



Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Пористые реакционные порошковые бетоны

А.А. Шишкина¹

Криворожский национальный университет, 50005, Украина, Кривой Рог, ул. Островского, 21.

Информация о статье

УДК 691.32

Научная статья

История

Подана в редакцию 30 июня 2014
Принята 23 июля 2014

Ключевые слова

пенобетон;
усадка;
водопоглощение;
комплексная добавка;
модификация структуры бетона

АННОТАЦИЯ

На строительные конструкции промышленных зданий и сооружений, в частности, горно-металлургического комплекса, в особенности расположенных вблизи тепловых аппаратов, оказывает температурное влияние окружающая среда, изменяя физико-механические свойства материалов, из которых изготовлены эти конструкции, и, как следствие, влияет на их долговечность. Это приводит к необходимости предусматривать, при реконструкции зданий и сооружений, мероприятия по повышению их долговечности путем снижения температурного влияния окружающей среды. Целью исследований, результаты которых представлены в работе, является получение пористого Reactive powder concretes с повышенной прочностью и пониженными усадкой и водопоглощением за счёт модификации его состава комплексной добавкой, которая состоит из полиспирта и железосодержащего вещества. Экспериментами установлено влияние комплексной добавки на прочность пористого реакционного порошкового бетона, объёмное водопоглощение исследуемых бетонов и их водопоглощение методом капиллярного подсоса для бетонов, приготовленных без использования комплексной добавки и с использованием добавки. Исследовано изменение во времени массы бетона с добавкой и без неё. Также была исследована усадка пористого бетона с применением комплексной добавки и без нее. В результате было установлено, что одновременное введение в пористые реакционные порошковые бетоны (rRPC) минерального комплекса, содержащего железо, и полиспирта приводит к повышению прочности при сжатии, снижению водопоглощения и усадки указанных бетонов. Показано, что содержание минерального железистого комплекса (порошка) и органического компонента в rRPC носит экстремальный характер, т.е. имеется их содержание, обеспечивающее наибольшую прочность таких бетонов и их наименьшее водопоглощение.

Содержание

1.	Введение	129
2.	Обзор литературы	129
3.	Постановка задачи	130
4.	Описание исследования	130
5.	Заключение	132

¹

Контактный автор:

+ 38 (097) 830 0286, shishkina_tbvk@mail.ru (Шишкина Александра Александровна, к.т.н., доцент)

1. Введение

На строительные конструкции промышленных зданий и сооружений, в частности, горно-металлургического комплекса, в особенности расположенных вблизи тепловых аппаратов, оказывает температурное влияние окружающая среда, изменяя физико-механические свойства материалов, из которых изготовлены эти конструкции, и, как следствие, влияет на их долговечность. Это приводит к необходимости предусматривать, при реконструкции зданий и сооружений, мероприятия по повышению их долговечности путем снижения температурного влияния окружающей среды.

Кроме того, одним из самых важных факторов, которые определяют стоимость эксплуатации домов и сооружений, является величина затрат на поддержание в них необходимого температурного режима. За годы эксплуатации конструкции существующих зданий и сооружений подвергались многократному воздействию окружающей среды, что снизило эксплуатационные свойства материалов, из которых изготовлены строительные конструкции и, как следствие, самих зданий. Помимо этого, строительные конструкции существующих жилых зданий и других сооружений проектировались на основе норм, которые уже не отвечают современным требованиям по теплопроводности и требуют, при ремонте конструкций, выполнения конструктивных мероприятий по ее уменьшению.

Одними из эффективных материалов для защиты от тепловых влияний окружающей среды, которые обладают низкой теплопроводностью, являются легкие и пористые бетоны. Однако известные пористые бетоны обладают повышенными влажностными деформациями (набуханием и усадкой) и водопоглощением и недостаточной прочностью при сжатии, что ограничивает их применение.

Пористые бетоны широко применяются для производства наружных ограждающих конструкций, доля которых составляет 45 – 60% объема строительных конструкций здания. Используя высокопрочные пористые бетоны возможно возведение уникальных зданий и сооружений.

2. Обзор литературы

Основу современной технологии бетона любого вида, как плотного, так и пористого, составляет создание высококачественного цементного камня, отличающегося высокой дисперсностью составляющих и новообразований, малой дефектностью и устойчивостью структуры, в том числе за счет уменьшения ее перестройки в процессе твердения. На его основе могут создаваться самые различные качественные бетоны путем «вкрапления» в структуру материала дополнительных составляющих и ее модификации [1-10].

