

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГЕОПОЛИМЕРНЫХ БЕТОНОВ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

© Е. М. Щербань

ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

В статье проведен обзор существующих исследований, посвящённых вопросу технологии, рецептуры, составов, применения геополимерных бетонов в России и за рубежом. В результате проведённого обзора были сделаны аналитические выводы, определены научные и практические дефициты, которые касаются геополимерных бетонов, оценена применимость подходов, которые существуют в настоящее время с привязкой к современным условиям при производстве геополимерных бетонов, выявлены основные факторы, влияющие на свойства геополимерных бетонов и их эффективность, разработаны практические предложения для отрасли по результатам аналитического обзора. Таким образом, данное исследование направлено на решение ряда научно-технологических задач, которые относятся к вопросам импортозамещения, а также замены части сырьевых компонентов на более дешёвые компоненты с целью создания бесклнкерных вяжущих и геополимерных бетонов на их основе. Результаты данного аналитического исследования вносят существенный вклад в существующие представления, как теоретические, так и практические, о структуре и свойствах геополимерных бетонов.

Ключевые слова: бетон, геополимеры, бесклнкерные вяжущие, алюмосиликаты.

Введение. Целью проводимого исследования является обзор существующих исследований, посвящённых вопросу технологии, рецептуры, составов, применения геополимерных бетонов в России и за рубежом.

Задачами исследования являются аналитические выводы по итогу проведённого обзора, определение научных и практических дефицитов, которые касаются геополимерных бетонов, оценка применимости подходов, которые существуют в настоящее время с привязкой к современным условиям при производстве геополимерных бетонов, выявление основных факторов, влияющих на свойства геополимерных бетонов и их эффективность, разработка практических предложений для отрасли по результатам аналитического обзора.

Научной новизной исследования будет являться методологически заданное аналитическое исследование, результаты которого позволят развить существующие представления, как теоретические, так и практические, о структуре и свойствах геополимерных бетонов.

С точки зрения практической значимости исследование направлено на решение ряда научно-технологических задач, которые относятся к вопросам импортозамещения, а также замены части сырьевых компонентов на более дешёвые компоненты с целью создания бесклнкерных вяжущих и геополимерных бетонов на их основе [1].

Хорошо известно, что производство портландцемента требует значительного количества энергии и в то же время способствует выбросу в атмосферу большого количества общего диоксида углерода (около 7%) как прямо, так и косвенно [2]. Прямое выделение CO_2 называется прокаливанием, а не прямое выделение CO_2 происходит при сжигании ископаемого топлива для нагрева печи, а также при добыче и транспортировке цемента. Кроме того, на одну тонну цемента требуется около 2,8 тонн сырья; это ресурсоемкий процесс, при котором потребляется огромное количество природных ресурсов, таких как известняк и сланец, для производства цементных клнкеров [3-7]. В

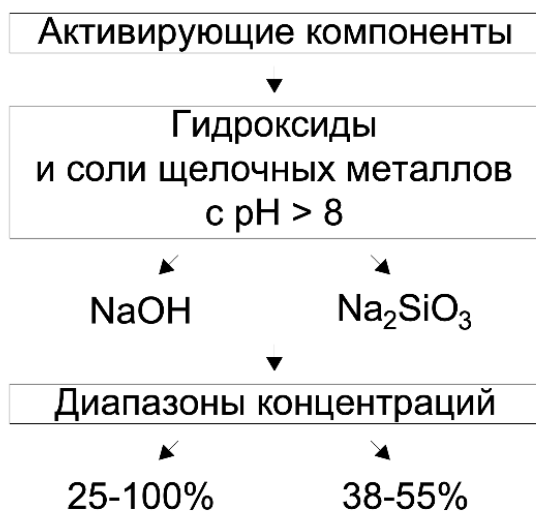


Рис. 1. Виды активирующих компонентов

бетонной промышленности ежегодно требуется около одного триллиона литров воды для смешивания. После производства алюминия и стали цементный сектор является наиболее энергоемким строительным материалом в тех же направлениях. Каждая тонна цемента, произведенная на типичном цементном заводе, потребляет примерно 110-120 кВтч. Однако, с другой стороны, бетон на основе цемента по-прежнему является наиболее широко используемым материалом в строительной индустрии во всем мире. Поэтому для экономического развития крайне важно высокоэффективное использование возобновляемого и

невозобновляемого сырья. Поскольку мир продолжает сталкиваться с серьезными экологическими проблемами, разработка уникального материала для замены портландцемента становится все более важной.

В настоящее время вяжущие вещества, активируемые щелочью, являются экологически чистой альтернативой обычному портландцементу.

Согласно Huseien et al. [3] геополимеры обладают внушительным перечнем достоинств, а именно высокими значениями прочностных характеристик, долговечностью и устойчивостью к повышенным температурам. Основными характеристиками геополимерного композита выступают низкая пористость, кислотостойкость и сульфатостойкость.

Основными определяющими факторами для производства геополимерных вяжущих являются объемы запасов алюмосиликатного сырья и его доступность для добычи, а также активность сырья, постоянство его химического состава и стабильность физико-механических характеристик геополимерных паст без изменения технологии производства геополимерного вяжущего [4, 5].

