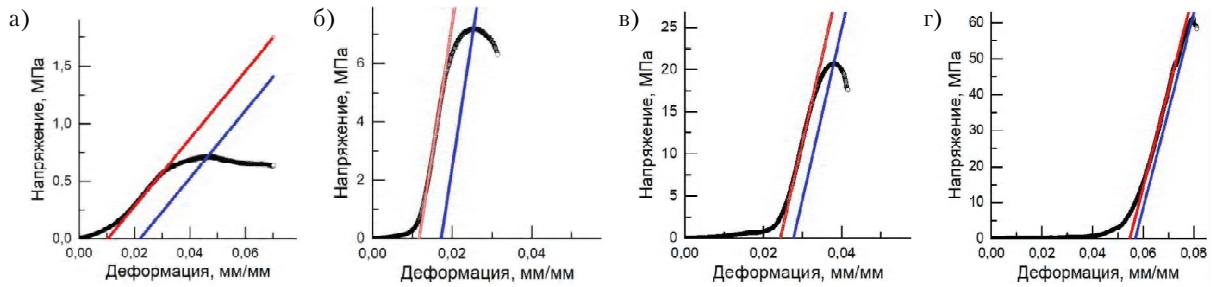


Рисунок 4 – Кривые «напряжение – деформация» после 6 часов изотермического прогрева: а) образец № 1; б) образец № 5; в) образец № 10; г) образец № 20. Красная линия – модуль упругости, синяя – предел прочности.

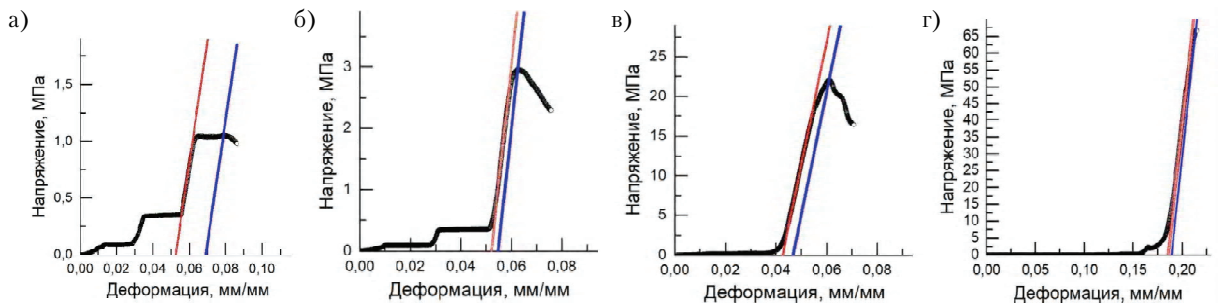


Рисунок 5 – Кривые «напряжение – деформация» после 8 часов изотермического прогрева: а) образец № 1; б) образец № 5; в) образец № 10; г) образец № 20. Красная линия – модуль упругости, синяя – предел прочности.

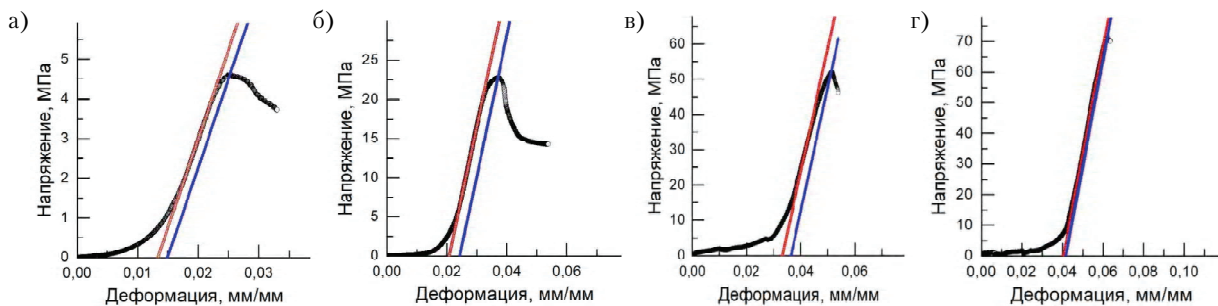


Рисунок 6 – Кривые «напряжение – деформация» после 10 часов изотермического прогрева: а) образец № 1; б) образец № 5; в) образец № 10; г) образец № 20. Красная линия – модуль упругости, синяя – предел прочности.

