

УДК 624.138:691.5

**В. Г. Хозин^а, А. И. Харченко^б, И. Я. Харченко^в, А. А. Пискунов^г, А. А. Карпухина^д,
Ю. И. Харин^е**

^а *Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *ООО «Научно-исследовательский центр подземных сооружений»*

^в *Российский университет транспорта*

^г *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ГРУНТОВ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Производство шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе является одной из перспективных областей разработок в строительной индустрии. В производстве шлакощелочных вяжущих и бетонов используются отходы металлургической промышленности — шлаки. Это способствует уменьшению негативного воздействия на окружающую среду, снижению экологического давления. Авторами проведено исследование свойств геополимерных вяжущих, рассмотрен опыт разработки и применения геополимерных вяжущих и бетонов.

Ключевые слова: подземные сооружения, шлакощелочные и геополимерные вяжущие, щелочной активатор, физико-химические исследования, ликвидация водопроводов.

Введение

Повышение качества жизни людей в условиях плотного жилого района неразрывно связано с освоением подземного пространства, что способствует развитию транспортных коммуникаций, формированию оптимальных и комфортных условий проживания, улучшению окружающей среды. Возведение подземных сооружений различного назначения предполагает разработку и внедрение новых экономичных строительных материалов и технологий по улучшению прочностных характеристик грунтов. В настоящее время на строительном рынке достаточно широко применяются различные технологии инъекционного закрепления грунтов с применением минеральных вяжущих, среди которых наибольшей востребованностью пользуется технология струйной цементации грунтов. Ее разновидностью является закрепление грунтов по манжетной технологии в режиме пропитки без разрушения их структуры. Каждая из указанных технологий цементации имеет свою область применения при решении тех или иных геотехнических задач с учетом конкретных инженерно-геологических условий. При этом расход цемента составляет 450...900 кг на 1 м³ закрепляемого грунта в зависимости от проектных требований и геотехнических условий строительства. В этой связи замена общепринятого строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее является существенным резервом, благодаря которому уменьшается стоимость использованных строительных материалов и увеличивается технико-экономическая эффективность работ по упрочнению грунтов по технологии струйной цементации.

Кроме того, замена строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее положительно сказывается на прочности и долговечности закреп-

ленных массивов. Довольно часто грунтовые воды в черте города обладают повышенной агрессивностью по отношению к общестроительным цементам, эти воды могут быть дополнительным активизирующим фактором при применении бесклинкерных вяжущих.

Характерным видом бесклинкерных вяжущих являются шлакощелочные вяжущие, теоретические основы применения которых рассмотрены в работах В. Г. Глуховского, П. И. Кривенко, В. И. Калашникова [1—4]. Развитие теории создания и использования вяжущих, активированных щелочами, получило в трудах французского ученого J. Davidovits, который внес значительный вклад в разработку разновидности минеральных бесклинкерных вяжущих и предложил использовать термин «геополимер» [4]. Обоснованность применения этого термина обусловлена тем, что технология геополимерных вяжущих (ГПВ) предусматривает синтез их полимерной структуры из мономерных силикатных и алюминатных групп. Эти мономеры образуются путем химического разрушения щелочными растворами первичной структуры природных материалов или промышленных отходов алюмосиликатного состава с последующим развитием процесса самопроизвольной пространственной полимеризации мономеров в новую пространственную структуру, со временем преобразующуюся в искусственный высокопрочный камень [5, 6].

Несмотря на очевидную технико-экономическую эффективность ГПВ и бетонов на их основе, их применение в строительной практике сдерживается двумя основными факторами: неудовлетворительной воспроизводимостью строительно-технологических свойств вследствие колебаний химического и минерального составов как минеральной составляющей, так и щелочного активатора; выделением на поверхности строительных конструкций свободной щелочи в виде подтеков, что существенно ухудшает внешний вид конструкций [7—9]. Указанные недостатки не являются решающими факторами, сдерживающими применение ГПВ для усиления прочностных свойств грунтов и формирования грунтобетонных массивов. Негативное влияние возможных колебаний составов компонентов на свойства ГПВ в геотехническом строительстве нивелируется достаточностью получения, как правило, низкопрочных грунтобетонных массивов с прочностью при сжатии, не превышающей 10 МПа, а также отсутствием возможности образования высолов на поверхности грунтобетонных массивов.