Основными сырьевыми составляющими геополимерного бетона являются алюмосиликатный компонент и активирующий компонент. На рисунке 1 представлены наиболее часто применяемые активирующие компоненты,

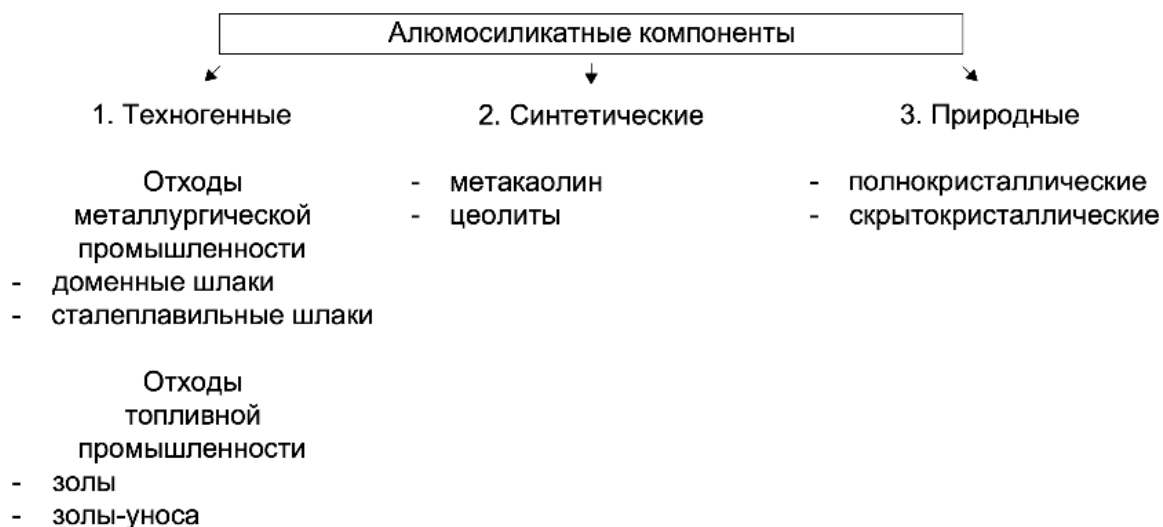


Рис. 2. Категории алюмосиликатных компонентов

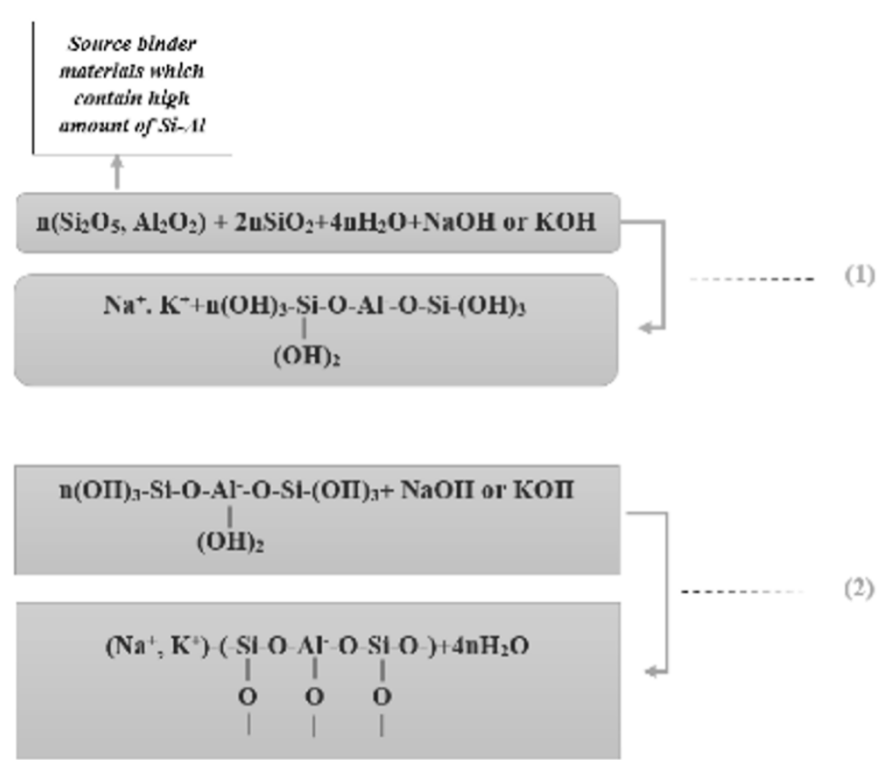


Рис. 3. Химические реакции в процессе геополимеризации

а на рисунке 2 приведена классификация алюмосиликатных компонентов.

Геополимеры представляют собой неорганические алюмосиликатные полимеры, полученные путем активации различных алюмосиликатных минералов различными щелочными растворами [3]. Геополимерные материалы имеют аморфную микроструктуру и химический состав, аналогичный природным цеолитовым материалам. Химическая реакция между щелочным раствором и исходным связующим материалом, содержащим алюмосиликат, называется процессом полимеризации; полимерная цепь и кольцевая структура, состоящая из связей Si-O-Al-O, образуется в процессе полимеризации, как показано на рисунке 3, схема адаптирована из [7-11] с эмпирической формулой $\{Mn [-(\text{SiO}_2)_z\text{-AlO}_2] n. w\text{H}_2\text{O}\}$, где M – действие щелочи, n – процент полимеризации, w – содержание воды. Кроме того, цепи в алюмосиликате могут быть в виде поли (сиалата) с отношением Si к Al, равным 1,0 (цепь -Al-O-Si-), поли (сиалата-силоксос) с

соотношением Si к Al, равному 2,0 (цепочка -Al-O-Si-Si-), и поли (сиалат-дисилоксос) с отношением Si к Al, равному 3,0 (-Al-O-Si-Si-Si-цепь) [12-16].

