

УДК 666.972.5

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. М. ЗАЙЧЕНКО¹, д.т.н., профессор; **А. К. ХАЛЮШЕВ²**, к.т.н., доцент;
В. В. НЕФЕДОВ¹, к.т.н.; **И. Ю. Петрик¹**

¹ ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

² ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Аннотация. Показано, что среди основных мировых тенденций развития отрасли промышленности строительных материалов и изделий в последние годы ключевое значение приобретает вовлечение техногенного сырья в производство строительных материалов, в том числе новых типов – инновационных и композитных, внедрение передовых технологий их производства. Рассмотрены различные технологические решения, направленные на модифицирование электроповерхностных свойств дисперсных компонентов для повышения показателей качества композиционных строительных материалов.

Ключевые слова: отходы промышленности, электроактивация, электроповерхностные свойства, модифицирование.



Зайченко
Николай Михайлович



Халюшев
Александр Карюмович



Нефедов
Владислав Васильевич



Петрик
Ирина Юрьевна

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Российской Федерацией на государственном уровне принята «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 г. № 868-р) [1], содержащая комплекс мероприятий, направленных на развитие промышленности строительных материалов. В документе, в частности, отмечено, что среди основных мировых тенденций развития отрасли промышленности строительных материалов и изделий в последние годы ключевое значение приобретает вовлечение техногенного сырья в производство строительных материалов, в том числе новых типов – инновационных и композитных, внедрение передовых технологий их производства.

Во многих развитых странах мира объем повторного использования отходов промышленности превышает 30 процентов. Значительная часть отходов используется в строительстве и при производстве строительных материалов. В Соединённых Штатах Америки и Федеративной Республике Германия, например, утилизация золошлаковых отходов достигает 80 процентов. В то же время, процент утилизации отходов промышленности в постсоветских странах значительно ниже. Подавляющая их часть направляется в отвалы, при этом в строительной индустрии утилизируется лишь 6-7 процентов. Колоссальные объемы отходов промышленности сосредоточены в отвалах на территории Донецкой Народной Республики: золы и шлаки ТЭС (рис. 1), металлургические шлаки, горелые породы шахтных терриконов, цементная пыль, алюмосиликатные пылевидные отходы керамической и огнеупорной промышленности и т.п.



Рис. 1. Золоотвал Зуевской ТЭС

Широкому вовлечению их в производство строительных материалов препятствует, прежде всего, крайне неоднородный их химико-минералогический и гранулометрический состав. Для решения проблемы необходима разработка инновационных технологий переработки отходов в кондиционные композиционные материалы.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В 1973 году вместе со становлением Макеевского инженерно-строительного института в его структуре создан научно-исследовательский сектор, что положило начало развитию большой науки в институте. Формировались научные направления, а затем научные школы, создавались научные лаборатории, инженерно-производственные центры, росли объемы хозяйственной и госбюджетной тематики, активно развивалась студенческая наука. В рамках научных школ планомерно осуществляется подготовка научных кадров через аспирантуру и докторантуру [2].

В 70-80-е годы сформирована одна из научных школ института: «Исследование отходов промышленности как сырья для производства строительных материалов и изделий», её возглавил канд. техн. наук, профессор Н. Ф. Почапский. В разрезе главной проблематики научной школы развиваются перспективные научные направления, связанные с инновационными технологиями производства строительных материалов с использованием отходов промышленности Донбасса.

Профессором кафедры строительных материалов и производства строительных конструкций, д-ром техн. наук В. А. Матвиенко осуществлено научное обоснование технического решения проблемы повышения эффективности технологии бетонных и железобетонных изделий [3].

Путем воздействия на свежетоформованные бетонные изделия электрическим током с напряжением свыше 5 кВ при ограничении плотности тока (менее 0,1 А/м²) активизируются межфазные и межчастичные взаимодействия при формировании структуры бетона, при этом исключаются либо сводятся к минимуму энергоёмкие электрохимические процессы на контактном электроде.

