

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22

*Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Огурцова Ю.Н.,
Орехова Т.Н., Боцман Л.Н., Нецвет Д.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: 549041@mail.ru

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ

Аннотация. В условиях постоянно возрастающих объемов строительства формируется потребность в переходе на экологически эффективные технологии производства строительных материалов с целью снижения промышленного прессинга на экосферу и обеспечения рационального недропользования. Это может быть обеспечено уменьшением потребления цемента путем использования композиционных вяжущих со сниженной долей клинкерной составляющей. Повышение качества композиционных вяжущих возможно за счет предварительной активации поверхности сырьевых компонентов. Одним из наиболее эффективных методов активации сырья является механоактивация. Обоснованный выбор ее способа и режима возможен только по результатам комплексных исследований в системе «объект механоактивации – инструмент механоактивации – показатель механоактивации – продукт совершенствования методами механоактивации». Комплексное определение активности механоактивированного минерального сырья, как показателя эффективности механоактивации, включает использование различных методов исследования и оценку: площади границы раздела фаз, гранулометрического состава, морфоструктурных особенностей, сорбционной емкости, донорно-акцепторных поверхностных центров, энергетического состояния системы и других параметров. В работе предложена декомпозиция методологии проведения оценки минерального сырья с позиции механоактивации при получении композиционных вяжущих. Использование данной методологии позволит провести ранжирование минерального сырья природного и техногенного происхождения, оптимизировать процесс механоактивации с позиции выбора рационального способа и разработать обобщенные рекомендации по подбору технологических режимов измельчения с учетом генезиса сырья для получения активных минеральных компонентов композиционных вяжущих различного состава, типа твердения и функционального назначения. Разработка и внедрение принципов рационального выбора минеральных сырьевых компонентов, на примере их применения в композиционных вяжущих, позволит обеспечить заданные функциональные свойства и реализовать прогнозную оценку эксплуатационных характеристик строительных композитов в целом.

Ключевые слова: механоактивация, природное сырье, техногенное сырье, композиционное вяжущее, рециклинг, методы оценки.

Введение. Строительное материаловедение как научное направление ориентировано на разработку и исследование строительных материалов широкого спектра применения. Ключевым направлением развития данной научно-прикладной отрасли является использование методологических и инструментальных подходов, обеспечивающих повышение эффективности строительной продукции, начиная со стадии ее проектирования и заканчивая эксплуатацией, и переработкой.

В основе получения современных композитов с уникальными характеристиками лежат универсальные методологические принципы, принятые для традиционных материалов, но дополненные новыми научными знаниями, подходами к модификации сырьевых материалов, расширенными инструментальными возможностями.

Эксплуатационные характеристики готовых материалов во многом зависят от свойств исходного природного и техногенного минерального

сырья, а также способов и режимов его подготовки. Другим ключевым элементом в структуре композита, определяющим его физико-механические и технико-эксплуатационные характеристики, является матрица, формируемая в результате твердения по различным физико-химическим механизмам связующих и консолидирующая все составляющие в единый прочный конгломерат. В этой связи правомерно утверждать, что улучшение свойств вяжущего, как основы строительного композита, при одновременном сокращении его содержания в конечном продукте, позволит существенно повысить технико-экономическую эффективность производства.

При проработке вопроса был осуществлен анализ литературных источников открытого доступа, представленных преимущественно в библиографической базе данных публикаций Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также статья зарубежных авторов. Временной период поиска составил последние 5–

7 лет, отражающие наиболее активный этап в области расширения спектра разрабатываемых композиционных вяжущих, методов и подходов к оценке эффективности их использования. Обзор публикаций осуществлялся по критериям:

- использование композиционных вяжущих для повышения эффективности строительной продукции;
- применение минерального сырья природного и техногенного происхождения;
- опыт внедрения технологий рециклинга в производство строительных материалов в случае использования отходов промышленности, относящихся к техногенному сырью;
- методологические подходы оценки минерального сырья и строительных материалов на его основе.

В настоящее время с учетом колоссальных и постоянно возрастающих объемов строительства первоочередной задачей является снижение потребления традиционных видов вяжущих без потери качества материалов на их основе. Это подразумевает переход на экологически эффективные технологии, обеспечивающие снижение промышленного прессинга на экосферу, рациональное недропользование с учетом истощающихся запасов качественного минерального сырья. При этом увеличение этажности городов, плотности городской застройки в совокупности с расширением и ростом загруженности транспортной системы страны диктуют необходимость повышения эффективности традиционных материалов и разработки новых, отличающихся высокими эксплуатационными характеристиками и пролонгированной долговечностью, стойкостью к внешним, в том числе неблагоприятным, факторам окружающей среды.

Одним из решений указанных задач является использование композиционных вяжущих (КВ) [1–4], представляющих собой не механическую смесь компонентов, а синергетическую (взаимосиливающую) дисперсную систему состава «базовое вяжущее – минеральный компонент». При этом состав и свойства минерального компонента, как критерии его выбора, должны определяться типом базового вяжущего вещества.

Эффективность КВ обусловлена несколькими факторами. С одной стороны, использование физически и/или химически активных минеральных компонентов придает дополнительные связующие свойства системе, что способствует формированию консолидированной структуры с минимальной степенью дефектности. Подбор рационального состава КВ, которое является матрицей строительного композита, способен обеспечить экстремальные показатели качества продукта. С другой стороны, формируется «запас» прочности вяжущего, что позволяет снизить его

долю в материале без потери конструктивных и эксплуатационных характеристик изделий на его основе. Однако, для реализации обозначенных функциональных возможностей, минеральный компонент, входящий в состав композиционного вяжущего, должен обладать достаточной активностью – способностью к химическому и/или физико-химическому взаимодействию с составляющими базового вяжущего [5–8].

В современных условиях производственные отрасли при потреблении сырьевых ресурсов все больше ориентируются на реализацию природоохранных и ресурсосберегающих технологий, в частности, путем рециклинга производства [9, 10]. Данный подход направлен на повторное использование побочных продуктов и отходов различных отраслей [11–15]. Отмечается, что модифицирование промышленными отходами цементных бетонов позволяет заменять до 45 % портландцемента в композиции при условии увеличения не только прочностных показателей, но и морозостойкости [15, 16]. Высокую популярность набирает использование бетонного лома в качестве минеральной добавки или вторичного заполнителя бетона, эффективность которого обусловлена положительным влиянием на физико-механические показатели композиционных вяжущих [17–19]. Для повышения эффективности композиционных гипсовых вяжущих веществ применяют минеральные добавки в виде отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, что позволяет получать составы водостойких гипсовых композиций [20]. Отмечены исследования по производству вяжущих из гипсосодержащих отходов различных производств [21].

