

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ НА ГИДРАТАЦИЮ ЦЕМЕНТА
МЕТОДОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КАЛОРИМЕТРИИ**

**Т.Р. Усачева, А.А. Крайнова, Л.А. Виноградова, В.В. Оганян, Г.Н. Кокурина, М.С. Мышенков,
Ю.А. Ануфриков, А.Ю. Шашерина, А.О. Адамцевич**

Татьяна Рудольфовна Усачева (ORCID 0000-0002-0840-4275)*, Анастасия Андреевна Крайнова (ORCID 0000-0001-9698-1373)

Кафедра общей химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: oxt@isuct.ru*

Любовь Алексеевна Виноградова, Виолетта Витальевна Оганян

Кафедра технологии керамики и электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: lavi@isuct.ru

Галина Николаевна Кокурина

Кафедра высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

Михаил Сергеевич Мышенков, Юрий Алексеевич Ануфриков, Анна Юрьевна Шашерина

Ресурсный центр «Термогравиметрические и калориметрические методы исследования», Научный парк, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский пр., д. 26, Российская Федерация, 198504

E-mail: m.myshenkov@spbu.ru, y.anufrikov@spbu.ru, annakirillova980@mail.ru

Алексей Олегович Адамцевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, 129337

E-mail: AdamtsevichAO@mgsu.ru

Исследовано влияние модификаторов на гидратацию цементов методом изотермической калориметрии. Термохимические эксперименты проведены с использованием изотермического калориметра ТАМ III (TA Instruments). Для калориметра ТАМ III была разработана методика проведения экспериментов по мониторингу термической активности твердофазных образцов с возможностью многократного использования стальных ампул объемом 20 мл. Исследованы процессы гидратации портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Б Д0 (ООО «Holcim Rus») без модификатора и с модификаторами поликарбоксилат типа S (ООО «ПОЛИПЛАСТ» и «Стеклопорошок»). Зарегистрированы термограммы тепловыделения, которые показали хорошую воспроизводимость результатов и их схожесть с имеющимися в литературе для подобных исследований, проводимых по стандартным методикам с использованием изотермического калориметра ТАМ AIR (TA Instruments). Это свидетельствует о надежности полученных данных и о возможности использования предложенной в данной статье методики для исследования процессов гидратации цементов. Максимум тепловыделения на термограммах образцов с поликарбоксилатным модификатором наблюда-

ется примерно через 20 ч после начала мониторинга тепловыделения. Образцы без модификатора и с модификатором «Стеклопорошок» показывают максимум тепловыделения примерно через 10 ч после начала эксперимента. Анализ результатов показал, что наличие модификаторов приводит к повышенному тепловыделению при гидратации цемента по отношению к его начальному составу. Соответственно, требуется меньше времени для завершения гидратации. Однако необходимо также учитывать возможные риски нарушения технологических режимов работы соответствующего оборудования за счет избыточного тепловыделения в процессе гидратации модифицированных цементов.

Ключевые слова: изотермическая калориметрия, гидратация цемента, модификаторы, поликарбонат, стеклопорошок, цемент

STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFIERS ON THE HYDRATION OF CEMENT BY THE METHOD OF ISOTHERMAL CALORIMETRY

T.R. Usacheva, A.A. Krainova, L.A. Vinogradova, V.V. Oganyan, G.N. Kokurina, M.S. Myshenkov, Yu.A. Anufrikov, A.Yu. Shasherina, A.O. Adamtsevich

Tatiana R. Usacheva (ORCID 0000-0002-0840-4275)*, Anastasia A. Krainova (ORCID 0000-0001-9698-1373)
Department of General Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shermetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: oxt@isuct.ru*

Lyubov A. Vinogradova, Violetta V. Oganyan
Department of Technology of Ceramics and Electrochemical Productions, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shermetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: lavi@isuct.ru

Galina N. Kokurina
Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shermetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

Mikhail S. Myshenkov, Yuri A. Anufrikov, Anna Yu. Shasherina
Resource Center "Thermogravimetric and calorimetric research methods". Science Park of St. Petersburg State University, 26, Universitetskii prospect, Petergof, St. Petersburg, 198504, Russia
E-mail: m.myshenkov@spbu.ru, y.anufrikov@spbu.ru, annakirillova980@mail.ru

