

А.В., Острая Т.В., Резникова Л.И. / Сб. науч. тр. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Часть 2. – Одесса – 2006. – С. 6-13. **5.** Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Моделирование конструкций как сложных систем // Вестник ОГАСА, выпуск № 28, 2007. – С. 64 – 70. **6.** Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука, 1982. -112 с. **7.** Острая Т.В., Выровой В.Н. Характер распределения технологических деформаций в строительных изделиях // Вестник ОГАСА, выпуск № 27, 2007. – С. 252 – 260. **8.** И.А. Биргер. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963.-232 с. **9.** Роуланс Р. Остаточные напряжения / Роуланс Р. // Экспериментальная механика. – М.: Мир, 1990. – С. 283-335. **10.** Давиденков Н.Н. Об остаточных напряжениях / Давиденков Н.Н. // Заводская лаборатория. – 1935. – IV. – №6. – С. 688-693. **11.** Томашевский В.Т. О задачах механики в технологии композитных материалов / Томашевский В.Т. // Механика композитных материалов, 1982. – №3. – С. 486-503.

**УДК 666.9**

**ОЦЕНКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ  
НА ОСНОВЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД**

**ОЦІНКА ЕНЕРГО-ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ТЕХНОЛОГІЇ ГЕОПОЛІМЕРНОГО В'ЯЖУЧОГО НА ОСНОВІ  
МАГМАТИЧНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**EVALUATION OF ENERGY- AND RESOURCE-SAVING OF  
TECHNOLOGIES GEOPOLYMER BINDERS BASED ON MAGMATIC  
ROCKS**

**Ерошкина Н. А., Коровкин М. О., Ильина Т. А.** (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация)

**Єрошкіна Н. А., Коровкін М. О., Ільїна Т. А.** (Пензенський державний університет архітектури та будівництва, м. Пенза, Російська Федерація)

**Eroshkina N. A., Korovkin M. O., Ilina T. A.** (Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation)

**Наведены сведения о влиянии основных параметров состава геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород на их свойства. Приводится сравнительный анализ потребления**

**энергетических и сырьевых ресурсов при производстве этих вяжущих в сравнении с традиционными строительными материалами.**

**Наведені дані про вплив основних параметрів складу геополімерних в'язучих на основі магматичних гірських порід на їх властивості. Наводиться порівняльний аналіз споживання енергетичних і сировинних ресурсів при виробництві цих в'язучих у порівнянні з традиційними будівельними матеріалами.**

**Provides information on the impact of the main parameters of geopolymer binders based on igneous rocks on their properties. The comparative analysis of the consumption of energy and raw materials in the production of these binders in comparison with traditional building materials.**

**Ключевые слова:**

Энерго- и ресурсосбережение, вяжущее, магматические породы.

Енерго-та ресурсозбереження, в'язуче, магматичні породи.

Energy and resource, binder, igneous rocks.

Разработка новых и совершенствование существующих разновидностей безклинкерных вяжущих щелочной активации, к числу которых относятся шлакощелочные, минерально-шлаковые, минерально-щелочные и геополимерные вяжущие – наиболее перспективное направление создания энерго- и ресурсосберегающей альтернативы портландцемента.

Минерально-щелочные вяжущие или по зарубежной терминологии – геополимерные вяжущие на основе магматических горных пород [1] получают за счет активации щелочами или метасиликатами щелочных металлов измельченных гранитов, базальтов, габбро, диабазов и других эффузивных и интрузивных пород [2].

Исследованиями установлено [2, 3], что магматические горные породы, измельченные до удельной поверхности  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  и более при затворении растворами щелочами способны твердеть только при низких водовязущих отношениях и сухом прогреве при температуре  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше. Эти вяжущие имеют достаточно высокую прочность –  $30 \dots 50 \text{ МПа}$ , однако они имеют низкую водостойкость, которая характеризуется коэффициентом размягчения в интервале от 0,15 до 0,6. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что эти материалы относятся к воздушному типу вяжущих. При замене щелочного активатора твердения на метасиликатный (растворимое стекло) свойства вяжущих изменяются незначительно.

Введение доменного гранулированного шлака в состав вяжущего позволяет повысить его прочность и водостойкость (табл. 1). Вяжущее с этой добавкой твердеет как при тепловлажностной обработке, так и в нормальных условиях.

