



УДК 666.972.16



УШЕРОВ-МАРШАК О.В.
Д-р технічних наук, проф.,
Харківський національний
університет будівництва та
архітектури,
м. Харків, Україна,
e-mail: a.v.usherov@gmail.com,
тел.: (067) 573-49-09,
ORCID: 0000-0001-9590-8537



КАБУСЬ О.В.
Канд. технічних наук, доц.,
Харківський національний
університет будівництва
та архітектури,
м. Харків, Україна,
e-mail: calorimetry_centra@ukr.net,
тел.: (057) 706-18-25,
ORCID: 0000-0002-2940-0513

ФУНКЦІОНАЛЬНА СУМІСНІСТЬ

КОМПОНЕНТІВ – ФАКТОР РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО БЕТОНУ (НА ПРИКЛАДІ ДОБАВОК ДО БЕТОНУ)

АНОТАЦІЯ

Розглядається проблема забезпечення ефективності рецептурно-технологічних рішень у сучасних бетонах. Констатується експоненціальний характер розвитку технології бетону, обумовлений зростанням числа компонентів, особливо в цементах і добавках. Обґрунтована доцільність вирішення задач оцінювання ефективності добавок у багатокомпонентних цементних системах із застосуванням методів калориметрії. Наводяться приклади проведення функціонально-кінетичного аналізу ефективного застосування добавок до бетонів різного призначення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: добавки в бетон, функціональність, калориметрія, оцінювання ефективності, термокінетичний аналіз.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ КОМПОНЕНТОВ – ФАКТОР РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА (НА ПРИМЕРЕ ДОБАВОК В БЕТОН)

УШЕРОВ-МАРШАК А.В. Д-р технических наук, проф., Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, e-mail: a.v.usherov@gmail.com, тел.: (067) 573-49-09, ORCID: 0000-0001-9590-8537

КАБУСЬ А.В. Канд. технических наук, доц., Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, e-mail: calorimetry_centra@ukr.net, тел.: (057) 706-18-25, ORCID: 0000-0002-2940-0513

АННОТАЦИЯ

Рассматривается проблема обеспечения эффективности рецептурно-технологических решений в современных бетонах. Констатируется экспоненциальный характер развития технологии бетона, обусловленный ростом числа компонентов, особенно в цементах и добавках. Обоснована целесообразность решения задач оценки эффективности добавок в многокомпонентных цементных системах с применением методов калориметрии. Приводятся примеры проведения функционально-кинетического анализа эффективности применения добавок в бетонах различного назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: добавки в бетон, функциональность, калориметрия, оценка эффективности, термокинетический анализ.

FUNCTIONAL COMPATIBILITY OF COMPONENTS – FACTOR OF THE DEVELOPMENT OF MODERN CONCRETE (ON THE EXAMPLE OF ADMIXTURES FOR CONCRETE)

USHEROV-MARSHAK A.V. Dr., Prof., Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.v.usherov@gmail.com, тел.: (067) 573-49-09, ORCID: 0000-0001-9590-8537

KABUS A.V. PhD, Ass. Prof., Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, e-mail: calorimetry_centra@ukr.net, тел.: (057) 706-18-25, ORCID: 0000-0002-2940-0513



ABSTRACT

The article is devoted to the problem of improve efficiency of prescription and technological solutions for modern concrete with admixtures. It is being stated that exponential character of the concrete technology development caused by the increase of the number of components, especially in cements and admixtures, which allows to adjust the composition and structure of the concrete mixtures within wide range and also to achieve self-regulation of the concrete mixtures' and concretes' properties. The expediency of solving the problems of quantitative evaluation of the effectiveness of admixtures use in multicomponent cement systems at the phenomenological level using calorimetry methods is substantiated.

Focal point is made on the analytically proved necessity of addressing to the terms: function, functionality, multi-functionality and potential of functionality within the concept of High-Performance Concrete. Increase of importance of chemical, mineral and complex admixtures as carriers of main functions of the concrete mixtures and concretes during the stages of their design and production is evaluated. Admixtures compatibility with cements were further researched and elaborated. The principle of components functional compatibility was articulated, that mainly related to the «cement-admixture» system.