В частности, при получении пенобетонов, основными «вкраплениями» в структуру бетона являются воздушные поры [11-14], которые, приводя к снижению плотности бетона и его теплопроводности, обуславливают снижение его прочности (в первую очередь при сжатии), не позволяя отнести данный бетон к конструктивным бетонам.

Очевидно, что основным путем повышения прочности пористых бетонов является повышение прочности бетона в их межпоровых перегородках. Данную задачу можно решить применением высокопрочных бетонов. Наиболее приемлемыми, в данном случае, являются так называемые реакционные порошковые бетоны — Reactive powder concretes (RPC). Данные бетоны получают на основе смеси вяжущего вещества, в качестве которого могут применяться портландцемент, шлакощелочное, шлакошламовое либо гипсоцементное вяжущее [15-17], микронаполнителя, в качестве которого могут применяться отходы обогащения железных руд, микрокремнезем, зола-унос, известняк [15,17-20].

В случае получения пористого бетона путем применения пен - пенобетона, наличие пенообразователя, который представляет собой поверхностно-активное вещество (ПАВ), в рассматриваемой системе (пенобетоне) приводит к тому, что часть этого ПАВ остается в межпоровых перегородках – в бетоне и, адсорбируясь на поверхности частиц вяжущего, замедляет реакции его гидратации. Это приводит к снижению величины прочности бетона в межпоровых перегородках и, как следствие, пенобетона.

Известные результаты исследований в области флотации [21] показывают, что молекулы ПАВ в первую очередь адсорбируются на минералах, содержащих железо, а результатами исследований школы академика Ребиндера П.А. [22] установлено, что ПАВ концентрируясь на внутренней поверхности воздушных пузырьков в бетоне, вступают в реакцию с минералами цемента, образуя на этой поверхности упрочненный слой новообразований, что способствует повышению прочности бетона. Кроме того, работами этой же школы установлено, что менее поверхностно-активные вещества вытесняют с поверхности раздела фаз более поверхностно-активные вещества.

Приведенные выше данные послужили основой научной гипотезы, которая заключается в следующем: для управления процессами структурообразования пористых RPC не зависимо от метода создания пористой структуры необходимо введение в их состав минерально-органических композиций, которые будут модифицировать структуру продуктов гидратации вяжущих, способствуя закупориванию пор, повышению скорости гидратации и достижению высокой прочности затвердевшей системы. Наиболее приемлемыми являются минерально-органические системы, минеральная часть которых представлена соединениями железа, а органическая – многоатомными спиртами. Данный вид бетонов практически полностью подпадает под классификацию как Reactive powder concretes (RPC), содержащих поры, т.е. пористые Reactive powder concretes (RPC).

3. Постановка задачи

Целью настоящей работы является получение пористых RPC и определение степени влияния минерально-органической добавки на основе минерального комплекса, содержащего железо и полиспирта на прочность при сжатии, пористость и водопоглощение этих бетонов.

4. Описание исследования

В исследовании производили в соответствии со стандартными методиками. Определение прочности при сжатии производили на универсальной машине УММ-100 испытанием стандартных образцов (образцы-кубы 150 x 150 x 150 мм и образцы-балочки 40 x 40 x 160 мм). Для изготовления образцов использовали стандартный портландцемент М400 производства ПАО «Хайдельберг цемент» (г. Кривой Рог). В качестве железосодержащего компонента использовали оксид железа и отходы обогащения железных руд и их тонкодисперсную часть. Отходы обогащения железных руд по своему гранулометрическому составу отвечают крупному песку (модуль крупности 2,3), тонкодисперсная часть отходов обогащения железных руд имела удельную поверхность 260 м²/кг. В качестве заполнителя применяли речной песок. В качестве полиспирта – пропантриол-1,2,3. Предварительными исследованиями было определено, что использование пропантриол-1,2,3 позволяет в большей степени повысить прочность бетона. В качестве пенообразователя использовали пенообразователь – ПО-2, а в качестве газообразователя – алюминиевую пудру.

Для исключения влияния на результаты исследований состава бетона, он был принят постоянным: цемент – 450 гр.; заполнитель – 150 гр.; вода – 250 гр.

