



УДК 691.32



**ШИШКІН О.О.**

Д-р технічних наук, проф. зав. каф., Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: 5691180@gmail.com, тел.: +38 (067) 569-11-80, ORCID: 0000-0003-3331-1422

## РЕАКЦІЙНІ ПОРОШКОВІ БЕТОНИ НА КОМПЛЕКСНОМУ ЗАПОВНЮВАЧІ

### АНОТАЦІЯ

**Вступ.** Реакційні порошкові бетони, отримані в кінці двадцятого століття, є бетонами нового покоління, що володіють цілим рядом специфічних властивостей, що дозволяють створювати унікальні будівлі і споруди з використанням передових технологій, наприклад, будівельний 3D-друк. Дані бетони виготовляють без застосування крупного заповнювача, в зв'язку з цим збільшується потреба в дрібному заповнювачі. Однак із зростанням цін на пісок для будівництва існує потреба у вишукуванні економічних і раціональних прийомів використання місцевої сировини для виробництва бетонів, у тому числі і реакційних порошкових. Додатковим фактором, що схиляє до цих рішень, є значні витрати на транспортування матеріалів і сировини до місця будівництва. Іншою проблемою, що стримує широке поширення перспективної технології будівельного 3D-друку, є необхідність отримання реакційних порошкових бетонів високої міцності без застосування таких технологічних прийомів, як віброущільнення і пресування, а також без застосування спеціальних модифікаторів - хімічних речовин-прискорювачів твердіння цементу.

**Мета.** Метою даної роботи є підвищення міцності при стиску реакційних порошкових бетонів за рахунок використання комплексного заповнювача, що складається з суміші річкового піску і відходів збагачення залізних руд.

**Результати досліджень** показали, що застосування суміші річкового і відходів збагачення залізних руд, що містять сполуки заліза, призводить до збільшення міцності бетону на (30-200)%. Встановлено оптимальний вміст відходів збагачення залізних руд у складі заповнювача незалежно від водоцементного відношення в бетоні і вмісту тонкодисперсної частини у відходах збагачення залізних руд. При цьому, чим вищий вміст заповнювача в бетоні, тим більше вплив відходів збагачення залізних руд.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки. Застосування в якості дрібного заповнювача в реакційних порошкових бетонах суміші річкового піску і відходів збагачення залізних руд, що містять сполуки заліза, дозволяє підвищити міцність даних бетонів при стиску на (30-200)%. При цьому оптимальний вміст відходів збагачення залізних руд, що містять сполуки заліза, в заповнювачі залежить від його вмісту в бетоні. Зі збільшенням вмісту заповнювача в бетоні зменшується оптимальний вміст відходів збагачення залізних руд, що містять сполуки заліза, в заповнювачі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** реакційний порошковий бетон, річковий пісок, сполуки заліза, міцність, дрібний заповнювач, відходи збагачення залізних руд

**ШИШКІН А. А.** Д-р технических наук, проф., зав. каф., Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина, e-mail: 5691180@gmail.com, тел.: +38 (067) 569-11-80, ORCID: 0000-0003-3331-1422

### РЕАКЦИОННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ БЕТОНЫ НА КОМПЛЕКСНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Реакционные порошковые бетоны, полученные в конце двадцатого века, являются бетонами нового поколения, обладающими целым рядом специфических свойств, позволяющих создавать уникальные здания и сооружения с использованием передовых технологий, например, строительной 3D-печати. Данные бетоны изготавливают без применения крупного заполнителя, в связи с чем увеличивается потребность в мелком заполнителе. Однако, с ростом цен на песок для строительства,



существует потребность в изыскании экономичных и рациональных приемов использования местного сырья для производства бетонов, в том числе и реакционных порошковых. Дополнительным фактором, предопределяющим использование местных материалов, является постоянно увеличивающиеся затраты на транспортирование материалов к месту строительства. Другой проблемой, сдерживающей широкое распространение перспективной технологии строительной 3D-печати, является необходимость получения реакционных порошковых бетонов высокой прочности без применения таких технологических приемов, как виброуплотнение и прессование, а также без применения специальных модификаторов – химических веществ-ускорителей твердения цемента.

