

Электроразрядная обработка сырьевых компонентов для изготовления облегченных строительных изделий

А.П. Малюшевская, П.П. Малюшевский

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: defr@iipt.com.ua*

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов электроразрядной обработки водно-целлюлозных суспензий для затворения гипсовых вяжущих. Определена возможность применения электроразрядной технологии для переработки целлюлозосодержащего вторичного сырья, а также последующего использования активированных электроразрядом суспензий затворения в качестве исходных компонентов для производства гипсовых строительных изделий.

УДК 537.526:693.625

В последние годы заметно повысилась роль ресурсосбережения в стройиндустрии, и особенно актуальны направления исследований, ориентированные на создание безотходных производств [1].

Например, ставшее типичным для строительной индустрии массовое применение гипсовых вяжущих материалов является существенным резервом экономии материальных, топливно-энергетических, трудовых и финансовых ресурсов. Так, для получения 1 тонны гипсового вяжущего требуется в 4 раза меньше топлива, чем на производство такого же количества цемента.Metalлоёмкость оборудования гипсовых заводов в 3 раза меньше, чем цементных. При производстве гипсобетонных изделий не требуется термовлажная обработка сырца, а при использовании некоторых специальных приёмов формования гипсовых изделий не нужна и сушка. Быстрое схватывание гипсового теста обеспечивает высокую оборачиваемость форм (оснастки). Гипсовые конструкции широко применяются в строительстве в связи с их высоким качеством и рядом эксклюзивных свойств. Индустриальные перегородки из гипсобетона позволили существенно повысить производительность труда, по всем технико-экономическим показателям гипсовые перегородки эффективнее кирпичных и железобетонных.

Однако в современном производстве таких строительных материалов имеется ряд научно-технических задач по дальнейшей оптимизации процессов их получения и обеспечению ресурсосбережения. В частности, вода затворения – равноправный участник формирования структуры гипсового камня, а ее состояние и способ подготовки во многом определяют характер процессов гидратации и структурообразования гипсовых систем. Насущной технико-экономической задачей является, несомненно, разработка ресурсосберегающих технологий получения гипсовых строительных изделий с использованием в качестве вяжущих доступного вторичного сырья.

Поиск путей решения таких задач методами современной электрофизики представляет научно-практический интерес.

Одним из эффективных методов физического воздействия на материалы с целью их активации и повышения реакционной способности служит подводный электрический разряд (ЭР). Он уже давно и успешно применяется в машиностроении, химико-технологических процессах, гидроакустике, горнодобывающих отраслях, нефтедобывающих производствах. Есть некоторый опыт использования электроразрядного метода и в так называемых силовых процессах строительной индустрии: разрушение старых фундаментов и негабаритов, уплотнение просадочных грунтов при подготовке строительной площадки, обустройство буронабивных свай, погружение железобетонных свай и т.п. [2]. В электроразрядных установках материалы подвергаются комплексному воздействию ударных волн, кавитации, высокоскоростных гидропотоков [3], изменение химических свойств рабочей жидкости – воды – происходит в результате воздействия электрического разряда на её структуру, имеет место поверхностная аморфизация измельченных частиц некоторых материалов [4]. Однако пока что электрический разряд мало применяют при подготовке сырьевых компонентов строительных изделий, хотя может сыграть значительную роль в повышении их качества и соответственно экономичности использования самих изделий. В частности, при электроразрядном измельчении кварца и кварцевого стекла наблюдается изменение свойств рабочей среды, обусловленное образованием раство-

римых форм азота и раствора кремниевой кислоты [5], в результате электроразрядной обработки воды затворения улучшаются качественные характеристики малоконцентрированных (1, 3, 5%) цементных суспензий [6], электроразрядная обработка увеличивает дисперсность вяжущего вещества, сокращает сроки схватывания, повышает прочность получаемого бетона в первые сутки твердения на 20–40% [7]. В настоящее время необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением эффективности применения разрядно-импульсных технологий в операциях подготовки сырьевых материалов, и особенно вторичных материалов и промышленных отходов. Это позволит существенно расширить сырьевую базу отраслей при одновременном повышении качества и эксплуатационных характеристик изделий.

