

УДК 691.544

**Н. А. ЕРОШКИНА, М. О. КОРОВКИН, С. В. АКСЕНОВ**

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**МАЛОЭНЕРГОЕМКИЕ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ВЯЖУЩИХ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ**

В работе представлены результаты разработки и исследования минерально-щелочных (геополимерных) вяжущих на основе отходов добычи и переработки магматических горных пород. Изучено влияние вида магматической горной породы, условий твердения, модифицирующей добавки и содержания активатора. Установлено влияние состава комплексного активатора на основе силиката натрия на свойства вяжущего. Показано, что по ресурсо- и энергосберегающей технологии может быть получено минерально-щелочное вяжущее на основе измельченных магматических горных пород. Для получения вяжущего прочностью 60...70 МПа, обладающего высокой водостойкостью и низким водопоглощением, в его состав должен входить доменный шлак 25 % от веса вяжущего при использовании комплексного активатора твердения, включающего силикат натрия в количестве 7...9 % и гидроксида натрия в количестве 2,0...2,5 %.

**энерго- и ресурсосберегающая технология, манерально-щелочное вяжущее, геополлимер, отходы дробления щебня**

В мировой строительной науке в последние годы возрастает интерес к работам по созданию мало-энергоемкой альтернативы портландцемента на основе вяжущих щелочной активации. Во многих странах ведется разработка и исследование таких вяжущих на основе концепции получения материалов полимерной структуры на базе неорганического сырья: шлаков, зол, термически активированных каолинов, полевошпатных и других пород [1, 2]. Автор этой концепции – J. Davidovits предложил использовать для таких вяжущих термин геополлимер [1].

В работах [3, 4] было установлено, что за счет щелочной активации измельченных магматических горных пород возможно получение вяжущих без термической обработки сырья. Вяжущие на основе этих горных пород имеют значительные преимущества с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, так как для их производства могут быть использованы многотоннажные дисперсные отходы добычи и переработки нерудных и рудных полезных ископаемых: отсева дробления щебня, хвосты рудообогащения и др.

Однако активация магматических горных пород NaOH или KOH не позволяет получить вяжущее с достаточно высокой прочностью и водостойкостью [3]. Для повышения технико-строительных характеристик вяжущего необходимо использовать модифицирующие добавки. В настоящей работе была исследована эффективность комплексного активатора твердения, включающего силикат натрия и гидроксид натрия и добавки доменного шлака.

Вяжущее было изготовлено из дисперсных отходов добычи и переработки магматических горных пород, которые смешивались с добавкой доменного гранулированного шлака. Полученная смесь затворялась раствором комплексного активатора, включающего силикат натрия (жидкое стекло) и NaOH. Из полученной смеси формовались образцы 20×20×20 мм, которые твердели в нормальных условиях твердения, а также при различных режимах тепловой обработки (ТО). ТО проводилась в сухих и во влажных условиях по режиму: подъем температуры – 3 часа, изотермическая выдержка – 6 часов при температурах 60, 80 и 100 °С с последующим остыванием в течение 8...10 часов.

