



ISSN 1993-3495 online

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

2023, ТОМ 19, НОМЕР 2, 51–60

EDN: IMIJNC

УДК 666.972

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЦЕМЕНТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДОНБАССА

С. В. Лахтарина¹, Н. М. Зайченко², Е. В. Егорова³, М. С. Хлестов⁴, Н. В. Онопченко⁵

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, Российская Федерация, 286123.

E-mail: ¹s.v.lahtarina@donnasa.ru, ²zaichenko_nikola@mail.ru, ³e.v.egorova@donnasa.ru,

⁴maksimhlestop109@gmail.com, ⁵onopchenko.n.v@ya.ru

Получена 10 мая 2023; принята 23 мая 2023.

Аннотация. В работе рассмотрено комплексное воздействие минеральной добавки в виде агломерированного микрокремнезема мокрой газоочистки Стахановского завода ферросплавов и отсева дробления известняка ГП «Докучаевский флюсо-доломитный комбинат» на физико-механические свойства цементного камня. Разработаны составы эффективных органоминеральных модификаторов (ОММ) на основе отходов промышленности как частичная замена портландцемента, установлены зависимости степени измельчения ОММ в шаровой мельнице от времени измельчения и состава. Установлено, что при помолу микрокремнезема (ОММ 5) происходит агломерация его частиц, что подтверждается увеличением удельной поверхности на более чем 50 % по отношению к составу ОММ 1. Разработаны составы вяжущего, обеспечивающие получение цементного камня с пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 60 МПа.

Ключевые слова: цементный камень, суперпластификатор, минеральная добавка, микрокремнезем, известняк.

МОДИФІКОВАНІ ЦЕМЕНТИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ДОНБАСУ

С. В. Лахтарина¹, М. М. Зайченко², О. В. Єгорова³, М. С. Хлестов⁴, М. В. Онопченко⁵

ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, Російська Федерація, 286123.

E-mail: ¹s.v.lahtarina@donnasa.ru, ²zaichenko_nikola@mail.ru, ³e.v.egorova@donnasa.ru,

⁴maksimhlestop109@gmail.com, ⁵onopchenko.n.v@ya.ru

Отримана 10 травня 2023; прийнята 23 травня 2023.

Анотація. У роботі розглянуто комплексний вплив мінеральної добавки у вигляді агломерованого мікрокремнезему мокрою газоочищення Стахановського заводу феросплавів та відсіву дроблення вапняку ДП «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат» на фізико-механічні властивості цементного каменю. Розроблено склади ефективних органо-мінеральних модифікаторів (ОММ) на основі відходів промисловості як часткова заміна портландцементу, встановлені залежності ступеня подрібнення ОММ в млині від часу подрібнення і складу. Встановлено, що при помолі мікрокремнезему (ОММ 5) відбувається агломерація його частинок, що підтверджується збільшенням питомої поверхні на більш ніж 50 % по відношенню до складу ОММ 1. Розроблено склади в'язучого, що забезпечують отримання цементного каменю з межею міцності при стисненні в проектному віці не менше 60 МПа.

Ключові слова: цементний камінь, суперпластифікатор, мінеральна добавка, мікрокремнезем, вапняк.



MODIFIED CEMENTS WITH THE USE OF INDUSTRIAL WASTE FROM DONBASS

Sergei Lakhtarina¹, Nikolai Zaichenko², Elena Egorova³, Maksim Khlestov⁴,
Nikolai Onopchenko⁵

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, Russian Federation, 286123.

E-mail: ¹s.v.lakhtarina@donnasa.ru, ²zaichenko_nikola@mail.ru, ³e.v.egorova@donnasa.ru,

⁴maksimhlestov109@gmail.com, ⁵onopchenko.n.v@ya.ru

Received 10 May 2023; accepted 23 May 2023.

Abstract. The paper considers the complex effect of a mineral additive as agglomerated silica fume of wet gas purification of the Stakhanov Ferroalloy Plant and limestone crushing of the Dokuchaevsky Flux-Dolomite Combine on the mechanical properties of cement. Compositions of effective modifiers (OMM) based on industrial waste, as a partial replacement of Portland cement, have been developed, the dependences of the degree of grinding of OMM in mill on the grinding time and composition have been established. It was found that when grinding silica fume (OMM 5), agglomeration of its particles occurs, which is confirmed by an increase in the specific surface area by more than 50 % relative to the composition of OMM 1. Binder compositions have been developed to ensure the production of cement with a compressive strength at the design age of at least 60 MPa.

