



ISSN 1993-3495 online

СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2023, ТОМ 19, НОМЕР 2, 71–78

EDN: VNXTJA

УДК 666.94.017:536.712:620.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЕЮЩЕГО ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОГО РАСТВОРА С РАЗЛИЧНЫМ ВОДОЦЕМЕНТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

К. А. Пьянкова¹, Д. Д. Вчерашний², С. В. Коробков³

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
2, пл. Соляная, г. Томск, Российская Федерация, 634003.

E-mail: ¹pankovaka18@gmail.com, ²topworld1337@gmail.com, ³korobkov_1973@mail.ru.

Получена 13 мая 2023; принята 23 мая 2023.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования прочностных характеристик стержня, изготовленного из цементно-песчаной смеси с определенным соотношением воды и цемента ($V/C = 0,4; 0,44; 0,49$ и $0,54$), который затвердевает в условиях температурных градиентов. Целью данного исследования является экспериментальное исследование влияния температурных градиентов на механические свойства затвердевшего цементно-песчаного раствора с изменяющимся соотношением воды и цемента. Исследование показало, что увеличение прочности цементно-песчаных образцов-кубиков различается по интенсивности в течение разных периодов затвердевания и испытаний. Было установлено, что температурные градиенты ($+60... (-20)$) °C оказывают значительное влияние на затвердевание цементно-песчаных образцов-кубиков. После 8 часов твердения наблюдается тенденция к увеличению накопления прочности, начиная с 5-го образца. Можно ожидать, что с дальнейшим временем твердения тенденция к немономонному упрочнению будет более выраженной. Изучение этих процессов поможет лучше понять степень негативного воздействия температурных перепадов на бетонные конструкции и впоследствии разработать меры по увеличению срока их службы.

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДКОГО ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНОГО РОЗЧИНУ З РІЗНИМ ВОДОЦЕМЕНТНИМ ВІДНОШЕННЯМ В УМОВАХ ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУР

К. А. П'янкoвa¹, Д. Д. Вчoрашній², С. В. Кoрoбкoв³

ФДБОУ ВО «Томський державний архітектурно-будівельний університет»,
2, пл. Соляна, м. Томськ, Російська Федерація, 634003.

E-mail: ¹pankovaka18@gmail.com, ²topworld1337@gmail.com, ³korobkov_1973@mail.ru.

Отримана 13 травня 2023; прийнята 23 травня 2023.

Анотація. У статті представлені результати дослідження міцності стрижня, виготовленого з цементно-піщаної суміші з певним співвідношенням води і цементу ($V/C = 0,4; 0,44; 0,49$ і $0,54$), який твердне в умовах температурних градієнтів. Метою даного дослідження є експериментальне дослідження впливу температурних градієнтів на механічні властивості затверділого цементно-піщаного розчину зі змінним співвідношенням води і цементу. Дослідження показало, що збільшення міцності цементно-піщаних зразків-кубиків різняться за інтенсивністю протягом різних періодів затвердіння і випробувань. Було встановлено, що температурні градієнти ($+60... (-20)$) °C мають значний вплив на затвердіння цементно-піщаних зразків-кубиків. Після 8 годин твердіння спостерігається тенденція до збільшення накопичення



міцності, починаючи з 5-го зразка. Можна очікувати, що з подальшим часом твердіння тенденція до немонотонного зміцнення буде більш вираженою. Вивчення цих процесів допоможе краще зрозуміти ступінь негативного впливу температурних перепадів на бетонні конструкції і згодом розробити заходи щодо збільшення терміну їх служби.

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

EXPERIMENTAL STUDIES OF MECHANICAL PROPERTIES OF HARDENING CEMENT-SAND MORTAR WITH DIFFERENT WATER-CEMENT RATIO UNDER TEMPERATURE GRADIENT

Ksenia Pyankova¹, Denis Vcherashniy², Sergey Korobkov³

FSBEI HE «Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering»,

2, pl. Solyanya, Tomsk, Russian Federation, 634003.

E-mail: ¹ pyankovaka18@gmail.com, ² topworld1337@gmail.com, ³ korobkov_1973@mail.ru.

Received 13 May 2023; accepted 23 May 2023.