Для получения пенобетона добавляли 0,8 гр. пенообразователя, для получения газобетона – 1 гр. алюминиевой пудры.

В результате получены пористые бетоны объемом 1000 см³ (1 л):

пенобетон: плотностью 654 кг/м³, прочностью при сжатии 1,8 МПа.

газобетон: плотность 650 кг/м³, прочность при сжатии 1,9 МПа

В процессе экспериментов в составе бетона изменялось содержание железосодержащего компонента и полиспирта.

Железосодержащий компонент вводился в сухом виде путем смешивания с цементом и заполнителем, полиспирт вводился в предварительно отмерянную для замеса дозу воды.

Результаты исследования влияния комплексной добавки на прочность пористого RPC (табл. 1 и 2) показали, что оптимальным является соотношение 1:1 между железосодержащим компонентом и полиспиртом. При суммарном их расходе 2 гр./л бетона.

Таблица 1. Влияние комплексной добавки на прочность при сжатии пористого RPC

Содержание оксида железа, гр/л	Прочность бетона, %, при содержании полиспирта, гр/л		
	0	1	2
0	100/110	150/150	160/165
1	110/124	180/180	176/183
2	123/125	175/180	180/184

Примечания:

1. Плотность бетона 650 кг/м³.

2. Расход компонентов добавки приведен на 1 л бетона.

3. Прочность: в числителе – пенобетона, в знаменателе – газобетона.

Таблица 2. Влияние комплексной добавки на прочность при сжатии пористого RPC

Содержание тонкодисперсных отходов обогащения железных руд, гр/л	Прочность бетона, МПа, при содержание полиспирта, гр/л		
	0	1	2
0	100/110	154/156	167/170
1	117/128	186/184	181/185
2	116/125	178/183	185/185

Примечания:

1. Плотность бетона 650 кг/м³.
2. Расход компонентов добавки приведен на 1 л бетона.
3. Прочность: в числителе – пенобетона, в знаменателе – газобетона.

Как видно из результатов экспериментов использование тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд оказалось более эффективным по сравнению с использованием оксида железа, очевидно, это связано с тем, что в отходах обогащения железных руд содержится не только оксид железа, но и другие соединения железа.

Так как для бетона наиболее опасной является открытая пористость, то во второй группе проведенных исследований было изучено изменение данного вида пористости в зависимости от содержания комплексной минерально-органической добавки. Открытую пористость пористого бетона определяли двумя методами: методом объемного водопоглощения и методом капиллярного подсоса.

В первом случае образцы бетона высушивали до постоянной массы, взвешивали, на 48 часов погружали в воду и вновь взвешивали. Водопоглощение определяли как отношение разницы в массе образцов выдержанных в воде и высушенных до постоянной массы к массе высушенных образцов в процентах. Во втором случае образцы-балочки помещали в емкость с водой в вертикальном положении таким образом, чтобы образцы были погружены в воду на 1 см. В процессе проведения эксперимента (48 часов) уровень воды в емкости поддерживали на постоянном уровне. Водопоглощение определяли тем же методом.

Как показали результаты экспериментов по первому методу (таблица 3), введение комплексной добавки в исследуемую систему приводит к резкому снижению водопоглощения бетоном.

Таблица 3. Влияние комплексной добавки на водопоглощение пористого RPC (погружение в воду)

Содержание полиспирта, г/л	0	1	2	3
Водопоглощение, %	92/48	80/32	68/30	63/26

Примечания:

1. Расход добавки приведен на 1 л. полученного бетона.
2. Водопоглощение: в числителе – пенобетона; в знаменателе – газобетона.
3. В добавке равно содержание оксида железа и полиспирта.
4. Масса высушенного образца 654 гр.

Определение водопоглощения пористого RPC вторым методом (методом капиллярного подсоса) также показало, что введение комплексной добавки приводит к значительному уменьшению водопоглощения пористым бетоном (таблица 4).

Таблица 4. Влияние комплексной добавки на водопоглощение пористого RPC (капиллярный подсос)

Высота подъема воды, %	
Без добавки	С добавкой полиспирта (2 гр./л)
50/36	22/12

Примечания:

1. Расход добавки приведен на 1 л. полученного бетона.
2. Водопоглощение: в числителе – пенобетона; в знаменателе – газобетона.
3. В добавке равно содержание оксида железа и полиспирта.
4. Масса высушенного образца 1664 гр.