**Цель.** Целью работы является повышение прочности при сжатии реакционных порошковых бетонов за счет использования комплексного заполнителя, состоящего из смеси речного песка и отходов обогащения железных руд без ухудшения эксплуатационных свойств бетонов.

**Результаты исследований** показали, что применение смеси речного песка и отходов обогащения железных руд, которые содержат соединения железа, приводит к увеличению прочности бетона на (30-200)%. Установлено оптимальное содержание отходов обогащения железных руд в составе заполнителя независимо от водоцементного отношения в бетоне и содержания тонкодисперсной части в отходах обогащения железных руд. При этом, чем выше содержание заполнителя в бетоне, тем больше влияние содержания в нем отходов обогащения железных руд.

**Выводы.** Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы. Применение в качестве мелкого заполнителя реакционных порошковых бетонов смеси речного песка и отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, позволяет повысить прочность данных бетонов при сжатии на (30-200)%. При этом оптимальное содержание отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, в заполнителе зависит от его содержания в бетоне. С увеличением содержания заполнителя в бетоне уменьшается оптимальное содержание отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, в заполнителе.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** реакционный порошковый бетон, речной песок, соединения железа, прочность, мелкий заполнитель, отходы обогащения железных руд

## COMPLEX AGGREGATE REACTIVE POWDER CONCRETE

**SHISHKIN A.A.** Dr, Prof., National University of Krivyi Rih, Krivyi Rih, Ukraine,

e-mail: 5691180@gmail.com,  
tel.: +38 (067) 569-11-80,  
ORCID: 0000-0003-3331-1422

### ABSTRACT

**Introduction.** Reactive powdered concrete obtained at the end of the twentieth century is a new generation of concrete, possessing a number of specific properties that allow creating unique buildings and structures using advanced technologies, for example, 3D construction printing. These concrete are produced without the use of a large aggregate, in connection with this, the need for a fine aggregate increases. However, with the increase in the price of sand for construction, there is a need to find economical and rational methods of using local raw materials for the production of concretes, including reactive powders. An additional, aggravating factor, inclined to these decisions is the constantly increasing costs of transporting materials and raw materials to the construction site.

Another problem hampering the widespread use of promising technology of 3D construction printing is the need to produce reactive powdered concrete of high strength without the use of such technological methods as vibration compacting and pressing, and also without the use of special modifiers - chemical accelerators for hardening cement

**Goal.** The purpose of this work is to increase the compressive strength of reactive powdered concrete by using a complex aggregate consisting of a mixture of river sand and iron ore beneficiation waste.

**The results of the research** showed that the use of a mixture of river and man-made sand, which contains iron compounds, leads to an increase in the strength of concrete by (30-200)%. It was found that there is an optimal content of man-made sand in the aggregate, regardless of the water-cement ratio in concrete and the content of the finely dispersed part in the iron ore beneficiation waste. At the same time, the higher the content of aggregate in concrete, the greater the effect of the content in it of the iron ore beneficiation waste.

**Conclusions.** The conducted studies made it possible to draw the following conclusions: The use of a mixture of river sand and man-made sand containing iron compounds as a fine aggregate of reactive powder concretes makes it possible to increase the strength of these concrete during compression by (30-200)%. At the same time, the optimal content of man-made sand containing iron compounds in the aggregate depends on its content in the concrete. With an increase in aggregate content in concrete, the optimum content of man-made sand containing iron compounds in the aggregate decreases.

