

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей
международной научной конференции,
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2018

Редакционная коллегия:

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЩЕЛОЧНОГО АКТИВАТОРА ДЛЯ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО

Л.М. Парфёнова, Е.А. Разуева, М.Н. Высоцкая

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by, e.razueva@psu.by

Рассматривается одно из направлений энерго- и ресурсосбережения в строительной отрасли. Предложено использование золошлаковой смеси БелГРЭС г.п.Ореховск в качестве сырья для производства геополимерного вяжущего. Приведена краткая характеристика физико-механических свойств золы, а также химический состав золошлаковой смеси. Выполнены исследования по оптимизации концентрации щелочного активатора гидроксида натрия (NaOH) для геополимерного вяжущего. Найден оптимальный состав геополимерного вяжущего с применением метода математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана второго порядка. Построена зависимость прочности от водозольного отношения и концентрации щелочного активатора. Установлена оптимальная концентрация гидроксида натрия при водозольном отношении $W/Z=0,3$.

Ключевые слова: геополимер, отвальная золошлаковая смесь, гидроксид натрия, щелочная активация, химический состав, вяжущее.

OPTIMIZATION OF ALKALINE ACTIVATOR CONCENTRATION FOR GEOPOLYMER BINDER

L. Parfenova, K. Razueva, M. Vysotskaya

Polotsk State University, Belarus

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by, e.razueva@psu.by

The article considers one of the directions of energy and resource saving in the construction industry. The use of ash-and-slag mixture of the Belorusskaya state district power station of the urban settlement Orekhovsk as a raw material for the production of geopolymer binder is proposed. A brief description of the physical and mechanical properties of ash and the chemical composition of the ash-and-slag mixture are given. Studies were carried out to optimize the concentration of the alkaline sodium hydroxide activator (NaOH) for the geopolymer binder. The optimal composition of the geopolymer binder with the application of the method of mathematical design of the experiment based on a three-factorial plan of the second order is found. The dependence of the strength on the water-ash ratio and the concentration of the alkaline activator is constructed. The optimum concentration of sodium hydroxide is established at a water-ash ratio $W/A = 0.3$.

Keywords: geopolymer, ash-and-slag mixture, sodium hydroxide, alkaline activation, chemical composition, binder.

Введение. Для Республики Беларусь разработка энерго- и ресурсосберегающих материалов и технологий является одним из приоритетных направлений развития строительной отрасли. Количество ежегодно публикуемых научно-исследовательских работ, связан-

ных с новой разновидностью безобжиговых вяжущих – геополимерных, и опыт практического использования строительных материалов на их основе, позволяет сделать вывод о высоком интересе к этому виду вяжущих во всем мире и о перспективности развития данного направления ресурсосберегающих технологий в строительной индустрии.

Экономические и экологические факторы побуждают исследователей к поиску альтернативы портландскому цементу. При производстве цемента требуется значительное количество энергии (от 750 до 1450°С для производства клинкера) и выделяется большой объем CO₂ в атмосферу. Производство цемента в 2016 году составило около 5% мирового выброса CO₂ [1]. В качестве сырья для производства геополимеров могут использоваться отходы и побочные продукты промышленности золы-уноса, металлургические (доменные) шлаки, золы рисовой шелухи. По сравнению с производством цемента при производстве геополимерных вяжущих сокращается на 70-90 % расход энергии и выбросы углекислого газа [2].

Под геополимерами принято подразумевать вяжущие системы на основе тонкодисперсных аморфных или кристаллических алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей или солей, имеющими щелочную реакцию (обычно растворами гидроксидов, силикатов или алюминатов натрия и калия) [3]. Отмечается [4], перспективность использования в качестве основного компонента геополимерного вяжущего низкокальциевых зол-уноса с высоким содержанием оксидов кремния и алюминия. По сравнению с другими сырьевыми материалами в их составе содержится значительная доля стекловидных фаз алюмосиликатного состава, которые в совокупности с высокой дисперсностью позволяют получать геополимеры с высокими техническими характеристиками [5].

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований использовалась золошлаковая смесь, образующаяся на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области при сжигании топливной смеси из 50% древесной щепы и 50 % торфа. Химический состав золошлаковой смеси (мас.%) по ГОСТ 10538-87 представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС (мас. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	ппп
87.62	4.39	1.08	3.08	0.55	0.61	1.79	0.24	0.19	<0.10	0.07

По химическому составу золошлаковая смесь состоит в основном из оксидов кремния и алюминия (более 90%). По модулю основности золошлаковая смесь относится к кислым, содержание оксида кальция составляет около 3%.

Золошлаковую смесь высушивали при температуре 120°С. В экспериментах использовалась фракция, прошедшая через сито № 008, т.е. по ГОСТ 25818 – зола-уноса (далее зола) со следующими характеристиками: насыпная плотность 960 кг/м³; истинная плотность 2100 кг/м³.