Экспериментальные исследования

Исследование свойств ГПВ выполнялось на тесте нормальной густоты с $V : Ц = 0,31$. Применяемый при проведении исследований метакаолин получали путем обжига каолиновой глины при $T = 750$ °С. В качестве щелочного активатора использовался водный раствор NaOH. Расход щелочного активатора изменялся в количестве 5, 15 и 25 % от массы вяжущего. В качестве замедлителя схватывания инъекционной смеси применялась НТФ-кислота с 50%-й концентрацией, плотностью 1,24 и основностью $pH = 1,82$. Расход замедлителя назначался в количестве 0,05, 0,2 и 0,8 % от расхода вяжущего. С целью дополнительной активации процессов гидратации в состав ГПВ вводился микрокремнезем в количестве 1...5 % от массы метакаолина. Результаты исследования влияния соотношения компонентов на активность ГПВ представлены на рис. 1, 2.

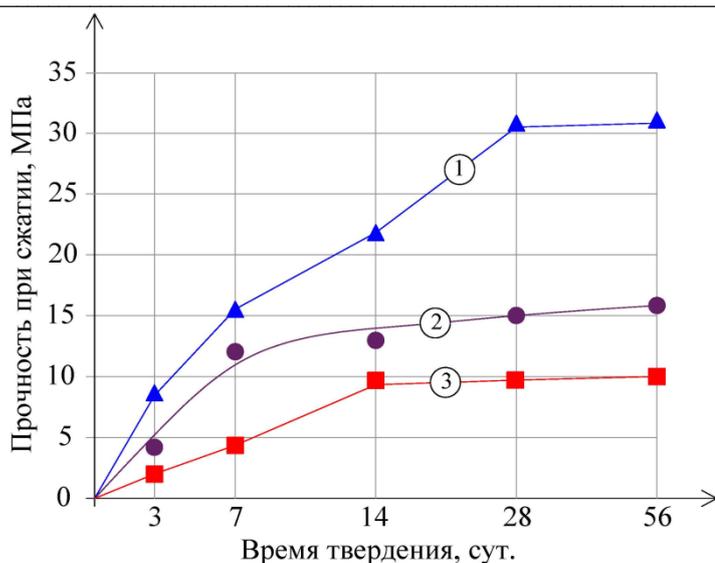


Рис. 1. Кинетика затвердевания ГПВ в зависимости от расхода щелочного активатора; состав ГПВ — метакралин (95 %) + микрокремнезем (5 %); содержание NaOH: 1 — 5 %; 2 — 15 %; 3 — 25 %

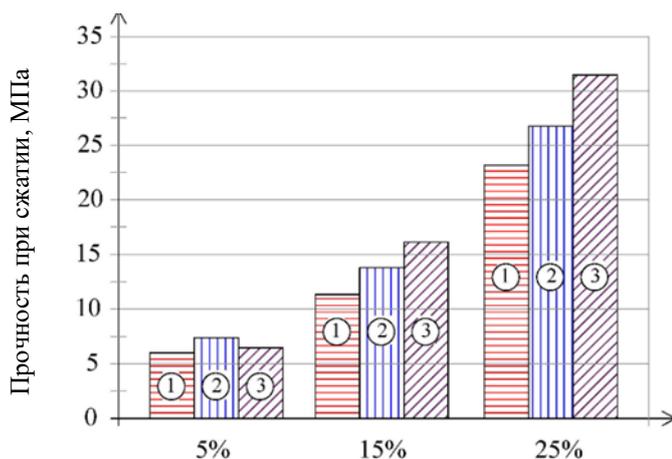


Рис. 2. Влияние соотношения щелочного активатора и микрокремнезема на прочность ГПВ: содержание щелочного активатора — в %; содержание микрокремнезема в составе вяжущего: 1 — 1 %; 2 — 3 %; 3 — 5 %