**KEY WORDS:** reactive powder concrete, river sand, iron compounds, strength, fine aggregate, man-made sand



## ВВЕДЕНИЕ

Реакционные порошковые бетоны, полученные в конце двадцатого века, являются бетонами нового поколения, обладающими целым рядом специфических свойств, позволяющих создавать уникальные здания и сооружения с использованием передовых технологий, например, строительную 3D-печать. Данные бетоны изготавливаются без применения крупного заполнителя, в связи с этим увеличивается потребность в мелком заполнителе. Однако с ростом цен на песок для строительства существует потребность в изыскании экономичных и рациональных приемов использования местного сырья для производства бетонов, в том числе и реакционных порошковых. Дополнительным фактором, предопределяющим принятие таких решений, является постоянно увеличивающиеся затраты на транспортирование материалов и сырья к месту строительства.

Другой проблемой, сдерживающей широкое распространение перспективной технологии строительной 3D-печати, является необходимость получения реакционных порошковых бетонов высокой прочности без применения таких технологических приемов, как виброуплотнение и прессование, а также без применения специальных модификаторов – химических веществ-ускорителей твердения цемента.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ

В настоящее время наиболее широко распространенными материалами техногенного происхождения, которые имеют фракционный состав, отвечающий мелкому заполнителю бетонов, являются отходы горно-обогатительных комбинатов (так называемые «хвосты» обогащения железных руд). Эти отходы используются, как для дополнительного извлечения полезных компонентов, так и в качестве одного из компонентов сложного вяжущего [1, 2] или мелкого заполнителя [2-6].

Исследования, проведенные Г.В. Пухальским и Г.Н. Бондаренко [3], явились основой для использования отходов обогащения железных руд в качестве мелких заполнителей бетона и дальнейших исследований в этом направлении [4-10].

Основными результатами, полученными в работе [3], использованными и подтвержденными в остальных работах, являются следующие:

1. Замена речного песка на отходы обогащения железных руд, освобожденных от фракции менее 0,14 мм, в качестве заполнителей бетона приводит к повышению его прочности на 15%.
2. По мере замены части речного песка на отходы обогащения железных руд, освобожденных от фракции менее 0,14 мм, происходит повышение прочности бетона.
3. Прочность бетона на отходах обогащения железных руд, освобожденных от фракции

менее 0,14 мм, естественного твердения выше прочности такого же бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке.

4. Введение в бетон в качестве добавки тонкодисперсной части (фракции менее 0,14 мм) отходов обогащения железных руд в количестве (5-15)% приводит к повышению его прочности на (5-20)%.
5. Введение в бетон на портландцементе в качестве добавки тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд (фракции менее 0,14 мм) приводит к повышению его прочности на 6%, а бетона на шлакопортландцементе до 88%.
6. Для улучшения технологических свойств бетонных смесей на основе отходов обогащения железных руд в них следует вводить микрозаполнители в виде тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд (фракции менее 0,14 мм).
7. Содержание оксидов железа в отходах обогащения железных руд в количестве (6-15)% не влияет на удобоукладываемость бетонной смеси и прочность при сжатии бетона.

Кроме того, следует отметить, что исследования [3] проведены для бетонов на крупном заполнителе и не могут быть распространены на мелкозернистые бетоны.

В последующих исследованиях бетонов с использованием отходов обогащения железных руд, с учетом результатов исследований [3], их применяли в качестве мелкого заполнителя, полностью заменяя речной песок.

Анализ приведенных выше результатов исследований показал:

- нет особого смысла во фракционировании отходов обогащения железных руд (т.е. выделения из них фракции менее 0,14 мм), если осуществлять частичную замену речного песка на нефракционированные отходы обогащения железных руд;
- применение отходов обогащения железных руд в качестве мелкого заполнителя или его части наиболее эффективно в бетонах на основе шлакопортландцемента или портландцементов с высоким содержанием доменного гранулированного шлака;
- отсутствуют исследования мелкозернистых бетонов на основе смешанного мелкого заполнителя, в котором одну его часть составляют отходы обогащения железных руд, а другую – речной песок.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Повышение прочности при сжатии реакционных порошковых бетонов за счет использования комплексного заполнителя, состоящего из смеси речного песка и отходов обогащения железных руд.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Материалы и оборудование, использованные в экспериментах

Для решения поставленной задачи в качестве вяжущего использовали Криворожский портландцемент СЕМ 42,5. В качестве мелкого заполнителя использован песок кварцевый речной средней плотностью породы  $2630 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $1550 \text{ кг/м}^3$ , пустотностью 41%, с модулем крупности 1,56. Содержание вредных примесей в пределах нормы. Результаты отсева приведены в табл. 1.