Abstract. The article presents the results of a study of the strength characteristics of a rod made of a cement-sand mixture with a certain ratio of water and cement ($V/C = 0.4; 0.44; 0.49$ and 0.54), which hardens under temperature gradients. The purpose of this study is an experimental study of the effect of temperature gradients on the mechanical properties of a hardened cement-sand mortar with a changing ratio of water and cement. The study showed that the increase in the strength of cement-sand cube samples varies in intensity during different periods of solidification and testing. It was found that temperature gradients ($+60.. (-20)$) °C have a significant effect on the solidification of cement-sand samples-cubes. After 8 hours of hardening, there is a tendency to increase the accumulation of strength, starting with the 5th sample. It can be expected that with further hardening time, the tendency to non-monotonic hardening will be more pronounced. The study of these processes will help to better understand the degree of negative impact of temperature changes on concrete structures and subsequently develop measures to increase their service life.

Keywords: temperature gradient, cementstone, mass transport.

Формулировка проблемы

Зимой градиенты температур могут значительно повлиять на процессы твердения бетона при возведении несущих элементов здания [1–6]. После укладки бетона, градиенты температуры запускают процесс миграции влаги из более нагретых в охлажденные зоны конструкции, что в конечном итоге может привести к переувлажнению и ухудшению свойств бетона [7]. Трещины, вызванные температурным градиентом, могут привести к потере структурной целостности и сокращению срока эксплуатации монолитных железобетонных конструкций. Хотя показатель температурного градиента в большинстве случаев невелик, активированный им процесс массопереноса может изменить структуру, пористость, влажность, прочность и другие физико-механические свойства бетона. Поэтому важно изучение закономерностей

твердения пескоцементов с разным водоцементным отношением в условиях градиентов температур, чтобы лучше понимать степень негативного воздействия на бетонные конструкции и в дальнейшем разработать меры для увеличения их срока эксплуатации.

Цель статьи

Целью данного исследования является экспериментальное исследование влияния температурных градиентов на механические свойства затвердевшего цементно-песчаного раствора с изменяющимся соотношением воды и цемента.

Основной материал исследования

Для изучения воздействия температурного градиента на механические свойства твердеющего

цементно-песчаного раствора на кафедре ТСП ТГАСУ была проведена серия экспериментов на установке контролируемых температурных градиентов. Установка включает в себя: морозильную камеру, устройства для крепления образцов, опалубку, нагреватель, измерительный комплекс. Это позволило нам автономно создавать и поддерживать неоднородное температурное поле в образце в течение установленного периода времени.

В качестве сырьевых материалов при проведении опытных испытаний был использован портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б Топкинского цементного завода (Кемеровская область, г. Топки), песок Кандинского месторождения фракции 2,0÷2,8 мм (Томская область) и вода. В образцах пескоцемента цементное тесто и инертный песок составляли доли 0,25 и 0,75 соответственно. Детали приготовления смеси описываются в работе [8].

Цементное тесто с инертным наполнителем и указанным В/Ц формовалось в опалубке размерами 70×70×700 мм и подвергалось обработке на вибрационном столе. Предварительно с целью сохранения прямоугольной формы бруски в опалубке упаковывались тонким полиэтиленом (рис. 1). В этом случае не происходило удаления свободной влаги из образцов на начальных этапах твердения.

Для создания образца была использована деревянная опалубка с металлическими пластинами толщиной 5 мм по торцам, имеющая форму прямоугольного бруска размером 70×70×700 мм и заполненная цементно-песчаной смесью. Для сохранения массопереноса водного раствора между образцами в условиях градиентов

температур и сохранения формы перед механическими испытаниями внутри бруска-образца были установлены тонкие водонепроницаемые сетки, разделяющие его на 10 равных кубиков размером 70×70×70 мм.

Перед установкой опалубки с образцами в морозильную камеру их оставляли на 4 часа при комнатной температуре (рис. 1). Затем формы помещали в установку, которая контролировала температурные градиенты (рис. 2). Одна металлическая пластина была подвергнута нагреву (+60 °С), в то время как другая была помещена на 10 см в рабочий объем морозильной камеры и охлаждена до –20 °С в соответствии с заданной программой аппаратного и программного обеспечения установки. На рис. 2, б цифрами отмечены номера образцов последовательно удаленные от холодной грани. Образцы № 1, 2, находятся в морозильной камере при температуре (–20) °С. Для исключения внешнего теплообмена по периметру опалубки установлен утеплитель (пеноплекс).