Methodology of functional-kinetic analysis, that base on principle of continuity of time, energy (temperature) and information about the parameters of the hardening processes using of isothermal and semi-adiabatic calorimetry methods, was created. Results are analyzed by the special computer program which identifies appropriate kinetic directional patterns, level of admixtures influence and advises its reasonable dosage. Illustrative examples of applying functional-kinetic analysis to precast reinforced concrete are provided. Relevance of further development of the proposed approach as a part of concrete information technology is being emphasized.

KEY WORDS: admixtures for concrete, functionality, calorimetry, efficiency evaluation, thermokinetic analysis

ВВЕДЕНИЕ

Современный бетон – оправдано ли такое определение? В чём существенная разница между этим определением и общепринятыми в международных нормативных документах понятиями. К примеру, EN 206:2013+A1:2016 [1] представляет бетон как материал, получаемый смешиванием цемента, крупного и мелкого заполнителей, воды, химических и минеральных добавок, возможно, фибры, который приобретает свои свойства в результате гидратации цемента. При этом выделяются в качестве отдельных технологически важных стадий – бетонная смесь и затвердевший бетон различного назначения с соответствующими свойствами.

Что же здесь нового, современного? Польские исследователи Л. Чарнецки и В. Курдовски [2] очень удачно отобразили картину развития бетона, начиная с 1850 г. (рис. 1).

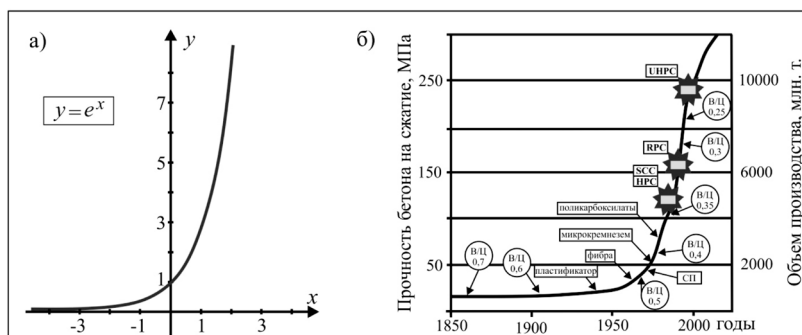


Рис. 1. Экспоненциальный характер развития технологии бетона: а) типичная функция; б) в соответствии с [2]

Рис. 1 иллюстрирует революционные изменения свойств бетона, обусловленные в основном увеличением эффективности добавок и технологически возможными типами «Ductal» или «White Box». Важнейшая предпосылка – рост наукоёмкости бетоноведения, линейный характер развития которого к концу XX века сменился на бурно восходящий, экспоненциальный. По признаку экспоненциальности развиваются многие отрасли науки и техники, в т.ч. – коммуникация, связь, медицина и др. Ситуация в технологии бетона полностью вписывается в парадигму экспоненциальных (прорывных) технологий.

Выдающийся писатель-фантаст и философ Станислав Лем блестяще определил – «технологии обусловлены состоянием знаний и способов достижения цели» [3]. Все сходится – сочетание глубоких междисциплинарных знаний с эффективными компонентами и средствами достижения высоких свойств товарного бетона, изделий и конструкций обеспечило очевидный прогресс отрасли.

Бетоны, ещё вчера называемые бетонами нового поколения, сегодня – реальность. Реальны очень высокие показатели эффективности добавок, технологичности бетонных смесей, прочности, долговечности, эстетичности и инвестиционной привлекательности. Наиболее значимой является возможность непрерывного регулирования составов, структуры и свойств бетона на начальных стадиях твердения.