Цель работы – исследование влияния электроразрядной обработки водных дисперсий затворения гипсовых вяжущих на физико-механические характеристики гипсового камня и определение возможности получения качественных изделий из такого строительного материала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований был выбран процесс электроразрядной обработки водной суспензии волокнистых материалов из макулатуры, используемой для затворения гипсовых вяжущих марки Г-4, Г-5. Твердой фазой при приготовлении суспензии служили отходы печатного и бумажного производства: газетная бумага, техническая писчая бумага, ватман. В качестве рабочей среды использовалась водопроводная вода с удельным сопротивлением 8–10 Ом·м. В экспериментах применялось оборудование: генератор импульсных токов ГИТ-50, электроразрядные камеры объёмом 10, 40 и 60 дм³, пресс гидравлический, мешалка электрическая. Приборы для измерения: мост реохордный Р-38 с колбой Х-38, вискозиметр Суттарда, линейка длиной 300 мм с ценой деления 1мм, прибор Вика, весы с погрешностью взвешивания не более 1 г, секундомер, мерный стакан, микроскоп МБИ-3. Оснастка: формы для изготовления образцов-балочек, сушильный шкаф, опоры диаметром 10 мм для испытаний на изгиб.

При проведении исследований обеспечивались постоянными следующие параметры: рабочее напряжение, индуктивность разрядного контура, частота следования импульсов, начальная температура рабочей жидкости $T = 293\text{K}$.

Для оптимизации процесса варьировали следующие параметры:

- энергию единичного импульса, кДж – 1,25–2,5;
- длину межэлектродного промежутка, мм – 40–60;
- процентное содержание твёрдой в жидкой фазе (по объёму), % – 1; 5;
- время электроразрядной обработки единичного объёма, мин – 2–15.

В качестве параметра оптимизации была выбрана седиментационная устойчивость получаемой в результате обработки коллоидной системы, степень которой определялась по отстою в мерном цилиндре. Дополнительно проводилось визуальное наблюдение полученных волокон с помощью микроскопа МБИ-3, контрольные точки фотографировались.

Прикладной целью проводимых исследований являлось получение облегченного гипсового камня за счет введения в гипс вместо воды затворения активированной электроразрядом бумажной суспензии различной концентрации. Контрольные и опытные образцы изготавливались по стандартным методикам соответствующих нормативных документов [8], согласно этим методикам исследовались также свойства гипсового теста и камня. Так, для изготовления литых смесей одним из основных критериев служила растекаемость гипсового теста. Она характеризуется диаметром расплыва, который должен равняться 180 ± 5 мм. Стандартную консистенцию определяли при затворении гипсового вяжущего водой и водно-целлюлозной суспензией различной концентрации. Определение стандартной консистенции осуществлялось на вискозиметре Суттарда по типовой методике [8]. Для определения сроков схватывания использовали гипсовое тесто стандартной консистенции. Сущность метода состоит в определении времени от начала контакта гипсового вяжущего с водой до начала и конца схватывания теста. Замеры производились с помощью прибора Вика [8]. Из полученного теста изготавливались образцы-балочки с применением суспензий, приготовленных из различных сортов бумаги с изменением содержания твёрдой фазы в воде и варьированием соотношения суспензия-гипс. Полученные образцы-балочки подвергались стандартным испытаниям согласно [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние внешних условий на эффективность выделения энергии в канале электрического разряда определяется в первую очередь проводимостью среды. Выбранное сырье по этому признаку

разделялось на 2 группы: первая, наиболее благоприятная, не имела в своём составе химических веществ, способных выщелачиваться при обработке (отходы писчей бумаги, ватмана); вторая состояла из материалов, склонных к выщелачиванию в воду различных химических веществ (газетная бумага за счет химических компонентов типографской краски).

На первом этапе были выявлены зависимости и влияние варьируемых параметров разряда на устойчивость дисперсной системы, зависящей в свою очередь от степени разделения волокон бумаги.

Было отмечено сильное влияние на процесс диспергирования величины энергии, запасаемой конденсатором: с ее ростом процесс воздействия проходил более эффективно. С учетом этого в последующих наших исследованиях уровень запасаемой энергии устанавливался максимальным. Теперь варьировались три параметра: величина межэлектродного промежутка, концентрация твёрдой фазы в суспензии и время электроразрядной обработки (то есть суммарное число импульсов, вводимых в активируемый объём).