Большое количество минеральных отходов природного происхождения накапливается на поверхности в виде отвалов. При переработке таких отходов, перспективных для использования в качестве вторичного твердого сырья, наиболее распространенным способом их подготовки является механический. Ввиду того, что одной из самых крупнотоннажных отраслей по потребляемому сырью и производимой продукции является промышленность строительных материалов, для обеспечения ее потребностей традиционно применяется значительная часть попутной продукции горнодобывающих и горнообогатительных комбинатов. Это позволяет решить проблему накопления техногенных образований на территории Российской Федерации, значительная доля которых скапливается в хвостохранилищах, шламонакопителях, отвалах и занимает общую площадь более 2000 тыс. км² [22]. Отходы горных пород, хранящихся в горнодобывающих районах, активно используют в качестве сырья

при производстве строительных материалов широкой области назначения, что во многом обусловлено экономической целесообразностью, выраженной снижением себестоимости конечной продукции и повышением ряда свойств [22–24]. Помимо этого, переработка того или иного сырья решает экологические и социально-экономические проблемы, расширяя сырьевую базу «дефицитных» регионов, в которых наблюдается ограниченность природных ресурсов. Направление по утилизации отходов и реализации рециклинга в отрасли производства строительных материалов достаточно широко развито и находит все большие области применения. В связи с чем, в данной работе представлена лишь малая доля работ, иллюстрирующих практическое применение отходов и вторичных продуктов природного и техногенного происхождения, преимущественно на примере композиционных вяжущих.

Однако, несмотря на устоявшийся тренд на использование природного и техногенного местного сырья, выбор сырьевых компонентов для КВ с целью обеспечения требуемого качества готового продукта должен осуществляться не на принципах доступности и экономичности, а, в первую очередь, с позиции способности минерального компонента и базового вяжущего к химическому и физико-химическому взаимодействию в естественных (нормальных) и гидротермальных условиях. Это означает, что необходимо изначально устанавливать критерии для выбора сырья, которое, при минимальных энергозатратах на подготовку, может обеспечить получение прочной матрицы, обуславливающей производство материала с заданными свойствами [5].

Известно, что основополагающая ресурсная база промышленности строительных материалов – минеральное сырье, представленное горными породами различного генезиса, в том числе продуктами их дробления и/или обогащения. С целью достижения требуемого состава, дисперсности и других параметров, сырье подвергают модификации физическими, химическими или физико-химическими методами. Наиболее распространенным среди них с позиции доступности, простоты и экономической эффективности является метод механической активации с использованием помольного оборудования различных типов [25–29].

Несмотря на существенный объем исследований по разработке композиционных вяжущих и материалов на их основе, в рассмотренных выше работах не прослеживается систематизированный характер: используется некое имеющееся в наличии оборудование, минеральное сырье, конкретный вид вяжущего вещества. Не всегда исследователь при выборе и оценке минеральных

компонентов опирается на критерии энергоэффективности. Однако, данный критерий является интегральной характеристикой сырьевых материалов, которая включает совокупность типоморфных и, как следствие, физико-механических и физико-химических особенностей, и учитывает генетический тип минерального сырья, вид и степень механоактивационного воздействия. Выбор сырьевых компонентов и аппаратов для их дезинтеграции осуществляется, как правило, на принципе доступности. Отмечаются лишь отдельные попытки оценки влияния вида измельчительного агрегата и активационного воздействия на свойства получаемых порошков. Системные исследования по оценке эффективности механоактивации в системе «генетический тип пород – оборудование – вид вяжущего» отсутствуют. Существенная разрозненность получаемых в настоящее время данных обусловлена в большей степени междисциплинарностью задачи, требующей знаний в области петрологии и технологической минералогии, физикохимии поверхности, механики и технологии измельчения, строительного материаловедения и других смежных областях науки.

Современное состояние исследований в области оценки, прогнозирования и управления физико-химическими и термодинамическими свойствами поверхности дисперсных систем показывает отсутствие комплексных решений и методик, позволяющих на стадии выбора и механоактивации минерального сырья оценить энергетический потенциал полидисперсного, полиминерального и полиструктурного дисперсного вещества как компонента композиционных вяжущих. Кроме того, использование новых минеральных дисперсных модификаторов требует комплексного междисциплинарного подхода с целью установления: целесообразности применения; характера и механизмов взаимодействия активированного вещества с вяжущими различного состава, способа твердения и функционального назначения; зависимостей изменения структурно-механических и реологических свойств вяжущих от вариативности свойств модификаторов.

Одним из затруднений при формировании фундаментальной базы научно обоснованных закономерностей и моделей процессов механоактивации в системе «генетический тип пород – оборудование – вид вяжущего» является отсутствие единой системы (алгоритма) применяемых методов оценки эффективности механоактивации. Как правило, используется ограниченное число исследований, по принципу «то, что есть в наличии». Применяются в основном нормативные, т.е. определяемые требованиями ГОСТ [11, 15], методы оценки физико-механических и физико-химических свойств дисперсного вещества

как компонента композиционных вяжущих, являющиеся, как правило, косвенными с позиций оценки активности вещества. Они являются необходимыми, но недостаточными для решения обозначенной задачи.

С другой стороны, несмотря на междисциплинарность строительного материаловедения, в его фундаментальном аспекте отсутствуют научно обоснованные методики и модели оценки термодинамических свойств поверхности, как показателей эффективности механоактивации минерального сырья. Их наличие позволило бы осуществить рациональный выбор типа горных пород, либо отходов различных производств, механического оборудования для их дезинтеграции с учетом вида базового вяжущего вещества для повышения эффективности КВ.

Влияние механоактивации распространяется не только на размерность исходного сырья, но и на свойства его поверхности. При этом степень этого влияния определяется рядом факторов: технологическими режимами и параметрами обработки [30, 31], генетической принадлежностью сырья и его типоморфными особенностями [5, 32, 33]. Комплексное влияние технологических параметров, стадийности, интенсивности, продолжительности механоактивации в сочетании с петрографическими характеристиками (минералогическим составом и морфоструктурными параметрами) породы обуславливает эффективность механического воздействия в части изменения активности для последующего взаимодействия компонентов КВ.

При этом оценка общей склонности поверхности высокодисперсных систем к трансформационным превращениям возможна только исходя из термодинамической характеристики ее энергетического состояния, которое определяется как уровнем общего запаса потенциальной энергии горной породы (зависит от генезиса), так и ее части, перешедшей в поверхностную энергию при образовании новой поверхности тонкодисперсных частиц твердых тел в процессе механоактивации [34–36]. Следует учитывать, что количественно данный энергетический переход дополняется: размером частиц, их структурой и формой, минеральным составом, дефектностью кристаллической решетки породообразующих минералов, газовоздушными и другими включениями, химической природой и т.д.

Рациональный выбор сырья с позиции эффективности механоактивации затруднен отсутствием энергетического критерия, позволяющего ранжировать сырье по величине свободной внутренней энергии породообразующих минералов и породы в целом. Но в качестве оценочного параметра можно рассматривать поверхностное натяжение, являющееся мерой накопления энергии в

разуплотненном поверхностном слое [33, 37, 38]. Дискретная природа частиц порошкового образца определяет шероховатость и пористость их поверхности, что, в свою очередь, затрудняет процесс определения краевого угла смачивания порошковых материалов [39–41]. При этом высокая воспроизводимость и корректность измерения данного показателя являются обязательными, так как он лежит в основе расчета величины поверхностного натяжения твердой фазы, термодинамически описывающего процессы структурообразования в дисперсных системах.

Данные предпосылки лежат в основе исследования физико-химических свойств поверхности порошковых материалов, по результатам которых предложены методологические основы количественной оценки энергетического состояния поверхности высокодисперсных систем минерального сырья различного генезиса [36]. Авторами установлены зависимости между размерными, топологическими и структурными параметрами тонкодисперсных систем, установлена роль дисперсионных и поляризационных составляющих поверхностного натяжения в высокодисперсных системах, предложены термодинамическая и энергетическая модели оптимизации их состава.