Современный бетон постепенно осваивает статус "умного" материала [4]. Приставки smart и self означают способность к саморегулированию свойств бетона на стадиях приготовления, формования, твердения и эксплуатации. Известную линейку саморегулируемых бетонов повсеместно возглавляет самоуплотняющийся бетон. Действительно, длительно сохраняемые реологические свойства, уплотнение без приложения внешних воздействий, самые высокие показатели прочности и плотности вполне доступны. Самозалечивающийся, самоочищающийся, самодиагностирующийся и др. разновидности «умных» бетонов пока экзотичны, но интересны и перспективны.



Саморегулирование – отнюдь не новое качество цемента и бетона, а важное технологическое свойство, закладываемое ещё на стадии выбора компонентов и проектирования составов. Регулированию подлежат любые самопроизвольные элементарные, термодинамически обоснованные, процессы гидратационного взаимодействия и даже старения бетона. К ним, как известно, относятся – адсорбция, смачивание, химические реакции, зародышеобразование, кристаллизация и др. Эти непрерывные процессы и достигаемые эффекты взаимодействия накладываются друг на друга. Реальные технологические эффекты есть результат функционирования компонентов.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Функция и функциональность

Функция – двояко трактуемое понятие. С физико-химических позиций – это явление и свойство, изменяющееся под влиянием взаимосвязанных, одновременно протекающих превращений в бетонных смесях, твердеющем и затвердевшем бетонах. С технологических позиций – это назначение компонентов, смесей и самих бетонов – характеризуемых количественно показателями нормируемых технологических эффектов.

Понятие «функция» органично встраивается в известную концептуально-познавательную систему, определяемую понятиями «состав-структура-процесс-свойство» [4]. Их взаимосвязь и взаимовлияние можно представить в виде схемы (рис. 2).

С технологической точки зрения всё достаточно очевидно. Классификации добавок, к примеру, в нормативных документах базируются на признаке назначения, а эффективность оценивается по технологически важным показателям – водоредуцирования, удобоукладываемости, ускорения или замедления твердения, прочности и др. [5]. В этом плане добавки следует рассматривать в роли носителей функций в цементных системах, различая и оценивая при этом главные, вторичные, нейтральные и др. функции.

Функциональность – собирательный термин, означающий способность материала и его компонентов к реализации одной или нескольких функций на технологических и эксплуатационных стадиях.

Потенциал функциональности компонентов и их смесей определяет результативность рецептурно-технологических решений.

Полифункциональность – свойство взаимодействующих компонентов, в т.ч. добавок, при обеспеченной

совокупности, целостности и адаптивности выполняемых функций подчиняться правилам аддитивности, синергетики, суперпозиций в случае отсутствия антагонизма явлений во взаимодействующих системах под влиянием внутренних и внешних факторов.

Бетон высокой функциональности (High-Performance Concrete – НРС)

Генеральная концепция современного бетона сформулирована П.-К. Айчиным [6]. «High-Performance Concrete» (НРС) или «высокофункциональный бетон», по определению автора, – это материал со специальными комбинациями функций и свойств, которые труднодостижимы традиционными способами. Высокие показатели технологичности бетонных смесей, прочности (200 МПа и выше), плотности, стойкости и долговечности бетона достигаются за счет хорошо совместимых компонентов, адекватных методов приготовления, формирования, ухода и контроля за твердеющим бетоном.

Лексическая неопределенность толкования объектов бетоноведения присуща отечественной литературе. Можно встретить – «высококачественный», «высокотехнологичный», «высокодолговечный» и даже «высокороботоспособный» бетоны. Но бесспорный факт, что понятие НРС воспринято мировым технологическим сообществом и постоянно развивается (табл. 1).



Рис. 2. Функции добавок в системе «состав – структура – процесс – свойство»

Таблица 1. Линейка высокофункциональных бетонов

Аббревиатура	Название, язык	
	английский	русский
НРС	high performance concrete	высокофункциональный бетон
УНРС	ultra-high performance concrete	ультравысокофункциональный бетон
НСНРС	high strength high performance concrete	высокопрочный высокофункциональный бетон
СНРС	self-compacting high performance concrete	самоуплотняющийся высокофункциональный бетон
ЛВАНРС	lightweight aggregate high performance concrete	высокофункциональный бетон на легких заполнителях
ФРНРС	fiber reinforced high performance concrete	высокофункциональный фибробетон



Понятия, приведенные в табл. 1, по своей сути являются словосочетаниями, сложными из традиционного лексикона и дополнений. Термин высокофункциональный бетон как-бы подчеркивает «претензии» на новизну и технологическую значимость.