Как видно из представленных рисунков, основным фактором, определяющим интенсивность затвердевания и конечную прочность ГПВ, является содержание щелочного активатора в его составе. При увеличении расхода щелочного активатора с 5 до 25 %, прочность при сжатии ГПВ увеличивается с 10 до 34 МПа, что особенно важно учитывать при проектировании инъекционных смесей, которые при манжетной технологии применяются с высоким водовязущим отношением до 3,0.

Это можно объяснить тем, что в щелочной среде происходит химическое разрушение алюмосиликатных минералов с образованием алюминатных и

силикатных анионов, из которых впоследствии формируется трехмерная полимерная структура. При этом щелочные катионы компенсируют отрицательные заряды, создаваемые тетраэдрами оксидов алюминия и кремния. Формируемый таким образом алюмосиликатный каркас обладает достаточно высокой прочностью, водостойкостью и устойчивостью в различных агрессивных средах.

Кинетика затвердевания геополимерных систем определяется интенсивностью растворения алюмосиликатных материалов [10, 11]. Установлено, что микроструктура ГПВ, полученного в результате щелочной активации метаксаолина, является однородной структурой и отличается высокой плотностью и однородностью. Из представленных результатов видно, что наиболее эффективным способом повышения активности ГПВ является повышение концентрации щелочного активатора.

Кроме того, значительно улучшить свойства ГПВ позволяет введение в состав суспензии микрокремнезема. Введение в состав ГПВ микрокремнезема сопровождается существенным приростом прочности при сжатии (см. рис. 2). Эта добавка не только ускоряет твердение ГПВ, но и обеспечивает повышенную плотность и непроницаемость структуры после завершения процесса структурообразования. При увеличении содержания микрокремнезема с 1 до 5 % в составе ГПВ прочность при сжатии увеличивается на 15...30 %. Причем эффективность введения в состав ГПВ микрокремнезема возрастает с увеличением расхода щелочного активатора.

На базе результатов физико-химических исследований установлено, что повышение прочности и улучшение характеристик вяжущих происходит вследствие образования продуктов гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Твердение таких вяжущих происходит по ионно-диффузионному сквозьрастворному механизму массопереноса продуктов гидратации в ионной форме [11—13]. При воздействии щелочной среды на кремнезем образуется гель кремниевой кислоты, способствующий связыванию и упрочнению системы. Прочность ГПВ после 28 сут твердения находится в пределах 25...38 МПа в зависимости от соотношения компонентов.

В результате исследований получены ГПВ со следующими показателями:

- прочность на сжатие со старением 28 сут — 15...38 МПа;
- прочность при изгибе со старением 28 сут — 2,8...3,5 МПа;
- модуль упругости — 1,2...1,6 ГПа;
- водопоглощение — 2,1... 3,2 %.

При изучении технологии и свойств инъекционных смесей на основе разработанных составов ГПВ для геотехнического строительства, исследовалось влияние водовяжущего отношения, а также соотношения компонентов на вязкость и седиментационную устойчивость инъекционных смесей и прочность сформированных грунтобетонных массивов. Установлено, что наибольшую активность имеет композиционное вяжущее с содержанием микрокремнезема 5 % и расходом щелочного активатора 25 % (см. рис. 1).

Фактором, в значительной степени определяющим активность ГПВ, является содержание щелочного элемента в составе композиционного вяжущего. При этом одновременно с ускорением твердения и повышением конечной

прочности существенно сокращаются сроки схватывания ГПВ, что необходимо учитывать при выполнении инъекционных работ в процессе формирования грунтобетонных массивов или ликвидации водопроявлений в подземных сооружениях. В этой связи выполнено исследование влияния замедлителей схватывания добавок на свойства инъекционной смеси (рис. 3). В качестве наиболее эффективного замедлителя схватывания использовалась нитрилотриметилфосфовая кислота (НТФ).