Основной целью данного обзора является анализ влияния рецептурных и технологических факторов на физико-механические характеристики геополимерного композита.

Основная часть. Поиск литературы проведен с использованием различных поисковых систем нескольких баз данных, таких как Google Scholar, Scopus, Web of Science и ScienceDirect. В литературе имеется большой объем информации о геополимерных композитах с различными исходными вяжущими материалами [17-22].

Данные, полученные по результатам литературного обзора, сведены в таблицы, классифицированные по виду основного алюмосиликатного компонента.

Результаты и обсуждения. Результаты проведенного литературного обзора представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Геополимерные композиты на основе метакеолина – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	10	Получение всестороннего представления о влиянии различных параметров состава смеси на свойства свежей и отвержденной местной геополимерной на основе метакеолина	– удобоукладываемость улучшается с увеличением отношения силиката натрия к NaOH, также данный показатель улучшается с увеличением отношения щелочных твердых веществ к метакеолину и отношения воды к твердым веществам; – прочность на сжатие увеличивалась с увеличением отношения силиката натрия к NaOH и отношения щелочных твердых веществ к метакеолину до определенного предела, зависящего от молярных соотношений смеси; – прочность на сжатие улучшается с увеличением содержания заполнителя, наибольшая прочность на сжатие достигается при содержании заполнителя 73,8% и значительно снижается при ее повышении до 75,8% и 79,8%; – увеличение отношения воды к твердым веществам снижает прочность на сжатие; – плотность геополимерных смесей имеет тенденцию к снижению с возрастом отверждения в результате избыточного испарения воды
2	11	Исследование поведения геополимерного бетона на основе метакеолина при температуре окружающей среды и повышенных температурах (200° С, 400° С, 600° С)	– установлено, что в условиях окружающей среды увеличение молярного соотношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с 0,52 до 0,59 обеспечивает незначительное увеличение прочности на сжатие до 9%; – увеличение молярного отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ до 0,7 приводит к падению прочности до 30%; – уменьшение молярного отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ с 2,87 до 2,28 приводит к значительному снижению прочности до 55%; – остаточная прочность на сжатие геополимерных смесей варьировалась от 56% до 63%, от 38% до 51% и от 28% до 34% после воздействия 200°С, 400°С и 600°С соответственно
3	12	Исследование влияния соотношения Si/Al на структуру, механические свойства и химическую стабильность геополимера на основе метакеолина с последующим добавлением плавного кварца	– геополимеры с отношениями Si/Al₂ и 2,5 содержат меньше остаточного метакеолина, чем геополимеры с отношениями Si/Al₃, 3,5 и 4; – плавный кварц с крупным размером частиц лишь частично прореагировал с щелочным раствором, проявляя химическую межфазную связь со связующей фазой; – геополимер с Si/Al₄ показал гораздо более высокие механические свойства, чем геополимер с Si/Al₂, что было связано с увеличением связей Si-O-Si и остаточным кремнеземом в качестве армирующего материала; – геополимеры с Si/Al₃ показали худшую химическую стабильность на воздухе, чем геополимеры с Si/Al₂ и 2,5, с наличием высолов на поверхности, что было связано с их более высоким остаточным свободным K⁺
4	13	Исследование влияния температуры отверждения на формирование твердой структуры геополимера на основе метакеолина	– температура отверждения оказывает существенное влияние на схватывание и твердение геополимера на основе метакеолина; – высокие температуры отверждения 60 и 80°С увеличивают прочность на сжатие и изгиб в раннем возрасте; – 28-дневная прочность образцов, твердевших при повышенной температуре, была заметно ниже по сравнению с прочностью образцов, обработанных при комнатной или пониженной температуре; – влияние температуры зависит от времени отверждения, например, отверждение всего в течение 1 ч при повышенной температуре не вызывало заметных изменений в развитии прочности, но более длительная обработка приводила к значительному ускорению скорости реакции и повышению прочности в раннем возрасте

5	14	Исследование характеристик сцепления стеклопластиковой и стальной арматуры, встроенной в геополимерный бетон на основе метаксаолина	– средняя нормализованная прочность сцепления геополимерных смесей в целом была ниже, чем у цементного бетона, на 11-27% и 21-40% для стальных и стеклопластиковых стержней соответственно; – включение стальной фибры в геополимерную смесь улучшило сцепление образцов со стальными и стеклопластиковыми стержнями на 7-45% и 33-114% соответственно
6	15	Получение и изучение свойств активированного щелочью геополимера на основе метаксаолина	– установлено, что оптимальный геополимер получают из метаксаолина, гидроксида натрия, силиката натрия и воды при мольном соотношении $\text{SiO}_2: \text{Al}_2\text{O}_3: \text{Na}_2\text{O}: \text{NaOH}: 2\text{O} = 3,4:1,1:0,5:1,0:11,8$; – наилучшие условия отверждения составляли 60°C в течение 168 часов
7	16	Исследование структуры геополимера на основе метаксаолина, полученного при различных температурах отверждения	– отверждение при более высоких температурах 55, 65 и 80°C в течение одного часа положительно влияет на прочность при сжатии; – количество мезопор увеличивается с температурой отверждения, в то время как количество макропор уменьшается