Подъем температуры до +60 °С осуществлялся в течение 2 часов, после чего образцы выдерживались при постоянной температуре в течение 4, 8 и 12 часов. На протяжении этого времени, каждый час производилось измерение температуры образцов в программном комплексе «Конфигуратор М110», предназначенном для считывания изменения и записи в энергонезависимую память приборов серии Мх110 рабочих параметров, а также создания файла-конфигурации с полученными параметрами для последующего использования. Обмен между прибором и программой происходит по протоколу ОВЕН (рис. 3).

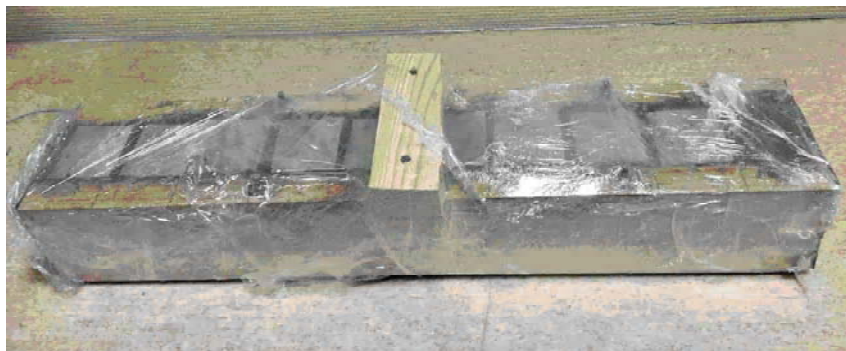


Рисунок 1 – Выдерживание цементно-песчаного образца-бруска.

а)



б)

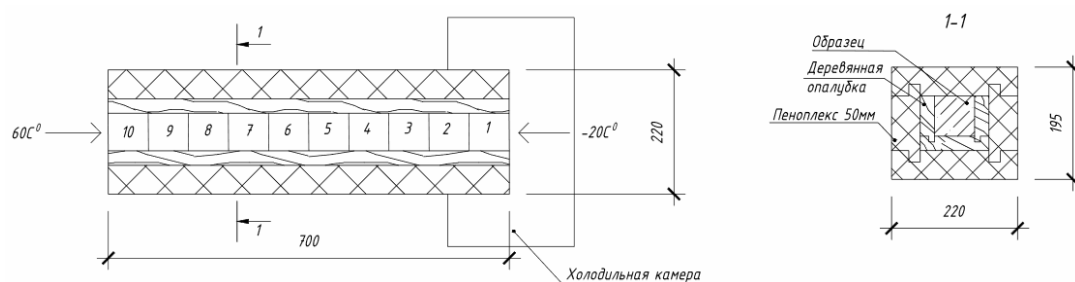


Рисунок 2 – Установка регулируемых температурных градиентов: а) общий вид установки с цементно-песчаным образцом-брусом в деревянной опалубке; б) схема установки с нумерацией цементно-песчаных кубиков в образце-бруске.

По истечении заданного времени выдерживания в условиях градиента температур образцы-кубики извлекались из опалубки (рис. 4) и подвергались механическим испытаниям для определения прочности. Испытания проводились с применением испытательной электрогидравлической

системы УТМ-4500 (рис. 5). Нагрузка прикладывалась вплоть до появления значительных макротрещин на поверхности образцов.

Результаты испытаний приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что набор прочности образцов для разных точек испытания происходит с

а)



б)

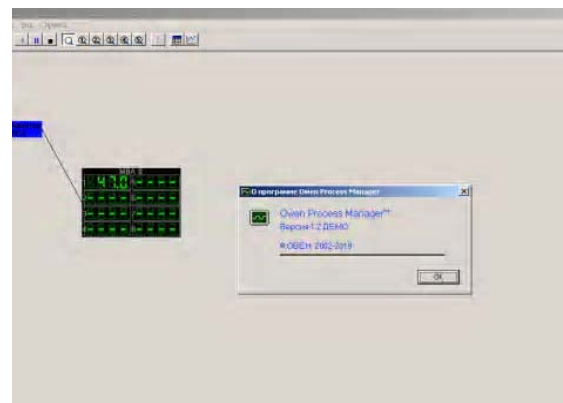


Рисунок 3 – Программный комплекс измерения температуры: а) конфигуратор М110; б) программа «ОВЕН».



Рисунок 4 – Полученные цементно-песчаные образцы-кубики размером 70×70 ×700 мм после их выдерживания в условиях градиента температур.