Оптимальную величину межэлектродного промежутка, обеспечившую стабильный разряд, выбрали экспериментальным путем – для первой группы материалов она оказалась равной 50 мм, для второй группы – 40 мм.

Сложность последующей оптимизации уровня двух остающихся переменных факторов заключалась в том, что не была известна закономерность влияния концентрации и дисперсности твёрдой фазы полученной электроразрядным методом суспензии на физико-механические характеристики гипсового камня. Для решения этого вопроса потребовалось проведение двух этапов исследований: на первом определялась степень устойчивости суспензий различной концентрации от времени обработки, а на втором изучались физико-механические характеристики гипсового камня на суспензиях затворения различной концентрации.

На первом этапе исследований отработывалась рабочая гипотеза об электростатическом взаимодействии расщеплённых частиц (волокон) бумаги с обработанной импульсным электромагнитным полем жидкостью-носителем, в нашем случае – водой. Увеличение числа частиц твёрдой фазы, их взаимодействие с водой и определяют степень устойчивости суспензий, прослеживается взаимосвязь между устойчивостью системы и степенью разделения твёрдой фазы на отдельные частицы.

Динамика диспергирования имеет место на всех стадиях процесса: сразу происходит дробление крупных кусков на более мелкие, через небольшой промежуток времени наблюдается окончательное тонкое диспергирование волокон целлюлозы – получается суспензия с однородной структурой во всём объёме (см. рис. 1).

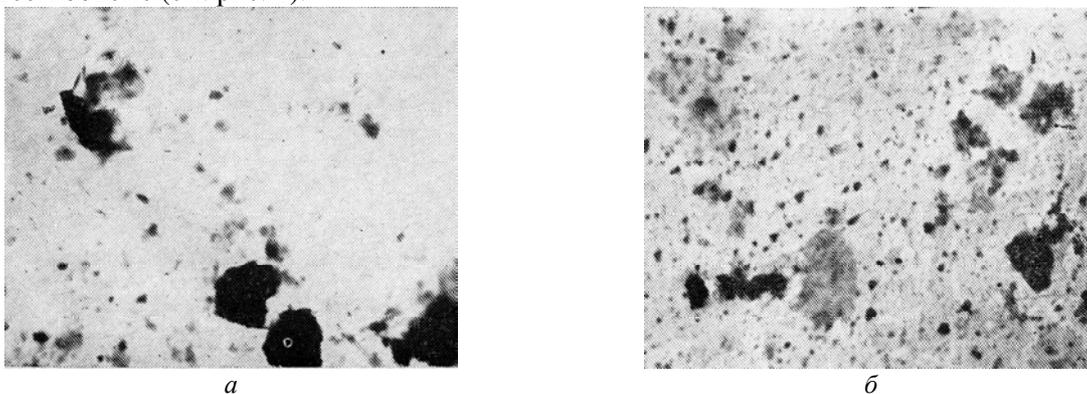


Рис. 1. Образцы твёрдой фазы через 1 (а) и 5 мин (б) после электроразрядной обработки.

Проверка устойчивости суспензий, полученных через 1 и 5 минут обработки, показала, что расслоение "1-минутной" суспензии наступало через 12 часов с выделением воды в верхней части мерного стакана до 20% от общего объёма, а суспензия, полученная в результате 5-минутной обработки, сохранила полученную однородную структуру и через 5 суток.

Результаты проведенных экспериментов позволили сделать вывод, что для получения устойчивых суспензий из материалов, входящих в первую группу, продолжительность обработки должна составлять 5 мин, а для материалов второй группы – 10–15 мин.

Второй этап исследований посвящен исследованию физико-механических характеристик гипсового камня, полученного затворением гипса водно-бумажной суспензией различной концентрации.

Обычно для изготовления перегородочных плит используются литые смеси. Плотность гипсобетонных плит после сушки составляет до 1250–1300 кг/м³, то есть масса плиты размером 600x300x80 мм – 18–19 кг; прочность изделий из гипсобетона при сжатии варьируется в широких пределах (от 3,5 до 8,0 МПа) в зависимости от заполнителей.