Таблица 2

Геополимерные композиты на основе золы – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	17	Исследования механических свойств и поведения сцепления при напряжении и скольжении геополимерного бетона с летучей золой	– соотношение щелочного активатора и золы уноса весьма значительно влияет на прочность на сжатие, прочность на сжатие увеличилась с 21,9 МПа до 38,2 МПа за счет снижения данного соотношения с 0,4 до 0,30; – критическое напряжение сцепления и максимальная прочность сцепления геополимерного бетона зависят от прочности бетона на сжатие, так, при повышении прочности на сжатие возрастала как критическая, так и максимальная прочность связи за счет расширения межфазной переходной зоны между пастой с заполнителями
2	18	Исследование механических характеристик и долговечности устойчивого геополимерного бетона с низким содержанием кальция и летучей золы	– прочность на сжатие геополимерного бетона снижается при температуре отверждения 60°C; – промышленный песок не оказывает отрицательного влияния на характеристики геополимерного бетона; – потеря веса образцов в результате воздействия сульфатов и кислот минимальна; – у образцов, подвергшихся кислотному воздействию, наблюдалось незначительное повреждение поверхности до 2 мм; – у образцов, подвергшихся воздействию сульфатов, повреждение поверхности не наблюдалось
3	19	Исследование влияния начального испарения с поверхности на характеристики геополимерной пасты на основе летучей золы при повышенных температурах	– степень начального испарения с поверхности оказывает большое влияние на конечные характеристики образцов, где герметизация образцов в процессе отверждения и, следовательно, ограничение избыточного начального испарения с поверхности давали более стабильные результаты, а также намного более высокие прочностные показатели; – негерметичные образцы показали примерно на 25% меньшее значение средней начальной прочности и приблизительно на 35% и 25% меньшие показания средней остаточной прочности при 400°C и 800°C соответственно; – у негерметичных образцов наблюдалась сравнительно более высокая степень термического растрескивания и расщепления по сравнению с запаянными образцами

4	20	Исследование механических свойств геополимерного бетона на основе золы-уноса с щелочными активаторами	– высокая молярность NaOH, используемого в качестве щелочного активатора, обеспечивает более высокую прочность на сжатие вместе со значительным влиянием на начальную прочность; – отношение предела прочности при раскалывании геополимерного бетона на основе золы-уноса со смесью 9 М NaOH и силиката натрия в массовом соотношении 50:50, отвержденного при 60°C в течение 24 ч, к его пределу прочности при раскалывании составляет примерно от 7,8 до 8,2%; – геополимерный бетон на основе летучей золы можно использовать для обычного бетона с портландцементом. Однако этот геополимерный бетон в основном больше подходит для сборных железобетонных изделий, поскольку прочность на сжатие геополимерного бетона может быть достигнута при температурах, превышающих 60°C
5	21	Исследование влияния коротких волокон на механические свойства геополимерного раствора на основе золы-уноса, содержащего нефтезагрязненный песок	– короткие волокна могут значительно улучшить прочность на сжатие геополимерного раствора, при этом наилучшее улучшение достигается при использовании прямых полипропиленовых волокон благодаря их хорошему сцеплению с раствором. Прочность на сжатие улучшилась на целых 39% по сравнению с раствором без волокон; – прочность на растяжение раствора с 6%-ным загрязнением сырой нефтью увеличилась при добавлении волокон за счет связи между волокном и раствором, что затем упрочняет раствор, повышая его устойчивость к восприятию нагрузок. Прямые полипропиленовые волокна улучшили прочность на разрыв на целых 74% по сравнению с образцом без волокна; – оптимальная дозировка 0,5% улучшала прочность геополимерного раствора на растяжение при сжатии и раскалывании на 65% и 89% соответственно по сравнению с образцом без волокон
6	22	Исследование влияния характеристик летучей золы и компонентов щелочного активатора на прочность на сжатие геополимерного раствора на основе летучей золы	– летучая зола с высоким содержанием аморфных компонентов (SiO_2, Al_2O_3, CaO и Fe_2O_3) и низким медианным размером частиц (>17 мкм) требовала низкой дозы щелочного активатора в пересчете на AL/FA, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ и концентрации NaOH для достижения оптимальной прочности на сжатие; – оптимальная прочность на сжатие, в которой использовалась летучая зола с низким содержанием аморфных компонентов и требуемым высоким средним размером частиц (<17 мкм), требовала более высокой дозы щелочного активатора; – распределение частиц по размерам влияет на степень развития прочности на сжатие летучей золы с аналогичным химическим составом
7	23	Изучение влияния процедуры отверждения и дозировки активатора на набор прочности раствора на основе летучей золы	– температура отверждения оказывает очень существенное влияние на прочность геополимеров на основе летучей золы. Образцы, отвержденные при 70°C, были значительно прочнее, чем образцы, отвержденные при 50°C. Было обнаружено, что время выдержки менее важно, и поэтому время выдержки в течение 1 часа перед отверждением в печи считалось достаточным; – дозировка активаторов очень важна не только для достижения требуемых свойств раннего старения, но и для влияния на прочность на сжатие. Оптимальное сочетание оптимального модуля щелочи и дозировки, т.е. дозировка щелочи 12,5% и модуль щелочности 1,25, дает прочность на сжатие более 70 МПа