Результаты полученных данных свидетельствуют о наборе прочности цементного камня при увеличении времени выдерживания в условиях градиента температур. Главной из механических свойств бетона является предел прочности при сжатии. Именно по этому показателю проводились аналитические сравнения. Можно сказать, что повышение температуры прогрева и увеличение сроков прогрева приводит к увеличению прочности. Было установлено, что наибольшее значение прочностные цементного камня наблюдается при его выдерживании в течение 10 часов. Вместе с тем время изотермического твердения оказывает существенное влияние на прочностные свойства бетона в области пластической деформации. На кривых «напряжение-деформации» в конце изотермического твердения предел прочности почти совпадает с пределом текучести.

При выборе требуемого режима прогрева бетона в зимнее время также нужно учитывать изотермическую температуру выдерживания. Так, при температуре ниже $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ прогрев может осуществляться только при применении высокоалюминатных и быстротвердеющих портландцементов [9].

Таблица 1 – Механические свойства цементного камня с В/Ц = 0,26 после 6 часов изотермического прогрева

№ образца	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Предел текучести, МПа
1	0,72	2 278	30	0,49
2	1,25	1 825	133	0,93
3	1,93	2 210	246	1,46
4	3,03	1 835	422	2,48
5	5,03	1 783	480	4,21
6	7,22	2 156	886	5,34
7	9,91	1 813	1 056	7,71
8	14,45	2 401	1 493	10,47
9	20,92	2 528	2 022	15,23
10	30,6	1 775	1 966	20,08
11	22,3	2 363	2 726	24,42
12	21,5	1 887	2 773	31,37
13	22,58	2 596	2 833	38,56
14	23,96	1 834	2 197	45,11
15	24,58	1 836	2 547	42,5
16	25,9	2 099	2 991	44,98
17	27,6	2 175	2 839	41,54
18	28,12	2 333	2 700	51,47
19	29,56	1 897	2 908	45,88
20	33,23	2 531	2 163	20,23

Таблица 2 – Механические свойства цементного камня с В/Ц = 0,26 после 8 часов изотермического прогрева

№ образца	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Предел текучести, МПа
1	0,7	2 697	36,1	0,51
2	0,98	2 670	68	0,72
3	1,07	2 054	90,52	0,92
4	1,4	1 840	108	1,11
5	1,8	1 838	199	1,5
6	2,97	1 885	382	2,5
7	4,45	1 972	420	2,94
8	6,07	1 983	443	4,62
9	9,85	1 784	832	6,59
10	13,08	1 932	1 077	9,44
11	22,19	2 033	1 455	16,61
12	28,4	1 838	1 850	19,2
13	38,21	1 973	1 867	31,31
14	48,83	1 762	2 167	33,52
15	49,5	1 962	2 283	40,73
16	50,65	2 044	2 395	40,73
17	51,86	1 834	2 438	44,48
18	52,9	1 965	2 587	49,45
19	53,78	2 237	2 687	49,74
20	54,3	1 946	2 717	56,23

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что градиент температур оказывает весомое влияние на твердение цементных образцов. Набор прочности цементных образцов-кубиков для разных точек испытания происходит с разной интенсивностью. Также заметим, что увеличение сроков прогрева до 8 часов даёт значительный рост и последующие накопления прочностных показателей образцов, причем при увеличении времени до 10 часов наблюдается максимальный рост прочности. Ещё наблюдается тенденция к немонотонному накоплению прочности некоторых образцов. Ожидается, что с дальнейшим ростом времени твердения тенденция немонотонного упрочнения проявится в большей степени. Можно полагать, что немонотонное упрочнение обусловлено эффектами тепломассопереноса.