Таблица 1

Влияние добавки шлака на свойства геополимерных вяжущих на основе  
магматических горных пород

Основной материал вяжущего	Шлак, %	Прочность, МПа, после ТВО при температуре		Прочность, МПа, через 28 сут. в норм. усл.	Через 60 сут насыщения в воде	
		80 °С	105 °С		$K_p$	W, %
Гранит павловский	–	28	37	0,5	0,2	–
	25	74	48	66	1,15	7,5
Сиенит	–	30	41	0,8	0,35	6,1
	25	78	60	70	1,22	7,0
Андезит	–	33	45	0,7	0,4	5,0
	25	59	50	64	1,31	5,6
Габбро-диабаз	–	35	45	1,2	0,34	4,8
	25	60	45	60	1,0	5,2
Базальт	–	38	50	2,0	0,55	5,6
	25	68	59	72	1,40	6,0
Дациит	–	29	35	0,3	0,32	5,5
	25	76	55	57	1,17	6,4

Сопоставление прочности вяжущих с различной дозировкой шлака, твердевших в воздушно-влажных условиях и в воде показывает, что уже при расходе шлака 7...8 % вяжущее приобретает гидравлические свойства (рис. 1). Графики на рис. 1 показывают, что увеличение дозировки шлака от 6 до 24 % приводит к повышению прочности в несколько раз, что свидетельствует об особой роли шлака в структурообразовании исследуемого вяжущего.

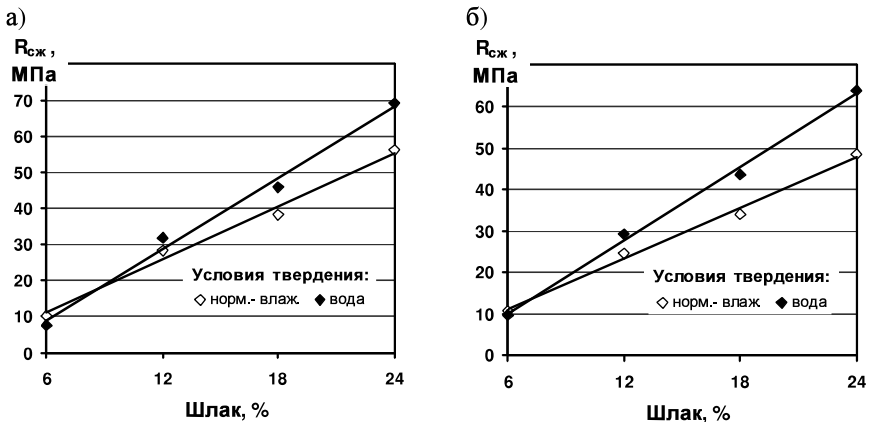


Рис. 1. Влияние дозировки шлака и на прочность при сжатии вяжущего на основе гранита (а) и базальта (б) при твердении в различных условиях

Механизм структурообразования геополимерного вяжущего на основе магматических горных пород, и в частности роль этого компонента в конструктивных процессах до конца не понятен. С учетом того, что на прочность вяжущего влияет удельная поверхность не только шлака, но и гордой породы (рис. 2), можно сделать вывод, о том, что измельченная порода не является инертным компонентом. Повышение тонкости помола гранита от 300 до 400 м<sup>2</sup>/кг не дает значительного повышения прочности в возрасте 3 сут. в вяжущем с удельной поверхностью шлака менее 300 м<sup>2</sup>/кг (рис. 2а). Через 28 сут зависимость прочности удельной поверхности шлака и гранита имеет линейный характер (рис. 2б), что свидетельствует о том, что измельченный гранит также является активным компонентом вяжущего, хотя его активность заметно ниже.

С учетом выявленных в ходе исследований закономерностей твердения вяжущих на основе магматических горных пород была предложена технология производства этого вяжущего. Основные этапы предлагаемой технологии включают: раздельное или совместное измельчение отхода добычи и переработки магматической горной породы и гранулированного шлака, приготовление комплексного активатора твердения состоящего метасиликата натрия или калия и гидроксида этих металлов в соотношении, обеспечивающем силикатный модуль не выше 1,6 (рис. 3).