Keywords: cement, superplasticizer, mineral additive, silica fume, limestone.

Формулировка проблемы

Бетон по праву считается самым востребованным строительным материалом современности. Тенденция строительства из бетона в мировом масштабе за последние десятилетия только увеличивается – около 11 млрд тонн бетона производится ежегодно для строительства зданий и сооружений различного назначения, которые эксплуатируются в различных условиях.

Как правило, современные бетоны включают в своем составе от пяти до десяти минеральных компонентов, взаимодействия между которыми могут создавать разнообразия показателей технологических свойств бетонной смеси, прочности и долговечности бетона [1]. При этом правильно подобранная и оптимизированная смесь минеральных компонентов, в том числе на основе отходов промышленности, может обеспечивать синергетический эффект в бетоне [2]. С одной стороны, это стимулирует развитие научных разработок в области исследований многокомпонентных композиционных цементов и бетонов на их основе, с другой стороны, для широкого внедрения в производство таких цементов требуется соответствующая нормативно-техническая база.

В мировой практике строительства, в том числе уникальных зданий и сооружений, наиболее

часто встречаются бетоны, изготовленные с содержанием микрокремнезема как активной минеральной добавки [3].

Микрокремнезем (МК) – очень реакционноспособный пуццолановый материал, что делает его воздействие весьма эффективным при увеличении прочности бетона, особенно в раннем возрасте [4–6].

Многочисленными исследованиями доказано, что введение микрокремнезема в состав бетонной смеси приводит к увеличению прочностных показателей бетона на 30–100 % в зависимости от количества и вида цемента, количества микрокремнезема, вида и дозировки суперпластификаторов, вида заполнителей и режимов твердения [7–12].

Wong и Razak изучили прочность бетона при сжатии, содержащего до 15 % микрокремнезема в составе камня вяжущего при В/В отношении 0,27 до 0,33. Отмечается, что введение микрокремнезема не давало прироста прочности в начальный период твердения – до 7 суток. В то же время, на 90 сутки твердения при введении 10 % МК произошло повышение прочности камня вяжущего на 17 % [13]. В исследованиях [14] отмечается, что при 6 % замене цемента микрокремнеземом существенно снижается коэффициент диффузии ионов

хлорида, что повышает долговечность таких бетонов.

Также введение микрокремнезема в состав бетона способствует существенному повышению его стойкости к истиранию. Такие бетоны находят особое применение в конструкциях водосбросов, бассейнов, а также для бетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов, подверженных сильному абразивному воздействию [15].

Известняк представляет собой осадочную горную породу, в ходе образования которой формируется пористый камень различной плотности и оттенка с обилием в составе кальцитов (известковых шпатов) ГОСТ 22688-77 «Известь строительная. Методы испытаний по ГОСТ 22688-77 «Известь строительная. Методы испытаний».

Установлено, что известняк не является инертным разбавителем, а в процессе гидратации портландцемента реагирует с трехкальциевым алюминатом с образованием карбоалюминатов кальция. При этом имеет место образование как высококарбонатной формы карбоалюмината $C_3A \times 3CaCO_3 \times 32H_2O$, так и низкокарбонатной $C_3A \times 3CaCO_3 \times 12H_2O$. Эти разновидности приближаются по физическим свойствам соответственно к высокосульфатной форме (эттрингит) и моносulfатной форме сульфоалюминатов кальция [16].

Добавка известняка в цемент, аналогично добавке гипса, может оказывать регулирующее воздействие на схватывание цемента и скорость реакций гидратации C_3A и C_3S . Наилучший эффект от применения известняка в цементе достигается при повышенном содержании C_3A в клинкере.

Исследования зарубежных ученых и опыт широкого использования известняковых портландцементов в Европе показали, что на таких цементах получается высококачественный бетон, характеризующийся приятной окраской и высокими физико-механическими свойствами. Цементы с известняком, полученные на базе клинкеров с повышенным содержанием C_3A , как известно, хуже ведут себя при гидротермальной обработке, прежде всего следует применять в бетонах, твердеющих в нормальных условиях [17–20].