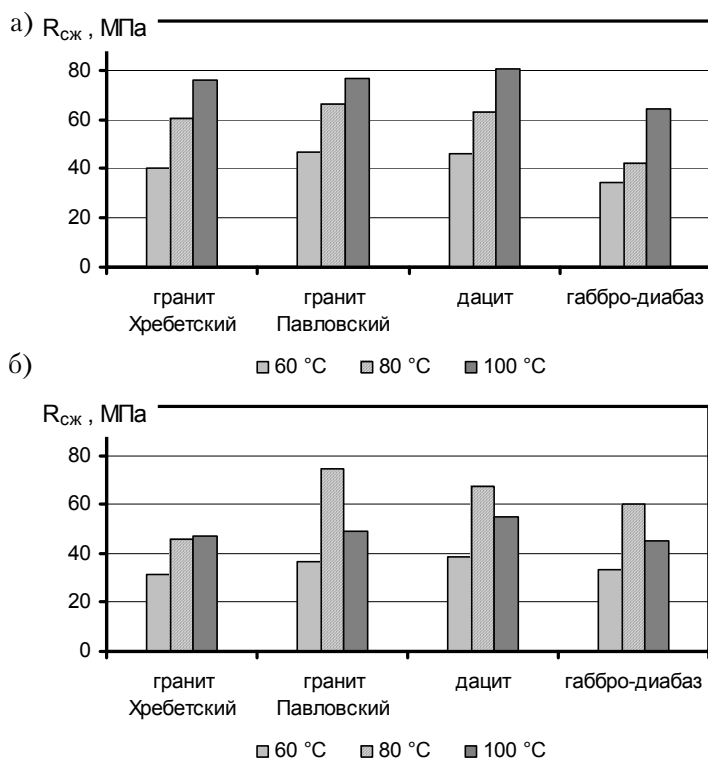
В качестве основного компонента вяжущего использовали, измельченные до удельной поверхности по ПСХ-2 350 м<sup>2</sup>/кг магматические горные породы – граниты Павловского и Хребетского месторождений, дацит и габбро-диабаз Круторожинского месторождения, а в качестве модифицирующей

добавки – доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината с удельной поверхностью 380 м<sup>2</sup>/кг.

В качестве активатора использовались: NaOH и натриевое жидкое стекло с  $M_c = 2,7$ , плотностью 1,47 г/см<sup>3</sup>. В первоначальных составах (табл. 1 и рис. 1) соотношение силиката натрия и гидроксида натрия составляло 4,5:1,0 при растворо-твердом отношении равном 0,4.

**Таблица 1** – Прочность минерально-щелочных вяжущих без добавки шлака после тепловой обработки

Условия твердения		Основа вяжущего			
		Гранит Хребетский	Гранит Павловский	Дацит	Габбро-диабаз
Сухой прогрев	60 °С	0,3	0,8	23,8	0,4
	80 °С	33,0	32,8	40,8	26,8
	100 °С	53,1	48,6	48,4	43,2
Тепловлажностная обработка	60 °С	0	0	0	0
	80 °С	5,0	6,5	2,5	3,5
	100 °С	10,8	8,2	5,8	7,7



**Рисунок 1** – Прочность геополимерных вяжущих с 25 % добавкой шлака в зависимости от условий твердения: а – при тепловлажностной обработке, б – при сухом прогреве.

При исследованиях влияния количества силиката натрия и гидроксида натрия (табл. 2, рис. 2 и 3) содержание этих компонентов в опытах варьировалось в интервалах 10...20 % и 2...6 %, соответственно. Соотношение активизирующего раствора и вяжущего составляло 0,32.

В ходе эксперимента было установлено, что измельченные горные породы с комплексным активатором без прогрева не твердеют. Прогрев при 60 °С является для всех горных пород, кроме дацита, недостаточным воздействием на вяжущее для получения практически значимой прочности (табл. 1). Тепловая обработка при более высокой температуре позволяет значительно повысить прочность вяжущего. Сухой прогрев позволяет получить прочность вяжущего в 5...8 раза более высокую, чем при тепловлажностной обработке, что свидетельствует о воздушном типе вяжущего.

Таблица 2 – Свойства минерально-щелочного вяжущего на граните с добавкой 12 % шлака

№ п/п	Активирующий раствор			Прочность, МПа, после твердения			Через 60 сут в воде	
	Силикат натрия, %	NaOH, %	Вода, %	60 °С	80 °С	60 сут в норм. усл.	K <sub>p</sub>	W, %
1	10	2	20	18,3	30	23,8	0,77	9,6
2	7,5		22,5	15	25,8	22,8	0,72	10,7
3	5		25	14,9	17	26,5	0,65	12,8
4	10	4	18	16,7	33	36,8	0,88	6,5
5	7,5		20,5	13,8	22,5	23,5	0,74	7,7
6	5		23	11,1	20,5	22,8	0,70	9,7
7	10	6	16	17,1	27,8	29,8	1,0	7,3
8	7,5		18,5	17	22,5	25,5	0,76	4,6
9	5		21	10,2	18	13,3	0,74	6,9