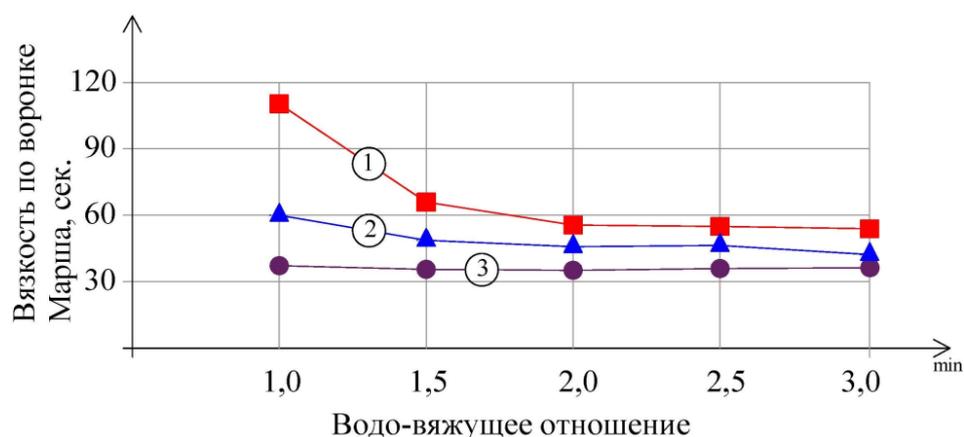


Рис. 3. Влияние расхода замедлителя на вязкость инъекционной смеси на основе ГПВ (метакаолин 70 % + микрокремнезем 5 % + NaOH 25 %), вязкость через 60 мин после затворения; расход НТФ соответственно: 1 — 0,05 %; 2 — 0,2 %; 3 — 0,8 %

При введении замедлителя схватывания формируются комплексные соединения, блокирующие формирование гидросиликатов кальция и гидроалюминатов, образующихся при гидратации ГПВ. Это происходит вследствие электростатического взаимного отталкивания гидратационных продуктов, что также способствует разжижению суспензии. Следует иметь в виду, что при дозировке замедлителя схватывания более 0,8 % установлено блокирование процесса гидратации в течение длительного периода. Введение щелочного активатора сопровождается значительным повышением величины рН в реакционном растворе, что превышает влияние введенного замедлителя на развитие процесса гидратации (рис. 4).

Развитию процесса структурообразования ГПВ предшествует растворение алюмосиликатных компонентов в щелочной среде. При этом растворение стекловидного алюмосиликата сопровождается обменом ионов H^+ на Ca^{2+} и Na^+ , с последующим гидролизом алюмосиликатных соединений, разрушением деполимеризованной стекловидной структуры и расщеплением соединений Si и Al на мономерные структуры [13, 14]. Развитие процесса геополимеризации начинается с растворения тонкодисперсного термически обработанного алюмосиликатного сырья в щелочной среде. Следует отметить, что на степень растворения алюмосиликатного сырья влияют его дисперсность и реакционная способность минеральных компонентов. Растворение алюмосиликатного сырья в результате щелочного гидролиза возможно при достаточном количестве воды и сопровождается разрушением соединений алюминия и кремния. Последние переходят в раствор и накапливаются в виде

отдельных частиц на поверхности минеральных компонентов в мономерной форме. В процессе накопления твердых частиц в растворе развивается процесс геополимеризации и упрочнения ГПВ [15].