По результатам проведенного обзора результатов современных исследований в области физикохимии и термодинамики поверхности высокодисперсных систем выделены методики оценки эффективности механоактивированного вещества для оптимального выбора минерального сырья, измельчительного агрегата и технологии механоактивации при производстве КВ. В данном контексте дисперсные системы минерального сырья, характеризующиеся полидисперсностью, полиминеральностью и полиструктурностью, рассматриваются как активные компоненты композиционных вяжущих. Оценка их энергетического состояния должна осуществляться комплексно по нескольким критериям, в числе которых, физические (дисперсность, размер частиц и прочее), химические показатели (сорбционная емкость, активные центры, свободная энергия поверхности и др.), а также физико-механические показатели КВ, являющиеся интегральными характеристиками свойств применяемых компонентов. Таким образом, выбор рационального способа измельчения, обеспечивающего экстремальную активность, будет основываться в том числе на данных о генетических и типоморфных особенностях минерального сырья.

Материалы и методы. Работа носит обзорно-проблемный характер и направлена на оценку механоактивированного минерального

сырья для композиционных вяжущих. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и обобщения данных из открытых первоисточников, представленных на портале Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, зарубежных публикаций – на платформе поисковой системы Google Scholar.

В качестве объекта изучения представлено сырье природного или техногенного происхождения (отходы промышленности, вторичные продукты промышленности, отсеvy дробления), имеющее преимущественно силикатный и алюмосиликатный состав. Выборка сырьевых материалов различного генезиса осуществлялась согласно критериям распространённости; технологичности, то есть объемам фактического потребления строительной отрасли, потенциальной энергозатратностью на измельчение и др.; физико-механическим, структурно-текстурным и химико-минеральным параметрам. Также следует выделить востребованность данного сырья для получения различных видов строительных материалов (использование в качестве крупного и мелкого заполнителя, минеральных добавок и т.д.) и опыт применения в составе композиционных вяжущих.

Необходимость и степень механоактивации определяется первоначальной дисперсностью и исходными свойствами сырья, технологией производства конечного материала и областью его применения. Объединение методологических подходов в единую картину диагностики сырья с позиции эффективности применения в составе композиционных вяжущих и дальнейшей оценки материалов на их основе являлось целью работы и представлено в основной части статьи, на основании чего предложена декомпозиция исследований с указанием необходимых методов.

Основная часть. Решение указанных проблем лежит в разработке обобщенных принципов повышения эффективности композиционных вяжущих за счет рационального использования механоактивированного минерального сырья, которые должны сочетать в себе пересечение научных интересов и подходов в области инженерных наук, а также химии и наук о материалах в системе «объект механоактивации – инструмент механоактивации – продукт совершенствования методами механоактивации». При этом практические и технологические задачи должны решаться с привлечением системно-структурного подхода в триаде «состав (сырье) – параметры структуры (сырье и консолидированное вяжущее) – свойства/качество (консолидированное вяжущее)».

Предлагается концепция повышения эффективности композиционных вяжущих различного

состава и способа твердения как базового компонента строительных композитов функционального назначения, заключающаяся в: оценке эффективности (пригодности) и степени механоактивации минерального сырья в зависимости от вида механического воздействия и технологических параметров дезинтеграции (интенсивности, длительности, энергозатратности и т.д.); комплексной оценке свойств механоактивированного сырья как компонента композиционных вяжущих различного состава для экспресс-диагностики и прогнозной оценки их эффективности; оценке эффективности управления процессами структурообразования матриц при твердении вяжущих различного состава.

При этом обоснование выбора, изучение процессов и технологических решений механоактивации минерального сырья для получения эффективных композиционных вяжущих предлагается реализовывать с учетом оценки взаимодействий в системе «объект механоактивации – инструмент механоактивации – показатель механоактивации – продукт совершенствования методами механоактивации», где:

I – объект механоактивации – минеральное сырье различных генетических типов: обоснование выбора генетических типов, изучение влияния продуктов диспергирования минерального сырья на процессы структурообразования и свойства композиционных вяжущих; оценка параметров энергоэффективности диспергирования в зависимости от типа помольного агрегата и генетического типа минерального сырья; оценка энергетического фактора дисперсионного взаимодействия, физико-химической и химической активности поверхности высокодисперсных систем для участия в процессах структурообразования;

II – инструмент механоактивации – виды механического воздействия, реализованные путем использования различных типов помольного оборудования;

III – показатель механоактивации – спектр физико-химических и энергетических характеристик поверхности измельченного вещества с точки зрения химии поверхности; комплексные количественные критерии оценки способности измельченного вещества участвовать в трансформационных превращениях, являясь активным компонентом КВ;

IV – продукт совершенствования методами механоактивации – композиционные вяжущие, полученные на основе базовых вяжущих веществ различного типа твердения: изучение влияния механоактивированного минерального сырья различного генетического типа и происхождения на процессы структурообразования КВ.