разной интенсивностью. В условиях тепло- и массопереноса наблюдаются различные показатели прочности по длине образца, что подтверждает теоретические предпосылки [9].

Из рис. 6, а видно, что независимо от времени выдерживания минимальной прочностью обладают образцы-кубики № 1 и № 2, находящиеся в морозильной камере. По мере удаленности от

а)



б)



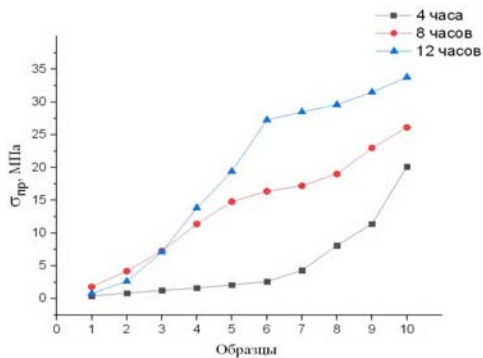
Рисунок 5 – Испытание образцов-кубиков на прочность: а) пресс UTM-4500; б) испытание образцов.

морозильной камеры прочность образцов возрастает. Менее интенсивно набор прочности происходит у образцов, выдержанных в течение 4 часов, при этом интенсификация набора прочности начинается с образца № 7. Увеличение времени твердения до 8–12 часов приводит к существенной интенсификации накопления и росту величины прочности образцов начиная с 3-го образца. При 8 часах твердения наблюдается тенденция к немоноотному накоплению прочности, начиная с образца № 5. С увеличением времени твердения до 12 часов эта тенденция усиливается. Рост прочности при удалении образцов от отрицательной температуры при времени твердения 4 часа составляет 20 раз, при 8

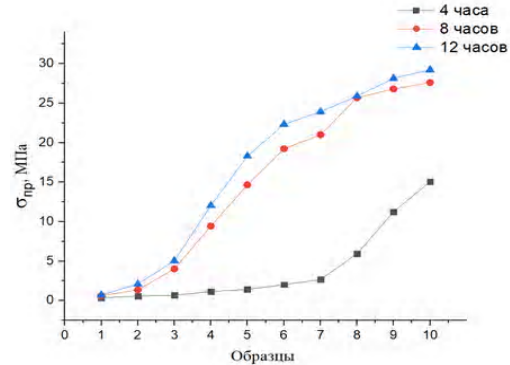
часах – 26 раз и при 12 часах – 35 раз. Это говорит о том, что время твердения и градиенты температур (+60...(-20)) °С оказывают существенное влияние на твердение песчано-цементных образцов.

Анализируя графики, представленные на рис. 6, б–г, можно наблюдать те же зависимости, что и на рис. 6, а. В целом анализируя графики, на рис. 6 выявлено, что с увеличением водоцементного отношения (В/Ц) предел прочности образцов-кубиков снижается для всех образцов независимо от их расположения в образце-бруске. Это снижение при времени твердения 4 часа составляет с 20 до 7,5 МПа, при времени твердения 8 часов – с 26 до 15 МПа, при времени

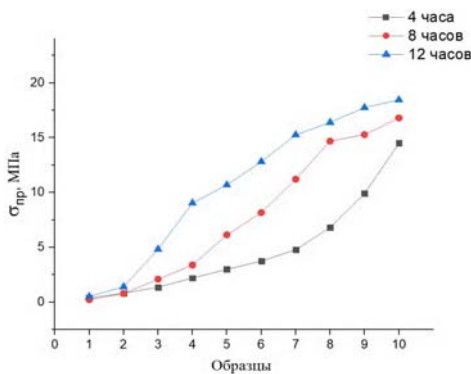
а)



б)



в)



г)

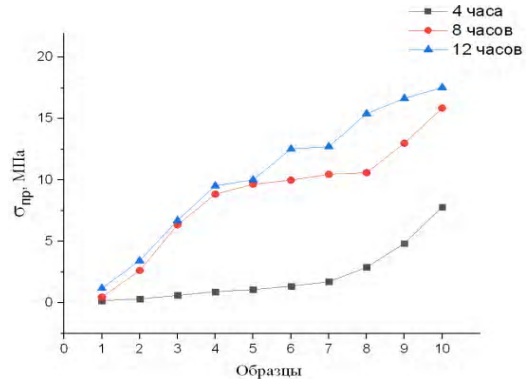


Рисунок 6 – Графики изменения предела прочности при сжатии образцов кубической формы (7×7×7 см) в зависимости от удаленности от холодного края цементно-песчаного образца-бруска при различном водоцементном отношении (В/Ц): а) В/Ц = 0,40; б) В/Ц = 0,44; в) В/Ц = 0,49; г) В/Ц = 0,54.