В качестве минеральной добавки использовали отходы обогащения железных руд Южного горно-обогатительного комбината (ГОК), которые отвечали требованиям [11]. Фракционный состав отходов обогащения железных руд Южного ГОКа, используемый в данной работе, представлен в табл. 2, а химический в табл. 3.

### Методика определения прочности бетона

Составы исследуемых бетонных смесей определяли по требованиям норм [12, 13]. В соответствии с требованиями норм в бетон вводили в качестве минеральной добавки отходы обогащения железных руд, гранулометрический состав которых представлен в табл. 2, а химический в табл. 3. Бетонную смесь готовили в лабораторной бетономешалке принудительного действия емкостью 25 литров. Компоненты дозировали по массе, перемешивали сначала сухие компоненты, а затем с водой. Время перемешивания одного замеса составляло 3 минуты. Уплотняли контрольные образцы с размером сторон  $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$  на стандартной лабораторной виброплощадке с частотой вибрационного воздействия 50 Гц, амплитудой (0,35-0,5) мм. Образцы твердели в стандартных условиях при температуре  $(293 \pm 2) \text{ К}$  при относительной влажности  $(95 \pm 5) \%$  и испытывались в 28-ми суточном возрасте на сжатие в соответствии с требованиями норм.

Таблица 1. Результаты отсева речного кварцевого песка

Остаток на ситах, %	Размеры отверстий сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	менее 0,14
Частные	1,0	2,4	7,85	37,9	42,05	8,8
Полные	1,0	3,40	11,25	49,15	91,2	100

Таблица 2. Гранулометрический состав отходов обогащения железных руд

Содержание в % по массе фракций размером, мкм								
менее 5	6-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-66	67-100	более 100
4,13	3,54	7,93	15,71	19,7	12,41	11,48	15,39	9,71

Таблица 3. Химический состав отходов обогащения железных руд

Химический состав, %					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
62,1	1,3	6,56	8,34	4,64	6,69

Прочность бетона контрольного состава (не содержащего отходы ГОК) составляла:

- при  $P/C = 3$  и  $V/C = 0,5 - 16 \text{ МПа}$ ;
- при  $P/C = 2,5$  и  $V/C = 0,5 - 21 \text{ МПа}$ ;
- при  $P/C = 3$  и  $V/C = 0,6 - 14,2 \text{ МПа}$ .

( $V/C$  – водоцементное отношение;  $P/C$  – отношение массы мелкого заполнителя к массе цемента).

**Результаты исследований** влияния содержания отходов обогащения железных руд в составе мелкого заполнителя реакционных порошковых бетонов показали, что в пределах эксперимента, имеется их оптимальное содержание в заполнителе (рис. 1, 2).