С другой стороны, высокодисперсные добавки-уплотнители, к которым также относятся

известняки, резко увеличивают величину общей удельной поверхности в составах камня вяжущего, что существенно повышает их водопотребность и, в свою очередь, приводит к снижению марочной прочности вяжущего (без применения пластификаторов). Исходя из этого, повышение активности композиционных цементов может осуществляться с применением последних достижений в области химии вяжущих и технологии бетонов как химическими, так и другими воздействиями, в том числе механическими или электрофизическими. Выбор того или иного вида активации обуславливается технологическими задачами: реализация потенциальных возможностей вяжущего с целью уменьшения расхода цемента; создание более пластичной системы без применения органических пластификаторов, замедляющих гидратацию и понижающих прочность; необходимость ускоренного твердения на определенном этапе структурообразования [21–22].

Утилизация техногенных отходов промышленности в технологии бетона позволяет также решить важную экологическую проблему, связанную с загрязнением атмосферы и водных ресурсов [7]. В то же время стоимость микрокремнезема на строительном рынке зачастую может превышать стоимость портландцемента. На основании этого были исследованы свойства модифицированных цементов, содержащих в составе микрокремнезем и молотый отсев дробления известняка.

Основной материал

Для получения камня вяжущих применялся в качестве дисперсной минеральной добавки отвалный микрокремнезём (МК) Стахановского завода ферросплавов, представляющий собой отход металлургической отрасли промышленности в комплексе с отсевом дробления (ОДИ) известняка ГП «Докучаевский флюсо-доломитный комбинат». Химический состав минеральных добавок представлен в табл. 1.

В качестве вяжущего – портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5 Н, ООО «ПИК-Цемент» Амвросиевского цементного комбината.

Как химический модификатор во всех составах и использовался суперпластификатор С-3 (ТУ 5870-002-58042865-03) в сухом виде.

Таблица 1. Химический состав минеральных добавок

Наименование добавки	Содержание оксидов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ag ₂ O	SO ₃
МК	97,79	1,2	0,03	0,33	0,2	0,05	0,02
ОДИ	1,67	0,35	0,27	96,74	0,62	–	–

Разработаны составы эффективных органо-минеральных модификаторов (ОММ) на основе отходов промышленности, в частности: микрокремнезема, отсева дробления известняка, для частичной замены портландцемента в составах бетонов.

Для проведения исследования были разработаны 5 составов органо-минеральных модификаторов (ОММ), полученных путем тонкого измельчения при помощи лабораторной шаровой мельницы сырьевых материалов в которые входили следующие компоненты:

- 1) ОММ 1: отсев дробления известняка (100 %), добавка С-3 (0,5 %) в сухом виде;
- 2) ОММ 2: отсев дробления известняка (75 %), микрокремнезем (25 %), добавка С-3 (0,5 %) в сухом виде;
- 3) ОММ 3: отсев дробления известняка (50 %), микрокремнезем (50 %), добавка С-3 (0,5 %) в сухом виде;
- 4) ОММ 4: отсев дробления известняка (25 %), микрокремнезем (75 %), добавка С-3 (0,5 %) в сухом виде;
- 5) ОММ 5: микрокремнезем (100 %), добавка С-3 (0,5 %) в сухом виде.

Свойства порошковых материалов, суспензий и эмульсий во многом зависят от размера создающих их частиц. Поэтому гранулометрический анализ (измерение распределений по размерам частиц в дисперсных средах) является одной из важнейших составляющих современных производств и научных разработок. При помощи анализатора «MicroSizer 201» было определено распределение частиц по размеру для каждого разработанного ОММ (рис.).

Установлено, что при помоле микрокремнезема (ОММ 5) происходит агломерация его частиц, что подтверждается увеличением удельной поверхности на 53,5 % по отношению к составу ОММ 1.

Результаты экспериментов и выводы

Для исследования реологических свойств цементных систем и физико-механических свойств цементного камня были разработаны составы на основе отсева дробления известняка и микрокремнезема с частичной заменой вяжущего в количестве 10, 15 и 20 % от массы цемента. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н с нормальной густотой 25 %. Составы и свойства цементного камня на 3 суток приведены в таблице 2.

Разработаны составы вяжущего, обеспечивающие получение цементного камня с пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 60 МПа.

Установлено, что при шаговой замене отсева дробления известняка на микрокремнезем в составе ОММ за счет меньшей дисперсии наблюдается снижение прочности камня вяжущего на 5–11 % в проектном возрасте, в то же время в раннем возрасте (3 суток) введение микрокремнезема в состав ОММ приводит к увеличению предела прочности при сжатии камня вяжущего на 5–8 %.

Введение взамен части цемента органо-минерального модификатора на основе отсева дробления известняка и микрокремнезема не приводит к повышению нормальной густоты теста вяжущего за счет содержания во всех составах ОММ 0,5 % суперпластификатора СЗ.