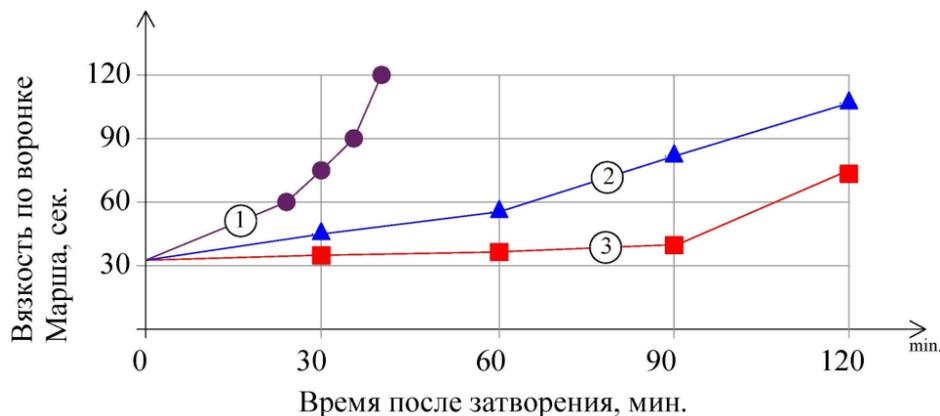


Рис. 4. Влияние замедлителя схватывания на вязкость инъекционной смеси на основе ГПВ (метакаолин 70 % + микрокремнезем 5 % + NaOH 25 %; В : В = 1,5); содержание НТФ соответственно: 1 — 0,05 %; 2 — 0,2 %; 3 — 0,8 %

Механизм развития процессов структурообразования при твердении ГПВ можно условно разделить на 3 этапа:

1-й этап — при введении щелочного активатора происходит расщепление алюмосиликатных минералов с насыщением жидкой фазы ионами алюминия, кремния, кислорода и гидроксильных групп;

2-й этап — образование силановых групп Si—ОН и ортосилатов, которые являются первичными зародышами геополимеров;

3-й этап — формирование полимерных систем путем сшивания силановых групп ионами алюминия, кислорода и гидроксильных групп.

Анализ результатов многолетних экспериментальных исследований показал, что щелочная активация метакаолина в присутствии микрокремнезема является более эффективной по сравнению с активацией только на основе щелочи. Причем, если при применении только щелочного активатора его оптимальное содержание находится в пределах 15 % от массы метакаолина, то в присутствии микрокремнезема его эффективное содержание увеличивается до 25 %. Это обусловлено различием в механизмах взаимодействия щелочного активатора с алюмосиликатами и микрокремнеземом из-за существенного различия в их растворимости. При дополнительном введении в состав ГПВ микрокремнезема активность композиционного вяжущего существенно повышается.

Формирование грунтобетонных массивов на основе ГПВ

В природных условиях грунты представляют собой сложную систему из твердых, жидких и газообразных компонентов с возможными органическими включениями. Во всех грунтах, кроме скальных, твердые частицы представляют собой систему минеральных зерен величиной от нескольких миллиметров до пылеватых частиц. Свойства грунтов, в первую очередь, определяются соотношением в их структуре твердых, жидких и воздушных фаз, а также

характером связей между ними. При этом в зависимости от состояния структурных связей между частицами, грунты классифицируют как рыхлые, средней плотности, плотные и каркасные. Кроме взаимного расположения важным параметром свойств грунтов являются связи между отдельными частицами грунта, которые могут быть водноколлоидными или кристаллизационными. Водноколлоидная связь обусловлена молекулярными силами пленочной воды, а кристаллизационная — природными химическими соединениями, включая солевые. Песчаные грунты характеризуется наличием мелких зерен с развитой поверхностью и представляют собой дисперсные системы со значительным объемом открытых пор и капилляров. В этих системах дисперсной фазой являются частицы, а дисперсионной средой — вода и воздух, заполняющие поровое пространство грунта. Кроме минеральных частиц в составе грунтов могут быть включения торфа или гумуса, существенно ухудшающие прочностные свойства грунтов. На основе ГПВ могут быть получены грунтобетоны с прочностью на сжатие до 25 МПа, обладающие высокой прочностью и долговечностью, в т. ч. в условия илистых и заторфованных грунтов, с повышенной структурной устойчивостью при динамических и вибрационных воздействиях (рис. 5).