По сравнению с требованиями существующих стандартов гипсобетон перегородочной плиты имеет избыточную прочность при сжатии (нормальная прочность – 5,0 МПа). Это позволяет решать актуальную задачу по уменьшению материалоемкости перегородочных плит, их массы при сохранении требуемой прочности гипсобетона плит при сжатии – уменьшение возможно за счет поризации гипсовой смеси. Для этого используется метод смешения гипсового вяжущего с облегчающей и поризующей добавкой в виде коллоидной целлюлозы. В данных исследованиях поризующей добавкой служила водная суспензия целлюлозы, полученная электроразрядным методом, различной концентрации при изменении соотношения суспензия-гипс.

Одним из основных критериев получения гипсового камня с максимально высокими физико-механическими свойствами является определение водогипсового соотношения для получения гипсового теста нормальной консистенции. В случае затворения гипса водно-бумажной суспензией различной концентрации выбор соотношений существенно влияет на изменение физико-механических свойств. Это связано с тем, что в суспензиях с содержанием расщеплённой твёрдой фазы 2–4% большая часть воды находится в связанном состоянии. Это в свою очередь уменьшает текучесть, и вода не вступает во взаимодействие с гипсовым вяжущим в момент гидратации, создавая излишки влаги, которая при сушке гипсового камня должна испариться. При сушке таких образцов образуются поры, уменьшающие весовые характеристики, но одновременно снижающие физико-механические показатели камня.

Определено влияние концентрации коллоидной целлюлозы суспензии на изменение *растекаемости* гипсового теста. Эксперименты по растекаемости гипсового теста выполнялись с гипсом марки Г-5 при затворении водой технической и целлюлозно-водными суспензиями концентрацией 1,5 и 3,0%.

Приведенные на рис. 2 зависимости изменения диаметра растекания гипсового теста R при различных соотношениях вода (суспензия) / гипс G показали, что с увеличением концентрации коллоидной целлюлозы в суспензии растекаемость гипсового теста резко снижается.

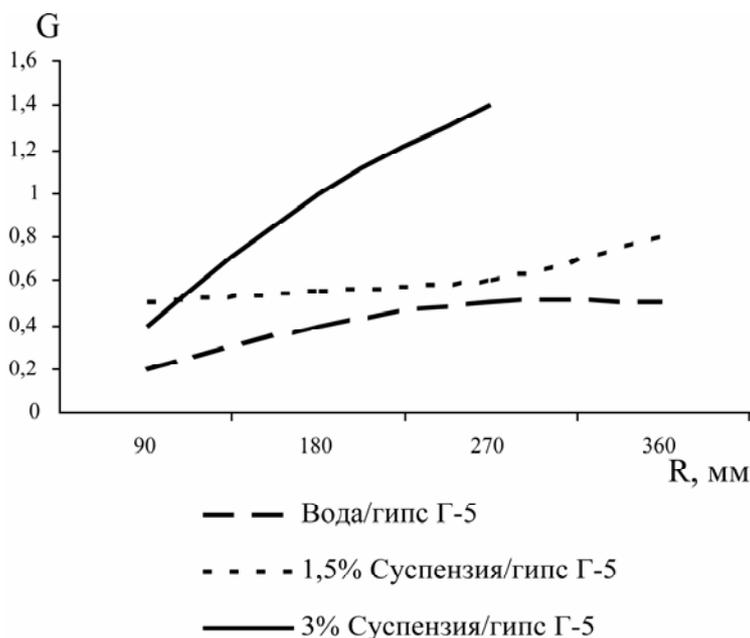


Рис. 2. Зависимость изменения диаметра растекания гипсового теста от изменения соотношения вода (суспензия) / гипс при варьировании затворителей.

Затем сравнивались результаты измерений *сроков схватывания* гипсового теста, приготовленного на воде и на суспензиях различной концентрации. Так, например, для гипса марки Г-5 с водогипсовым соотношением 0,45 при затворении водой сроки схватывания составляли: начало – 8 мин, окончание – 13 мин, а при затворении суспензией, содержащей 3% коллоидной целлюлозы, сроки схватывания изменились: начало – 9 мин, окончание – 16 мин. Это связано и с тем, что для приготовления гипсового теста нормальной консистенции с использованием 3% суспензии соотношение суспензия/гипс составляет 1:1.