твердения 12 часов – с 35 до 17,5 МПа. Причем при времени твердения 8 часов это снижение занимает среднее значение между 4 и 12 часами твердения образцов.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. Наблюдаются различные интенсивности набора прочности цементно-песчаных кубиков для разных точек испытания. Это подтверждается разными показателями прочности вдоль образца при условиях тепло- и массопереноса, что соответствует теоретическим предположениям.
2. Градиенты температур в диапазоне от +60 до – 20 градусов Цельсия оказывают существенное воздействие на процесс твердения цементно-песчаных образцов. Набор прочности менее интенсивен у образцов, выдержанных в течение 4 часов. Увеличение времени твердения до 8 и 12 часов приводит к существенной интенсификации накопления и росту величины прочности образцов, начиная с 3-го образца (при выходе из отрицательной зоны температур).
3. С увеличением времени твердения ожидается более выраженное немонотонное упрочнение. Предполагается, что это связано с эффектами тепломассопереноса, что вызывает рост термических напряжений и ускоренное формирование новых фаз в процессе гидратации.
4. Увеличение водоцементного отношения ведет к снижению предела прочности всех образцов-кубиков в образце-бруске независимо от их положения по его длине.

Литература

1. Numerical Simulation of Temperature Gradients for the Mass Concrete Foundation Slab of Shanghai Tower / Jian Gong, Weijiu Cui, Yong Yuan, [et al.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of High-Rise Buildings*. – 2015. – Volume 4, № 4. – P. 283–290.
2. Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure / I. Chu, Y. Lee, M. N. Amin [et al.]. – Текст : электронный // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Volume 45. – P. 192–198. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.056> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system / X. H. Liu, C. Zhang, X. L. Chang [et al.]. – Текст : электронный // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Volume 78. – P. 449–459. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050> (дата обращения: 10.04.2023).
4. Kyle, A. R. Statistical determination of cracking probability for mass concrete / A. R. Kyle. – Текст : электронный // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2014. – Volume 26, № 9. – P. 04014058. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000947](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000947) (дата обращения: 12.04.2023).
5. Effects of temperature and temperature gradient on concrete performance at elevated temperatures / Quang X. Le, Vinh TN Dao, Jose L. Torero [et. al.]. – Текст : непосредственный // *Advances in Structural Engineering*. – 2018. – Volume 21(8). – P. 1223–1233.
6. Nano-modification effect on the pore characteristics and the water multiscale transport properties of concrete in winter construction of tunnel engineering / C. Sheng-ai, X. Wei, Z. Guang [et. al.]. – Текст : электронный // *Cement and Concrete Composites*. – 2023. – Volume 137. – P. 104933. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104933> (дата обращения: 12.04.2023).
7. Peizhi, S. Concepts to enhance specification and inspection of curing effectiveness in concrete pavement design and construction / S. Peizhi, D. G. Zollinger. – Текст : электронный // *Transportation Research Record*. – 2015. – Volume 2504. – P. 124–132. – URL: <https://doi.org/10.3141/2504-15> (дата обращения: 12.04.2023).
8. Mechanical properties of cement paste curing at different isothermal conditions / A. I. Гнурья, Yu. A. Abzaev, S. V. Korobkov [et. al.]. – 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 (1): 012010. – P. 1–5. – DOI: 10.1088/175581315/193/1/012010.