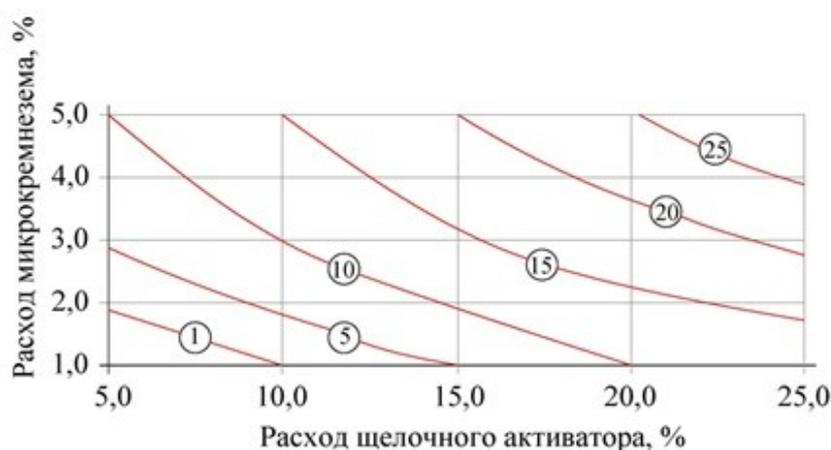


Рис. 5. Влияние соотношения компонентов на прочность ГПВ: прочность при сжатии 1...25 МПа; 28 сут; твердение под водой

Инъекционные системы на основе ГПВ возможно применять и при низких температурах до -40°C без потери прочности при замораживании и оттаивании в условиях мерзлых грунтов. Отличительной особенностью применения ГПВ в геотехническом строительстве является возможность активного участия пылевидных и глинистых частиц грунта в процессе структурообразования и затвердевания при формировании грунтобетонных массивов [16—18]. Одной из наиболее эффективных областей применения инъекционных смесей на основе ГПС является стабилизация и упрочнение лессовых грунтов, отличающихся высокой просадочностью при замачивании. При этом солевой элемент структуры лессовых грунтов является дополнительным активатором при затвердевании ГПВ. Грунтобетоны, получаемые на основе ГПВ, обладают довольно низкой водопроницаемостью и относительно высоким показателем

pH воды в порах, что обеспечивает их надежную устойчивость и пригодность для работы в сложных инженерно-геологических и геотехнических условиях. Представление грунтобетона в виде мелкозернистого цементного бетона дает возможность использовать известную нормативную базу и методологию бетонных технологий.

Необходимо с новых позиций рассмотреть вопросы проектирования, подбора и регулирования состава композиционных вяжущих для укрепления грунтов в режиме пропитки, прогноза и контроля его прочности, однородности и долговечности (морозостойкости и коррозионной стойкости) грунтобетона при учете особенностей и специфики манжетной технологии. Установлено, что свойства грунтобетона, сформированного по манжетной технологии, существенно отличаются от свойств мелкозернистого цементного бетона, приготовленного традиционным способом при равных величинах В : Ц и расходах цемента.

Как видно из таблицы, основная закономерность изменения прочности грунтобетона от В : Ц сохраняется для песчаных грунтов после их цементации в режиме пропитки. Влияние В : Ц как фактора уменьшается с ростом модуля крупности песка, которая начинает играть наиболее более заметную роль при M_k менее 1,8...1,5.

Влияние В : Ц на прочность грунтобетона на основе ГПВ

Модуль крупности песка, M_k	Прочность при сжатии грунтобетона, МПа, при различном В : Ц				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,8	12,6	9,8	7,3	5,2	3,8
1,2	9,4	6,2	5,1	3,1	1,4
1,8	5,1	3,8	3,0	2,2	0,5
2,3	2,2	1,8	1,2	0,8	—
3,1	0,9	0,6	0,2	—	—

Примечание. Состав ГПВ: 70 % метакаолин + 25 % гидроксид натрия + 5 % микрокремнезем. Активность ГПВ — 36 МПа. Прочность при сжатии в возрасте 28 сут