Alexey O. Adamtsevich
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia
E-mail: mnspecter@gmail.com

The effect of modifiers on the hydration of cements was studied by isothermal calorimetry. Thermochemical experiments were carried out using a TAM III isothermal calorimeter (TA Instruments). For the TAM III calorimeter, a method was developed for conducting experiments on monitoring the thermal activity of solid-phase samples with the possibility of repeated use of steel ampoules with a volume of 20 ml. The processes of hydration of Portland cement grade CEM I 42.5B D0 LLC "Holcim Rus" without a modifier and with modifiers polycarboxylate type S (POLYPLAST LLC and «Glass Powder) were studied. Heat release thermograms were recorded, which showed good reproducibility of the results and their similarity with those available in the literature for similar studies carried out according to standard methods using a TAM AIR isothermal calorimeter (TA Instruments). This indicates the reliability of the obtained data and the possibility of using the method proposed in this article to study the processes of hydration of cements. The maximum heat release on the thermograms of samples with a polycarboxylate modifier is observed approximately 20 h after the start of heat release monitoring. Samples without the modifier and

with the glass powder modifier show the maximum heat release approximately 10 h after the start of the experiment. Analysis of the results showed that the presence of modifiers leads to increased heat release during cement hydration in relation to its initial composition. Accordingly, it takes less time to complete hydration. However, it is also necessary to take into account the possible risks of violation of the technological modes of operation of the corresponding equipment due to excessive heat release during the hydration of modified cements.

Key words: isothermal calorimetry, cement hydration, modifiers, polycarboxylate, glass powder, cement

Для цитирования:

Усачева Т.Р., Крайнова А.А., Виноградова Л.А., Оганян В.В., Кокурина Г.Н., Мышенков М.С., Ануфриков Ю.А., Шашерина А.Ю., Адамцевич А.О. Исследование влияния модификаторов на гидратацию цемента методом изотермической калориметрии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 6. С. 88–93. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6979.

For citation:

Usacheva T.R., Krainova A.A., Vinogradova L.A., Oganyan V.V., Kokurina G.N., Myshenkov M.S., Anufrikov Yu.A., Shasherina A.Yu., Adamtsevich A.O. Study of the influence of modifiers on the hydration of cement by the method of isothermal calorimetry. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 6. P. 88–93. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.6979.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка инновационных материалов на основе цементных вяжущих актуальна для строительства как жилых зданий, так и промышленных сооружений. Знание физико-химических закономерностей влияния различных модификаторов на свойства цементсодержащих материалов является основой технологического прогресса в области строительной индустрии. Известно, что активным связующим компонентом цемента является клинкер. В состав клинкера входят CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . В клинкере оксиды образуют силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция в виде минералов кристаллической структуры, часть их входит в стекловидную фазу [1-5].

Результаты исследований свойств цементов являются составной частью необходимых тестов для новых строительных материалов [6-11]. Для модификации цементов используются различные добавки. Например, добавки гидросиликатов меди блокируют процессы гидратации, а при использовании гидросиликатов цинка скорость гидратации определяется содержанием кремниевой кислоты. Показано, что модифицирующие добавки замедляют сроки схватывания, увеличивается количество трехкальциевого силиката в цементных камнях, снижается их прочность для некоторых составов [12]. Добавки белитового цемента с золой уноса к портландцементу могут сократить время схватывания, увеличить скорость реакции гидратации, повысить скорость выделения тепла при гидратации силикатных минералов на начальном этапе гидратации и снизить общее тепловыделение при гидратации [13].

Цемент активно реагирует с водой, переходя из вязкого состояния в камневидное. Процесс твердения называется гидратацией цемента и представляет собой совокупность химико-физических процессов, сопровождающихся выделением тепла. Метод изотермической калориметрии – стандартный метод исследования кинетики гидратации цемента, который позволяет идентифицировать процессы гидратации портландцемента и косвенно предположить динамику роста прочности различных цементных систем в изделиях [14, 15]. Мониторинг процесса гидратации цемента методом изотермической калориметрии позволяет определить количество выделившегося при гидратации тепла и сделать вывод о том, как модифицирующие добавки влияют на процесс гидратации [16-19].