References

1. Gong, Jian; Cui, Weiji; Yuan, Yong [et al.]. Numerical Simulation of Temperature Gradients for the Mass Concrete Foundation Slab of Shanghai Tower. – Text : direct. – In: *International Journal of High-Rise Buildings*. – 2015. – Volume 4, № 4. – P. 283–290.
2. Chu, I.; Lee, Y.; Amin, M. N.[et al.]. Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure. – Text : electronic. – In: *Construction and Building Materials*. – 2013. – Volume 45. – P. 192–198. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.056> (date of access: 10.04.2023).
3. Liu, X. H.; Zhang, C.; Chang, X. L.; Zhou, W. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. – Text : electronic. – In: *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Volume 78. – P. 449–459. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050> (date of access: 10.04.2023).
4. Kyle, A. R. Statistical determination of cracking probability for mass concrete. – Text : electronic. – In: *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2014. – Volume 26, № 9. – P. 04014058. – URL : [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000947](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000947) (date of access: 12.04.2023).
5. Quang, X. Le; Vinh, TN Dao; Jose, L. Torero [et. al.]. Effects of temperature and temperature gradient on concrete performance at elevated temperatures. – Text : direct. – In: *Advances in Structural Engineering*. – 2018. – Volume 21(8). – P. 1223–1233.
6. Sheng-ai, C.; Wei, X.; Guang, Z. [et. al.]. Nano-modification effect on the pore characteristics and the water multiscale transport properties of concrete in winter construction of tunnel engineering. – Text : electronic. – In: *Cement and Concrete Composites*. – 2023. – Volume 137. – P. 104933. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104933> (date of access: 12.04.2023).
7. Peizhi, S.; Zollinger, D. G. Concepts to enhance specification and inspection of curing effectiveness in concrete pavement design and construction. – Text : electronic. – In: *Transportation Research Record*. – 2015. – Volume 2504. – P. 124–132. – URL : <https://doi.org/10.3141/2504-15> (date of access: 12.04.2023).
8. Gnyrya, A. I.; Abzaev, Yu. A.; Korobkov, S. V.; [et. al.]. Mechanical properties of cement paste curing at different isothermal conditions. – Text : direct. – In: *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 (1): 012010. – P. 1–5. – DOI: 10.1088/175581315/193/1/012010.
9. Aksenichik, K.V. Research of heat and mass transfer in concrete slabs subjected to heat treatment. – Text : direct. – In: *Bulletin of the Cherepovets State University*. – 2010. – № 4. – P. 63–67. (in Russian)

9. 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.

Пьянкова Ксения Андреевна – магистрант кафедры технологии строительного производства ФГБОУ ВО «Томского государственного архитектурно-строительного университета». Научные интересы: теория и технология производства бетонных работ в зимних условиях, тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых материалах, компьютерное моделирование.

Вчерашний Денис Дмитриевич – магистрант кафедры технологии строительного производства ФГБОУ ВО «Томского государственного архитектурно-строительного университета». 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 ФГБОУ ВО «Томского государственного архитектурно-строительного университета». 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.

П'янкoвa Ксeнiя Андrіївнa – магістрант кафедри технології будівельного виробництва ФГБОУ ВО «Томського державного архітектурно-будівельного університету». Наукові інтереси: теорія та технологія виконання бетонних робіт у зимових умовах, тепло- та масоперенесення у капілярно-пористих матеріалах, комп'ютерне моделювання.

Вчoрашний Дeніс Дmітpович – магістрант кафедри технології будівельного виробництва ФГБОУ ВО «Томського державного архітектурно-будівельного університету». Наукові інтереси: теорія та технологія виконання бетонних робіт у зимових умовах, тепло- та масоперенесення у капілярно-пористих матеріалах, комп'ютерне моделювання.

Кoрoбкoв Сeргій Вікторoвич – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри технології будівельного виробництва ФГБОУ ВО «Томського державного архітектурно-будівельного університету». Наукові інтереси: теорія та технологія виконання бетонних робіт у зимових умовах; аеродинаміка та зовнішній теплообмін моделей будівель та споруд; тепло- та масоперенесення у капілярно-пористих матеріалах, комп'ютерне моделювання.

Pyankova Ksenia – master's student of the Department of Technology of Construction Production, FSBEI HE «Tomsk State University of Architecture and Building». Scientific interests: theory and technology of production of concrete works in winter conditions, heat and mass transfer in capillary-porous materials.

Vcherashniy Denis – master's student of the Department Technology of Construction Production, FSBEI HE «Tomsk State University of Architecture and Building». Scientific interests: theory and technology of production of concrete works in winter conditions, heat and mass transfer in capillary-porous materials.

Korobkov Sergey – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head of the Department Technology of Construction Production, FSBEI HE «Tomsk State University of Architecture and Building». Scientific interests: theory and technology of production of concrete works in winter conditions; aerodynamics and external heat exchange of models of buildings and structures; heat and mass transfer in capillary-porous materials.