Следует рассматривать грунт как заполнитель грунтобетона, состоящего из двух частей: части несвязного грунта, аналогичной фракциям стандартного песка, и части, состоящей из агрегатов связного грунта. Учитывая более развитую общую поверхность частиц грунта по сравнению со строительным кварцевым песком, а также достаточно компактное их размещение в структуре природного грунта, определяющим конструктивным и технологическим фактором является равномерное распределение инъекционной смеси в природной структуре грунтобетона с вытеснением воды из капиллярно-пористой структуры и замещением ее инъекционной смесью. В этом случае формируется практически бездефектная структура грунтобетонного массива. Кроме того, нагнетание инъекционной смеси в массив грунта в режиме пропитки сопровождается расклинивающим эффектом между отдельными частицами грунта, обеспечивающим их надежное сцепление и дополнительное уплотнение структуры, что существенно повышает прочностные и деформационные характеристики грунтобетона.

Выводы

В результате выполненных исследований установлены основные закономерности влияния соотношения компонентов на свойства ГПВ и инъекционных смесей на их основе.

Введение в состав ГПВ микрокремнезема сопровождается повышением прочности инъекционных смесей и грунтобетона.

Введение в состав инъекционных смесей НТФ в количестве до 0,8 % от массы вяжущего в качестве замедлителя схватывания обеспечивает сохранение вязкости инъекционных смесей в период до 90 мин без замедления интенсивности затвердевания.

Применение ГПВ в геотехническом строительстве является существенным вкладом в технологию «зеленого строительства» и альтернативой применения общестроительных цементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глуховский В. Д., Пахомов В. А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев : Будивельник, 1978. 184 с.
2. Krivenko P., Kavalerova E. Performance of alkali-activated cements — perspective ways for carbon dioxide emissions reduction // Proceed. 3rd International Symposium “Non-traditional cement&concrete”. 2008. Pp. 389—398.
3. Рахимова Н. Р., Рахимов Р. З., Стоянов О. В. Шлакощелочные композиционные материалы для защиты от радиоактивных излучений и иммобилизации радиоактивных отходов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 7. С. 129—131.
4. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin : Geopolymer Institute, 2008. 592 p.
5. Palomo A., Glasser G. Chemical-Bonded cementitious materials based on metakaolin // British Ceramic Transactions and Journal. 1992. Vol. 91. Iss. 4. Pp. 107—112.
6. Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products / A. Palomo, S. Alonso, A. Fernández-Jiménez, I. Sobrados, J. Sanz // Journal of the American Ceramic Society. 2004. Vol. 87. Iss. 6. Pp. 1141—1145.
7. Ерошкина Н. А., Коровкин М. О., Тымчук Е. И. Структурообразование геополимеров // Молодой ученый. 2015. № 7. С. 123—126.
8. Гусев Б. В., Фаликман В. Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // Евразийский союз ученых. 2015. № 2(11). С. 15—18.
9. Chatterjee A. K. Chemistry and engineering of the clinkerization process — incremental advances and lack of breakthroughs // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Pp 624—641.
10. Provis J. L., Van Deventer J. S. J. Alkali Activated Materials. Springer, 2014. 388 p.
11. Weng L., Sogoe-Crentsil K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis // Journal of Materials Science. 2007. Vol. 42. Pp. 2997—3006.
12. Khale D., Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development // Journal of Materials Science. 2007. Vol. 42. 729—746.
13. Gjorv O. E., Sakai K. Concrete technology for a sustainable development in the 21st century. London — New York : E&FNSpon, 2000. 386 p.
14. Barbosa V. F. F., Mackenzie K. J. D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers // International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. Iss. 4, 2. Pp. 309—317.
15. Duxson P., Provis J. L. Designing precursors for geopolymer cements // Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91. Iss. 12. Pp. 3864—3869.
16. Provis J. L., Duxson P., Van Deventer J. S. J., Lukey G. C. The role of mathematical modeling and gel chemistry in advancing geopolymer technology // Chemical Engineering Research and Design. 2005. No. 83. Pp. 853—860.
17. Положнов А. В., Михалькова А. П. Анализ разработок по созданию высококачественных цементных бетонов с использованием техногенных отходов предприятий Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Вып. 2(75). С. 65—71.