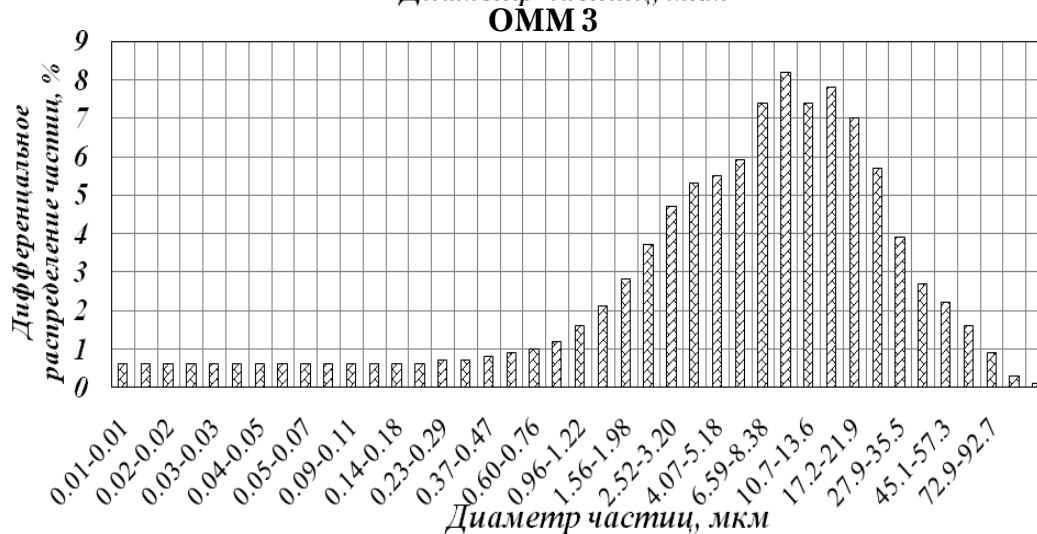
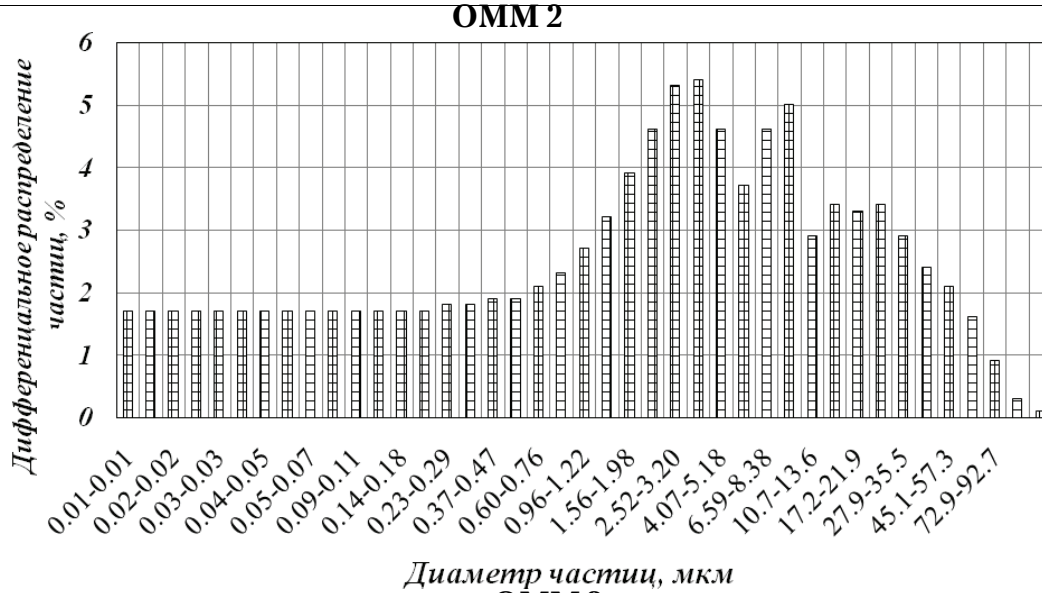