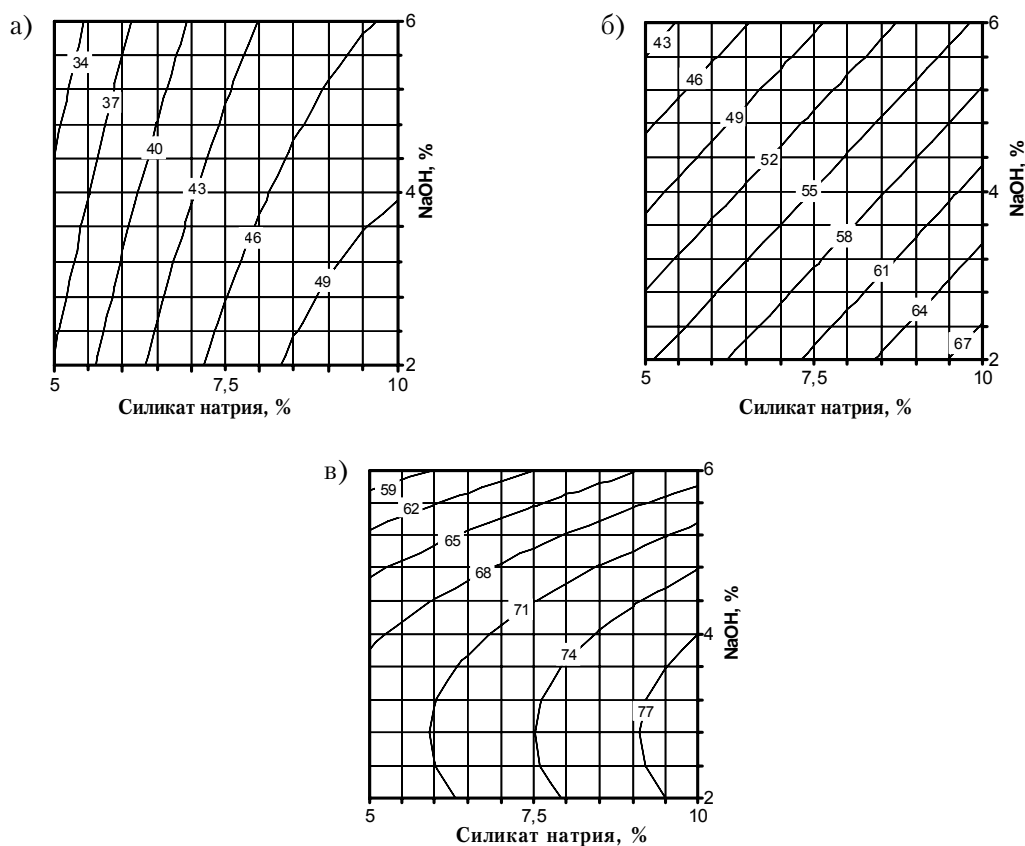
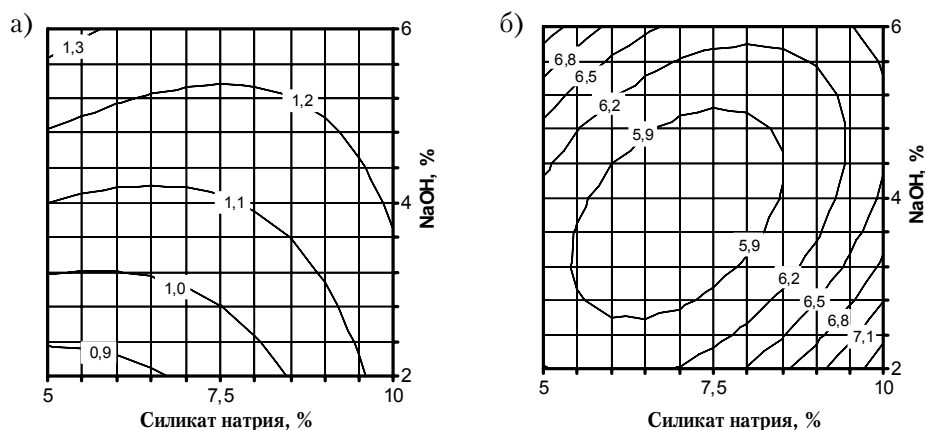


Рисунок 2 – Прочность вяжущих, содержащих 25 % шлака: а – после 60 °С; б – после 80 °С; в – при твердении в течение 60 суток в воздушно-влажностных условиях.