Performance в переводе на русский язык имеет ряд толкований. Применительно к материаловедению – это, на наш взгляд, наиболее профессионально и адекватно – функционирование, функциональность.

Заданная функциональность

Стремление к высокой, надежно обеспечиваемой функциональности обусловило смену концепции бетонов с заданными свойствами (НРС) на концепцию бетонов заданной функциональности – «Defined Performance Concrete» (DPC), которая предусматривает осуществление непрерывного, регулируемого, не ограниченного определенными показателями выполнения высоких заданных функций. В этом коренное отличие концепции DPC от концепции НРС с заложенной в нее ориентацией на совокупность высоких свойств бетона.

Функциональная совместимость

По сути, вся история бетона – это поиски и находки совместимых компонентов применительно к конкретным задачам и решениям. Например, технологии бетона ускоренного твердения, нейтрализации внутренних и внешних негативных влияний коррозионного типа и др. В последние десятилетия актуальность совместимости растёт пропорционально увеличению числа компонентов, снижению доли клинкерной составляющей в цементе и, особенно, росту эффективности добавок в бетоне.

Решение проблемы гораздо сложнее, чем представлялось ранее. В национальном стандарте [7] вводится понятие технической совместимости применительно к системам – «изделие-среда», «изделие-материал», экологическая, функциональная и др. виды совместимости. Функциональная совместимость, в соответствии со стандартом – «есть пригодность к совместному использованию по видам функций и значениям параметров».

В зарубежном дополнении к термину «functional compatibility» используется более строгое понятие – «interoperability» с целесообразностью полной (full) совместимости взаимозависимых элементов сложных систем.

Сформулирован принцип сосредоточения или согласования функций для поддержания их целостности. Его реализация – не простая, но решаемая в принципе научно-технологическая задача.

Яркий пример – основные функции ПАВ-суперпластификаторов: водоредуцирующая и реологическая налагаются на функции твердеющих цементов, в большинстве случаев замедляя начальную гидратацию, увеличивая сохранность удобоукладываемости бетонных смесей и часто способствуя воздухововлечению. В ходе гидратации

меняется фазовый состав и структура новообразований за счет встраивания органоминеральных мотивов в микроструктуру цементного камня. По мере гидратации меняются значения потенциала функциональности с возможным снижением прочностных и др. характеристик.

Иной пример – функции тонкодисперсных минеральных добавок. Помимо их влияния на формирование плотной структуры цементного камня и участия в пуццолановых реакциях, установлено позитивное действие на реологию цементных паст и бетонных смесей. А негативная функция, в связи с ростом водопотребности, легко устранима в комплексе с ПАВ нового поколения. Согласование функций обоих видов добавок положено в основу получения высокопрочных, самоуплотняющихся, реакционно-порошковых и др. современных бетонов.

Конфликт функций – дисфункция (функциональная несовместимость)

Многокомпонентность, различия в природе и механизмах действия компонентов, взаимовлияние состояний и характеристик твердой, жидкой и воздушной, изменяющихся в ходе взаимодействия фаз, продуктов гидратации – причины конфликта функций в технологии бетона и даже деградиационных последствий. Примеры общеизвестны – влияние хлорида кальция на коррозию металлической арматуры, реакции «щелочь – заполнитель» и др.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принцип функциональной совместимости

Совместимость – системная, в общем, пока на эмпирическом уровне достаточно глубоких знаний проблема бетоноведения.

На основании анализа результатов собственных, проводимых с начала 2000-х годов исследований, и огромного объема зарубежных публикаций в этом направлении нами сформулирован принцип функциональной совместимости, который предполагает целостность и беспрепятственное выполнение установленных основных и дополнительных функций отдельными взаимодействующими, совместимыми компонентами (элементами) систем без проявления дисфункций (негативных последствий) при решении конкретных задач, определяемых технологическими регламентами, нормативными документами и пр. [4].