Активация свежетоформованных изделий в процессе выдержки перед тепловой обработкой в течение 15-120 минут обеспечивает прирост прочности бетона при сжатии на 15-25 % при удельных затратах энергии 150-200 ВА·час/м³ [3]. Такая операция в производствен-



Канд. техн. наук,
проф. Почапский
Николай Федотович



Д-р техн. наук,
проф. Матвиенко
Василий Андреевич

ном цикле изготовления бетонных изделий может быть технологически обоснована в случае обязательной предварительной выдержки свежетоформованных изделий перед тепловой обработкой, например, изделий из газобетонных смесей в процессе формирования структуры (вспучивания) (кандидатская диссертация: «Модифицированный неавтоклавный газополистиролбетон с повышенными физическими и механическими свойствами», В. А. Мартынова, 2008 г.).

Более существенный технико-экономический эффект ($\Delta R \approx 20-50\%$) при на порядок меньших удельных энергозатратах (1,5-20 ВА·час/м³) достигнут при активации бетонных смесей в нестационарных режимах: при перемешивании в бетоносмесителе (канд. дисс. «Цементные бетоны, активированные в электрическом поле на стадии перемешивания», Г. В. Шамрина, 2001 г.), в процессе вибрационного уплотнения в формах (канд. дисс. «Бетоны, электроактивированные на стадии вибрационного уплотнения», Н. М. Зайченко, 1995 г.); обработке свежетоформованных изделий электрическими импульсами малой мощности (канд. дисс. «Активация бетонной смеси электрическими разрядами малой мощности», В. Г. Вешневская, 1996 г.). Разработаны устройства, установлены параметры активации бетонных смесей в высоковольтном электрическом поле. В то же время для практической реализации разработанных способов активации имеется ряд технических и технологических ограничений: сложность обеспечения надежной электроизоляции, исключающей утечки тока и обеспечивающей надежную электробезопасность; обязательный учет при выборе параметров активации консистенции бетонных смесей и, главное – необходимость применения нетокпроводящей опалубки для формирования изделий (исключение эффекта «Клетки Фарадея»).

Более доступной как в техническом исполнении, так и в плане организации технологического процесса является электрообработка отдельных ингредиентов бетона: цемента, заполнителей, дисперсных минеральных добавок (канд. дисс.: «Поляризационная активация заполнителей бетона», В. Н. Губарь, 1991 г., «Электроактивационная технология силикатного бетона», А. А. Нгалбиок, 1999 г.). Разработана конструкция устройства для активации компонентов бетона в бункерах оперативного запаса бетоносмесительного цеха в технологическом цикле приготовления бетонной смеси. Устройство представляет собой конденсатор с двумя видами чередующихся пластин – контактных и изолированных электродов. Сопротивление изоля-

ции последних, а также внутренней поверхности бункера выбирается из условия максимальной удельной плотности тока до 10 mA/m^2 при разности потенциалов 15–20 кВ. В этом случае электроды в виде двух параллельных пластин создают внешнее электрическое поле с примерно одинаковой напряженностью в любых точках — однородное поле [4], а процесс зарядки частиц происходит путем электростатической индукции [5]. Однако в результате поляризации на поверхности частиц появляются связанные заряды, вектор напряженности электрического поля которого направлен внутри диэлектрика противоположно вектору напряженности внешнего электрического поля, вызывающего поляризацию. В результате напряженность поля внутри диэлектрика уменьшается, что в целом снижает эффективность работы устройства для активации.

Значительно более существенный эффект при электрообработке дисперсных материалов может быть достигнут в неоднородном электрическом поле. Так, согласно [4–6] поле коронного разряда, создаваемое в различных по конструктивному исполнению электросепараторах и электрофильтрах, является самым эффективным способом генерации электрических зарядов требуемой полярности. В докторской диссертации Н. М. Зайченко («Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой», 2009 г.) развиты теоретические представления о механизме влияния высоковольтной электростатической активации компонентов бетонных смесей, в частности в поле коронного разряда, на межчастичные взаимодействия в дисперсных системах, формирование микроструктуры и свойств бетонов. С использованием компьютерного моделирования электрического поля коронного разряда выполнен расчет параметров электростатической поляризации дисперсных компонентов бетонных смесей, которые обеспечивают максимальный эффект электроактивационного воздействия [7].