В данной работе методом изотермической калориметрии исследованы процессы гидратации портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Б Д0 (ООО «Holcim Rus») без модификатора, с поликарбоксилатным модификатором типа S (ООО «ПОЛИПЛАСТ») и с модификатором «Стеклопорошок».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Калориметрические эксперименты были выполнены на калориметре ТАМ III (TA Instruments) в изотермическом режиме при $T = 298,15 \text{ K}$, в комплектации с блоком микрокалориметра, снабженным стальными ампулами объемом 20 мл. Конструкция используемой калориметрической системы и принцип ее действия аналогичны представленным в [19, 20].

Для возможности многократного использования стальных ампул ТАМ III было предложено

оригинальное техническое решение по использованию стеклянных одноразовых цилиндров, размер которых максимально приближен к размеру калориметрических стальных ампул. В стеклянные цилиндры помещались исследуемые образцы цемента и затем загружались в герметично закрывающиеся стальные ампулы. Обычно исследование процессов гидратации цементов проводят на многоканальных калориметрах с воздушным термостатированием, например, с использованием модели TAM AIR (TA Instruments) [16, 17]. Принципиальная разница между TAM AIR и TAM III заключается в разновидности термостата. В TAM AIR используется воздушный термостат, а в TAM III – масляный, позволяющий исследовать процессы с меньшим тепловыделением или теплопоглощением. Для процессов с большим тепловыделением (например, гидратация цементов) лучше подходит TAM AIR, так как при интенсивных процессах гидратации цементов тепловыделение может быть значительно больше, чем верхняя граница чувствительности TAM III. Имеющаяся комплектация используемого TAM III проигрывает в производительности TAM AIR, поскольку не позволяет тестировать одновременно несколько образцов. Регистрируемое в экспериментах на TAM III тепловыделение не превышало верхней границы чувствительности используемого оборудования.

В данной работе использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б Д0 (ООО «Holcim Rus»). В качестве модификаторов применены поликарбоксилат типа S производства ООО «ПОЛИПЛАСТ» и модификатор «Стеклопорошок». Модификатор «Стеклопорошок» щелочестойкий представлял собой алюмоборсиликатное аппретированное стекловолокно в виде отрезков элементарных стеклянных нитей со средней длиной волокна не менее 50 мкм и диаметром элементарной нити 6-20 мкм.

В ходе исследования были проведены серии экспериментов с портландцементом без модификаторов и с модификаторами. В каждой серии проводили не менее двух идентичных экспериментов для контроля воспроизводимости результатов. При подготовке тестируемого образца к 10,00 г портландцемента добавляли 3,5 мл воды и тщательно перемешивали. Затем на технических весах взвешивали в стеклянных цилиндрах 4,00 г полученной смеси. В стальную ампулу ячейки сравнения загружали аналогичный стеклянный цилиндр с сухой цементоподобной смесью в количестве 4,00 г. По аналогичной методике были проведены эксперименты по исследованию влияния модификато-

ров на гидратацию портландцемента. При приготовлении образцов с модификаторами количество портландцемента и воды оставалось такими же, как и в опытах, проведенных с образцами без модификатора. В исследовании процессов гидратации портландцемента с добавлением модификатора сначала смешивали 1 г модификатора с 3,5 мл воды, а затем эту смесь приливали к цементу. Термограммы регистрировались в течение минимум 30 ч.

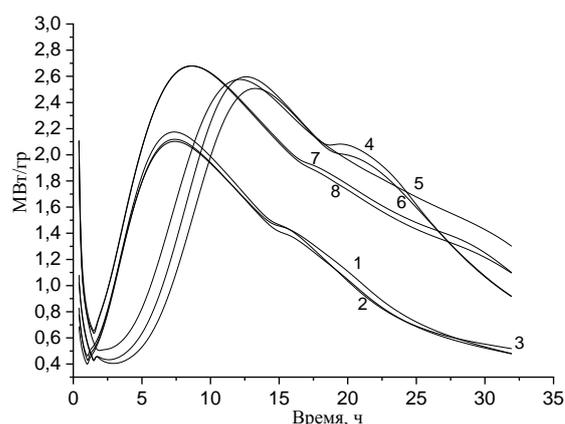


Рис. 1. Сравнение графиков теплового потока образцов портландцемента без модификатора (1-3), цемента с поликарбоксилатом (4-6) и цемента со стеклопорошком (7,8)