В качестве щелочного активатора использовался гидроксид натрия (NaOH) СТО 00203275-206-2007. Для приготовления раствора щелочи гранулы гидроксида натрия растворяли в воде и давали остыть раствору до температуры 20°С. Геополимерное вяжущее получали путем смешивания золы со щелочным раствором в течение 45 минут. Из полученной пластичной массы формовали образцы кубиков с размером ребра 20 мм. Образцы без предварительной выдержки помещали в сушильный шкаф SNOL, где они

твердели в течение 24 часов при температуре 60°C. Прочность образцов на сжатие определяли через 24 часа после температурной обработки.

Основная часть. Оптимизация концентрации щелочного активатора выполнялась с применением метода математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана второго порядка. В качестве варьируемых факторов рассматривались массовая доля золы в составе геополимерного вяжущего (x1), массовая доля гидроксида натрия NaOH (x2) и водозольное отношение (x3), в качестве результирующего фактора – прочность на сжатие геополимерного камня (Rсж).

Таблица 3. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		x1	x2	x3
Основной уровень	0	0,8	0,14	0,259
Интервал варьирования	Δ	0,2	0,05	0,091
Верхний уровень	+	1	0,19	0,35
Нижний уровень	-	0,6	0,09	0,169

Матрица планирования эксперимента в кодированных и натуральных переменных и значения прочности на сжатие геополимерного камня приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер образца	План в кодированных переменных			План в натуральных переменных			Прочность на сжатие Rсж, МПа	Концентрация, %	Характеристика смесей
	x1	x2	x3	Зола	NaOH	В/З			
1	1	1	1	1	0,19	0,350	1,40	35,3	BC
2	-1	1	1	0,6	0,19	0,350	1,48	47,6	Ж
3	1	-1	1	1	0,09	0,350	2,97	20,5	С
4	-1	-1	1	0,6	0,09	0,350	1,33	30,1	BC
5	1	1	-1	1	0,19	0,169	3,03	53,1	С
6	-1	1	-1	0,6	0,19	0,169	3,10	65,3	-
7	1	-1	-1	1	0,09	0,169	2,13	34,8	С
8	-1	-1	-1	0,6	0,09	0,169	1,40	47,1	С
9	1	0	0	1	0,14	0,259	2,24	35,1	BC
10	-1	0	0	0,6	0,14	0,259	1,93	47,4	П
11	0	1	0	0,8	0,19	0,259	1,99	47,9	П
12	0	-1	0	0,8	0,09	0,259	2,05	30,3	BC
13	0	0	1	0,8	0,14	0,350	1,18	33,4	Ж
14	0	0	-1	0,8	0,14	0,169	3,48	50,9	BC
15	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,08	40,3	П
16	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,05	40,3	П
17	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,13	40,3	П

Примечание. С – сухая; BC –сухая, в процессе перемешивания стала пластичной; П – пластичная; Ж – очень пластичная

Внешний вид образцов геополимерного камня после твердения при температуре 60°C в течение 24 часов представлен на рисунке 1. На образцах 6, 10 и 11 появлялись капли влаги, что свидетельствовало о высоком значении принятого водозольного (В/З) отношения. После извлечения из сушильного шкафа на поверхности образцов 2, 4, 5, 9 и 15

начинал формироваться белый налет игольчатой структуры. Причиной высолообразования может быть пересыщение геополимера щелочным раствором, и как следствие, выделением на поверхности образцов щелочного активатора, не вступившего в реакцию. В работе [6] отмечается, что после формирования структуры геополимера молекулы щелочи, не участвующие в формировании каркаса алюмосиликатных тетраэдров, начинают выкристаллизовываться на поверхности формируемого материала. При концентрации NaOH более 62% наблюдается рыхлая структура. Образцы 3, 7, 8, 12, 13, 14 не имели дефектов внешнего вида, при этом максимальная прочность получена при испытании образца 3 (2,97 МПа) и образца 14 (3,48 МПа), соответственно при концентрации гидроксида натрия 20,5% и 50,9%.