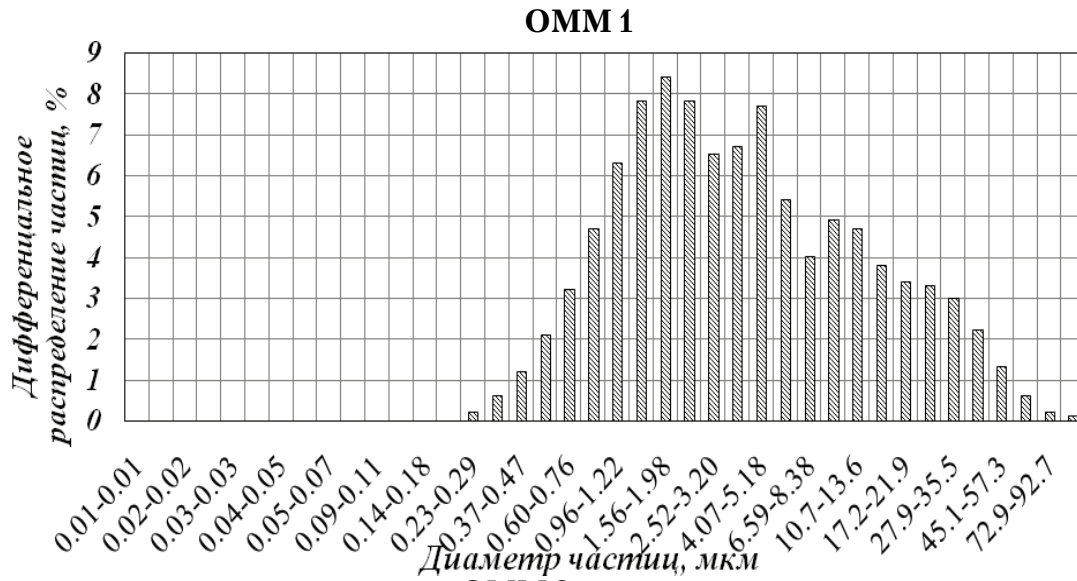
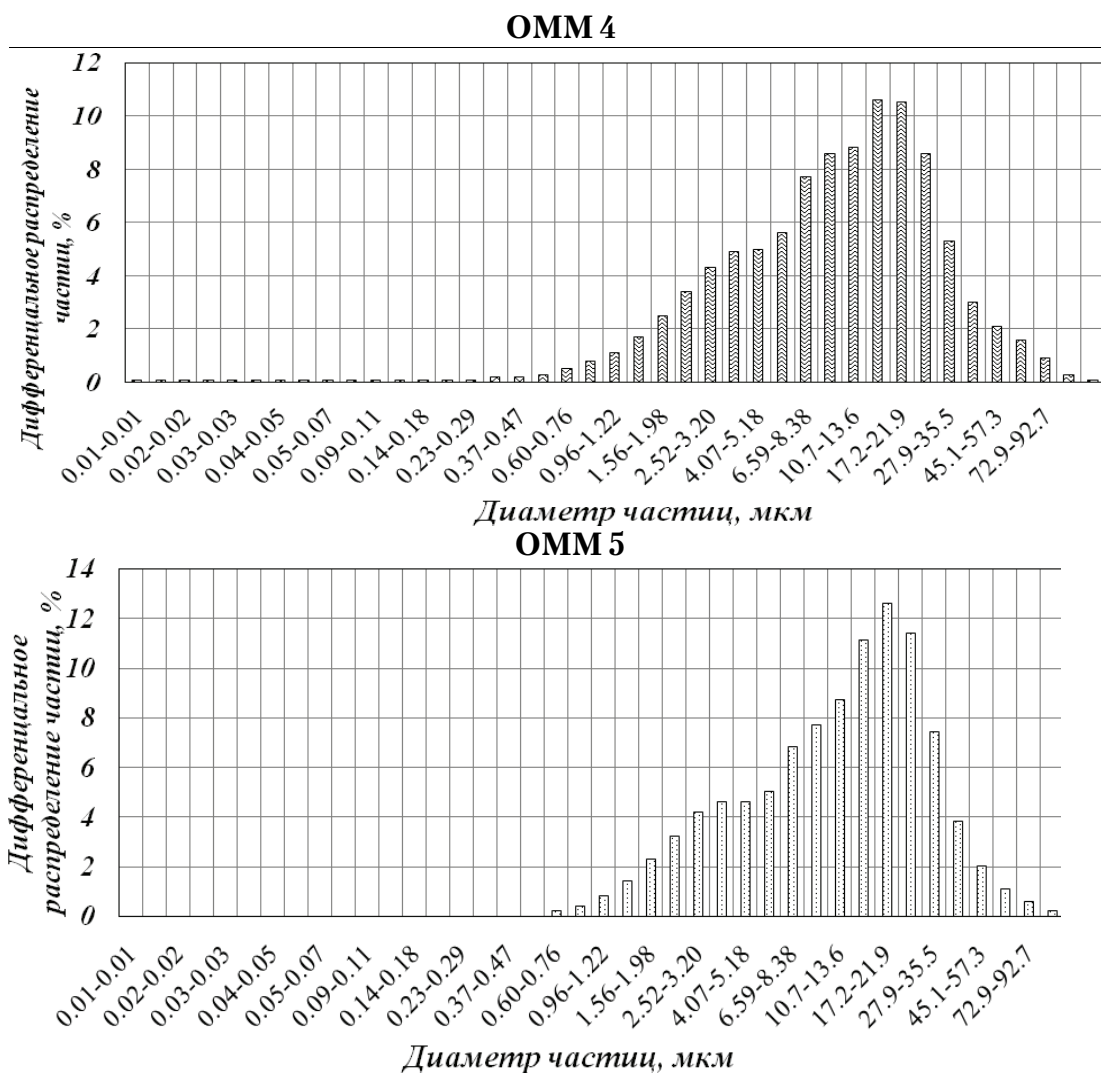