Fig. 1. Comparison of heat flow thermograms for samples of Portland cement without modifier (1-3), cement with polycarboxylate (4-6) and cement with glass powder (7,8)

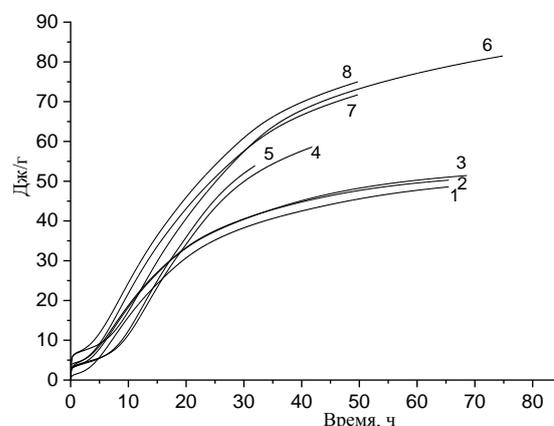


Рис. 2. Интегральный график тепловыделения при гидратации образцов портландцемента без модификаторов (1-3), с поликарбоксилатом (4-6), со стеклопорошком (7,8)

Fig. 2. Integral plots of heat release during hydration of Portland cement samples without modifiers (1-3), with polycarboxylate (4-6), with glass powder (7,8)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Термограммы образцов портландцемента без модификаторов и с модификаторами приведены на рис. 1. При анализе графиков можно отметить высокую воспроизводимость результатов,

полученных по данной методике термодинамических экспериментов. Интегральные графики тепловыделения при гидратации портландцемента без модификатора и с модификаторами представлены на рис. 2.

Анализ результатов показал, что максимум тепловыделения на термограммах образцов с поликарбоксилатным модификатором наблюдается примерно через 20 ч после начала мониторинга тепловыделения. Максимум тепловыделения цемента без модификатора и с модификатором «Стеклопорошок» проявляется примерно через 10 ч после начала эксперимента. Наличие обоих типов модификаторов приводит к повышенному тепловыделению при гидратации цемента по сравнению с цементом без модификаторов, и, соответственно, требуется меньшее время для завершения процесса гидратации. Однако необходимо также учитывать возможные риски нарушения технологических режимов работы соответствующего промышленного оборудования за счет избыточного тепловыделения в процессе гидратации модифицированных цементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в НИИ Термодинамики и кинетики химических процессов Ивановского гос-

ударственного химико-технологического университета с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ при поддержке Министерства науки и высшего образования России (грант № 075-15-2021-671), при поддержке Министерства науки и высшего образования России (FZZW-2023-0008). Обсуждение результатов проведено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (шифр проекта АААА-А19-119082790069-6).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out at the Research Institute of Thermodynamics and Kinetics of Chemical Processes of the Ivanovo State University of Chemical Technology using the resources of the Center for Collective Use of Scientific Equipment of ISUCT with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (grant No. 075-15-2021-671), with financial support of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects FZZW-2023-0008). Discussion of the results was carried out with the support of St. Petersburg State University (project АААА-А19-119082790069-6).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баженов Ю.М.** Технология бетона. Москва: АСВ. 2007. 528 с.
2. **Ведищев К.А.** Фибробетон – строительный материал XXI века. *Науч.-практ. эл. журн. Аллея Науки*. 2017. № 15. С. 52–66.
3. **Левкович Т.И., Токар Н.И., Мевлидинов З.А., Ласман И.А., Федоров И.С., Ласман В.С.** Разработка и исследование свойств составов цементнофибробетонов для дорожного строительства. *Вестн. Евраз. науки*. 2021. № 1 (13). С. 1-14.
4. **Виноградова Л.А.** Технология декоративно-художественных изделий на основе вяжущих веществ. М.: Юрайт. 2021. 138 с.
5. **Лотов В.А.** О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента. *Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2018. № 1. С. 99-110.
6. **Shi C., Qian J.** High performance cementing materials from industrial slags - a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000. V. 29. P. 195-207. DOI: 10.1016/S0921-3449(99)00060-9.
7. **Kani E.N., Allahverdi A., Provis J.L.** Calorimetric study of geopolymer binders based on natural pozzolan. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. V. 127. P. 2181-2190. DOI: 10.1007/s10973-016-5850-7.
8. **Nocun-Wczelik W.** Differential calorimetry as a tool in the studies of cement hydration kinetics with sulphate and nitrate solutions. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. V. 130. P. 249-259. DOI: 10.1007/s10973-017-6378-1.