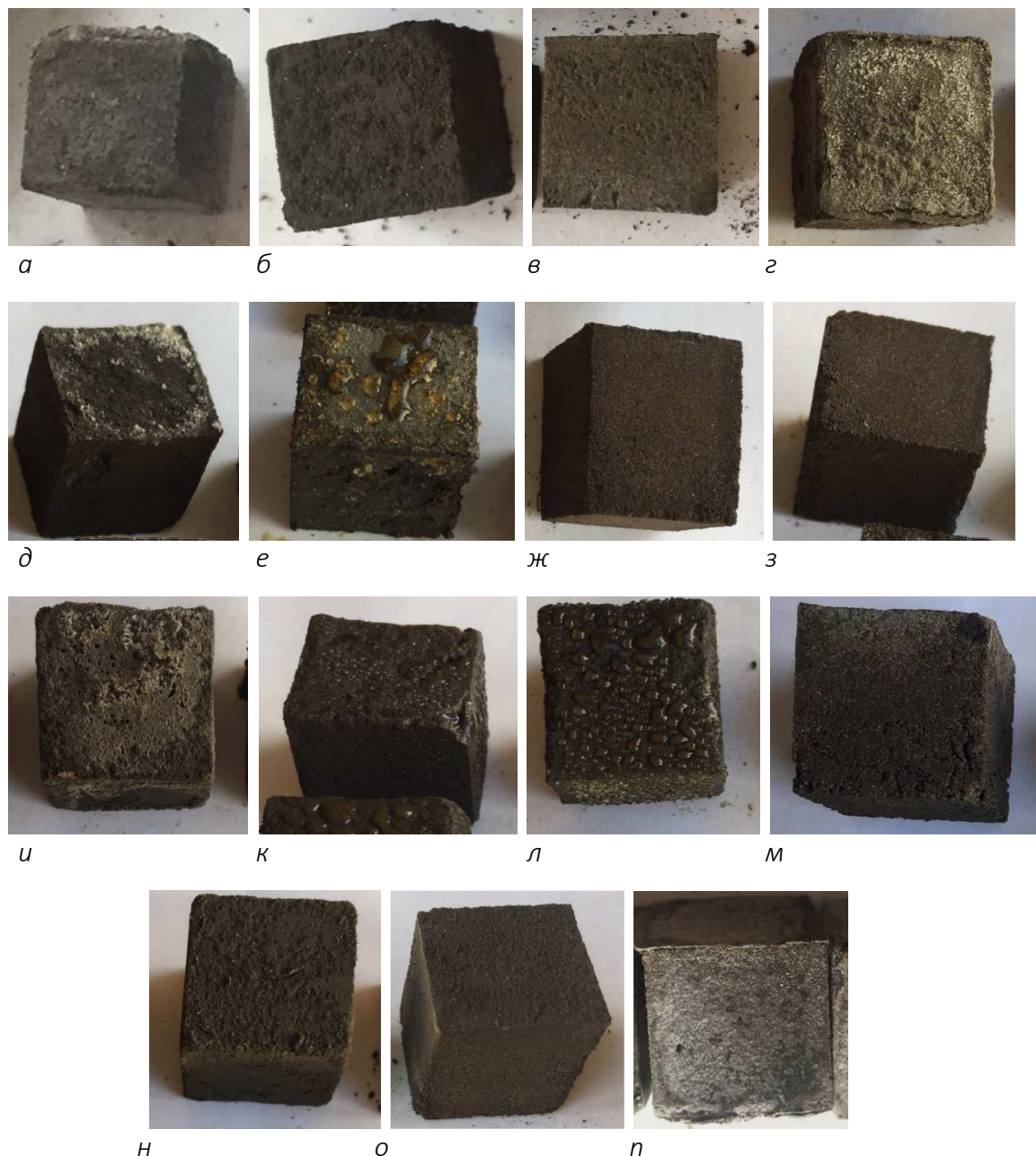


Рисунок 1 – Внешний вид образцов геополимерного камня после твердения при температуре 60 °С в течение 24 часов:

а – образец № 1; *б* – образец № 2; *в* – образец №3; *г* – образец 4; *д* – образец 5; *е* – образец 6; *ж* – образец 7; *з* – образец 8; *и* – образец 9; *к* – образец 10; *л* – образец 11; *м* – образец 12; *н* – образец 13; *о* – образец 14; *п* – образец 15

Обработка экспериментальных данных методами математической статистики позволила получить полином второго порядка прочности на сжатие геополимерного камня. Графическая интерпретация полученного уравнения представлена на рисунке 2.