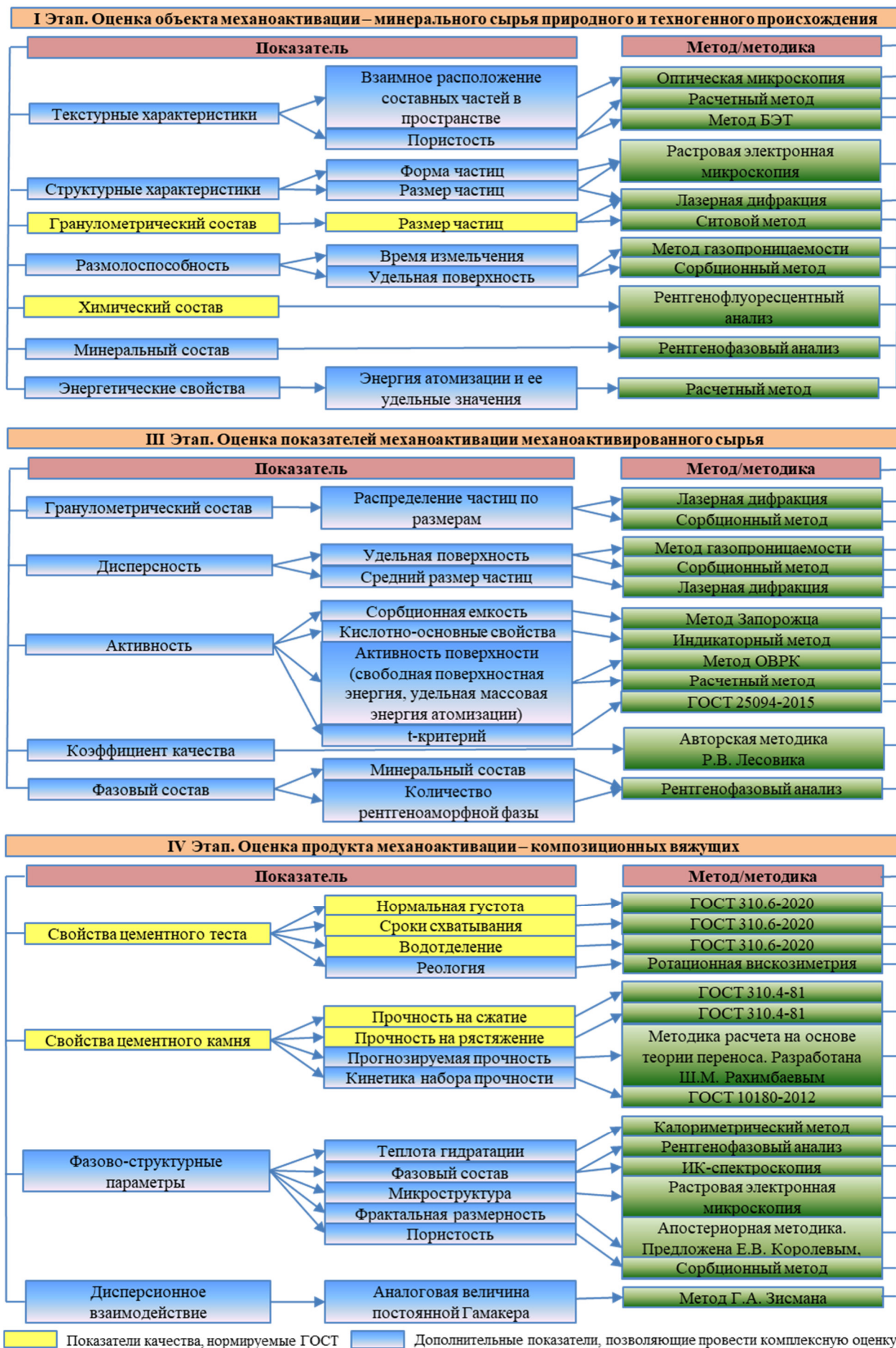


Рис. 1. Декомпозиция методологии проведения оценки минерального сырья с позиции механоактивации при получении композиционных вяжущих

На основании результатов обобщения теоретических и методологических положений рационального использования минерального сырья, и подходов к его оценке разработана декомпозиция (см. рис. 1), отражающая перечень необходимых показателей и методик, позволяющих учитывать различные характеристики минерального сырья и проводить его многокритериальное ранжирование по степени эффективности использования при производстве КВ.

Распределение методов оценки на этапы осуществлялось согласно предложенной системе «объект механоактивации – инструмент механоактивации – показатель механоактивации – продукт совершенствования методами механоактивации». Комплексное установление значимости того или иного вида сырья не обеспечивается в полной мере требованиями ГОСТ. В связи с чем, на каждом этапе исследования введены дополнительные показатели, позволяющие осуществить оценку и ранжирование минерального сырья.

Следует отметить, что этап, касающийся инструмента механоактивации, умышленно опущен. Для его оценки могут применяться такие показатели, как энергонасыщенность и стоимость промышленного оборудования, продолжительность технологической обработки и т.д.

Несомненно, в современных условиях активно развивается научное направление по механизации и автоматизации промышленности, появляются новые подходы за счет усовершенствования оборудования и разработки уникальных комплексов технического оснащения. Но фактически большое количество лабораторного оборудования не выходит на площадки массового производства. В реальных условиях не менее 90 % предприятий промышленности строительных материалов для механоактивации применяют традиционный помольный агрегат – шаровую мельницу, несмотря на имеющиеся недостатки [42, 43]. Таким образом, ввиду отсутствия на данный момент альтернативы шаровым мельницам, стабильно использующимся на производстве, и невозможности масштабирования результатов лабораторных исследований, подразумевающих использование других помольных агрегатов в производственных условиях, снижается значимость подбора инструмента механоактивации отличного от шаровой мельницы. И включение в декомпозицию данного этапа с материаловедческой точки зрения становится бессмысленным. Таким образом, на данный момент оценка эффективности механоактивации может осуществляться только с позиции обоснованного выбора минерального сырья при использовании одного постоянного инструмента воздействия – шаровой мельницы. Но при этом в дальнейшем может быть осуществлен рациональный выбор способа

механоактивации для получения требуемых показателей механоактивируемого сырья и конечного продукта с его использованием.

Рассмотрение показателей по I этапу и их анализ (при условии единства инструмента механоактивации и подбора оптимального способа) может позволить провести ранжирование минерального сырья, спрогнозировать потенциальную эффективность механоактивации для каждого конкретного вида сырья природного и техногенного происхождения. В декомпозицию в показатели, характеризующие объект механоактивации, не внесены химические и/или физические свойства (плотность, влажность, пустотность, модуль крупности, водопоглощение и др. – в зависимости от конкретного вида сырья), определение которых подразумевается по умолчанию, а методики регламентированы соответствующими нормативными документами.

Реализация исследований в соответствии с предложенной концепцией с учетом специфики функционирования элементов системы по отдельности и в комплексе позволит выявить взаимосвязи между генезисом и типоморфными особенностями минерального сырья (объект), технологическими подходами к его эффективной механической активации (инструмент), физико-химическими свойствами поверхности (показатель) механоактивированного дисперсного сырья как активного компонента, и процессами структурообразования и, как следствие, свойствами композиционных вяжущих (продукт совершенствования), полученных на его основе.

Предлагаемые термодинамические критерии оценки свойств поверхности исходного и механоактивированного сырья по величине активности дадут возможность количественно оценить способность высокодисперсного материала к трансформационным превращениям при механоактивации, в том числе, способность высокоразвитой поверхности материала к самопроизвольным процессам компенсации избыточной поверхностной энергии и долю общего запаса потенциальной энергии системы, перешедшей в свободную поверхностную энергию. Определение реакционной активности может базироваться на определении:

– сорбционной емкости, что подразумевает оценку взаимодействия сырьевых материалов с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не только единообразно через 72 часа после смешивания (по методике), но и в процессе достижения этого времени с целью контроля технологических свойств смеси [5];

– кислотно-основных свойств, которые позволяют контролировать изменение характеристик поверхности в реальных процессах [44, 45];

– активности поверхности, определяемой как отношение величины свободной поверхностной энергии к удельной массовой энергии атомизации, и позволяющей сделать вывод о возможности использования диспергированного минерального сырья в качестве компонентов строительных материалов [35, 38, 46];

– t -критерия – показателя возможности использования минерального сырья как пуццоланового компонента в составе КВ. На основании его расчета оценивается однородность и симметричность распределения результатов определения прочности образцов.

В дополнение к этому посредством апостериорной методики следует рассчитывать фрактальную размерность по данным прочности и пористости композитов, что позволяет получить дополнительную информацию об их структурообразовании. Фрактальный анализ [47] параметров структуры готовых композитов, полученных при различных условиях механоактивации, позволит создать комплексную методику оценки физико-химических и поверхностных свойств порошков минерального сырья различной генетической принадлежности как компонента КВ.

Выводы.

1. Обоснована необходимость систематизации имеющихся междисциплинарных знаний в области применения минерального сырья различного генезиса для создания композиционных вяжущих на основе традиционных вяжущих веществ, а также генерации принципиально новых знаний, закономерностей и методов получения материалов с требуемыми показателями качества с использованием ресурсо- и энергосберегающих технологий, в том числе базирующихся на использовании вторичных ресурсов (отходов) различных производств.