REFERENCES

1. **Bazhenov Yu.M.** Concrete technology. M.: ACB. 2007. 528 p. (in Russian).
2. **Vedischev K.A.** Fiber-reinforced concrete is a building material of the 21st century. *Nauch.-Prakt. el. Zhurn. Alleya Nauki*. 2017. N 15. P. 52–66 (in Russian).
3. **Levkovich T.I., Tokar N.I., Mevlidinov Z.A., Lasman I.A., Fedorov I.S., Lasman V.S.** Development and research of properties of compositions of cement-fiber concrete for road construction. *Vestn. Evraz. Nauki*. 2021. N 1 (13). P. 1-14. (in Russian).
4. **Vinogradova L.A.** Technology of decorative and artistic products based on binders. M.: Yurayt. 2021. 138 p. (in Russian).
5. **Lotov V.A.** On the interaction of cement particles with water or a variant of the mechanism of the processes of hydration and hardening of cement. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Inzhiniring Georesursov*. 2018. N 1. P. 99-110 (in Russian).
6. **Shi C., Qian J.** High performance cementing materials from industrial slags - a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000. V. 29. P. 195-207. DOI: 10.1016/S0921-3449(99)00060-9.
7. **Kani E.N., Allahverdi A., Provis J.L.** Calorimetric study of geopolymer binders based on natural pozzolan. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. V. 127. P. 2181-2190. DOI: 10.1007/s10973-016-5850-7.
8. **Nocun-Wczelik W.** Differential calorimetry as a tool in the studies of cement hydration kinetics with sulphate and nitrate solutions. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. V. 130. P. 249-259. DOI: 10.1007/s10973-017-6378-1.