Активация твердения бетона происходит в основном за счет эффектов модифицирования поверхностных центров дисперсных минеральных частиц, имеющих электрическую природу [8]. По определению Г. И. Дистлера активными центрами поверхности твердой фазы являются группировки из точечных дефектов разного знака заряда, расположенные на расстоянии 5–25 нм. Важным следствием электрически активного рельефа поверхности твердых тел являются дальнедействующие эффекты, когда влияние силовых полей активных центров поверхности распространяется вглубь жидкости по эстафетному механизму [9].

Модифицирование структуры жидких граничных слоев объясняется образованием индуцированной поляризационной структуры, что обусловлено заряженным рельефом поверхности, главным образом заряженными точечными дефектами, свойства которых примерно аналогичны свойствам различных функциональных групп (например, гидроксильных) [10]. Компенсация зарядов на поверхности различных минералов приводит к уменьшению активности к химическим взаимодействиям, т.е. происходит «старение» поверхности и повышение степени ее инертности [11].

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Комплексное модифицирование микроструктуры композиционных строительных материалов

Начало 2000-х ознаменовало развитие абсолютно новых трендов в технологии композиционных строительных материалов — в технологии бетона. Бетоны становятся многокомпонентными, при их приготовлении широко используются химические модификаторы структуры и свойств, активные минеральные ультрадисперсные компоненты и ряд других эффективных добавок. Составы бетона с тонкомолотыми цементами и ультрадисперсными наполнителями способствуют более эффективно использованию суперпластификаторов и применению их повышенных дозировок, что позволяет получать бетонные смеси с предельно низкими значениями водоцементного отношения В/Ц и максимальной плотностью твердой фазы [12, 13].

Так, новый класс гиперпластификаторов, синтезированных на основе поликарбоксилатных и полиакрилатных полимеров, за счет электростатического эффекта стабилизации позволяет получать литые (самоуплотняющиеся) бетонные смеси при значениях В/Ц менее 0,3. На этой основе развивается новое направление — технология высокопрочных, высокофункциональных бетонов с прочностью при сжатии свыше 100 МПа. В этой связи, разработанные ранее различные активационные технологии, основанные на физико-механических воздействиях на бетонные смеси (электрические, электромагнитные, ультразвуковые, вибрационные) уже не могли конкурировать с бурно развивающимся направлением химического модифицирования структуры композитов.

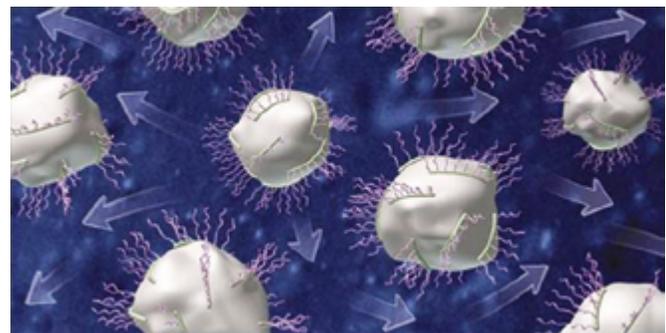


Рис. 2. Диспергирование частиц цементного теста за счёт стерического барьера отталкивания

Тем не менее, это не означало бесперспективность научного направления использования электроактивационных воздействий в технологии бетона, развиваемого профессором В. А. Матвиенко и его учениками. Практическое приложение накопленного опыта направлено не на решение проблемы повышения прочности как таковой, а на достижение целого ряда эффектов в технологии композиционных материалов с позиций электроповерхностных явлений при формировании их структуры.

Осуществлено научное обоснование технического решения получения высокотехнологичных тонкозернистых бетонных смесей и бетонов с высокими показателями физико-механических и деформационных

свойств, которое заключается в установлении закономерностей формирования микроструктуры бетона, комплексно модифицированной комбинированными органо-минеральными добавками и электрической активацией дисперсных компонентов бетона в поле коронного разряда [7].

Исходя из электроповерхностных свойств дисперсных компонентов разработана технологическая последовательность перемешивания бетонной смеси, содержащей комбинированный органо-минеральный модификатор, что исключает конкурентную адсорбцию двух анионных полиэлектролитов (суперпластификаторов) на активных центрах поверхности твердой фазы и обеспечивает высокие показатели подвижности бетонных смесей и ее сохраняемости в течение не менее часа.