Коллоидная целлюлоза связывает воду затворения, препятствуя быстрой гидратации гипсового вяжущего. Это даёт возможность более продолжительное время производить технологические операции с гипсовым тестом.

После определения оптимального соотношения суспензии и гипса для получения гипсового теста нормальной консистенции были изготовлены образцы-балочки стандартного размера 40x40x160 мм [8]. После сушки до постоянной массы производилось взвешивание образцов и определялась *плотность* сухого гипсобетона. Затворение гипса производилось суспензиями с содержанием коллоидной целлюлозы 2,0; 2,5; 3,0; 4,0%. Проведенные эксперименты дали возможность определить зависимость изменения плотности сухого гипсобетона ρ от содержания коллоидной целлюлозы C в суспензии затворения (рис. 3).

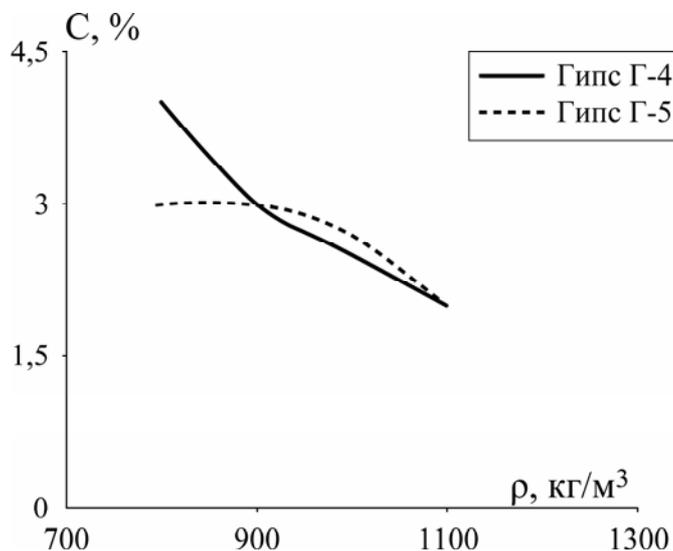


Рис. 3. Зависимость изменения плотности гипсобетона от содержания коллоидной целлюлозы в суспензии затворения.

Полученные образцы-балочки подвергались стандартным испытаниям согласно [8] – определялись пределы *прочности на растяжение* при изгибе и *прочности на сжатие*. Испытания осуществлялись через 2 часа после изготовления и после сушки до постоянной массы. Сопоставлялись прочностные характеристики гипсобетона, приготовленного с одинаковым соотношением суспензия/гипс, но с суспензиями из различных сортов бумаги. Сравнение характеристик позволило сделать вывод, что сорт бумаги, использованной для получения суспензии, не оказывает существенного влияния на физико-механические характеристики гипсобетона.

Кроме того, проверялось изменение прочностных характеристик гипсобетона в зависимости от изменения количества коллоидной целлюлозы, вводимой в гипсобетон. Изготавливались образцы-балочки из гипсобетонового теста нормальной консистенции. Для затворения гипса марок Г-4 и Г-5 использовались суспензии с содержанием коллоидной целлюлозы 2,0; 2,5; 3,0; 4,0%. Проведенная серия испытаний дала возможность определить зависимости изменения предела прочности на изгиб и сжатие от плотности гипсобетона (рис. 4, 5).

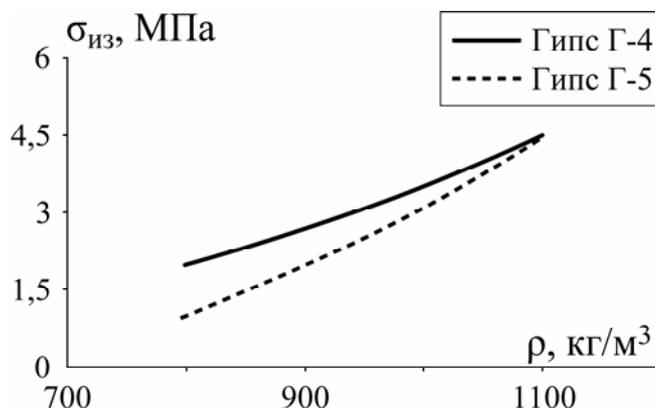


Рис. 4. Зависимость изменения предела прочности на изгиб от плотности гипсобетона.