Таблица 3

Геополимерные композиты на основе шлака – обзор

№ п/п	Номер источника	Цель исследования	Основные выводы, полученные по результатам исследования
1	2	4	5
1	24	Исследование влияния содержания молотого гранулированного доменного шлака (GGBFS), массового соотношения щелочного раствора и связующего (Al/Bi), массового отношения раствора силиката натрия к раствору гидроксида натрия (SS/SH) на прочностные характеристики геополимерного композита	– с увеличением содержания GGBFS, в геополимерных пастах прочность на сжатие значительно возрастает, но время схватывания и удобоукладываемость резко сокращаются; – увеличение соотношения Al/Bi привело к снижению прочности на сжатие, увеличению обрабатываемости и времени схватывания; – при увеличении отношения SS/SH с 1,0 до 2 прочность на сжатие увеличилась. Однако когда отношение SS/SH увеличилось с 2,0 до 2,5, прочность на сжатие уменьшилась. Оптимальное соотношение SS/SH равнялось 2 для всех соотношений Al/Bi (0,4, 0,5, 0,6, 0,7). Кроме того, увеличение отношения SS/SH привело к уменьшению начального и конечного времени схватывания; – при увеличении соотношения Aw/Bi прочность на сжатие снижается, но увеличивается время начального и окончательного схватывания и удобоукладываемость; – оптимальная смесь имеет содержание GGBFS 40%, соотношение Al/Bi 0,5, соотношение SS/SH 2,0 и соотношение Aw/Bi 0,15
2	25	Изучение влияния различных концентраций (молярности) гидроксида натрия (SH) на свойства самоуплотняющегося геополимерного бетона	– изменения молярности NaOH отрицательно влияют на осадочную текучесть и значения J-кольца, самоуплотняющегося геополимерного бетона; – высокое содержание молярности снижает коэффициент проходимости геополимерного бетона
4	26	Исследование влияния температуры отверждения на прочностные характеристики геополимерных систем на основе шлака	– предварительное отверждение строительных растворов при комнатной температуре за 2 дня до отверждения при повышенной температуре не влияет на приобретаемую прочность, поскольку в это время происходит небольшая гидратация; – влажность в печи для отверждения заметно влияет на изменение механических свойств. Влажные условия более благоприятны, чем сухие, поскольку для гидратации требуется удержание влаги; – для геополимерных растворов, содержащих жидкое стекло и отвержденных при 80°C, КОН является более эффективным активатором, чем NaOH. Однако при комнатной температуре использование КОН давало более высокую прочность, чем использование равномолярного NaOH, только в первые несколько недель, после чего тенденция изменилась на противоположную; – отношение воды к шлаку оказывает большое влияние на приrost прочности как при повышенных температурах, так и при комнатной температуре

5	27	Изучение влияния содержания щелочи и модулей активатора, а также времени отверждения на время схватывания, прочность, усадку при высыхании и проницаемость для хлоридов щелочно-активированного шлака	– увеличение содержания щелочи и модуля силиката натрия ускоряет как начальное, так и окончательное схватывание геополимерного раствора; – усадка при высыхании геополимерного раствора постепенно увеличивается с увеличением содержания и модуля щелочи – активатор с содержанием щелочи выше 4% способствует раннему набору прочности на изгиб, но снижает 28-дневную прочность на изгиб; – увеличение содержания щелочи, модулей и времени отверждения неуклонно улучшает прочность на сжатие
6	28	Влияние активатора (жидкий силикат натрия (LSS), гидроксид натрия (SH) и карбонат натрия (SC)) на прочность и усадку при высыхании щелочно-активированного шлакового раствора	– сроки окончательного схватывания щелочно-активированной шлаковой пасты уменьшаются с увеличением концентрации натрия в активаторе. Кроме того, конечное время схватывания пасты из активированного шлака (жидкий силикат натрия) уменьшалось с увеличением отношения $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (с 0,75 до 1,5); – раствор из активированного шлака LSS, SH и SC достиг максимальной прочности на сжатие 81, 29 и 36 МПа и максимальной прочности на растяжение при изгибе 6,8, 3,8 и 5,3 МПа через 28 дней; – увеличение концентрации натрия в активаторах приводит к увеличению прочности раствора на сжатие и изгиб; – усадка раствора из активированного шлака LSS и SH была в 3 и 6 раз больше, чем у раствора на основе портландцемента соответственно. Усадка раствора SC из активированного шлака была ниже или аналогична усадке раствора на основе портландцемента
7	29	Исследование и понимание механизма усадки бетона на щелочно-активированном шлаке	– бетон на щелочно-активированном шлаке имеет более высокую потерю массы, большую величину конечной усадки при высыхании и более медленную кинетику усадки по сравнению с бетоном на обычном портландцементе при аналогичной относительной влажности; – предельная усадка геополимерных смесей зависит не только от относительной влажности или потери массы, но также от скорости сушки и истории сушки; – растворенный силикат из активатора влияет на усадочную характеристику геополимерного раствора, изменяя структуру пор и механические свойства

Заключение. По результатам проведенного литературного обзора основные факторы, влияющие на конечные физико-механические характеристики геополимерного композита [23-29], а также реологические характеристики геополимерных растворов можно наглядно представить в виде диаграммы Исикавы (см. рисунок 4).