Различная ориентирующая сила активных центров поверхности на молекулы и ионы адсорбирующихся веществ является причиной избирательной адсорбции, так как адсорбция коллоидных частиц определенного знака соответствует «электрической карте» поверхности [14]. Изменение концентрации центров адсорбции в результате воздействия на дисперсные компоненты бетонной смеси (адсорбенты) высоковольтным электростатическим полем может являться одним из эффективных способов регулирования величины адсорбции добавок суперпластификаторов на поверхности вяжущего и минеральных наполнителей.

Поверхностное модифицирование портландцемента

Обработка (поверхностное модифицирование) композиционного портландцемента, содержащего высокодисперсные минеральные добавки, осуществляется в установке, которая состоит из нескольких последовательных узлов: дозирующего устройства; камеры электризации (биполярной зарядки частиц); камеры агломерации и приемного бункера модифицированного композиционного цемента [15].

Исходные компоненты — микрокремнезем и портландцемент через дозирующие устройства раздельными потоками подаются в отсеки камеры

электризации — портландцемент в камеру с положительным коронирующим электродом, микрокремнезем — отрицательным. Заряженные более крупные частицы портландцемента и мелкие частицы микрокремнезема в камере агломерации под влиянием переменного электрического поля совершают колебания с различной амплитудой и частотой. Градиент частоты и амплитуды колебаний обуславливают многочисленные столкновения частиц и фиксацию мелких частиц микрокремнезема на более крупных частицах портландцемента, что приводит к образованию сфероидальных агломератов (рис. 3) (канд. дисс. «Бетоны на основе композиционных цементов, активированных в высоковольтном электрическом поле», А. К. Халюшев, 2010 г.).

По данным сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией установлено, что в результате электроповерхностного модифицирования портландцемента высокодисперсным микрокремнеземом (смесь «портландцемент — 75% — микрокремнезем — 25%») количество мелких частиц приобретает сфероидальную форму в результате образования агломератов размером 25-50 мкм, что сопровождается снижением водопотребности (нормальной густоты) цемента на 11 % и повышением прочности цементного камня при сжатии на 37 % в сравнении с контрольным образцом.

По мнению профессора П. Г. Комохова [16] активные центры (функциональные группы) поверхности наполнителей влияют на процессы, происходящие при твердении цементной суспензии, с первых секунд затворения цемента водой. Профессором М. М. Сычевым поверхность минерального наполнителя рассматривается с одной стороны, как «... активная подложка, на которой формируются гидросиликаты, структурные мотивы цементирующих фаз», а с другой стороны — как заряженная поверхность, что отражается на формировании адгезионных контактов [17]. Следовательно, повышение активности поверхности минеральных добавок, например, при воздействии внешнего электрического поля должно обеспечи-