Введение в состав вяжущего 25 % шлака приводит к значительному повышению прочности вяжущего при тепловлажностной обработке – до 60...80 МПа (рис. 1а). Твердение вяжущих с добавкой шлака в сухих условиях менее эффективно, чем при тепловлажностной обработке, причем повышение температуры сухого прогрева с 80 до 100 °С почти во всех случаях снижает прочность составов с добавкой шлака (рис. 1б).

Результаты исследования (табл. 1 и рис. 1) показывают, что оптимальный тип тепловой обработки, зависит от наличия в составе вяжущего добавки шлака: в сухих условиях более высокую прочность набирают вяжущие без этой добавки, а во влажных условиях – вяжущие с добавкой шлака. Эту закономерность можно объяснить изменением типа вяжущего с воздушного на гидравлическое при введении в его состав доменного шлака.



**Рисунок 3** – Водостойкость (а) и водопоглощение (б) вяжущих, содержащих 25 % шлака через 60 суток водонасыщения.

Уменьшение расхода шлака до 12 % приводит к снижению прочности (табл. 2). Такая дозировка шлака позволяет получить вяжущие активностью 23...36 МПа. Наиболее высокие значения прочности достигаются при максимальном содержании силиката натрия и дозировке щелочи 4 %. При увеличении расхода щелочи до 6 % происходит снижение прочности, но при этом возрастает коэффициент водостойкости  $K_p$  и снижается водопоглощение  $W$  (табл. 2).

Сопоставляя результаты на рис. 1 и в табл. 2, можно сделать вывод, что уменьшение расхода шлака с 25 до 12 % приводит к двукратному снижению прочности, кроме того, при таком расходе шлака не все составы достаточно водостойки, что снижает перспективность использования минерально-щелочного вяжущего в строительстве. В связи с этим влияние состава активатора твердения вяжущего на его свойства было исследовано на составах, включающих 25 % шлака.

Для этих исследований был использован двухфакторный план эксперимента, в котором варьировалось содержание двух компонентов комплексного активатора – силиката натрия и гидроксида натрия.

После проведения эксперимента и статистической обработки его результатов были получены математические модели в виде полиномиальных уравнений второго порядка, по которым построены графики влияния состава активатора на прочность вяжущего, твердевшего по различным режимам (рис. 1), а также водопоглощение и водостойкость (рис. 2).

Анализ изолиний на рис. 1 показывает, что при тепловлажностной обработке повышение прочности происходит при увеличении дозировки жидкого стекла и снижении дозировки щелочи. При повышении температуры с 60 до 80 °С прочность возрастает на 10...20 МПа, при этом несколько снижается направление изолиний – при повышении температуры возрастает чувствительность прочностных показателей к изменению дозировки щелочи.

При твердении в нормальных условиях зависимость прочности от состава активатора имеет схожий характер, но при этом оптимальное содержание NaOH – 2,5...3,0 %.

С точки зрения водостойкости (рис. 3а) и водопоглощения (рис. 3б) вяжущих оптимальные составы активатора отличаются от оптимальных составов для прочности. Увеличение дозировки щелочи и жидкого стекла повышает коэффициент размягчения при насыщении образцов водой в течение 60 суток от 0,9 до 1,3. Это свидетельствует о том, что при повышении дозировки компонентов твердение вяжущего продолжается в течение продолжительного времени. Для получения вяжущего с минимальным водопоглощением (рис. 3б) оптимальная дозировка силиката натрия ~ 7 %, NaOH ~ 4 %.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить, что минерально-щелочное вяжущее на основе измельченных магматических горных пород должно включать в свой состав 25 % доменного шлака, что при использовании комплексного активатора твердения на основе силиката натрия в количестве 7...9 % и гидроксида натрия в количестве 2,0...2,5 %, обеспечивается получение прочности 60...70 МПа при высокой водостойкости и низком водопоглощении.