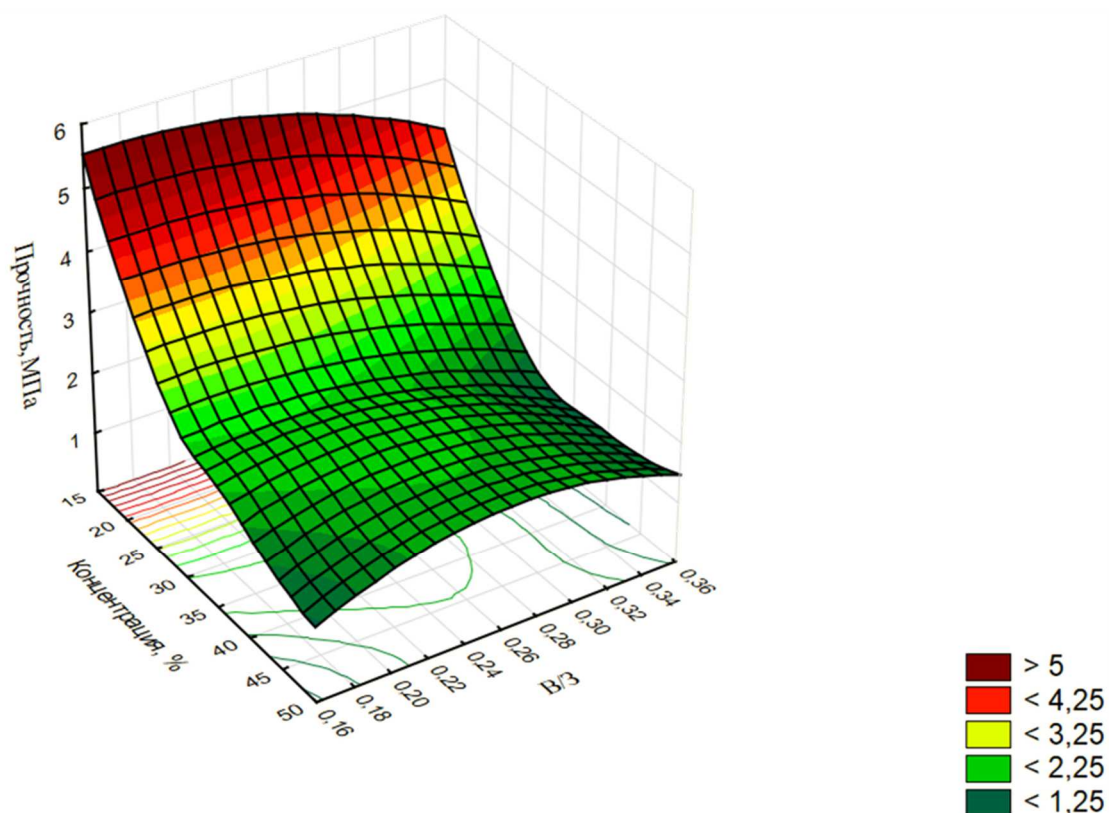


Рисунок 2. – Зависимость прочности геополимерного камня от концентрации щелочного активатора и водозольного отношения

Поверхность отклика, представленная на рисунке 2, показывает, что выбранный диапазон варьирования факторов не охватывает зону экстремума функции. Для определения оптимальной концентрации щелочного активатора дальнейшие исследования проводились на составах 3 и 14 при постоянном водозольном отношении путем изменения количества сухого вещества гидроксида натрия в воде затворения. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Оптимизация концентрации щелочного активатора

Номер образца	Расход материалов			Прочность на сжатие Rсж, МПа через 24 часа после термической обработки
	Зола	Концентрация, %	В/З	
3**	1	22,9	0,350	2,7
3	1	20,5	0,350	2,97
3*	1	18	0,350	3,9
3^	1	15,7	0,350	2,8
3^^	1	13,4	0,350	2,1
14	0,8	50,9	0,169	3,48
14**	0,8	44	0,169	3,26
14*	0,8	34,8	0,169	2,16

Выводы. Золошлаковая смесь, образующаяся на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области при сжигании древесной щепы (50%) и торфа (50%), может использоваться в качестве сырья для получения геополимерного вяжущего. Оптимальная концентрация гидроксида натрия NaOH составила 18% при водозольном отношении $V/3=0,35$. Максимальная прочность геополимерного камня составила $R_{сж}=4$ МПа. Увеличение полученных показателей прочности может быть достигнуто за счет оптимизации температуры тепловой обработки геополимерного камня и значений удельной поверхности золы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошкина, Н.А. Использование золы ТЭС в технологии геополимерных строительных материалов / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Молодой ученый. – 2015. – №7. – С. 117–120.
2. Стасевич, К.А. Сколько углекислого газа «съедает» цемент / К.А. Стасевич // Наука и жизнь. – 2016. – Вып. № 11. – С. 14–20.
3. Парфенова, Л.М. Режимы и способы активации золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Л.М. Парфенова, В.В. Бозылев, А.П. Шведов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 57–60.
4. Ерошкина, Н.А. Принципы выбора сырьевых компонентов в технологии получения геополимеров на основе золы-уноса / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, М.Ю. Чамурлиев // Теория. Практика. Инновации. – 2017. – № 5 (17). – С. 7–16.
5. Ерошкина, Н.А. Свойства геополимерного вяжущего на основе Том -Усинской ГРЭС / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Новый университет. Сер. Техн. науки. – 2014. – № 12 (34). – С. 30–34.
6. Чижов, Р.В. Зависимость прочностных характеристик геополимерного камня от условий набора прочности / Р.В. Чижов, В. В.Строкова // V Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей : сб. докладов / Международное аналитическое обозрение «ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси»; сост.: кол. авторов. – СПб., 2015. – С. 100–105.