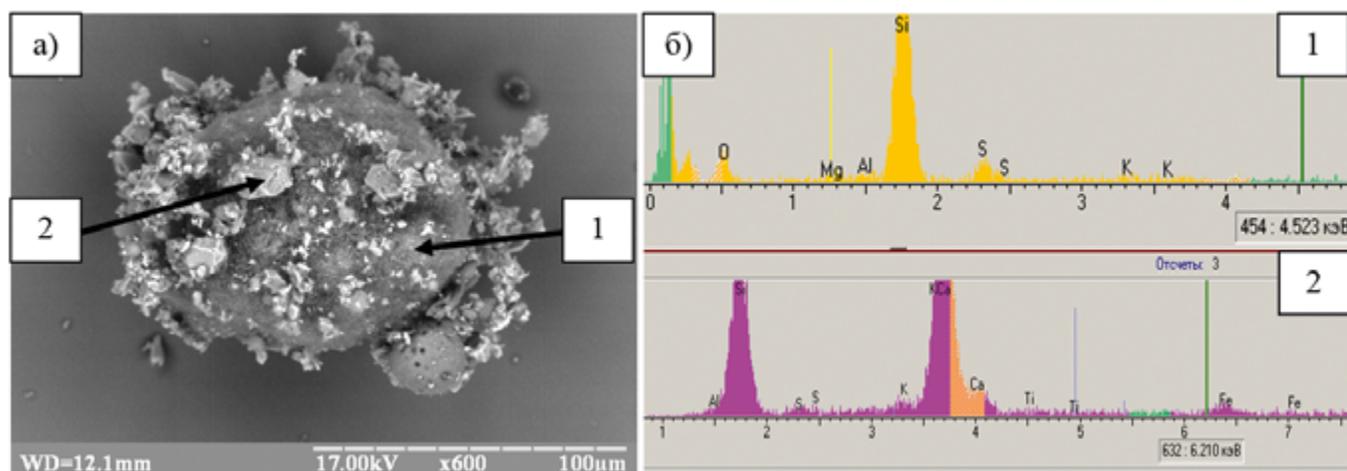


Рис. 3. СЭМ частиц модифицированного композиционного портландцемента (а) с энергодисперсионной спектроскопией (б): 1 — сфероид, образованный адгезией ультрадисперсных частиц микрокремнезема на поверхности частицы портландцемента; 2 — угловатая частица портландцемента

вать повышение прочности адгезионных контактов и прочности композита в целом. При этом активация дает максимальный эффект, если сопровождается воздействием и на вяжущее вещество, и на поверхность наполнителя, поскольку прочность адгезионного контакта определяется активностью поверхности наполнителя, активностью и свойствами цементирующих фаз, а также плотностью адгезионных контактов (формирование электрогетерогенных контактов).

Химическое модифицирование поверхности минерального наполнителя

Управление процессами структурообразования цементного теста с минеральными добавками необходимо осуществлять с учетом кислотно-основных свойств поверхности. Согласно [17] активные центры поверхности минеральных добавок с показателем кислотности $pK_a = -5...0$ интенсифицируют гидратацию вяжущего, центры с $pK_a = 0...+7$ оказывают незначительное влияние на гидратацию и прочность цементного камня, а центры с $pK_a = +7$ снижают степень гидратации и прочность камня вяжущего. Так, в [18] отмечено, что при обработке кварцевого песка раствором кислоты наблюдается усиление кислотных свойств его поверхности, что активизирует обменные донорно-акцепторные взаимодействия между заполнителем и цементирующими фазами. Рост обменной емкости кварцевого песка вследствие обработки его неорганическими веществами, например, 0,1 н. раствором азотной кислоты обеспечивает значительное повышение прочности мелкозернистого бетона [19, 20].

Таким образом, предварительная обработка заполнителей (наполнителей) слабыми растворами электролитов является направленным введением химических добавок крайне малой концентрации непосредственно в зону контакта [21]. В результате можно повысить концентрацию центров, участвующих в адгезии, или усилить адгезионные свойства уже имеющихся центров [19]. При этом если даже не образуются новые соединения между поверхностными атомами, то возникает контактная разность потенциалов, усиливающая адгезию [18].

Одним из объективных препятствий для расширения ассортимента наполнителей полимерных композиционных материалов является отсутствие совместимости, в т.ч. и химической, с полимерной ма-

трицей [22], поэтому важным технологическим этапом создания прочных адгезионных связей между материалами фаз полимерных композитов является подготовка поверхности наполнителя [23].

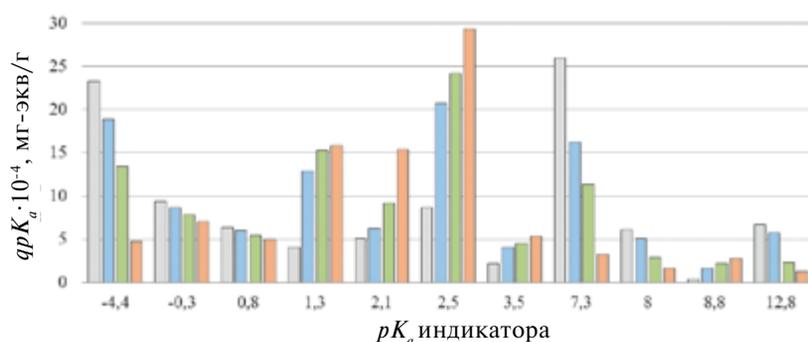
Для определения влияния обработки наполнителя (зола гидроудаления Зуевской ТЭС) слабыми растворами серной кислоты различной концентрации (1, 3 и 5 %) на поверхностные свойства рассчитано содержание активных центров адсорбции, эквивалентное количеству адсорбированных индикаторов Гаммета по результатам спектрофотометрического метода исследований (канд. дисс. «Полимерный композиционный материал на основе вторичного полиэтилентерефталата и модифицированной золы тепловых электростанций», В.В. Нефедов, 2020).