9. Sanderson R.A., Gavin M., Cann G.M., Provis J.L. Comparison of calorimetric methods for the assessment of slag cement hydration. *Adv. Appl. Ceram.* 2017. V. 116. P. 186-192. DOI: 10.1080/17436753.2017.1288371.
10. Xiaohai Liu, Baoguo Ma, Hongbo Tan, Benqing Gu, Ting Zhang, Pian Chen, Hainan Li, Junpeng Mei. Effect of aluminum sulfate on the hydration of Portland cement, tricalcium silicate and tricalcium aluminate. *Construct. Build. Mater.* 2020. V. 232. P. 117179. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117179.
11. Linlin Zhao, Xianwei Ma, Shuaiqi Song, Peibo You, Hairong Wu. Activating effect of potassium silicate solution in low portland cement binder. *Construct. Build. Mater.* 2022. V. 319. P. 126091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126091.
12. Grishina A.N., Korolev E.V., Gladkikh V.A. Hydration of cement in the presence of biocidal modifiers based on metal hydrosilicates. *Materials.* 2022. V. 15. P. 292. DOI: 10.3390/ma15010292.
13. Yongfan Gong, Jianming Yang, Haifeng Sun, Fei Xu. Effect of fly ash belite cement on hydration performance of portland cement. *Crystals.* 2021. V. 11. P. 740. DOI: 10.3390/cryst11070740.
14. Ушеров-Маршак А.В., Сопов В.П. Изотермическая калориметрия – стандартный метод измерения кинетики гидратации цемента. *Цемент и его применение.* 2009. № 5. С. 106-107.
15. Фомина Н.Н., Кебедов М.Б. Применение методов калориметрии в исследовании процессов гидратации портландцемента. *Техн. регул. в трансп. строит.* 2016. № 1(15). С. 26-28.
16. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения. *Инж.-строит. журн.* 2013. № 3. С. 36-42. DOI: 10.5862/MCE.38.5.
17. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Актуальные аспекты практического применения методов калориметрии при изучении кинетики гидратации вяжущих в строительном материаловедении. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. М.: МГСУ. 2012. С. 354-360.
18. Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Myshenkov M.S., Kalinkina E.V., Zvereva I.A. A calorimetric study of hydration of magnesia-ferriferous slag mechanically activated in air and in CO₂ atmosphere. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2018. V. 134. P. 165–171. DOI: 10.1007/s10973-018-7439-9.
19. Wadso I. The study of cement hydration by isothermal calorimetry. Building materials. Sweden: Lund University. 1995. URL: www.tainstruments.com/pdf/literature/M100.pdf.
20. Усачева Т.Р., Белова Н.В., Сатурина Е.В., Крутова О.Н., Луканов М.М., Павлова Э.А. Термодинамика комплексообразования с 18-краун-6 с l-карнозином и его конформационный анализ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 21-31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6781.
9. Sanderson R.A., Gavin M., Cann G.M., Provis J.L. Comparison of calorimetric methods for the assessment of slag cement hydration. *Adv. Appl. Ceram.* 2017. V. 116. P. 186-192. DOI: 10.1080/17436753.2017.1288371.
10. Xiaohai Liu, Baoguo Ma, Hongbo Tan, Benqing Gu, Ting Zhang, Pian Chen, Hainan Li, Junpeng Mei. Effect of aluminum sulfate on the hydration of Portland cement, tricalcium silicate and tricalcium aluminate. *Construct. Build. Mater.* 2020. V. 232. P. 117179. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117179.
11. Linlin Zhao, Xianwei Ma, Shuaiqi Song, Peibo You, Hairong Wu. Activating effect of potassium silicate solution in low portland cement binder. *Construct. Build. Mater.* 2022. V. 319. P. 126091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126091.
12. Grishina A.N., Korolev E.V., Gladkikh V.A. Hydration of cement in the presence of biocidal modifiers based on metal hydrosilicates. *Materials.* 2022. V. 15. P. 292. DOI: 10.3390/ma15010292.
13. Yongfan Gong, Jianming Yang, Haifeng Sun, Fei Xu. Effect of fly ash belite cement on hydration performance of portland cement. *Crystals.* 2021. V. 11. P. 740. DOI: 10.3390/cryst11070740.
14. Usherov-Marshak A.V., Sopov V.P. Isothermal calorimetry is a standard method for measuring cement hydration kinetics. *Tsement i ego primenenie.* 2009. N 5. P. 106-107 (in Russian).
15. Fomina N.N., Kebedov M.B. Application of calorimetric methods in the study of hydration processes of Portland cement. *Tekhn. Regulir. Transp. Stroit.* 2016. N 1(15). P. 26-28 (in Russian).
16. Adamtsevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. The use of calorimetry to predict the growth of strength of accelerated hardening cement systems. *Inzh.-Stroit. Zhurn.* 2013. N 3. P. 36-42 (in Russian). DOI: 10.5862/MCE.38.5.
17. Adamtsevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. Current aspects of the practical application of calorimetry methods in the study of the kinetics of hydration of binders in construction materials science. Integration, partnership and innovation in construction science and education. М.: MGSU. 2012. P. 354-360. (in Russian).
18. Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Myshenkov M.S., Kalinkina E.V., Zvereva I.A. A calorimetric study of hydration of magnesia-ferriferous slag mechanically activated in air and in CO₂ atmosphere. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2018. V. 134. P. 165–171. DOI: 10.1007/s10973-018-7439-9.
19. Wadso I. The study of cement hydration by isothermal calorimetry. Building materials. Sweden: Lund University. 1995. URL: www.tainstruments.com/pdf/literature/M100.pdf.
20. Usacheva T.R., Belova N.V., Saturina E.V., Krutova O.N., Lukanov M.M., Pavlova E.A. Thermodynamics of complexation with 18-crown-6 with l-carnosine and its conformational analysis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 5. P. 21-31 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6781.

Поступила в редакцию 27.09.2023

Принята к опубликованию 10.10.2023

Received 27.09.2023

Accepted 10.10.2023