Уменьшение высоты подъема воды по телу бетона можно объяснить только резким уменьшением количества открытых и сообщающихся капилляров в объеме пористого RPC при введении комплексной

добавки, которая состоит из полиспирта и железосодержащего вещества. А это является подтверждением научной гипотезы работы.

В третьей группе исследований было определено изменение массы образцов-кубов (которые имели объем 1000 см³) начиная с 3-суточного возраста.

Как показали результаты следующей группы экспериментов (табл. 5), образцы, изготовленные из пористого бетона (пенобетона) с добавкой, за 25 суток потеряли 16,3% массы, а образцы, изготовленные из пенобетона без добавки – 17,8 %, т.е. потеря массы образцами, после 3 суток твердения, практически не зависит от содержания комплексной добавки. Однако следует отметить, что в момент изготовления образцов они имели практически одинаковую массу, были изготовлены с одинаковым расходом компонентов по одинаковой технологии. Их состав отличался только наличием добавки, масса которой составила 3 гр., что не является определяющим влиянием на результаты экспериментов. Образцы хранили в климатической камере при температуре 20°C и относительной влажности 65%.

Таблица. 5. Изменение массы образцов пенобетона во времени

Возраст, сут.	Масса образца, гр.	
	Без добавки	С добавкой
0	700	700
3	528	650
7	425	520
14	430	522
28	440	525

Примечания:

1. Расход добавки 2 гр. на 1 л. полученного бетона.
2. В добавке равно содержание оксида железа и полиспирта.

Таким образом, за трое первых суток твердения, образцы, приготовленные на основе дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь», потеряли 24,6% от массы, а образцы, приготовленные на основе системы дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь – комплексная добавка», только 7,6 % от массы образца.

Так как образцы изготавливали из одних и тех же материалов, одного и того же состава, то потеря массы образцами могла происходить только из-за потери ими влаги. Результаты данной группы экспериментов косвенно подтверждают, что показывают, что в пористом, полученном в результате твердения дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь – комплексная добавка», формируется значительно большее количество замкнутых пор по сравнению с цементным камнем, полученным в результате твердения дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь».

Результаты данных исследований используются предприятием «Перспектив СМ» (п. Лозоватка). В промышленных условиях, использование тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд и полиспирта пропантриол-1,2,3 в качестве добавки к пенобетону позволило: повысить прочность пенобетона 35-40% и снизить расход цемента на 50 кг/м³ пенобетона.

5. Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что одновременное введение в пористые реакционные порошковые бетоны (rRPC) минерального комплекса, содержащего железо, и полиспирта приводит к повышению прочности при сжатии, снижению водопоглощения и усадки указанных бетонов.
2. Показано, что содержание минерального железистого комплекса (порошка) и органического компонента в rRPC носит экстремальный характер, т.е. имеется их содержание, обеспечивающее наибольшую прочность таких бетонов и их наименьшее водопоглощение.