В технологии полученных безобжиговых минерально-щелочных вяжущих могут быть использованы крупнотоннажные дисперсные отходы камнедробления и рудообогащения, что позволит

значительно снизить затраты электроэнергии на измельчение сырья и производить строительные материалы по ресурсосберегающей технологии, за счет замены природного сырья на промышленные отходы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davidovits, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials [Текст] / J. Davidovits // Journal of Materials Education. – 1994. – Vol. 16 (2, 3). – P. 91–138.
2. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching [Текст] / M. Izquierdo, X. Querol, J. Davidovits et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Volume 166, Issue 1. – P. 561–566.
3. Ерошкина, Н. А. Сравнительные исследования магматических горных пород в качестве сырья для геополимеров [Текст] / Н. А. Ерошкина, В. И. Калашников, М. О. Коровкин // Сырьевые ресурсы регионов и производство на их основе строительных материалов : сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. / Пензенский гос. унив. арх. и стр.-ва. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2007. – С. 55–59.
4. Ерошкина, Н. А. Исследование вяжущих, полученных при щелочной активизации магматических горных пород [Текст] / Н. А. Ерошкина // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 1(33). – С. 61–64.

Получено 07.03.2013

**Н. О. ЄРОШКІНА, М. О. КОРОВКІН, С. В. АКЬОНОВ**  
**МАЛОЕНЕРГОЄМНІ РЕСУРСОЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА**  
**В'ЯЖУЧИХ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙНОГО БЕТОНУ**  
Пензенський державний університет архітектури та будівництва

У роботі представлені результати розробки і дослідження мінерально-лужних (геополімерних) в'язучих на основі відходів видобутку і переробки магматичних гірських порід. Вивчено вплив виду магматичної гірської породи, умов твердіння, модифікуючої добавки і вмісту активатора. Встановлено вплив складу комплексного активатора на основі силікату натрію на властивості в'язучого. Показано, що за ресурсо- і енергоощадною технологією може бути отримане мінерально-лужне в'язуче на основі подрібнених магматичних гірських порід. До складу цього в'язучого повинно входити 25 % доменного шлаку, що при використанні комплексного активатора твердіння на основі силікату натрію в кількості 7...9 % і гідроксиду натрію в кількості 2,0...2,5 %, забезпечує отримання міцності 60...70 МПа при високій водостійкості і низькому водопоглинанню.

**енерго- та ресурсоощадна технологія, мінерально-лужне в'язуче, геополімер, відходи дроблення щебеню**

**NADEZHDA EROSHKINA, MARK KOROVKIN, SERGEY AKSENOV**  
**LOW-POWER RESOURCE SAVING TECHNOLOGIES OF BINDERS FOR**  
**STRUCTURAL CONCRETE**  
Penza State University of Architecture and Construction

The results of research and development of mineral-alkali (geopolymer) binders on the basis of waste production and processing of magmatic rocks are presented in the article. The influence of the type of magmatic rock, hardening conditions, modifier admixture and content of the activator were investigated. The influence of composition complex activator on the basis of sodium silicate on the properties of binder was found. It is shown that mineral-alkali binder on basis of crushed magmatic rocks can be obtained by resource-and energy-efficient technology. To obtain bonder with strength of 60...70 MPa and high water resistance and low absorption of water in its composition should include blast furnace slag 25 % by weight of the binder and using a complex activator on basis of sodium silicate in amount of 7...9 % and sodium hydroxide 2,0...2,5 %.

**energy-and resource-saving technology, alkali-maneral binder, geopolymer, waste crushing rubble**