18. Положнов А. В., Торколенкова К. С., Хуторной С. М. Оценка процессов структурообразования и формирования строительного композита с использованием вторичных полимерных материалов и отходов инструментального машиностроения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Вып. 4(77). С. 82—92.

© Хозин В. Г., Харченко А. И., Харченко И. Я., Пискунов А. А., Карпухина А. А., Харин Ю. И., 2024

Поступила в редакцию
в январе 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Применение геоплимерных вяжущих для уплотнения и упрочнения грунтов в геотехническом строительстве / В. Г. Хозин, А. И. Харченко, И. Я. Харченко, А. А. Пискунов, А. А. Карпухина, Ю. И. Харин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 1(94). С. 91—101. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_91

Об авторах:

Хозин Вадим Григорьевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, г. Казань, ул. Зеленая, 1; khzin.vadim@yandex.ru

Харченко Алексей Игоревич — канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Научно-исследовательский центр подземных сооружений». Российская Федерация, 123112, Москва, Пресненская наб., 12, МФК «Башня Федерация», 59-й этаж; iharchenko@mail.ru

Харченко Игорь Яковлевич — д-р техн. наук, проф. каф. мостов и тоннелей, Российский университет транспорта. Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; iharchenko@mail.ru

Пискунов Александр Алексеевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. мостов и тоннелей, Российский университет транспорта. Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; info@nicps.ru

Карпухина Александра Александровна — ассистент каф. мостов и тоннелей, Российский университет транспорта. Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; aleks.karpukhina@mail.ru

Харин Юрий Иванович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. механики грунтов и геотехники, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; 9651388552@mail.ru

**Vadim G. Khozin^a, Alexey I. Kharchenko^b, Igor Ya. Kharchenko^c,
Alexander A. Piskunov^c, Alexandra A. Karpukhina^c, Yuri I. Harin^d**

^a *Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*

^b *Research Center for Underground Structures LLC*

^c *Russian University of Transport*

^d *Moscow State University of Civil Engineering*

APPLICATION OF GEOPOLYMER BINDERS FOR COMPACTION AND HARDENING OF SOILS IN GEOTECHNICAL CONSTRUCTION

The production of slag-alkali binders and concretes based on them is one of the promising areas of development in the construction industry. In the production of slag-alkali binders and concretes, waste products of the metallurgical industry are used — slags. This helps to reduce the negative impact on the environment and reduce environmental pressure. The authors conducted a study of the properties of geopolymer binders, reviewed the experience of developing and using geopolymer binders and concretes.

Key words: underground structures, slag-alkaline and geopolymer binders, alkaline activator, physico-chemical studies, elimination of water occurrences.

For citation:

Khozin V. G., Kharchenko A. I., Kharchenko I. Ya., Piskunov A. A., Karpukhina A. A., Harin Yu. I. [Application of geopolymer binders for compaction and hardening of soils in geotechnical construction]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 1, pp. 91—101. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_91.

About authors:

Vadim G. Khozin — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 1, Zelenaya st., Kazan, Russian Federation; khzin.vadim@yandex.ru

Alexey I. Kharchenko — Candidate of Engineering Sciences, CEO, Research Center for Underground Structures LLC. 59th floor, Federation Tower, 12, Presnenskaya emb., Moscow, 123112, Russian Federation; iharcenko@mail.ru

Igor Ya. Kharchenko — Doctor of Engineering Sciences, Russian University of Transport. 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; iharcenko@mail.ru

Alexander A. Piskunov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Russian University of Transport. 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; info@nicps.ru

Alexandra A. Karpukhina — Assistant, Russian University of Transport. 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; aleks.karpukhina@mail.ru

Yuri I. Kharin — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation; 9651388552@mail.ru