Литература

1. Баженов Ю.М. Бетоны: технологии будущего // Современные стройматериалы. 2005. июль-август. С. 50-52.
2. Красовский П. С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов: учебное пособие. Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2013. 204 с.
3. Шишкина А. А. Свойства и технология пенобетона, модифицированного оксидами железа: дис...канд. техн. наук: 05.23.05. – Кривой Рог, 2010. – 178 с.
4. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40). С. 5-19.
5. Горшков А.С., Ватин Н.И. Инновационная технология возведения стеновых конструкций из газобетонных блоков на полиуретановый клей // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 8 (13). С. 20-28.
6. Шишкин А.А. Специальные бетоны для усиления строительных конструкций эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред: дис...докт. техн. наук: 05.23.05. – Кривой Рог, 2003. – 336 с.
7. Баженов Ю. М. Технология бетона: учебник. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
8. Effect of fly ash on autogenous shrinkage / Termkhajornkit P., Nawa T., Nakai M., Saito T. (2005) Cem. Concr. Res. Vol. 35. Issue 3. Pp. 473-482.
9. Yang Y., Sato R., Kawai K. (2005) Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages / Cem. Concr. Res. Vol. 35. Issue 3. Pp. 449-456.
10. Меркин А. П., Траубе П. Р. Непрочное чудо. М.: Химия, 1983. 224 с.
11. Меркин А. П., Кобидзе Т. Е. Особенности структуры и основы технологии получения эффективных пенобетонных материалов // Строительные материалы. 1988. № 3. С. 16–18.
12. Шахова Л. Некоторые аспекты исследований структурообразования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения // Строительные материалы. 2003. №2 [приложение]. С. 4-7
13. Юдович Б. Э., Зубехин С. А. Пенобетон: новое в основах технологии // Техника и технология силикатов. 2007. Т. I. С. 14–24.
14. Swamy R.N., Sakai M., Nakamura N. (2006) Role of Superplasticizers and Slag for Producing High Performance Concrete. The Fourth CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI SP-148-1, Proceedings. Detroit (USA), - Pp. 1-26.
15. Kocaba V., Gallucci E., Scrivener K.L. (2012) Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes. Cement and concrete research. Elsevier Science Publishing Company, Inc. Vol. 42. Pp. 511-525.
16. Шишкин А.А. Щелочные реакционные порошковые бетоны // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2 (17). С. 56-65.
17. An innovation method in producing high early strength PFA concrete / Poon C.S., Kou S.C., Lam L., Lin Z.S. (1999) Creating with Concrete: International Conference. 1999: Proceedings. Dundee (Scotland). Pp. 131-138.
18. Cao J., Chung D.D.L. (2004) Use fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding // Cement and Concrete Research. Vol. 34. Issue 10. Pp. 1889-1892.
19. Effect of temperature on the hydration of portland cement blended with siliceous fly ash / Deschner F., Lothenbach B., Winnefeld F., Neubauer J. (2013) Cement and Concrete Research. Elsevier Science Publishing Company, Inc. Vol. 52. Pp. 169-181.
20. Годэн А.М. Флотация. М.: Госнаучлит по горному делу, 1959. - 653 с.
21. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М.: «Наука», 1978. – 369. с.

The porous reactive powder concrete

A.A. Shishkina¹

Krivoy Rog National University, 21 street of Ostrovskogo, Krivoy Rog, 50005, Ukraine.

ARTICLE INFO

Original research article

Article history

Received 30 June 2014
Accepted 23 July 2014

Keywords

foam concrete;
shrinkage;
water absorption;
complex additive;
modification of the concrete structure

ABSTRACT

On structures of industrial buildings and structures, in particular the mining and metallurgical complex, especially located near thermal devices, has the effect of temperature environment, changing the physical and mechanical properties of the materials from which these structures are made, and, as a consequence, affect their durability. This leads to the need to provide, in the reconstruction of buildings and structures, activities to increase their longevity by reducing the temperature influence of the environment. The purpose of research, the results of which are shown in the work is to obtain a porous Reactive powder concretes with improved strength and reduced shrinkage and water absorption by modifying its integrated additive composition which consists of iron-containing substance and a polyalcohol. Experiments established the influence of additives on the integrated strength of the porous reactive powder concrete, volumetric water absorption study concrete and water absorption by capillary suction of concrete prepared without the use of complex additives and using supplements. The change in time of mass concrete can be with and without it. Also investigated was the shrinkage of the porous concrete with or without complex additive it. As a result, it was found that the simultaneous introduction to the porous reactive powder concretes (pRPC) mineral complex containing iron polyalcohol and leads to increased compression strength, lower water absorption and shrinkage of said concrete. It is shown that the content of ferrous mineral complex (powder) and an organic component is pRPC extreme nature, i.e. attaching their content, providing the greatest strength of concrete and the least water absorption

¹

Corresponding author:

+ 38 (097) 830 0286, shishkina_tbvk@mail.ru (Alexandra Alexandrovna Shishkina, Ph. D., Associate Professor)