Выводы. Основываясь на проведенном литературном обзоре ряда исследований, посвященных теме геополимерных композитов, можно сделать следующие выводы:

- геополимерные вяжущие с технологической точки зрения имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными клинкерными цементами, а именно более сокращенную технологическую линию по переработке исходного алюмосиликатного сырья, меньшая энергоемкость производства и как следствие более низкая себестоимость вяжущего;

- у них широкий ряд рецептурных и технологических возможностей. Варьируя соотношением сырьевых компонентов и изменяя условия синтеза геополимерных композитов, можно получить геополимерный композит, об-

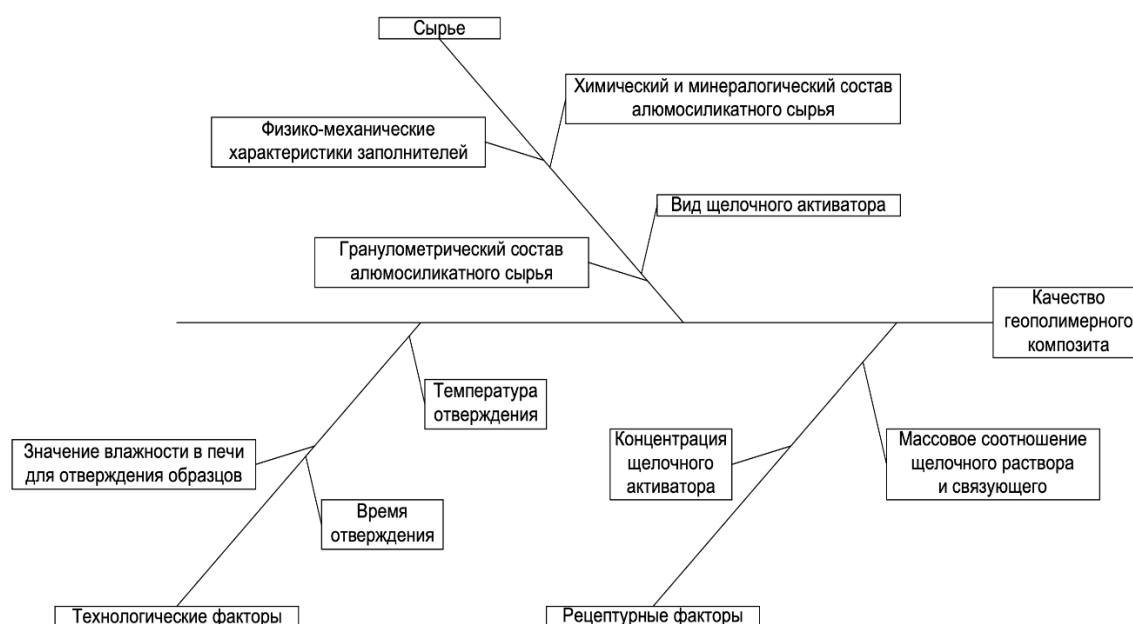


Рис. 4. Основные факторы, влияющие на качество геополимерного бетона

ладающий рядом специфических физических и механических характеристик, например, высокие показатели прочности при сжатии, стойкость к воздействию высоких температур, низкая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость, низкие усадочные деформации;

– геополимерные композиты можно применять при строительстве объектов общего назначения, при строительстве объектов специального назначения эксплуатируемых в условиях агрессивной окружающей среды или в условиях высоких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salamanova M. Sh., Murtazayev S. A. Yu., Alaskhanov A. Kh., Saydumov M. S. Prospects for the use of waste cement industry in the production of clinker-free concrete // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 012012.
2. Salamanova M., Murtazaev S. A., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. C. 385-388.
3. Huseien G. F., Ismail M., Tahir M., Mirza J., Hussein A., Khalid N. H., Sarbini N. N. Effect of binder to fine aggregate content on performance of sustainable alkali activated mortars incorporating solid waste materials // Chem. Eng. Trans. 2018. № 63. C. 667-672.
4. Муртазаев С. А. Ю., Саламанова М. Ш., Узаева А. А., Бисултанов Р. Г. Получение мелкозернистых бетонов на щелочных цементах из алюмосиликатных добавок // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. № 4 (26). С. 63-72.
5. Саламанова М. Ш., Нахаев М. Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклинкерных композитов на вяжущем щелочной активации // Строительные материалы. 2022. № 1-2. С. 30-39.
6. Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer // Cement and Concrete Composites. 2010. Т. 32. № 2. С. 142-147.
7. Abdulrahman Albidah, Mohammed Alghannam, Husain Abbas, Tarek Almusallam, Yousef Al-Salloum. Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Т. 10. С. 84-98.