Рисунок – Дифференциальное распределение частиц по размеру разработанных составов органо-минеральных модификаторов (ОММ1-ОММ5).



Окончание рисунка.

Литература

1. Ferraris, C. F. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete / C. F. Ferraris, K. H. Obla, R. Hill. – Текст : непосредственный // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Volume 31, № 2. – P. 245–255.
2. Daderko, G. Specifying blended cements for performance and strength // *The Construction Specifier* : [сайт]. – [2003]. – Текст : электронный. – URL: <http://www.lafarge-na.com> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Aïtcin, P. C. Binders for durable and sustainable concrete / P. C. Aïtcin ; First Edition. – New York : Taylor and Francis Group Ltd, 2008. – 500 p. – Текст : непосредственный.
4. Erdem, T. K. Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete / T. K. Erdem, O. Kirca. –

References

1. Ferraris, C. F.; Obla, K. H.; Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Volume 31, № 2. – P. 245–255.
2. Daderko, G. Specifying blended cements for performance and strength // *The Construction Specifier* : [website]. – [2003]. – Text : electronic. – URL: <http://www.lafarge-na.com> (date of access: 10.04.2023).
3. Aïtcin, P. C. Binders for durable and sustainable concrete ; First Edition. – New York : Taylor and Francis Group Ltd, 2008. – 500 p. – Text : direct.
4. Erdem, T. K.; Kirca, O. Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete. – Text : direct. – In: *Construction and Building Materials*. – 2008. – Volume 22. – P. 1477–1483.

Таблица 2. Составы и свойства цементного камня

№	Расход компонентов, %							Предел прочности при сжатии, МПа	
	ПЩ	В	ОММ-1	ОММ-2	ОММ-3	ОММ-4	ОММ-5	3 суток	28 суток
1.К	100	25	–	–	–	–	–	52,7	69,7
2.1	90	25	10	–	–	–	–	54,4	67,3
2.2	85	25	15	–	–	–	–	56,1	74,5
2.3	80	25	20	–	–	–	–	44,6	59,7
3.1	90	25	–	10	–	–	–	49,9	62,9
3.2	85	25	–	15	–	–	–	48,3	66,4
3.3	80	25	–	20	–	–	–	49,6	64,8
4.1	90	26	–	–	10	–	–	48,5	64,1
4.2	85	25	–	–	15	–	–	51,2	62,8
4.3	80	25	–	–	20	–	–	51,6	59,5
5.1	90	25	–	–	–	10	–	52,5	63,4
5.2	85	25	–	–	–	15	–	50,6	59,9
5.3	80	25	–	–	–	20	–	57,4	59,1
6.1	90	25	–	–	–	–	10	54,7	59,2
6.2	85	25	–	–	–	–	15	50,8	63,7
6.3	80	25	–	–	–	–	20	51,6	62,5