References

1. Bazhenov Yu.M. (2005) *Betony: tekhnologii budushchego*. [Concrete: technologies of the future] *Sovremennyye stroymaterialy. iyul-avgust*. Pp. 50-52. (rus)
2. Krasovskiy P. S. (2013) *Fiziko-khimicheskiye osnovy formirovaniya struktury tsementnykh betonov* [Physico-chemical basis of structure formation of cement concrete] *uchebnoye posobiye. Khabarovsk: Izdatelstvo DVGUPS*, 204 p. (rus)
3. Shishkina A. A. (2010) *Svoystva i tekhnologiya penobetona, modifitsirovannogo oksidami zheleza* [Properties and foam technology, modified iron oxides]: dis...kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Krivoy Rog, 2010. 178 p. (rus)
4. Gorshkov A.S., Vatin N.I. (2013) *Svoystva stenovykh konstruksiy iz yacheistobetonnykh izdeliy avtoklavnogo tverdeniya na poliuretanovom kleyu*. [Properties of porous concrete wall construction products autoclaved polyurethane glue] *Magazine of Civil Engineering*. Vol. 5. Issue 40. Pp. 5-19. (rus)
5. Gorshkov A.S., Vatin N.I. (2013) *Innovatsionnaya tekhnologiya vozvedeniya stenovykh konstruksiy iz gazobetonnykh blokov na poliuretanovyy kley* [The innovative technology of construction of the wall construction of the concrete blocks on the polyurethane adhesive] *Construction of Unique Buildings and Structures*. Vol. 13. Issue. Pp. 20-28. (rus)
6. Shishkin A.A. (2003) *Spetsialnyye betony dlya usileniya stroitelnykh konstruksiy ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh deystviya agressivnykh sred* [Special concrete to reinforce building structures operating in conditions hostile environment]: dis...dokt. tekhn. nauk: 05.23.05. Krivoy Rog. 336 p. (rus).
7. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona: uchebnik* [Concrete technology] . M.: Izd-vo ASV, 2003. 500 p. (rus)
8. Effect of fly ash on autogenous shrinkage / Termkhajornkit P., Nawa T., Nakai M., Saito T. (2005) *Cem. Concr. Res.* Vol. 35. Issue 3. Pp. 473-482.
9. Yang Y., Sato R., Kawai K. (2005) Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages / *Cem. Concr. Res.* Vol. 35. Issue 3. Pp. 449-456.
10. Merkin A. P., Traube P. R. *Neprochnoye chudop* [Recarious miracle]. M.: Khimiya, 1983. 224 p. (rus).
11. Merkin A. P., Kobidze T. Ye. (1988) *Osobennosti struktury i osnovy tekhnologii polucheniya effektivnykh penobetonnykh materialov. Stroitelnyye materialy*. [Features of structure and foundations of the technology producing effective foam concrete materials] 1988. Issue 3. Pp. 16–18. (rus)
12. Shakhova L. (2003) *Nekotoryye aspekty issledovaniy strukturoobrazovaniya yacheistykh betonov neavtoklavnogo tverdeniya*. [Some aspects of studies of structure of non-autoclaved cellular concrete hardening] *Stroitelnyye materialy*. Issue 2 [application]. Pp. 4-7. (rus)
13. Yudovich B. E., Zubekhin S. A. (2007) *Penobeton: novoye v osnovakh tekhnologii*. [Foam: a new technology in the basics] *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. Vol. 1. Pp. 14–24.
14. Swamy R.N., Sakai M., Nakamura N. (2006) Role of Superplasticizers and Slag for Producing High Performance Concrete. The Fourth CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI SP-148-1, Proceedings. Detroit (USA), - Pp. 1-26.
15. Kocaba V., Gallucci E., Scrivener K.L. (2012) Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes. *Cement and concrete research*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. Vol. 42. Pp. 511-525.
16. Shishkin A.A. (2014) Alkaline reaction powder concretes. *Construction of Unique Buildings and Structures*. Vol. 17. Issue 2. Pp. 56-65.
17. An innovation method in producing high early strength PFA concrete / Poon C.S., Kou S.C., Lam L., Lin Z.S. (1999) *Creating with Concrete: International Conference*. 1999: Proceedings. Dundee (Scotland). Pp. 131-138.
18. Cao J., Chung D.D.L. (2004) Use fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding // *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. Issue 10. Pp. 1889-1892.
19. Effect of temperature on the hydration of portland cement blended with siliceous fly ash / Deschner F., Lothenbach B., Winnefeld F., Neubauer J. (2013) *Cement and Concrete Research*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. Vol. 52. Pp. 169-181.
20. Goden A.M. (1959) *Flotatsiya* [Flotation] . M.: Gosnauchlit po gornomu delu. 653 p. (rus).
21. Rebinder P.A. (1978) *Izbrannyye trudy. Poverkhnostnyye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Kolloidnaya khimiya*. [Selected Works. Surface phenomena in disperse systems.] M.: «Nauka». 369 p.