8. *PeigangHe, Meirong Wang, ShuaiFu, DechangJia, ShuYan, JingkunYuan, Jiahuan Xu, Pengfei Wang, YuZhouab*. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer // *Ceramics International*. 2016. T. 42. № 13. C. 14416-14422.
9. *Pavel Rovnanik*. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2010. T. 24. № 7. C. 1176-1183.
10. *Abdulrahman Albidah, Ali Altheeb, Fahed Alrshoudi, Aref Abadel, Husain Abbas, Yousef Al-Salloum*. Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete // *Structures*. 2020. T. 27. C. 1582-1593.
11. *Liang Chen, Zaiqin Wang, Yuanyi Wang, Jing Feng*. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer // *Materials*. 2016. № 9 (9). C. 767.
12. *Dongming Yan, Shikun Chen, Qiang Zeng, Shilang Xu, Hedong Li*. Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition // *Materials & Design*. 2016. T. 95. C. 306-318.
13. *Aredes F. G. M., Campos T. M. B., Machado J. P. B., Sakane K. K., Thim G. P., Brunelli D. D*. Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer // *Ceramics International*. 2015. T. 41. № 6. C. 7302-7311.
14. *Hamdi Abdulrahman, Rahimah Muhamad, Phillip Visintin, Ahmad Azim Shukric*. Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. T. 327. C. 126909.
15. *Rajmohan B., R. Ramesh Nayaka, Rajesh Kumar K., Khaja Kaleemuddin* Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete // *materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022. T. 58. № 4. C. 1337-1343.
16. *Thathsarani Kannangara, Maurice Guerrieri, Sam Fragomeni, Paul Joseph*. Effects of Initial Surface Evaporation on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Paste at Elevated Temperatures // *Apple Science*. 2022. № 12 (1). C. 364.
17. *Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, Young Soo Chung*. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators // *Construction and Building Materials*. 2013. T. 47. C. 409-418.
18. *Rajab Abousnina, Haifa Ibrahim Alsalmi, Allan Manalo, Rochstad Lim Allister, Omar Alajarmeh, Wahid Ferdous, Khouloud Jlassi*. Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand // *Polymers*. 2021. № 13 (17). C. 3008.
19. *Muhammad N.S. Hadi, Mustafa Al-Azzawi, Tao Yu*. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar // *Construction and Building Materials*. 2018. T. 175. C. 41-54.
20. *Marios Soutsos, Alan P. Boyle, Raffaele Vinai, Anastasis Hadjierakleous, Stephanie J. Barnett*. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers // *Construction and Building Materials*. 2016. T. 110. C. 355-368.
21. *Muhammad N.S. Hadi, Haiqiu Zhang, Shelley Parkinson*. Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability // *Journal of Building Engineering*. 2019. T. 23. C. 301-313.
22. *Khaleel H. Younis*. Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate // *materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022. T. 56. № 4. C. 1733-1737.
23. *Ekin Altan, Sinan T. Erdoğan*. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures // *Cement and Concrete Composites*. 2012. T. 34. № 2. C. 131-139.
24. *Shuai Fang, Eddie Siu Shu Lam, Bo Li, Bo Wu*. Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 249. C. 118799.
25. *Cengiz Duran Atiş, Cahit Bilim, Özlem Çelik, Okan Karahan*. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar // *Construction and Building Materials*. 2009. T. 23. № 1. C. 548-555.
26. *Hailong Ye, Christopher Cartwright, Farshad Rajabipour, Aleksandra Radlińska*. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2017. T. 76. C. 13-24.

27. B. Singh, Ishwarya G., M. Gupta, S. K. Bhattacharyya. Geopolymer concrete: A review of some recent developments // *Construction and Building Materials*. 2015. T. 85. C. 78-90.
28. F. Pelisser, B. V. Silva, M. H. Menger, B. J. Frasson, T. A. Keller, A. J. Torii, R. H. Lopez. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete // *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2018. V. 11. N. 03. Pp. 535-543. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000300006>.
29. Mugahed Amran, Solomon Debbarma, Togay Ozbakkaloglu. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 270. C. 121857.

THE CURRENT STATE OF THE ISSUE OF GEOPOLYMER CONCRETE IN RUSSIA AND ABROAD

© E. M. Shcherban

DSTU, Rostov-on-Don, Russia

The article provides an overview of existing studies on the technology, formulation, compositions, and application of geopolymer concrete in Russia and abroad. As a result of the review, analytical conclusions were made, scientific and practical deficiencies related to geopolymer concretes were identified, the applicability of approaches that currently exist with reference to modern conditions in the production of geopolymer concretes was assessed, the main factors affecting the properties of geopolymer concretes and their effectiveness were identified, practical proposals for the industry were developed based on the results of analytical review. Thus, this study is aimed at solving a number of scientific and technological problems that relate to import substitution, as well as replacing some of the raw materials with cheaper components in order to create linker-free binders and geopolymer concretes based on them. The results of this analytical study make a significant contribution to the existing ideas, both theoretical and practical, about the structure and properties of geopolymer concrete.

Keywords: concrete, geopolymers, linker-free binders, aluminosilicates

REFERENCES

1. Salamanova M. Sh., Murtazayev S. A. Yu., Alaskhanov A. Kh. and Saydumov M. S. (2021) 'Prospects for the use of waste cement industry in the production of clinker-free concrete'. *Journal of Physics: Conference Series*. 012012.
2. Salamanova M., Murtazaev S. A., Alashanov A. and Ismailova Z. (2019) 'Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing'. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Pp. 385-388.
3. Huseien G. F., Ismail M., Tahir M., Mirza J., Hussein A., Khalid N. H. and Sarbini N. N. (2018) 'Effect of binder to fine aggregate content on performance of sustainable alkali activated mortars incorporating solid waste materials'. *Chem. Eng. Trans.* № 63. Pp. 667-672.
4. Murtazaev S. A. Yu., Salamanova M. Sh., Uzaeva A. A. and Bisultanov R. G. (2021) 'Poluchenie melkozernistykh betonov na shchelochnykh tsementakh iz alyumosilikatnykh dobavok' *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Obtaining fine-grained concrete on alkaline cements from aluminosilicate additives] Vol. 17. № 4 (26). Pp. 63-72.