Использование 1% суспензии для приготовления гипсового теста повышает прочность на растяжение при изгибе на 6–8% при снижении веса на 5–6% по сравнению со стандартными водогипсо-

выми образцами. Дальнейшее увеличение содержания коллоидной целлюлозы приводит к снижению как плотности, так и физико-механических характеристик. Оказалось, при содержании волокнистой добавки 2–3% из гипсового вяжущего марок Г-4 и Г-5 можно получить гипсобетон средней плотности 970–1080 кг/м³ с прочностью на сжатие 4,57-7,62 МПа. Такие составы гипсобетона могут использоваться для изготовления полосовых перегородочных плит, для устройства «тёплой» штукатурки, теплоизоляции.

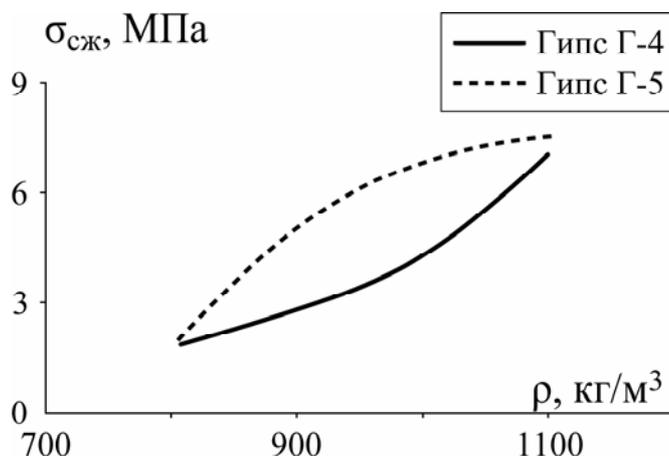


Рис. 5. Зависимость изменения предела прочности на сжатие от плотности гипсобетона.

Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Физико-технологические характеристики гипсобетона, приготовленного с различным содержанием целлюлозной составляющей

Шифр серий образцов	Концентрация суспензии, %	Соотношение суспензия / гипс	Сроки схватывания, нач./кон.	Масса волокна в образце, г	Масса гипса, г	Марка гипса
I-1	2	0,66	9/14	3,19	242,16	Г-5
I-2	2	0,66	9/14	3,24	245,78	
I-3	2	0,66	9/14	3,20	242,70	
Среднее				3,21	243,50	
II-1	2,5	0,73	9/15	4,15	227,7	Г-5
II-2	2,5	0,73	9/15	4,14	227,1	
II-3	2,5	0,73	9/15	4,15	227,7	
Среднее				4,146	227,5	
III-1	3	1	9/16	5,55	185,0	Г-5
III-2	3	1	9/16	5,56	186,0	
III-3	3	1	9/16	5,52	184,0	
Среднее				5,55	185,0	
IV-1	2	0,618	10/15	2,88	232,0	Г-4
IV-2	2	0,618	10/15	2,91	236,0	
IV-3	2	0,618	10/15	2,85	231,0	
Среднее				2,88	233,0	
V-1	2,5	0,706	10/16	3,69	209,0	Г-4
V-2	2,5	0,707	10/16	3,77	212,0	
V-3	2,5	0,707	10/16	3,65	207,0	
Среднее				3,69	209,0	
VI-1	4	0,990	10/18	6,68	169,0	Г-4
VI-2	4	0,990	10/18	6,80	169,0	
VI-3	4	0,990	10/18	6,68	172,0	
Среднее				6,72	170,0	

Таблица 2. Физико-механические характеристики гипсобетона, приготовленного с различным содержанием целлюлозной составляющей (свойств образцов-балочек)