- Текст : непосредственный // Construction and Building Materials. – 2008. – Volume 22. – P. 1477–1483.
5. Shehata, M. H. Use of Ternary Bends Containing Silica Fume and Fly to Suppress Expansion due to Alkali-Silica Reaction in Concrete / M. H. Shehata, M. D. A. Thomas. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2002. – Volume 32(3). – P. 341–349.
 6. Geiker, M. Assessment of Rapid Chloride Permeability Test of Concrete with and without Mineral Admixtures / M. Geiker, N. Thaulow, P. J. Andersen. – Текст : непосредственный // Durability of Building Materials and Components: Proceedings of the Fifth International Conference, Brighton, 7–9 November 1990 / Editton by J. M. Baker, P. J. Nixon, A. J. Majumdar [et al.]. – London, 1991. – P. 493–502.
 7. Зайченко, Н. М. Модифицированные цементные бетоны для устойчивого развития : учебно-справочное пособие / Н. М. Зайченко. – Донецк : «Цифровая типография», 2017. – 401 с. – Текст : непосредственный.
 8. Mehta, P. K. Advancements in Concrete Technology / P. K. Mehta. – Текст : непосредственный // Concrete International. – 1999. – Volume 96(4). – P. 69–76.
 9. Malhotra, V. M. Use of fly ash in concrete / V. M. Malhotra, A. A. Ramezaniapour; 2-nd Edition. – [s. l.] : CANMET, 1994. – 307 p. – Текст : непосредственный.
 5. Shehata, M. H.; Thomas, M. D. A. Use of Ternary Bends Containing Silica Fume and Fly to Suppress Expansion due to Alkali-Silica Reaction in Concrete. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2002. – Volume 32(3). – P. 341–349.
 6. Geiker, M.; Thaulow, N.; Andersen, P. J. Assessment of Rapid Chloride Permeability Test of Concrete with and without Mineral Admixtures. – Text : direct. – In: *Durability of Building Materials and Components: Proceedings of the Fifth International Conference, Brighton, 7–9 November 1990* / Editton by J. M. Baker, P. J. Nixon, A. J. Majumdar [et al.]. – London, 1991. – P. 493–502.
 7. Zaichenko, N. M. Modified cement concretes for sustainable development: educational and reference manual. – Donetsk : «Digital Printing House», 2017. – 401 p. – Text : direct. (in Russian)
 8. Mehta, P. K. Advancements in Concrete Technology. – Text : direct. – In: *Concrete International*. – 1999. – Volume 96(4). – P. 69–76.
 9. Malhotra, V. M.; Ramezaniapour, A. A. Use of fly ash in concrete ; 2-nd Edition. – [s. l.] : CANMET, 1994. – 307 p. – Text : direct.
 10. Mehta, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look. – Text : direct. – In: *Proceedings of the Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. – 1989. – № 1. – P. 1–44.
 11. Li, H.; Farzadnia, N.; Shi, C. The role of seawater in interaction of slag and silicafume with cement in