Применительно к технологии бетона основную роль в функциональной совместимости, а значит и технологической эффективности, играет совместимость «цемент-добавка», трактуемая как способность добавки обеспечивать и поддерживать требуемое время заданные свойства бетонной смеси и бетона [4].

Количественная оценка функциональной совместимости, как неоднократно отмечалось, – серьезная и не решенная до сего времени задача бетоноведения.



Практически все евронормы и стандарты определяют только правила контроля свойств и качества продукции. Но любые требования к процедурам приведены к конкретным срокам их проведения и носят дискретный характер. Вместе с тем известно, что реакции гидратации и процессы формирования составов, структуры и свойств твердеющих материалов – непрерывны. Отсюда вывод о необходимости разработки научно-обоснованного методологического аппарата оценки функциональной совместимости с целью обеспечения и поддержания высокой эффективности в технологии бетона.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ Методологический аспект

Принцип непрерывности (continuity), вытекающий из общей теории взаимодействия, применительно к химии и технологии вяжущих веществ и бетонов, провозглашает непрерывность времени, энергии (температуры) и информации о параметрах взаимосвязанных самопроизвольных процессов твердения и сопровождающих их явлений. Непрерывность предусматривает в этом случае, что предыдущее или текущее состояние твердеющих систем есть причина последующих непрерывных изменений свойств отдельных фаз и системы в целом. Все превращения должны описываться непрерывными, кинетическими, а не дискретными физико-химическими и физико-математическими моделями-уравнениями.

Как отмечено выше, наложение достигаемых технологических эффектов влияния добавок, особенно комплексных, на свойства и твердение бетонных смесей и бетонов затрудняет количественную оценку и даже понимание во многих случаях причин колебаний эффективности принимаемых рецептурных решений и регулирования технологических процессов от ряда важных факторов, в т.ч. температурных.

Сложный характер взаимодействий с учетом сложных действий добавок в твердеющих дисперсных системах не позволяет представить их однозначными, простыми концептуальными зависимостями. Такие попытки неоднократно принимались исследователями разных стран, начиная с очень известной работы Р. Кондо и Ш. Уэда [8].

В общем, ситуация характерна для любых, даже более простых объектов гетерогенной кинетики. В классическом труде Б. Дельмона [9] отмечена в этом плане перспективность «анализа не отдельных реакций, а установлением общих

кинетических закономерностей».

Экзотермический характер гетерогенных взаимодействий при твердении цемента и бетона обуславливает целесообразность использования калориметрии либо температурных измерений для кинетического моделирования и построения непрерывных схем влияния добавок с акцентом на решение задач их функциональности, эффективности и совместимости с цементами. Тепловые эффекты, как результат взаимодействия добавок с вяжущими веществами, совокупно характеризуют изменения скорости и полноты элементарных актов гидратации.

Калориметрия – инструмент непрерывного термокинетического анализа и оценки функциональности и совместимости добавок с цементами

Методы калориметрии позволяют с высокой степенью достоверности и информативности фиксировать эффекты влияния добавок в виде показателей скорости тепловыделения, теплоты гидратации и температуры. Это далеко не новый факт. Во многих масштабных «добавочных» работах приводятся калориметрические данные, правда, в большинстве своем несущие описательно-иллюстративный характер [10].

В начале 2000-х годов на основании анализа состояния проблемы количественной оценки эффективности добавок и их совместимости с цементами была сформулирована концепция феноменологического подхода к её решению по данным калориметрии [4].

Изотермический и полуадиабатический методы калориметрии позволяют количественно анализировать функциональное влияние добавок на характерные кинетические зависимости согласно табл. 2.