Установлено (рис. 4), что для исходной золы гидроудаления преимущественными являются кислотные центры адсорбции Льюиса ($pK_a = -4,4; -0,3$), кислотные ($pK_a = +2,5$) и основные ($pK_a = +7,3$) центры Брэнстеда. После химического модифицирования поверхности наполнителя с ростом концентрации кислоты наблюдается значительное увеличение концентрации кислотных центров ($pK_a = +1,3; 2,1; 2,5$) Брэнстеда, а также снижение концентрации основных центров ($pK_a = +7,3$).

Исходя из полученных данных по спектру распределения центров адсорбции, рассчитана функция кислотности поверхности, H_0 , (таблица 1). Уменьшение значения функции кислотности поверхности по мере увеличения концентрации растворов серной кислоты, применяемой для модифицирования поверхности золы, свидетельствует о возрастающем содержании кислотных центров адсорбции на поверхности наполнителя. Полученные результаты показывают возможность применения разработанного способа модифицирования минерального наполнителя (зола гидроудаления ТЭС) для усиления межфазного взаимодействия на границе раздела фаз полимерного композиционного материала.

Таблица 1. Функция кислотности поверхности, H_0

Материал	H_0
Исходная зола	2,78
Обработка 1%-ным раствором H_2SO_4	2,47
Обработка 3%-ным раствором H_2SO_4	2,23
Обработка 5%-ным раствором H_2SO_4	2,15



	Исходная зола
	Зола, обработанная 1% раствором H_2SO_4
	Зола, обработанная 3% раствором H_2SO_4
	Зола, обработанная 5% раствором H_2SO_4

Рис. 4. Содержание активных центров на поверхности золы гидроудаления Зуевской ТЭС, обработанной растворами H_2SO_4 различной концентрации

Обогащение золы гидроудаления ТЭС электростатической сепарацией

Для улучшения характеристик золы гидроудаления, соответствующих техническим требованиям для замены цемента в бетоне, разработана технология трибоэлектростатического обогащения. Данная технология позволяет получить материал с низким содержанием несгоревшего углерода (ППП = 2,52 % в этом исследовании) для высокого уровня замены цемента (45 %) в бетонах. Обогащённая зола гидроудаления имеет улучшенный гранулометрический и фазовый состав, пониженное содержание несгоревшего углерода, что ускоряет процесс гидратации цемента, повышает реологические свойства цементной пасты и способность воздухововлекающей добавки удерживать требуемый объем вовлечённого воздуха.

Способ электрической сепарации, основанный на различной электрической проводимости веществ, реализуется путем обработки потока частиц золы-уноса в высоковольтном электрическом поле [24]. Процесс заключается в создании на зернах минералов электрического заряда, отличающегося по значению или знаку, с последующим пропусканием потока заряженных частиц через электростатическое поле. Разделение происходит путем отклонения траекторий движения заряженных частиц от траекторий, характерных для незаряженных частиц при отсутствии внешнего электрического поля.

Для электростатической сепарации применен камерный электростатический сепаратор свободного падения (рис. 5). Частицы золы в основном состоят из кремнезёма и глинозёма, которые имеют более высокую работу выхода ($\text{SiO}_2 = 5,0 \text{ эВ}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,7 \text{ эВ}$), чем

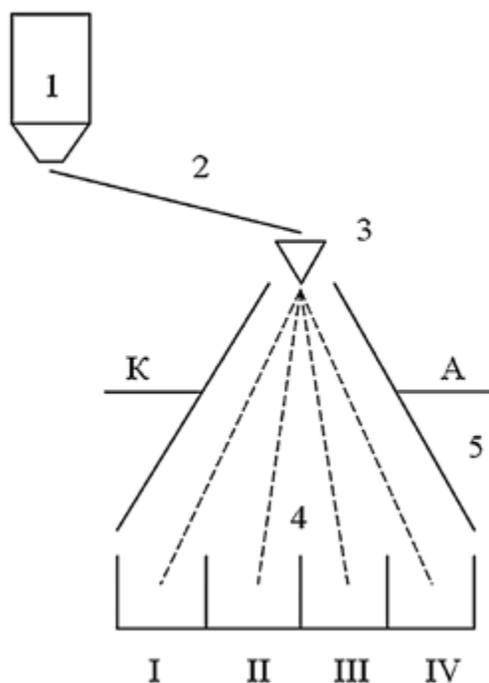


Рис. 5. Схема камерного электростатического сепаратора свободного падения:

- 1 – бункер; 2 – наклонная медная пластина;
- 3 – воронка; 4 – приемные контейнеры;
- 5 – электроды (А – анод, К – катод)

углерод ($C = 4,0 \text{ эВ}$). Поэтому, когда они контактируют друг с другом или с поверхностью медного питателя ($\text{Cu} = 4,38 \text{ эВ}$), частицы углерода будут заряжаться положительно, а частицы золы – отрицательно, вследствие различий в значениях работы выхода [25].

Разделяемый материал поступает из дозатора в зону электростатического поля. Поле создается вертикально расположенными не коронирующими электродами. Падая вниз под действием силы тяжести, частицы отклоняются в сторону электродов под влиянием кулоновских сил. Направление действия электрической силы зависит от знака избыточного заряда частицы. Увеличение межэлектродного расстояния в нижней части сепаратора позволяет расширить веер разделяемой золы-уноса и улучшить таким образом ее сепарацию.

Установлено, что максимальное содержание несгоревших угольных частиц, определяемое по показателю потерь при прокаливании, после электрического сепарирования сосредоточено в навесках, отобранных с катода и ячеек, близких к катоду. Об этом свидетельствуют также более высокие показатели насыпной плотности навесок золы, близких к зоне анода. Согласно [26] заряд несферических частиц, что характерно для зерен несгоревшего углерода, в 1,4-1,8 раз больше заряда шарообразных частиц (алюмосиликатные сфероиды), имеющих эквивалентную массу. Различие между зарядами частиц правильной и неправильной формы особенно значительно для частиц с размерами менее 200 мкм. Этим объясняется достаточно высокая эффективность сепарирования как тонкодисперсных, так и относительно крупных частиц несгоревшего углерода.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что среди основных мировых тенденций развития отрасли промышленности строительных материалов и изделий в последние годы ключевое значение приобретает вовлечение техногенного сырья в производство строительных материалов, в том числе новых типов – инновационных и композитных, внедрение передовых технологий их производства.

2. Широкому вовлечению отходов промышленности в производство строительных материалов препятствует, прежде всего, крайне неоднородный их химико-минералогический и гранулометрический состав. Для решения проблемы необходима разработка инновационных технологий переработки отходов в кондиционные композиционные материалы.

3. Творческими коллективами ГОУ ВПО ДОННАСА под руководством профессоров В. А. Матвиенко, Н. М. Зайченко разработаны теоретические и практические основы для реализации способа поверхностного модифицирования дисперсных компонентов композиционных строительных материалов.