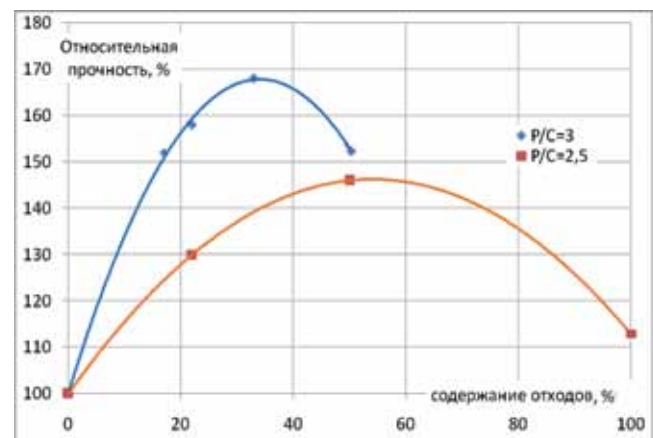
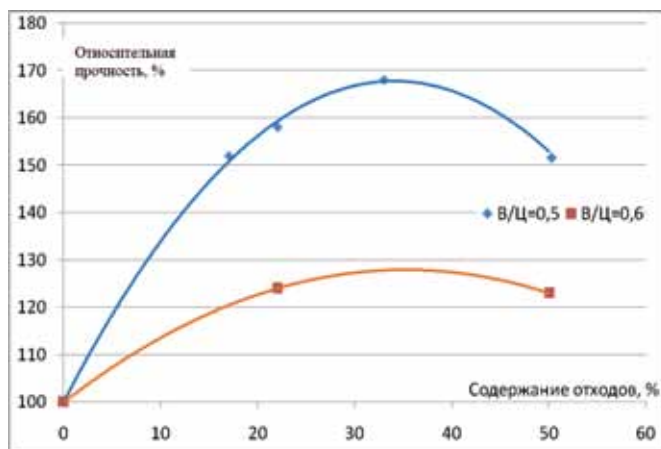


Рис. 1. Влияние содержания отходов обогащения железных руд в заполнителе на прочность бетона ( $V/C=0,5$ ;  $P/C$  – отношение массы мелкого заполнителя к массе цемента)

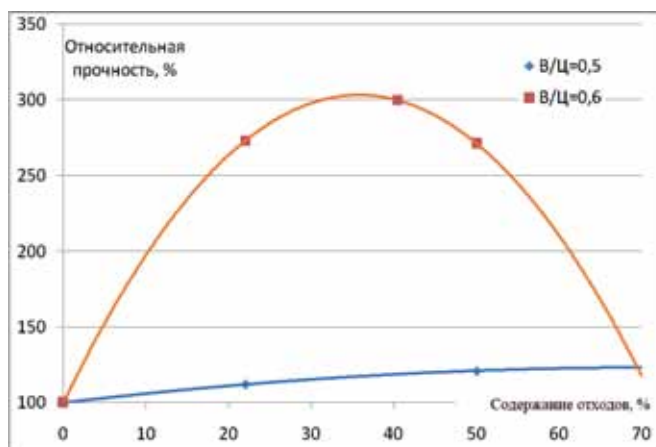
При этом, чем выше содержание заполнителя в бетоне, тем более выражено влияние содержания в нем отходов обогащения железных руд.

Влияние водоцементного отношения в бетоне не однозначно сказывается на прочности бетона. Так, при применении неклассифицированных отходов обогащения железных руд, с уменьшением водоцементного отношения, в пределах эксперимента, в бетоне увеличивается влияние отходов обогащения железных руд (удалением фракции менее  $0,14 \text{ мм}$ ), с уменьшением водоцементного отношения в бетоне влияние отходов уменьшается (рис. 3).

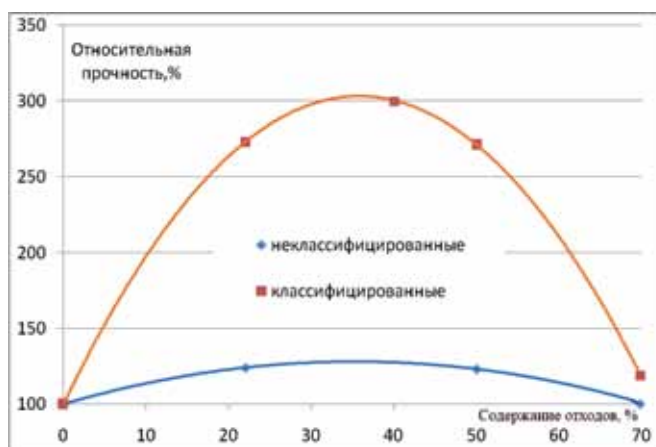
В то же время, классифицированные отходы обогащения железных руд (с удаленной фракцией менее  $0,14 \text{ мм}$ ) обеспе-