Разработанный методологический аппарат обеспечивает возможность вычислять по термокинетическим и температурно-временным зависимостям технологически значимые кинетические параметры цементов в присутствии добавок. Это – длительность индукционного периода (τ_i), максимум интенсивности (q_{max} и ΔT_{max}) и полноты (Q_n и $T\tau_n$) процессов твердения к заданному моменту времени (n) (рис. 3). В основу проведения функционального анализа положены кинетические закономерности взаимодействия в системе «цемент-вода-добавка»

Таблица 2. Характерные аналитические зависимости взаимодействия в системе «цемент-вода-добавка»

Зависимость	Процесс, реакция	Аналитическая функция процесса	
		полнота (завершенность)	интенсивность
кинетическая	превращение	$\alpha = f(\tau)$	$d\alpha/d\tau = f(\tau)$
термокинетическая	гидратация	$Q = f(\tau)$	$dQ/d\tau = f(\tau)$
температурно-временная	твердение	$T\tau = f(\tau)$	$T = f(\tau)$



тические схемы влияния добавок с учетом ускоренного, замедленного или нейтрального их действия [11].

Эксперименты могут выполняться на двух типах калориметров – изотермическом и полуадиабатическом (рис. 3). Термокинетический модуль предпочтительней использовать на поисковом, научно-исследовательском этапе при исследовании цементных паст, а температурно-временной – для решения прикладных задач в производственных условиях при оценке влияния добавок на твердение растворов и бетонов.

В качестве примера результативности критерия функционально-кинетического анализа эффективности влияния добавок на твердение цементно-песчаных растворов приводятся дан-

ные, представленные на рис. 4.

Калориметрическая информация (рис. 4) показывает последовательное приближение к рекомендациям по предварительному выбору концентрации добавок в соответствии с обоснованной технологической схемой влияния типа «ускорение-замедление», «ускорение» и «замедление» для бетонов различного назначения.

Последовательность непрерывного анализа названная температурно-временным мониторингом (ТВМ), включает шаги, отражаемые в левой части рис. 4. Можно отнести ТВМ к вспомогательной информационно-технологической системе технологии бетона. Её задача – измерение, регистрация, обработка, хранение, анализ, прогноз и поддержание параметров эффективных рецептурно-

технологических решений. В какой-то степени можно сравнить подобную систему, к примеру, с системами обеспечения беспилотного транспорта – авиации, автотранспорта и др. ТВМ должен базироваться на теоретических и экспериментальных методах и средствах получения информации по специальной прикладной программе. Непрерывность и объективность информации о показателях и изменяющихся во времени свойствах бетона при изготовлении и эксплуатации железобетонных изделий и конструкций – условие результативности



Рис. 3. Алгоритм получения калориметрической информации

Тип бетона	Товарный бетон «Лето»			Массивный бетон			ЖБИ		
Тип влияния	Замедление-ускорение			Замедление			Ускорение		
Схема эффективного влияния									
Цемент	ПЩ П/Б-Ш-400			ПЩ П/Б-Ш-400			ПЩ I-500		
Добавка	СП поликарбоксилатного типа			Пластификатор ЛСТ			Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	Ca(NO ₃) ₂
Концентрация, %	0,25	0,5	1	0,25	0,5	1	1	1	1
Критерии эффективности									
Схема влияния (эксперимент)									
Уровень влияния	Высокий	Средний	Низкий	Низкий	Высокий	Отрицательный	Средний	Средний	Высокий
Рекомендация	Концентрация добавки: 0,5%			Концентрация добавки: 0,5%			Добавка: Ca(NO ₃) ₂		

Рис. 4. Функционально-кинетический анализ эффективности влияния добавок



мониторинга.