2. Сформулировано комплексное решение вышеуказанных задач, заключающееся в разработке алгоритма прогнозной оценки эффективности механоактивирующего воздействия на минеральное сырье природного и техногенного происхождения. Использование предложенного алгоритма обеспечит рациональный выбор минерального сырья, технологий и параметров его механоактивации при получении композиционных вяжущих. Обоснованное использование минеральных сырьевых компонентов в качестве реакционно-активных составляющих композиционных вяжущих, которые являются наиболее материало- и энергоемкими компонентами конечного композита, позволит снизить промышленный прессинг на экосферу при производстве бетонов и бетонных изделий различного назначения.

3. Подтверждена необходимость использования междисциплинарного подхода при обосно-

вании выбора процессов и режимов механоактивации минерального сырья для получения эффективных композиционных вяжущих. Междисциплинарные исследования взаимосвязей в тетраде «объект механоактивации – инструмент механоактивации – показатель механоактивации – продукт совершенствования методами механоактивации» позволят осуществить:

– разработку технологических принципов энергоэффективной механоактивации минерального сырья различного генезиса, заключающихся на обоснованном выборе измельчительного агрегата и параметров технологического процесса, обеспечивающих высокую производительность при минимальной энергоемкости механоактивных процессов;

– комплексную оценку активности дезинтегрированного минерального сырья различного генезиса как интегральной характеристики, связывающей площадь границы раздела фаз, гранулометрический состав, морфоструктурные особенности с его сорбционной емкостью, характером донорно-акцепторных поверхностных центров, энергетическим состоянием и другими параметрами. Это в совокупности позволит провести ранжирование минерального сырья природного и техногенного происхождения по эффективности применения в составе композиционного вяжущего, оптимизировать процесс механоактивации с позиции выбора рационального способа и разработать обобщенные рекомендации по подбору технологических режимов измельчения с учетом генезиса минерального сырья для получения активных минеральных компонентов композиционных вяжущих различного состава, типа твердения и функционального назначения;

– разработку физико-химических принципов управления процессами структурообразования композиционных вяжущих различного состава в системе «базовое вяжущее вещество – минеральный компонент» на всех этапах жизненного цикла системы для обеспечения заданных функциональных свойств и реализации прогнозной оценки эксплуатационных характеристик композитов на их основе.

Источник финансирования. Грант № Пф-1/23 в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калинкина Е.В., Калинин А.М., Иванова А.Г., Кругляк Е.А., Гуревич Б.И. Композиционные механоактивированные вяжущие на основе золы тепловой станции, кальцита и двуводного гипса // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки.

2022. Т. 1. № 2. С. 50–57. DOI:10.37614/2949-1185.2022.1.2.006

2. Данзанов Д.В., Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Дамбаев Ж.Г. Модификация композиционных вяжущих ультрадисперсной добавкой, полученной при гидролизе портландцемента // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 65–69. DOI:10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-65-69

3. Лесовик В.С., Абсиметов М.В., Елистраткин М.Ю., Поспелова М.А., Шаталова С.В. К вопросу изучения особенностей структурообразования композиционных вяжущих для неавтоклавных газобетонов // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 3. С. 41–47.

4. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бадмаева Э.В. Исследование влияния минеральных добавок на свойства и фазовый состав композиционных вяжущих для сухих строительных смесей // Вестник ВСГУТУ. 2021. № 4 (83). С. 79–84. DOI:10.53980/24131997_2021_4_79

5. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Комплексная оценка активности кремнеземсодержащего сырья как показателя эффективности механоактивации // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 17–25. DOI:10.17580/or.2022.02.03

6. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI:10.1134/S2075113322010336

7. Алфимова Н.И., Калатоzi В.В., Карацупа С.В., Вишнеvская Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89.

8. Машкин Н.А., Елесин М.А., Косач А.Ф. Технологии композиционных строительных материалов с применением методов активации техногенного сырья // Научный вестник Арктики. 2021. № 11. С. 10–15. DOI:10.52978/25421220_2021_11_10

9. Shekhovtsova J., Kovtun M., Kearsley E., Zhernovskiy I., Kozhukhova N., Zhernovskaya I. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements—a step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.270

10. Сафронов Е.Г., Силинская С.М., Нарыжная Н.Ю., Абдрахимов В.З. Экологическая целесообразность рециклинга золошлака в производстве стеновых материалов и оптимизация керамических масс по техническим показателям // Уголь. 2021. № 6 (1143). С. 44–49. DOI:10.18796/0041-5790-2021-6-44-49

11. Tolstoy A., Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Gunasekaran M., Vatin N., Vasilev Y. Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates // Materials. 2020. Vol. 13. No. 23. 5575. DOI:10.3390/ma13235575

12. Lkhasaranov S., Urkhanova L., Danzanov D. The study of the phase composition and microstructure of composite binders using industrial waste Transbaikalia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 880. No.1. Article. 012009. DOI:10.1088/1757-899X/880/1/012009

13. Федоров В.И., Абдимежитов М.К., Дьяконов А.А., Попов А.Л., Местников А.Е. Легкие бетоны из отходов производства автоклавного пенобетона // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 11. С. 61–65.

14. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А. Влияние молотого шлака сталеплавильного производства на свойства композиционного шлакощелочного вяжущего // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11 (83). С. 429–439.

15. Барковская С.В., Пчельникова В.А. Разработка композиционных гипсовых вяжущих веществ с использованием керамзитовой пыли и стеклобоя // Эксперт: теория и практика. 2022. № 3 (18). С. 34–38. DOI: 10.51608/26867818_2022_3_34

16. Ovcharenko G., Ibe E. The effect of added high-iron slag on the frost resistance of cement compositions // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2021. Vol. 263. 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/202126301012

17. Lesovik V.S., Lesovik R.V., Ali W.S.A. Effect of recycled coarse aggregate from concrete debris on the strength of concrete // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1926. No. 1. 012002. DOI:10.1088/1742-6596/1926/1/012002

18. Lesovik R.V., Tolykina N.M., Alani A.A., Jasim A.-B.-A.-W.S. Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 307–312. DOI:10.1007/978-3-030-54652-6_46

19. Krasnikova N.M., Khozin V.G. Recycling of concrete scrap as raw materials for cement concrete // Construction Materials. 2020. Vol. 1 (2). Pp. 56–65. DOI:10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

20. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 27–34.

21. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных

производств // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 8–23. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23

22. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Апакашев Р.А. Использование отходов горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 1. С. 21–31. DOI:10.25018/0236-1493-2021-1-0-21-31

23. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Рама Шанкер Верма. Минераловатный композит с использованием сапонит-содержащих отходов горнодобывающей промышленности // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 21–27. DOI:10.34031/2618-7183-2020-3-3-21-27

24. Drozdyuk, T., Frolova M., Ayzenshtadt A., Calay R.K., Jhatial A.A. Preliminary Study on the Mechanical Activation and High-Temperature Treatment of Saponite-Containing Tailings Generated during Kimberlite Ore Dressing // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 10. 4957. DOI:10.3390/app12104957

25. Вайсберг Л., Сафронов А. Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов // Экология и промышленность России. 2019. № 23(7). С. 4–9. DOI:10.18412/1816-0395-2019-7-4-9

26. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование селективности процесса измельчения материалов в электромагнитных механоактиваторах // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 47. С. 288–294. DOI:10.24411/2078-1318-2019-12135

27. Yao G., Wang Z., Yao J., Cong X., Anning C., Lyu X. Pozzolanic activity and hydration properties of feldspar after mechanical activation // Powder Technology. 2021. Vol. 383. Pp. 167–174. DOI:10.1016/j.powtec.2021.01.042

28. Yao G., Liu Q., Wang J., P. Wu, Lyu X. Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217. Pp. 12–21. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.01.175

29. Wu C., Hong Z.-Q., Yin Y.-H., Kou S.-C. Mechanical activated waste magnetite tailing as pozzolanic material substitute for cement in the preparation of cement products // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 252. 119129. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119129

30. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород // Горный журнал. 2017. № 9. С. 53–58. DOI:10.17580/gzh.2017.09.10

31. Вайсберг Л.А., Устинов И.Д. Феноменология вибрационной классификации и усреднения по крупности гранулярных материалов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 181–189. DOI:10.18721/JEST.25118

32. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71–73.

33. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45–48.

34. Строкова В.В., Айзенштадт А.М., Сивальнева М.Н., Кобзев В.А., Нелюбова В.В. Оценка активности наноструктурированных вяжущих термодинамическим методом // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 3–9.

35. Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Sokolova Y.V., Drozdyuk T.A. Control of Physical and Chemical Processes at the Phase Boundary in the Formation of Building Composites // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Vol. 173. Pp. 209–215. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_27

36. Sokolova Y., Ayzenshtadt A., Frolova M., Stroková V., Kobzev V. Energy characteristics of finely dispersed rock systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. No. 3. 032036. DOI:10.1088/1757-899X/365/3/032036

37. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Къельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72. DOI:10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72

38. Королев Е.В., Гришина А.Н., Пустовгар А.П. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 104–109.

39. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the contact angles of powders by the sessile drop method // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798. DOI:10.1134/S2075113321030084

40. Erbil H.Y. The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review // Surface Science Reports. 2014. Vol. 69. Issue 4. Pp. 325–365. DOI:10.1016/j.surfrep.2014.09.001

41. Huhtamäki T., Xuelin T., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements // Nature Protocols. 2018. Vol. 13. Pp. 1521–1538. DOI:10.1038/s41596-018-0003-z

42. Маляров П.В., Ковалев П.А., Бочкарев А.В., Долгов А.М. Исследование механизмов разрушения минерального сырья в шаровых мельницах // Обогащение руд. 2018. № 3 (375). С. 3–8. DOI:10.17580/or.2018.03.01

43. Голик В.И. Исследование влияния свойств твердых тел на энергетiku измельчения в мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 10. С. 112–122. DOI:10.25018/0236_1493_2021_10_0_112

44. Байдарашвили М.М., Сахарова А.С. Исследование сорбционных свойств материалов с помощью физико-химического метода распределения центров адсорбции // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 1. С. 87–94. DOI:10.17308/sorpchrom.2020.20/2383

45. Цыганова Т.А., Антропова Т. В., Мякин С.В., Анфимова И.Н. Особенности формирования адсорбционных центров термически модифицированных высококремнеземных пористых стекол // Физика и химия стекла. 2020. Т. 46. № 5. С. 475–481. DOI:10.31857/S0132665120050121

46. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздук Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 3. С. 40–48. DOI:10.30791/0015-3214-2021-3-40-48

47. Королев Е.В., Гришина А.Н. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 5–15.

Информация об авторах

Сивальнева Мариана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Нелубова Виктория Викторовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: nelubova@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Огурцова Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: ogurtsova.y@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Орехова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Боцман Лариса Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: lora80@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Нецвет Дарья Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 17.08.2023 г.

© Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Нелубова В.В., Огурцова Ю.Н., Орехова Т.Н., Боцман Л.Н., Нецвет Д.Д., 2023

**Sivalneva M.N., Strokhova V.V., Nelubova V.V., Ogurtsova Yu.N., Orekhova T.N., Botsman L.N., Netsvet D.D.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: 549041@mail.ru*

METHODS FOR ASSESSING MECHANICALLY ACTIVATED MINERAL RAW MATERIALS FOR COMPOSITE BINDERS

Abstract. *In the conditions of constantly increasing construction volumes, there is a necessity to transfer to environmentally efficient technologies for the production of building materials in order to reduce industrial pressure on the ecosystem and ensure rational subsoil use. One of the solutions is to reduce cement consumption by using composite binders with a reduced proportion of the clinker component. Improving the quality of*

composite binders is possible due to the preliminary activation of the surface of raw components. One of the most effective methods of activating raw materials is mechanical activation. A reasonable choice of its method and mode is possible only on the basis of the results of comprehensive studies in the system "the object of mechanical activation – the instrument of mechanical activation – the indicator of mechanical activation – the product of improvement by methods of mechanical activation". A comprehensive determination of the activity of mechanoactivated mineral raw materials as an indicator of the effectiveness of mechanoactivation includes the use of various research methods and evaluation of: the area of the interface boundary, granulometric composition, morphostructural features, sorption capacity, donor-acceptor surface centers, the energy state of the system and other parameters. The paper proposes a decomposition of the methodology for evaluating mineral raw materials from the position of mechanical activation in the production of composite binders. The use of this methodology will make it possible to rank mineral raw materials of natural and technogenic origin, optimize the process of mechanical activation from the point of view of choosing a rational method and develop generalized recommendations for the selection of technological modes of milling, taking into account the genesis of raw materials for obtaining active mineral components of composite binders of various composition, type of hardening and functional purpose. The development and implementation of the principles of rational selection of mineral raw materials components, based on the example of their application in composite binders, will ensure the specified functional properties and implement a predictive assessment of the performance characteristics of building composites as a whole.

Keywords: mechanical activation, natural raw materials, technogenic raw materials, composite binder, recycling, methods for assessing.