10. Mehta, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look / P. K. Mehta. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. – 1989. – № 1. – P. 1–44.
11. Li, H. The role of seawater in interaction of slag and silicafume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration / H. Li, N. Farzadnia, C. Shi. – Текст : электронный // Construction Building Materials. – 2018. – October 2018. – P. 508–518. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.091> (дата обращения: 10.04.2023).
12. High volume fly ash cement composite modified with nano silica, hydrated lime and set accelerator / R. Roychand, S. De Silva, D. Law [et al.]. – Текст : электронный // Materials Structures Construction. – 2015. – May 2015. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0629-z> (дата обращения: 10.04.2023).
13. Wong, H. S. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance / H. S. Wong, H. A. Razak. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2005. – Volume 34(4). – P. 696–702.
14. Whiting, D. Silica Fume Concrete for Bridge Decks / D. Whiting, R. Detwiler // NCHRP Report 410: Transportation Research Board. – Washington : D. C., 1998. – 107 p. – Текст : непосредственный.
15. Holland, T. C. Silica Fume User's Manual / T. C. Holland // FHWA-IF-05-016 : Federal Highway Administration. – Washington : D. C., 2005. – 194 p. – Текст : непосредственный.
16. Li, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂ / G. Li. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2004. – Volume 34, № 6. – P. 1043–1049.
17. Zach, J. Possibilities of utilization of finely ground limestone for cement CEM II as substitution to blast furnace slag / J. Zach, P. Schorik, V. Petranek. – Текст : непосредственный // Proceedings 17-th Ibausil, international conference on building materials (internationale baustofftagung), 23–26 September 2009, Weimar, Germany. Band 1 / H. B. Fischer & K. A. Bode (Eds.). – Weimar, Germany : Bauhaus Universitat Weimar, 2009. – P. 10117–10122.
18. Menendez, G. Strength development of ternary blended cement with lime-stone filler and blast-furnace slag / G. Menendez, V. Bonavetti, E. F. Irassar. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Composites. – 2003. – Volume 25, № 1. – P. 61–67.
19. Sabir, B. B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a re-view / B. B. Sabir, S. Wild, J. Bai. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Composites. – 2001. – Volume 23, № 6. – P. 441–454.
20. Konsta-Gdoutos, M. S. Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration. – Text : direct. – In: *Construction Building Materials*. – 2018. – October 2018. – P. 508–518. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.091> (date of access: 10.04.2023).
21. Roychand, R.; Silva, S. De; Law, D. [et al.]. High volume fly ash cement composite modified with nano silica, hydrated lime and set accelerator. – Text : electronic. – In: *Materials Structures Construction*. – 2015. – May 2015. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0629-z> (date of access: 10.04.2023).
22. Wong, H. S.; Razak, H. A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Volume 34(4). – P. 696–702.
23. Whiting, D.; Detwiler, R. Silica Fume Concrete for Bridge Decks // NCHRP Report 410: Transportation Research Board. – Washington : D. C., 1998. – 107 p. – Text : direct.
24. Holland, T. C. Silica Fume User's Manual // FHWA-IF-05-016: Federal Highway Administration. – Washington : D. C., 2005. – 194 p. – Text : direct.
25. Li, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Volume 34, № 6. – P. 1043–1049.
26. Zach, J.; Schorik, P.; Petranek, V. Possibilities of utilization of finely ground limestone for cement CEM II as substitution to blast furnace slag. – Text : direct // Proceedings 17th Ibausil, international conference on building materials (internationale baustofftagung), 23–26 September 2009, Weimar, Germany. Band 1 / H. B. Fischer & K. A. Bode (Eds.). – Weimar, Germany: Bauhaus Universitat Weimar, 2009. – P. 10117–10122.
27. Menendez, G.; Bonavetti, V.; Irassar, E. F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Composites*. – 2003. – Volume 25, No 1. – P. 61–67.
28. Sabir, B. B.; Wild, S.; Bai, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a re-view. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Composites*. – 2001. – Volume 23, № 6. – P. 441–454.
29. Konsta-Gdoutos, M. S.; Shah, M. S. Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Volume 33, № 8. – P. 1269–1276.
30. Li, P.; Li, W.; Yu, T. [et al.]. Investigation on early-age hydration, mechanical properties and microstructure of seawater sea sand cement mortar. – Text: electronic. – In: *Construction Building Materials*. – 2020. – Volume 249. – P. 118776. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118776> (date of access: 10.04.2023).
31. Li, Q.; Geng, H.; Shui, Z.; Huang, Y. Effect of metakaolin addition and seawater mixing on the

and blast furnace slag / M. S. Konsta-Gdoutos, M. S. Shah. – Текст : непосредственный // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Volume 33, № 8. – P. 1269–1276.

21. Investigation on early-age hydration, mechanical properties and microstructure of seawater sea sand cement mortar / P. Li, W. Li, T. Yu [et al.]. – Текст : электронный // *Construction Building Materials*. – 2020. – Volume 249. – P. 118776. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118776> (дата обращения: 10.04.2023).
22. Effect of metakaolin addition and seawater mixing on the properties and hydration of concrete / Q. Li, H. Geng, Z. Shui, Y. Huang // *Applied Clay Science*. – 2015. – Volume 115. – P. 51–60. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.043> (дата обращения: 10.04.2023).

properties and hydration of concrete. – In: *Applied Clay Science*. – 2015. – Volume 115. – P. 51–60. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.043> (date of access: 10.04.2023).

Лахтарина Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: легкие высокопрочные бетоны.

Зайченко Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: высокопрочные и особо высокопрочные бетоны на основе модифицированных дисперсных компонентов бетона.

Егорова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны.

Хлестов Максим Сергеевич – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

Онопченко Николай Вадимович – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: дисперсно-армированные бетоны.

Лахтарина Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: легкі високоміцні бетоны.

Зайченко Микола Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: високоміцні і надвисокоміцні бетоны на основі модифікованих дисперсних компонентів бетону.

Егорова Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ФДБНЗ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетоны, що самоупільнюються.

Хлестов Максим Сергійович – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетоны з високими експлуатаційними характеристиками.

Онопченко Микола Вадимович – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дисперсно-армовані бетоны.

Lakhtarina Sergei – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: lightweight high-strength concrete.

Zaichenko Nikolai – D. Sc. (Engineering), Professor; of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: high strength and high-performance concretes on the base of modified fillers.

Yegorova Elena – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: self-compacting concretes.

Khlestov Maksim – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: concretes with high performance characteristics.

Onopchenko Nikolai – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: fiber concretes