Таблица 3 – Механические свойства цементного камня с В/Ц = 0,26 после 10 часов изотермического прогрева

№ образца	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Предел текучести, МПа
1	3,86	2 193	30	0,49
2	4,44	1 907	133	0,93
3	5,94	1 840	246	1,46
4	7,96	1 804	422	2,48
5	13,6	1 889	480	4,21
6	19,1	1 880	886	5,34
7	20,2	1 858	1 056	7,71
8	21,6	1 847	1 493	10,47
9	30,2	1 752	1 966	15,23
10	32,2	2 382	2 022	20,08
11	54,79	2 284	2 163	20,23
12	36	1 769	2 197	24,42
13	37,2	2 441	2 547	31,37
14	41,07	2 338	2 700	38,56
15	45,4	1 767	2 726	41,54
16	49,72	2 299	2 773	42,5
17	56,85	2 268	2 833	44,98
18	60,73	2 368	2 839	45,11
19	61,5	2 345	2 908	45,88
20	63,47	2 368	2 991	51,47

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effects of temperature and temperature gradient on concrete performance at elevated temperatures / Q. X. Le, V.T.N. Dao, J. L. Torero [и др.]. – Текст : непосредственный // *Advances in Structural Engineering*. – 2018. – Volume 21(8). – P. 1223–1233. – DOI: 10.1177/1369433217746347.
2. Numerical Simulation of Temperature Gradients for the Mass Concrete Foundation Slab of Shanghai Tower / Jian Gong, Weijiu Cui, Yong Yuan, Xiaoping Wu. – Текст : непосредственный // *International Journal of High-Rise Buildings*. – 2015. – Volume 4, No 4. – P. 283–290.
3. Study of temperature differential in different types of concrete slabs / G. K. Kamalakara, Dr. Srikanth M. Naik, B. K. Sachinkumar [et al.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Research and Analytical Reviews*. – 2018. – Volume 5, issue 2. – P. 1022–1028.
4. Peizhi, Sun Concepts to enhance specification and inspection of curing effectiveness in concrete pavement design and construction / Sun Peizhi, Dan G. Zollinger. – Текст : непосредственный // *Journal of the Transportation Research Board*. – 2015. – Volume 2504. – P. 124–132.
5. Несветаев, Г. В. Бетоны : учебное пособие / Г. В. Несветаев. – Ростов н/Дону : Феникс, 2013. – 381 с. – Текст : непосредственный.
6. Влияние времени и температуры твердения на структурообразование цементного камня / А. И. Гныря, Ю. А. Абзаев, С. В. Коробков, К. С. Гаусс. – Текст : непосредственный // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2018. – № 2. – С. 171–185.
7. Mechanical properties of cement paste curing at different isothermal conditions / A. I. Gnyrya, Yu. A. Abzaev, S. V. Korobkov and K. S. Gauss. – Текст : непосредственный // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science : The Fifth All-Russian Conference with International Participation POLAR MECHANICS, 9–11 October 2018, Novosibirsk, Russian Federation*. – Novosibirsk : [s. n.], 2018. – Volume 193(012010). – DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012010.
8. Аксенчик, К. В. Исследование тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловой обработке / К. В. Аксенчик. – Текст : непосредственный // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – 2010. – № 4. – С. 63–67.
9. Миронов, С. А. Теория и методы зимнего бетонирования / С. А. Миронов. – Москва : Стройиздат, 1975. – 700 с. – Текст : непосредственный.

Получена 20.04.2022

С. В. КОРОБКОВ, К. А. П'ЯНКОВА, Д. Д. ВЧОРАШНІЙ
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦЕМЕНТНОГО
КАМЕНЮ ЗА УМОВ ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУР

Томський державний архітектурно-будівельний університет, м. Томськ, Росія

Анотація. У наведеному нижче дослідженні отримано результати механічних властивостей зразків цементного каменю, що твердіють за умов градієнтів температур. Метою даних досліджень було експериментальне вивчення впливу градієнтів температур ($T = +60 - (-20) ^\circ\text{C}$) на механічні властивості цементного розчину, що твердне, з водоцементним відношенням $W/C = 0,26$. В результаті проведених експериментів можна зробити висновок, що градієнт температур вагомо впливає на затвердіння цементних зразків. Набір міцності цементних зразків-кубиків для різних точок випробування відбувається з різною інтенсивністю. Також зауважимо, що збільшення термінів прогріву до 8 годин дає значне зростання і подальші накопичення показників міцності зразків, причому при збільшенні часу до 10 годин спостерігається максимальне зростання міцності. Ще спостерігається тенденція до немонотонного нагромадження міцності деяких зразків. Очікується, що з подальшим зростанням часу твердіння тенденція немонотонного зміцнення виявиться більшою мірою. Можна вважати, що немонотонне зміцнення обумовлено ефектами тепломасоперенесення. Вивчення даних процесів допоможе краще зрозуміти ступінь негативного впливу на бетонні конструкції градієнта температур і надалі розробити заходи для збільшення їх терміну експлуатації.

Ключові слова: градієнт температури, цементний камінь, масоперенесення, механічні властивості.

SERGEY KOROBKOV, KSENIA PYANKOVA, DENIS VCHERASHNIY
RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT STONE UNDER
CONDITIONS OF TEMPERATURE GRADIENT

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

Abstract. In the study below, the results of the mechanical properties of cement stone samples hardening under conditions of temperature gradients were obtained. The purpose of these studies was to experimentally study the effect of temperature gradients ($T = +60 - (-20) ^\circ\text{C}$) on the mechanical properties of a hardening cement mortar with a water-cement ratio $W / C = 0.26$. As a result of the experiments, we can conclude that the temperature gradient has a significant effect on the hardening of cement samples. Strengthening of cement samples-cubes for different test points occurs with different intensity. We also note that an increase in the heating time to 8 hours gives a significant increase and subsequent accumulation of the strength characteristics of the samples, and with an increase in time to 10 hours, the maximum increase in strength is observed. There is also a tendency to nonmonotonic strength accumulation of some specimens. It is expected that with a further increase in the hardening time, the trend of non-monotonic hardening will manifest itself to a greater extent. It can be assumed that nonmonotonic hardening is due to the effects of heat and mass transfer. The study of these processes will help to better understand the degree of negative impact on concrete structures of the temperature gradient and subsequently develop measures to increase their service life.

Key words: temperature gradient, cement stone, mass transfer, mechanical properties.

Коробков Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология производства бетонных работ в зимних условиях; аэродинамика и внешний теплообмен моделей зданий и сооружений; тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Пьянкова Ксения Андреевна – магистрант 1 года обучения кафедры технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология производства бетонных работ в зимних условиях, тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Вчерашний Денис Дмитриевич – магистрант 1 года обучения кафедры технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология производства бетонных работ в зимних условиях, тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Коробков Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, м. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология выполнения бетонных работ в зимних условиях; аэродинамика и внешний теплообмен моделей зданий и сооружений; тепло- и массообмен в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Пьянкова Ксения Андреевна – магистрант 1-го года обучения кафедры технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, м. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология выполнения бетонных работ в зимних условиях, тепло- и массообмен в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Вчерашний Денис Дмитриевич – магистрант 1 года обучения кафедры технологии строительного производства Томского государственного архитектурно-строительного университета, м. Томск, Россия. Научные интересы: теория и технология выполнения бетонных работ в зимних условиях, тепло- и массообмен в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Korobkov Sergey – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head Construction Technology at the Construction Department, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia. Scientific interests: theory and technology of concrete work in winter conditions; aerodynamics and external heat transfer of models of buildings and structures; heat and mass transfer in capillary-porous materials, computer simulation.

Pyankova Ksenia – 1st year master's student, Construction Technology at the Construction Department, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia. Scientific interests: theory and technology of concrete work in winter conditions, heat and mass transfer in capillary-porous materials, computer modeling.

Vcherashniy Denis – a 1st year master's student, Construction Technology at the Construction Department, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia. Scientific interests: theory and technology of concrete work in winter conditions, heat and mass transfer in capillary-porous materials, computer modeling.