5. Salamanova, M. Sh. and Nakhaev M. R. (2022) 'Opređenje udel'noi svobodnoi poverkhnostnoi energii besklinsknykh kompozitov na vyazhushchem shchelochnoi aktivatsii' *Stroitel'nye materialy*. [Determination of the specific free surface energy of linker-free composites on an alkaline activation binder]. № 1-2. Pp. 30-39.
6. Xiaolu Guo, Huisheng Shi and Warren A. Dick (2010) 'Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer'. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. №2. Pp. 142-147.
7. Abdulrahman Albidah, Mohammed Alghannam, Husain Abbas, Tarek Almusallam and Yousef Al-Salloum (2021) 'Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters'. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 10. Pp. 84-98.
8. Peigang He, Meirong Wang, ShuaiFu, DechangJia, ShuYan, JingkunYuan, Jiahuan Xu, Pengfei Wang and YuZhouab (2016) 'Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer'. *Ceramics International*. Vol. 42. №13. Pp. 14416-14422.
9. Pavel Rovnaník (2010) 'Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer'. *Construction and Building Materials*. Vol. 24. №7. Pp. 1176-1183.
10. Abdulrahman Albidah, Ali Altheeb, Fahed Alrshoudi, Aref Abadel, Husain Abbas and Yousef Al-Salloum (2020) 'Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete'. *Structures*. Vol. 27. Pp. 1582-1593.
11. Liang Chen, Zaiqin Wang, Yuanyi Wang and Jing Feng (2016) 'Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer'. *Materials*. №9 (9). Pp. 767.
12. Dongming Yan, Shikun Chen, Qiang Zeng, Shilang Xu and Hedong Li (2016) 'Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition'. *Materials & Design*. Vol. 95. Pp. 306-318.
13. F. G. M. Aredes, T. M. B. Campos, J. P. B. Machado, K. K. Sakane, G. P. Thim and D. D. Brunelli. (2015) 'Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer'. *Ceramics International*. Vol. 41. №6. Pp. 7302-7311.
14. Hamdi Abdulrahman, Rahimah Muhamad, Phillip Visintin and Ahmad Azim Shukric. (2022) 'Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete'. *Construction and Building Materials*. Vol. 327. Pp. 126909.
15. Rajmohan B., R. Ramesh Nayaka, Rajesh Kumar K. and Khaja Kaleemuddin (2022) 'Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete'. *materialstoday: PROCEEDINGS*. Vol. 58. №4. Pp. 1337-1343.
16. Thathsarani Kannangara, Maurice Guerrieri, Sam Fragomeni and Paul Joseph (2022) 'Effects of Initial Surface Evaporation on the Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Paste at Elevated Temperatures'. *Apple Science*. №12 (1). Pp. 364.
17. Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh and Young Soo Chung (2013) 'The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators'. *Construction and Building Materials*. Vol. 47. Pp. 409-418.
18. Rajab Abousnina, Haifa Ibrahim Alsalmi, Allan Manalo, Rochstad Lim Allister, Omar Alajarmeh, Wahid Ferdous and Khoulood Jlassi (2021) 'Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand'. *Polymers*. №13 (17). Pp. 3008.
19. Muhammad N. S. Hadi, Mustafa Al-Azzawi and Tao Yu (2018) 'Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar'. *Construction and Building Materials*. Vol. 175. Pp. 41-54.
20. Marios Soutsos, Alan P. Boyle, Raffaele Vinai, Anastasis Hadjierakleous and Stephanie J. Barnett (2016) 'Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers'. *Construction and Building Materials*. Vol. 110. Pp. 355-368.
21. Muhammad N.S. Hadi, Haiqiu Zhang, Shelley Parkinson (2019) 'Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability'. *Journal of Building Engineering*. Vol. 23. Pp. 301-313.
22. Khaleel H. Younis (2022) 'Influence of sodium hydroxide (NaOH) molarity on fresh properties of self-compacting slag-based geopolymer concrete containing recycled aggregate'. *materialstoday: PROCEEDINGS*. Vol. 56. №4. Pp. 1733-1737.

23. Ekin Altan and Sinan T. Erdoğan (2012) 'Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures'. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 34. №2. Pp. 131-139.
24. Shuai Fang, Eddie Siu Shu Lam, Bo Li and Bo Wu (2020) 'Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag'. *Construction and Building Materials*. Vol. 249. Pp. 118799.
25. Cengiz Duran Atiş, Cahit Bilim, Özlem Çelik and Okan Karahan (2009) 'Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar'. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. №1. Pp. 548-555.
26. Hailong Ye, Christopher Cartwright, Farshad Rajabipour and Aleksandra Radlińska. (2017) 'Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars'. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 76. Pp. 13-24.
27. B. Singh, Ishwarya G., M. Gupta and S.K. Bhattacharyya (2015) 'Geopolymer concrete: A review of some recent developments'. *Construction and Building Materials*. Vol. 85. Pp. 78-90.
28. F. Pelisser, B.V. Silva, M.H. Menger, B.J. Frasson, T.A. Keller, A.J. Torii and R.H. Lopez (2018) 'Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete'. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. Vol. 11. №03. Pp. 535-543.
29. Mugahed Amran, Solomon Debbarma and Togay Ozbakkaloglud (2021) 'Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties'. *Construction and Building Materials*. Vol. 270. Pp. 121857.