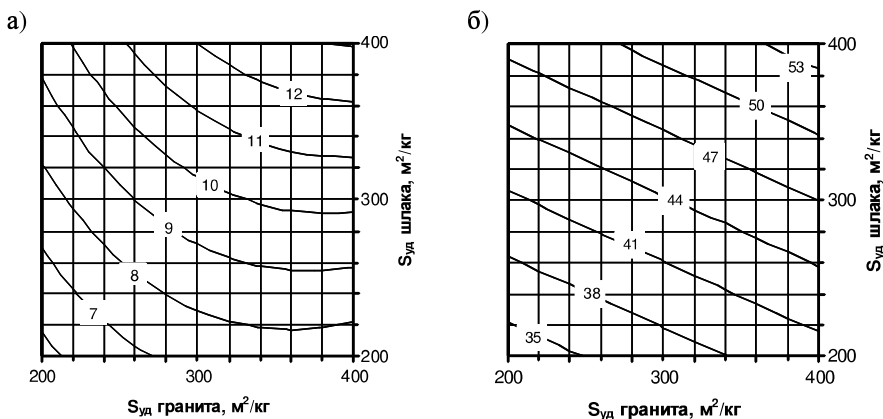


Рис. 2. Влияние удельной поверхности компонентов вяжущего на прочность через 3 суток (а), через 28 суток (б)

После приготовления смеси измельченной горной породы и шлака, она перемешивается с заполнителем и затворяется водой, в которой растворен комплексный активатор. Бетон на основе минерально-щелочного вяжущего характеризуется свойствами сходными с портландцементным бетоном и может производиться на существующих технологических линиях без их значительных изменений.

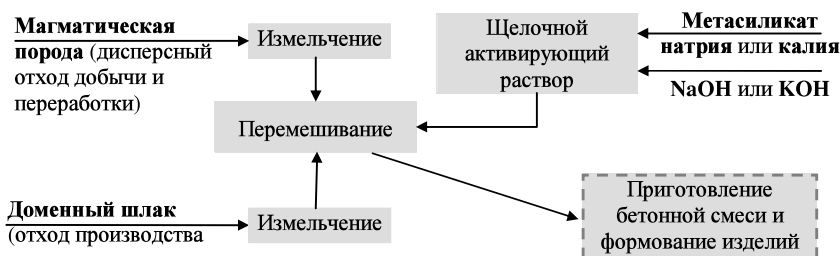


Рис.3. Схема получения геополимерного минерально-щелочного вяжущего и бетона на его основе

В технологии минерально-щелочных вяжущих заложен высокий энерго- и ресурсосберегающий потенциал: во-первых, для производства вяжущих используются дисперсные многотоннажные отходы добычи и переработки каменных горных пород, не требующих значительных затрат энергии на доизмельчение; во-вторых в технологии минерально-щелочных вяжущих отсутствует операция обжига. Последнее обстоятельство выгодно отличает разрабатываемые вяжущие от классических геополимерных материалов на основе обожженных при температуре 750 °С каолина или полевошпатных пород. Еще более эффективна замена на минерально-щелочные вяжущие доминирующего в современном строительстве портландцемента, производство которого сопряжено со значительными расходами тепловой энергии на высокотемпературный обжиг и электроэнергии на помол сырья и клинкера.

Сопоставление энергетических затрат показывает, что для получения геополимерных вяжущих требуется затратить в два раза меньше энергии. Наибольшая доля энергетических затрат при производстве геополимеров приходится на получение активатора твердения в состав которого входит метасиликат натрия или калия. Этот компонент вяжущего получают на специализированных предприятиях в процессе высокотемпературной варки. Получение метасиликата непосредственно не входит в технологию производства геополимерного вяжущего, но в связи с тем, что этот процесс является энергоемким, в расчетах энергозатраты на получение метасиликатов щелочных металлов нами были учтены.

Замещение портландцемента геополимерными вяжущими позволяет получить ресурсосберегающий эффект за счет двух факторов:

- замещения природного сырья на промышленные отходы;
- повышения соотношения готовой продукции и затраченного сырья, что достигается благодаря исключению из сырьевых материалов карбонатного сырья, которое при обжиге теряет почти половину своей массы за счет выделения углекислого газа.