REFERENCES

1. Kalinkina E.V., Kalinkin A.M., Ivanova A.G., Kruglyak E.A., Gurevich B.I. Composite Mechanically Activated Binders Based on Power Plant Fly Ash, Calcite and Two-Water Gypsum [Kompozitsionnye mekhanoaktivirovannye vyazhushchie na osnove zoly teplovoj stancii, kal'cita i dvuvodnogo gipsa]. Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2022. Vol. 1. No. 2. Pp. 50–57. DOI:10.37614/2949-1185.2022.1.2.006. (rus)
2. Danzanov D.V., Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Dambaev ZH.G. Modification of Composite Binders with an Ultrafine Additive Obtained by Hydrolysis of Portland Cement [Modifikatsiya kompozitsionnykh vyazhushchih ul'tradispersnoj dobavkoj, poluchenoj pri gidrolize portlandcementsa]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2022. No. 1–2. Pp. 65–69. DOI:10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-65-69. (rus)
3. Lesovik V.S., Absimetov M.V., Elistratkin M.Yu., Pospelova M.A., Shatalova S.V. For the study of peculiarities of structure formation of composite binders for nonautoclaved aerated concrete [K voprosu izucheniya osobennostej strukturoobrazovaniya kompozitsionnykh vyazhushchih dlya neavtoklavnykh gazobetonov]. Construction Materials and Products. 2019. Vol. 2. No. 3. Pp. 41–47. (rus)
4. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Badmaeva E.V. Study of the Effect of Mineral Supplements on Properties and Phase Composition of Composite Binders for Dry Building Mixtures [Issledovanie vliyaniya mineral'nykh dobavok na svoystva i fazovyj sostav kompozitsionnykh vyazhushchih dlya suhikh stroitel'nykh smesey]. ESSUTM Bulletin. 2021. Vol. 4. No. 83. Pp. 79–84. DOI:10.53980/24131997_2021_4_79. (rus)
5. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Danilov V.E., Aizenshtadt A.M. Comprehensive activity analysis of silica-containing raw materials for use in mechanical activation efficiency evaluations Information about authors [Kompleksnaya ocenka aktivnosti kremnezemsoderzhashchego syr'ya kak pokazatelya effektivnosti mekhanoaktivatsii]. Mineral processing Journal. 2022. No. 2. Pp.17–25. DOI:10.17580/or.2022.02.03. (rus)
6. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders. Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI:10.1134/S2075113322010336
7. Alfimov N.I., Kalatzi V.V., Karatcupa S.V., Vishnevskaya I.A., Sheichenko M.S. Mechanical Activation as a Way of Improving the Efficiency Use of Raw Materials of Different Genesis in Building Materials Science [Mekhanooaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)
8. Mashkin N.A., Yelesin M.A., Kosach A.F. Composite Construction Technologies Materials with the Use of Methods Activation of Technogenic Raw Materials [Tekhnologii kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov s primeneniem metodov aktivatsii tekhnogenogo syr'ya]. Scientific Bulletin of the Arctic. 2021. Vol. 11. Pp. 10–15. DOI: 10.52978/25421220_2021_11_10. (rus)
9. Shekhovtsova J., Kovtun M., Kearsley E., Zhernovskiy I., Kozhukhova N., Zhernovskaya I. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements-a step towards sustainable building material and waste utilization. Journal of Cleaner

Production. 2018. Vol. 78. Pp. 22–33. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.270

10. Safronov E.G., Silinskaya S.M., Naryzhnaya N.YU., Abdrakhimov V.Z. Ecological Feasibility of Ash Slag Recycling in the Production of Wall Materials and Optimization of Ceramic Masses According to Technical Indicators [Ekologicheskaya celesoobraznost' reciklinga zoloshlaka v proizvodstve stenovykh materialov i optimizaciya keramicheskikh mass po tekhnicheskim pokazatelyam]. Ugol'. 2021. Vol. 6. No. 1143. Pp. 44–49. DOI:10.18796/0041-5790-2021-6-44-49. (rus)

11. Tolstoy A., Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Gunasekaran M., Vatin N., Vasilev Y. Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates. Materials. 2020. Vol. 13. No. 23. 5575. DOI:10.3390/ma13235575

12. Lkhasaranov S., Urkhanova L., Danzanov D. The study of the phase composition and microstructure of composite binders using industrial waste Transbaikalia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. No. 1. 012009. DOI:10.1088/1757-899X/880/1/012009

13. Fedorov V.I., Abdimezhitov M.K., Dyakonov A.A., Popov A.L., Mestnikov A.E. Light Concrete From Waste Manufacture Autoclaved Foam Concrete [Legkie betony iz othodov proizvodstva avtoklavnogo penobetona]. Modern High Technologies. 2016. Vol. 11. Pp. 61–65. (rus).

14. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Elichev K.A. Influence of Ground Slag of Steelmaking Production on The Properties of a Composite Slag-Alkaline Binder [Vliyanie molotogo shlaka staleplavil'nogo proizvodstva na svoystva kompozitsionnogo shlakoshchelochnogo vyazhushchego]. Engineering journal of Don. 2021. Vol. 11. No. 83. Pp. 429–439. (rus)

15. Barkovskay S.V., Pchel'nikova V.A. Development of composite gypsum binders using ceramic dust and glass [Razrabotka kompozitsionnykh gipsovykh vyazhushchih veshchestv s ispol'zovaniem keramzitovoy pyli i stekloboya]. Expert: theory and practice. 2022. Vol. 3. No. 18. Pp. 34–38. DOI: 10.51608/26867818_2022_3_34. (rus)

16. Ovcharenko G., Ibe E. The effect of added high-iron slag on the frost resistance of cement compositions. E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2021. Vol. 263. Article 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/202126301012

17. Lesovik V.S., Lesovik R.V., Ali W.S.A. Effect of recycled coarse aggregate from concrete debris on the strength of concrete. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021. Vol. 1926. No. 1. 012002. DOI:10.1088/1742-6596/1926/1/012002

18. Lesovik R.V., Tolypina N.M., Alani A.A., Jasim A.-B.-A.-W.S. Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 307–312. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_46

19. Krasnikova N.M., Khozin V.G. Recycling of concrete scrap as raw materials for cement concrete. Construction Materials. 2020. Vol. 1. No. 2. Pp. 56–65. DOI:10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

20. Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite Gypsum Bending with Multicomponent Mineral Additives of Different Genesis [Kompozitsionnoe gipsovoe vyazhushchee s mnogokomponentnymi mineral'nymi dobavkami raznogo genezisa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. Vol. 10. Pp. 27–34. (rus)

21. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M. Yu., Kozhukhova N.I., Titenko A.A. Production Methods of Binders Containing Gypsum-Bearing Wastes: A Review [Obzornyj analiz sposobov polucheniya vyazhushchih iz gipsosoderzhashchih othodov promyshlennykh proizvodstv]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. Vol. 11. Pp. 8–23. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23. (rus)

22. Tarasov P.I., Khazin M.L., Apakashev R.A. Mining waste recycling in the Ural [Ispol'zovanie othodov gornodobyvayushchej promyshlennosti]. Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). 2021. Vol. 1. Pp. 21–31. DOI:10.25018/0236-1493-2021-1-0-21-31. (rus)

23. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A. M., Frolova M.A., Rama Shanker Verma. Mineral wool composite with the use of saponite-containing mining industry waste [Mineralovatnyj kompozit s ispol'zovaniem saponit-soderzhashchih othodov gornodobyvayushchej promyshlennosti]. Construction Materials and Products. 2020. Vol. 3. No. 3. Pp. 21–27. DOI:10.34031/2618-7183-2020-3-3-21-27. (rus)

24. Drozdyuk, T., Frolova M., Ayzenshtadt A., Calay R.K., Jhatial A.A. Preliminary Study on the Mechanical Activation and High-Temperature Treatment of Saponite-Containing Tailings Generated during Kimberlite Ore Dressing. Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 10. 4957. DOI:10.3390/app12104957

25. Vaisberg L., Safronov A. Innovative Crushing and Grinding equipment of Vibration Action [Drobil'no-izmel'chitel'noe oborudovanie vibratsionnogo dejstviya dlya pererabotki syr'ya i promyshlennykh othodov]. Ecology and Industry of Russia. 2019. Vol. 23. No. 7. Pp. 4–9. DOI:10.18412/1816-0395-2019-7-4-9. (rus)

26. Bezzubtseva M.M., Volkov V.S. Investigation of the selectivity of the process of milling of materials in electromagnetic mechanical activators