Список литературы

- 1. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую пер-

- спективу до 2030 года [Электронный ресурс] // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 г. № 868-р. — М., 2016. — Режим доступа : <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293755/4293755171.htm>.
2. ДОННАСА — полвека славного пути. Юбилейное научно-информационное издание к 75-летию высшей инженерно-строительной школы Донбасса и 50-летию юбилею Донбасской национальной академии строительства и архитектуры / Авт. сост. ректор ГОУ ВПО «ДОННАСА», проф. Н. М. Зайченко. — Донецк: ООО «ИПП «Промиль», 2022. — 492 с., илл. цв., ч/б.
 3. Матвиенко, В. А. Электрические явления и активационные воздействия в технологии бетона / В. А. Матвиенко, С. М. Толчин. — Макеевка: РИС, 1998. — 154 с.
 4. Олофинский, Н. Ф. Электрические методы обогащения / Олофинский Н. Ф. — [изд. 3-е, перераб. и доп.]. — М.: Недра, 1970. — 522 с.
 5. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верецагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин. — М.: Энергия, 1974. — 480 с.
 6. Тэнзеску, Ф. Электростатика в технике / Ф. Тэнзеску, Р. Крамарюк. — [пер. с рум.]. — М.: Энергия, 1980. — 296 с. Зайченко, Н. М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой / Н. М. Зайченко [Монография]. — Макеевка: ДонНАСА, 2009. — 207 с.
 7. Сычев, М. М. Природа активных центров. Методы активации гидратации и твердения цементов / М. М. Сычев // Цемент. — 1992. — № 2. — С. 79-88.
 8. Дистлер, Г. И. Информационные свойства твердых и жидких граничных слоев / Г. И. Дистлер // V конф. по поверхностным силам, 1974 г.: сб. докладов. — М.: Наука, 1974. — С. 273-285.
 9. Дистлер, Г. И. Электрическая структура реальных поверхностных твердых тел и формирование граничных слоев с особыми свойствами, обеспечивающими передачу дальнего действия влияния твердых тел / Г. И. Дистлер // IV конф. по поверхностным силам, 1972 г.: сб. докладов. — М.: Наука, 1972. — С. 245-261.
 10. Ведь, Е. И. Исследование некоторых силикатных и несиликатных водных систем в гидротермальных условиях с целью получения различных строительных материалов: дис... доктора техн. наук: 05.23.05 / Ведь Евгений Иванович. — Х., 1967. — 487 с.
 11. Баженов, Ю. М. Бетоны: технологии будущего / Ю. М. Баженов // Современные стройматериалы. — 2005. — июль-август. — С. 50-52.
 12. Баженов, Ю. М. Новому веку — новые бетоны / Ю. М. Баженов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2000. — № 2. — С. 10-11.
 13. Челидзе, Т. Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем / Челидзе Т. Л., Деревянко А. И., Куриленко О. Д. — К.: Наук. думка, 1977. — 231 с.
 14. Способ поверхностного модифицирования цемента / Н. М. Зайченко, А. К. Халюшев, С. А. Стельмах и др. // RUS 2715276 C1, МПК В28В 11/00; владелец Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», опублик. 26.02.2020.
 15. Комохов, П. Г. Научно-технологическая конструкция бетона как композиционного материала (часть 2) / П. Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2002. — № 5. — С. 26-27.
 16. Управление свойствами цементных смесей природой заполнителя / П. Г. Комохов, Л. Б. Сватовская, Н. Н. Шангина // Изв. ВУЗов. «Строительство». — 1997. — № 9. — С. 51-54.
 17. Активация поверхности кварцевого заполнителя кислотными и щелочными растворами / В. В. Чистяков, В. И. Гоц, М. И. Дудар, В. М. Веретельник // Бетон и железобетон в Украине. — 2003. — № 3. — С. 9-14.
 18. Сычев, М. М. Некоторые вопросы активации адгезии вяжущих систем / М. М. Сычев // ЖПХ. — 1987. — № 5. — С. 982-993.
 19. Гладких, Ю. П. Поверхностные свойства кварцевого песка и прочность мелкозернистого бетона / Ю. П. Гладких, В. В. Ядыкина, В. И. Завражина // Всес. конф., 1989 г.: тезисы докл. — Белгород: БТИСМ, 1989. — Ч. 4. — С. 79.
 20. Ольгинский, А. Г. Влияние среды на адаптацию зоны контакта заполнителей с цементным камнем в бетоне / А. Г. Ольгинский, В. Л. Черняевский // Бетон и железобетон. — 2000. — № 41. — С. 5-8.
 21. Рюткянен, Е. А. Модификация поверхности твердых дисперсных наполнителей полимерными пленками: автореф. дис. ... канд. химич. наук: 02.00.06 / Рюткянен, Евгения Александровна. — СПб, 2012. — 20 с.
 22. Rudawska, A. Surface treatment in bonding technology / A. Rudawska. — Academic Press, 2019. — 290 p.
 23. Сулейманов, О. А. Электростатическая сепарация, как способ сухой переработки минерального сырья [Электронный ресурс] / О. А. Сулейманов // Научное пространство Европы. — Белгород: 2013. — Режим доступа: <http://www.rusnauka.com/>.
 24. Kim J. K. Tribo-electrostatic beneficiation of fly ash for ash utilization / J. K. Kim, S. C. Kim // Korean J. Chem. Eng. — 2001. — Vol. 18, No. 4. — P 531-538. <https://doi.org/10.1007/BF02698302>.
 25. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков [Текст] — М.: Химия, 1976. — 432 с.