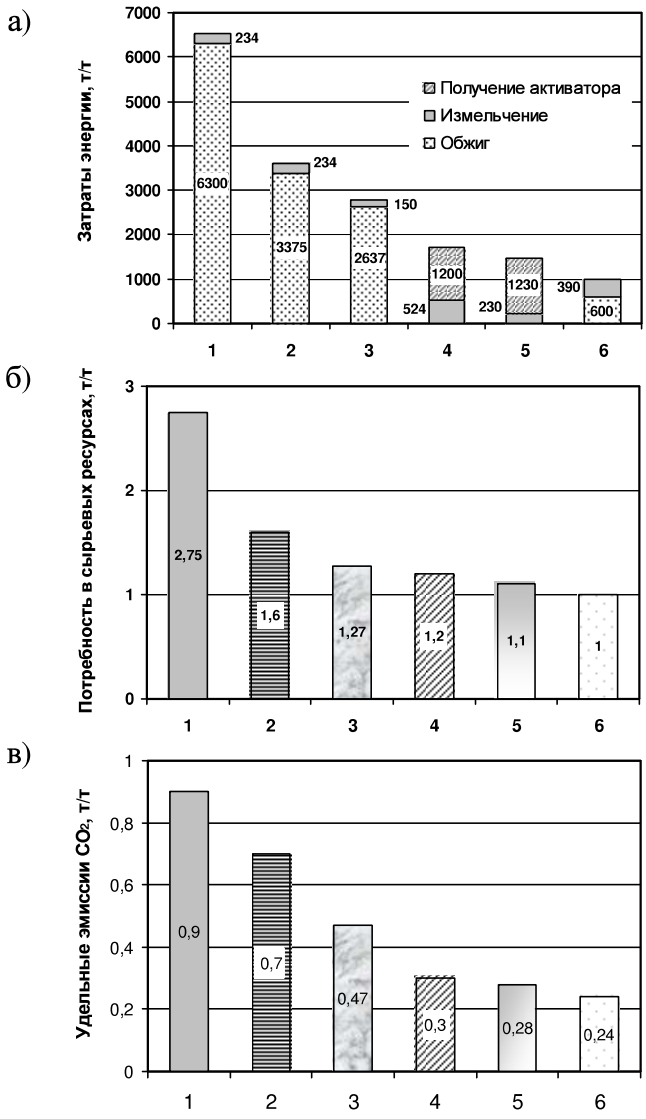


Рис. 4. Затраты энергии (а) и сырья (б) и эмиссия углекислого газа (в) при получении различных видов строительных материалов. Обозначения: 1 – портландцемент мокрым способом; 2 – портландцемент сухим способом; 3 – кирпич; 4 – шлакощелочное вяжущее; 5- геополимерное вяжущее на основе метаксаолина; 6 – минерально-щелочное геополимерное вяжущее

При производстве портландцемента потери при прокаливании сырьевой шихты составляют около 35 %. С учетом топлива, которое расходуется на обжиг сырья для производства 1 тонны цемента затраты сырья составляют приблизительно 1,8 тонны. При производстве разработанного геополимерного вяжущего используются крупнотоннажные отходы горной промышленности. Даже если считать, что шлак является товарным продуктом, расходы сырья для производства разрабатываемых нами вяжущих материалов будут составлять 0,35...0,45 тонны на 1 тонну готовой продукции. Материальные затраты в производстве традиционного геополимерного вяжущего выше за счет использования природного сырья и топлива для его обжига.

Негативным фактором производства портландцемента является выделение углекислого газа. В соответствии с данными приведенными Дж. Давидовичем [1] и рассчитанными нами при производстве геополимеров в атмосферу выделяется в 3-4,5 раза меньше углекислого газа, чем при производстве портландцемента (рис. 2б).

Сравнение затрат энергии для производства 1 тонны портландцемента и геополимерного вяжущего по данным [1] показывает, что эти затраты для производства геополимера примерно в 2 раза ниже. Это связано с отсутствием операции обжига в технологии геополимера (рис.2в).

### **Выводы**

Разработаны составы для получения геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород с добавкой доменного гранулированного шлака, активированных силикатом щелочного металла. Эти вяжущие и бетоны на их основе могут производиться по энерго- и ресурсосберегающей технологии, включающей четыре этапа: доизмельчение магматических пород и доменного шлака, приготовление активатора, приготовление бетонной или растворной смеси и формование изделий и конструкций. Подсчитаны затраты энергии и ресурсов на получение 1 тонны геополимерного вяжущего, а также выбросы углекислого газа.

1. Davidovits, J. (2011). "Geopolymer chemistry and applications." Geopolymer Institute, 3<sup>rd</sup> edition, France. 2. Ерошкина Н.А. Исследование вяжущих, полученных при щелочной активизации магматических горных пород // Строительство и реконструкция. 2011. № 1. С. 61-65. 3. Ерошкина Н.А. Минерально-щелочные вяжущие: монография / Н.А. Ерошкина, В.И. Калашников, М.О. Коровкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 152 с.