**Рис. 2.** Влияние содержания отходов обогащения железных руд в заполнителе на прочность бетона (P/C = 3,0 – отношение массы мелкого заполнителя к массе цемента)



**Рис. 3.** Влияние содержания классифицированных отходов обогащения железных руд в заполнителе на прочность бетона (фракция менее 0,14 мм удалена)



**Рис. 4.** Влияние классифицирования отходов обогащения железных руд (удалением фракции менее 0,14 мм), примененных в качестве заполнителя бетона на его прочность

чивают большой прирост прочности бетона при сжатии, который достигает 200% (рис. 4).

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- применение в качестве мелкого заполнителя реакционных порошковых бетонов смеси речного песка и отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, позволяет повысить прочность данных бетонов при сжатии на (30-200)%;
- оптимальное содержание отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, в заполнителе зависит от его содержания в бетоне. С увеличением содержания заполнителя в бетоне уменьшается оптимальное содержание отходов обогащения железных руд, содержащих соединения железа, в заполнителе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резниченко П. Т. Охрана окружающей среды и использование отходов промышленности / П. Т. Резниченко, А. П. Чехов. – Днепропетровск: Промінь, 1973. – 94 с.
2. Шишкин А. А. Щелочные реакционные порошковые бетоны / А. А. Шишкин // Стр-во уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 2 (17). – С. 56-65.
3. Пухальский Г. В. Свойства бетонов на песках из отходов горно-обогатительных комбинатов / Г. В. Пухальский, Г. Н. Бондаренко // Бетон и железобетон, 1975. – № 5. – С. 26-28.
4. Шевченко Б. Н. Конструкции из бетонов на отходах обогащения железных руд / Б. Н. Шевченко. – Киев : Вища шк., 1989. – 192 с.
5. Шишкин А. А. Особенности использования отходов горно-обогатительных комбинатов в производстве строительных материалов / А. А. Шишкин, А. А. Шишкина, В. В. Щерба // Вісн. ДНАБА, 2013. – №1 (99). – С. 8-12.
6. Вандоловський А. Г. Міцнісні властивості особливодрібнозернистого бетону на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів у ролі заповнювача / А. Г. Вандоловський, В. М. Чайка // Зб. наукових пр. УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160. – С. 17-24.
7. Шалтабаева С. Т. Бетоны и вяжущие с использованием активизированных отходов горно-обогатительных комбинатов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Шалтабаева Салтанат Турарбековна. - Алматы, 2010. - 21 с.



8. Русина В. В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов / В. В. Русина. - Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 224 с.
9. Песок и щебень из отходов обогащения железной руды для мелкозернистого бетона / [Г. М. Рахимова, Д. М. Тажибаева, А. О. Икишева и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 11). – С. 2445-2449.
10. Приходько А. П. Ячеистые бетоны с использованием техногенных отходов промышленности / А. П. Приходько, Д. О. Маляр // Вісн. ПДАБА. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2009. – № 4. – С. 5-7.
11. Песок кварцево-железистый и тонкодисперсная фракция для строительных работ из отходов горно-обогатительных комбинатов Украины. Технические условия: ДСТУ Б В.2.7-33-2001. - [Дата введения 2002-04-01]. – Киев : ГП "УкрНИИЦ", 2001. – 13 с. – (Нац. стандарт Украины).
12. Бетони. Правила підбору складу: ДСТУ Б В.2.7-215:2009. – [Чинний від 2010-09-01]. – Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2010. – IV, 14 с. – (Нац. стандарт України).
13. Настанова щодо визначення складу важкого бетону: ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. – [Чинний від 2014-07-01]. – Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – IV, 87 с. – (Нац. стандарт України).

Стаття надійшла до редакції 11.08.2017 г.