ВЫВОДЫ

Высокая информационная емкость, технологическая целесообразность и результативность калориметрии как метода непрерывного контроля и количественной оценки влияния добавок на твердение цементов и бетона обуславливает в разных странах мира, включая США, разработку специальных калориметров в этих целях. Накопленный нами опыт убеждает в результативности развития функционально-кинетического анализа в химии и технологии цемента и бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Concrete. Specification, performance, production and conformity: EN 206:2013+A1:2016. – [Effective from 2016-06-01] – Brussels: CEN, 2016. – 106 p. – (European standard).
2. Czarnecki L. Future developments in concrete / L. Czarnecki, W. Kurdowski // *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete.* / Ed. S. Mindess. – London: Woodhead Publishing in Materials, 2008. – P. 270-284.
3. Лем С. Сумма технологий / С. Лем. – М.: Мир, 1968. – 608 с.
4. Ушеров-Маршак А. Бетоноведение. Современные этюды / А. Ушеров-Маршак – Харьков: Раритеты Украины, 2016. – 135 с.
5. Łukowski P. Modyfikacja materiałowa betonu / P. Łukowski. – Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2016. – 355 s.
6. Mehta P. Principles underlying production of high-performance concrete / P. Mehta, P.-C. Aïtcin // *Cement, Concrete and Aggregates.* – Vol. 12, № 2. – 1990. – P. 70-78.
7. Технічна сумісність. Терміни та визначення (ГОСТ 30709-2002, IDT): ДСТУ ГОСТ 30709:2004. – [Чинний від 2005-07-01]. – Київ: Держспоживстандарт України, 2005. – 11 с. – (Державний стандарт України).
8. Кондо Р. Кинетика и механизм гидратации цемента / Р. Кондо, Ш. Уеда // *Пятый международный конгресс по химии цемента.* – М.: Стройиздат, 1973. – С. 185–206.
9. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций / Б. Дельмон. – М.: Мир, 1971. – 308 с.
10. Cheung J. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement / J. Cheung, A. Jeknavorian, L. Roberts, D. Silva // *Cement and Concrete Research.* – V. 41, № 12. – 2011. – P. 1289-1309.
11. Usherov-Marshak A.V., Kabus A.V. Functional kinetic analysis of the effect of admixtures on

cement hardening. // *Inorganic Materials.* – Vol. 52, №4. – 2016. – P. 479–484.

REFERENCES

1. Concrete. Specification, performance, production and conformity. (2016). EN 206:2013+A1:2016 from 1st June 2016. Brussels: CEN [in English].
2. Czarnecki L., Kurdowski W. (2008). Future developments in concrete // *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete.* / Ed. S. Mindess. – London: Woodhead Publishing in Materials, pp. 270-284 [in English].
3. Lem S. (1968). *Summa tekhnologiy* [The amount of technology]. – M.: Mir, p. 608 [in Russian].
4. Usherov-Marshak A. (2016). *Betonovedeniye. Sovremennyye etyudy* [The science of concrete. Contemporary etudes] – Kharkov: Rarities of Ukraine, p. 135 [in Russian].
5. Lukowski P. (2016). *Modyfikacja materiałowa betonu* [Modification of concrete material] – Krakow: Association of Cement Manufacturers, p. 355 [in Poland].
6. Mehta P., Aïtcin P.-C. (1990). Principles underlying production of high-performance concrete // *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12 (2), pp. 70-78 [in English].
7. *Tekhnichna sumisnist. Terminy ta vyznachennya* [Technological compatibility. Terms and definitions] (2005). GOST 30709–2002 IDT from 1st Juli 2005. – Kiev: Derzhspozhyvstandart of Ukraine [in Ukrainian].
8. Kondo R. Ueda Sh. (1973). *Kinetika i mekhanizm gidratatsii tsementa* [Kinetics and Mechanism of Cement Hydration] // *The Fifth Intern. Cong. on Chemistry of Cement.* – M.: Stroyizdat, pp. 185–206 [in Russian].
9. Delmon B. (1971) *Kinetika geterogennykh reaktsiy* [Kinetics of heterogeneous reactions]. – M.: Mir, p. 308 [in Russian].
10. Cheung J., Jeknavorian A., Roberts L., Silva D. (2011). Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement // *Cement and Concrete Research.* V. 41(12), pp. 1289-1309 [in English].
11. Usherov-Marshak A.V., Kabus A.V. (2016). Functional kinetic analysis of the effect of admixtures on cement hardening // *Inorganic Materials.* Vol. 52 (4), pp. 479–484 [in English].

Стаття надійшла до редакції 05.09.2017р.