- [Issledovanie selektivnosti processa izmel'cheniya materialov v elektromagnitnyh mekhanoaktivatorah]. Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2017. Vol. 47. Pp. 288–294. DOI:10.24411/2078-1318-2019-12135. (rus)
27. Yao G., Wang Z., Yao J., Cong X., Anning C., Lyu X. Pozzolanic activity and hydration properties of feldspar after mechanical activation. Powder Technology. 2021. Vol. 383. Pp. 167–174. DOI:10.1016/j.powtec.2021.01.042
28. Yao G., Liu Q., Wang J., P. Wu, Lyu X. Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217. Pp. 12–21. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.01.175
29. Wu C., Hong Z.-Q., Yin Y.-H., Kou S.-C. Mechanical activated waste magnetite tailing as pozzolanic material substitute for cement in the preparation of cement products. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 252. 119129. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119129
30. Vaisberg L.A., Kameneva E.E. Interconnection of structural features and physico-mechanical properties of rocks [Vzaimosvyaz' strukturnykh osobennostej i fiziko-mekhanicheskikh svojstv gornyh porod]. Gornyi Zhurnal [Mining Journal]. 2017. Vol. 9. Pp. 53–58. DOI:10.17580/gzh.2017.09.10. (rus)
31. Vaisberg L.A., Ustinov I.D. Phenomenology for vibration-induced size segregation and mixing of granular materials [Fenomenologiya vibracionnoj klassifikacii i usredneniya po krupnosti granulyarnyh materialov]. St. Petersburg state polytechnic University journal of engineering science and technology. 2019. Vol. 25. No. 1. Pp. 181–189. DOI:10.18721/JEST.25118. (rus)
32. Lesovik V.S., Frolova M.A., Aizenshtadt A.M. Surface activity of rocks [Poverhnostnaya aktivnost' gornyh porod]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2013. Vol. 11. Pp. 71–73. (rus)
33. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of silicon-containing rocks [Poverhnostnaya aktivnost' kremnesoderzhashchih gornyh porod]. Materialovedenie [Materials Science]. 2016. Vol. Pp. 45–48. (rus)
34. Strokova V.V., Izenshtadt A.M., Sivalneva M.N., Kobzev V.A., Nelubova V.V. Activity Evaluation of Nanostructured Binders with Using Thermodynamic Method [Ocenka aktivnosti nanostrukturirovannyh vyazhushchih termodinamicheskim metodom]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2015. Vol. 2. Pp. 3–9. (rus)
35. Aizenshtadt A.M., Frolova M.A., Sokolova Y.V., Drozdyuk T.A. Control of Physical and Chemical Processes at the Phase Boundary in the Formation of Building Composites. Digital Technologies in Construction Engineering. Springer, Cham, 2022. Vol. 173. Pp. 209–215. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8_27
36. Sokolova Y., Aizenshtadt A., Frolova M., Strokova V., Kobzev V. Energy characteristics of finely dispersed rock systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. No. 3. 032036. DOI:10.1088/1757-899X/365/3/032036
37. Danilov V.E., Korolev E.V., Aizenshtadt A.M., Strokova V.V. Features of the calculation of free energy of the surface based on the model for interfacial interaction of Owens–Wendt–Rabel–Kaelble [Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa-Vendta-Rabelya-K'el'ble]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2019. Vol. Pp. 66–72. DOI:10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72. (rus)
38. Korolev E.V., Grishina A.N., Pustovgar A.P. Surface Tension in Structure Formation of Materials. Significance, Calculation, and Application [Poverhnostnoe natyazhenie v strukturoobrazovanii materialov. Znachenie, raschet i primenenie]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2017. Vol. 1–2. Pp. 104–109. (rus)
39. Danilov V.E., Korolev E.V., Aizenshtadt A.M. Measuring the contact angles of powders by the sessile drop method. Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798. DOI:10.1134/S2075113321030084
40. Erbil H.Y. The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review. Surface Science Reports. 2014. Vol. 69. No. 4. Pp. 325–365. DOI:10.1016/j.surfrep.2014.09.001
41. Huhtamäki T., Xuelin T., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. Nature Protocols. 2018. Vol. 13. Pp. 1521–1538. DOI:10.1038/s41596-018-0003-z
42. Malyarov P.V., Kovalev P.A., Bochkarev A.V., Dolgov A.M. Investigation of Mechanisms Behind Mineral Raw Materials Destruction in Ball Mills [Issledovanie mekhanizmov razrusheniya mineral'nogo syr'ya v sharovyh mel'nicah]. Mineral processing Journal. 2018. Vol. 3. No. 375. Pp. 3–8. DOI:10.17580/or.2018.03.01. (rus)
43. Golik V.I. Effect of Properties of Solids on Grinding Energy in Mills [Issledovanie vliyaniya svojstv tverdyh tel na energetiku izmel'cheniya v mel'nicah]. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2021. Vol. 10. Pp. 112–122. DOI:10.25018/0236_1493_2021_10_0_112. (rus)
44. Baidarashvili M.M., Sakharova A.S. The study of the sorption properties of materials using physico-chemical method of adsorption sites distribution [Issledovanie sorbcionnykh svojstv materialov

s pomoshch'yu fiziko-himicheskogo metoda raspredeleniya centrov adsorbtsii]. Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssy. 2020. Vol. 20. No. 1. Pp. 87–94. DOI:10.17308/sorpchrom.2020.20/2383. (rus)

45. Tsyganova T.A., Antropova T.V., Anfimova I.N., Mjakin S.V. Features of the Formation of Adsorption Centers of Thermally Modified High-Silica Porous Glasses [Osobennosti formirovaniya adsorbtsionnyh centrov termicheski modifitsirovannyh vysokokremnezemnyh poristyh stekol]. Glass Physics and Chemistry. 2020. Vol. 46. No. 5. Pp. 400–404. DOI:10.31857/S0132665120050121. (rus)

46. Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Drozdyuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. Possible approach to estimating the dispersion interaction in powder systems [Vozmozhnyj podhod k ocnke dispersionnogo vzaimodejstviya v poroshkovykh sistemah]. Physics and chemistry of materials treatment. 2021. Vol. 3. Pp. 40–48. DOI:10.30791/0015-3214-2021-3-40-48. (rus)

47. Korolev E.V., Grishina A.N. Fractal Dimension as a Universal Characteristic of Parameters Structure and Compressive Strength of a Material [Fraktal'naya razmernost' kak universal'naya harakteristika parametrov struktury i prochnosti materiala]. Regional architecture and engineering. 2020. Vol. 1. No. 42. Pp. 5–15. (rus)

Information about the authors

Sivalneva, Mariana N. PhD, Assistant professor. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Strokova, Valeria V. DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nelyubova, Victoria V. DSc, Assistant professor. E-mail: nelubova@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ogurtsova, Yuliya N. PhD, Assistant professor. E-mail: ogurtsova.y@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Orekhova, Tatiana N. PhD. E-mail: nefact@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Botsman, Larisa N. PhD, Assistant professor. E-mail: lora80@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Netsvet, Daria D. PhD. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 17.08.2023

Для цитирования:

Сивальнева М.Н., Строчкова В.В., Нелюбова В.В., Огурцова Ю.Н., Орехова Т.Н., Ботцман Л.Н., Нецвет Д.Д. Методы оценки механоактивированного минерального сырья для композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22

For citation:

Sivalneva M.N., Strokova V.V., Nelubova V.V., Ogurtsova Yu.N., Orekhova T.N., Botsman L.N., Netsvet D.D. Methods for assessing mechanically activated mineral raw materials for composite binders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22