Шифр серии образцов	Через 2 часа		Высушенных до постоянной массы		
	Прочность, МПа		Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	
	При изгибе	При сжатии		При изгибе	При сжатии
I-1	2,01	2,56/2,61	1074	5,04	8,1/8,4
I-2	1,98	2,43/2,39	1085	4,94	7,91/7,6
I-3	2,03	2,81/2,76	1074	5,01	8,9/8,5
Среднее	2,00	2,59	1077	4,98	8,18
II-1	1,26	1,78/1,85	1019	4,31	7,5/7,8
II-2	1,25	1,69/1,74	1000	4,02	6,95/7,01
II-3	1,28	1,95/1,89	1015	3,98	7,31/7,2
Среднее	1,26	1,81	1011	4,10	7,29
III-1	0,98	1,01/0,97	855	1,87	4,23/3,85
III-2	1,06	1,12/1,14	851	1,82	3,65/4,15
III-3	1,01	1,06/1,10	839	1,79	3,94/4,05
Среднее	1,017	1,06	848	1,83	4,07
IV-1	1,97	2,37/2,13	1079	4,67	7,47/7,60
IV-2	1,89	2,13/2,20	1094	5,17	7,60/7,80
IV-3	1,93	2,20/2,16	1074	5,34	7,47/7,80
Среднее	1,93	2,18	1080	5,06	7,62
V-1	1,27	1,44/1,36	977	4,12	4,80/4,67
V-2	1,20	1,44/1,44	957	3,82	4,67/4,13
V-3	1,24	1,40/1,44	977	3,83	4,47/4,67
Среднее	1,24	1,42	970	3,92	4,57
VI-1	0,94	0,72/0,65	780	2,19	2,47/2,13
VI-2	0,87	0,72/0,79	780	1,98	2,13/2,27
VI-3	0,81	0,72/0,72	800	2,27	2,27/2,27
Среднее	0,91	0,72	797	2,15	2,27

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность использования электроразрядной обработки для получения устойчивых водных суспензий отходов бумажного производства.

Выявленные закономерности дают возможность наметить области применения электроразрядного метода в производстве гипсовых изделий – для изготовления изделий повышенной прочности необходимо получать ЭР методом бумаговолоконные суспензии с низким содержанием твердой фазы. Затворение гипсового вяжущего такой суспензией повышает его марочность, однако в этом случае экономия гипсового вяжущего будет незначительной.

В случае использования суспензии с содержанием твёрдой фазы в пределах 3–6% можно существенно облегчить изделие, однако при этом его прочностные характеристики снижаются из-за увеличения пористости.

Определены оптимальные параметры процесса ЭР получения таких суспензий в порционном режиме. На основе полученных водно-целлюлозных суспензий получены образцы гипсовых изделий плотностью 800–1100 кг/м³ с пределом прочности на сжатие 3,0–8,0 МПа при экономии гипсового вяжущего до 20%. Такой диапазон физико-механических характеристик строительных материалов позволит изготавливать облегченные строительные изделия при существенном ресурсосбережении за счет эффективного использования вторичного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Файнер М.Ш. *Новые закономерности в бетоне и их практическое применение*. К.: Наукова думка, 2001. 448 с.
2. Ясиевич Г.Н. *Электрогидравлический эффект в строительстве*. Горький: изд. ГГУ, 1988. 68 с.
3. Круглицкий Н.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П. *Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях*. К.: Наукова думка, 1983. 192 с.

4. Малюшевский П.П. *Основы разрядно-импульсной технологии*. К.: Наукова думка, 1983. 272 с.
5. Malyushevskaya A.P., Yushchishina A.N., Malyushevskii P.P. Electrodischarge Activation of Sand Slime to Temper Cementitious Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, **47**(2), 185–188.
6. Малюшевский П.П., Гуйтур В.И., Шиян Л.П., Кривицкая З.К., Голубенко Ю.Г. Свойства цементно-песчаных растворов, затворенных на активированной электрическими разрядами воде. *Электронная обработка материалов*. 1989, (2), 26–27.
7. Горовенко Г.Г., Жекул В.Г., Ляпис Д.Н., Малюшевский П.П., Муха А.Г., Швец И.С. Электро-взрывное кондиционирование бетона буронабивных свай. *Электронная обработка материалов*. 2004, **40**(4), 91–95.
8. ГОСТ 23789-79. *Вяжущие гипсовые. Методы испытаний*.

Поступила 02.02.12

Summary

The results of experimental studies of the processes of electric discharge treatment of water-cellulose suspensions for tempering of gypsum bonders are presented. A possibility to apply electric discharge technologies for processing cellulose-containing recycled materials is determined, as well as for the subsequent use of mixing suspensions activated by electric discharge as starting components for the production of gypsum constructional products.
