

УДК 666.972.035.51-413

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ; канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЁНОВА
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены методы повышения активности воды как основного компонента бетонной смеси. Выявлена нестабильность получаемых результатов при использовании для повышения активности воды электрического тока с разными характеристиками. Приведены данные влияния на результаты активации воды сезонных условий ведения работ. Проанализированы теоретические аспекты механизма электроактивации воды затворения как сложной аномальной структуры исходя из её особенностей. Выявлено, что из-за сложности подбора режимов электроактивации во многих случаях целесообразно использовать более энергоёмкие методы электроактивации цементных суспензий. Приведены данные по меньшей степени зависимости результатов электроактивации цементных суспензий по сравнению с электроактивацией воды затворения от сезонности производства работ.

Ключевые слова: бетонные смеси, затворение, электроактивация, подбор режимов, эффективность.

При возведении или усилении монолитных конструкций, определяющих темп и сроки реконструкции зданий и сооружений в целом, часто, особенно при производстве работ при пониженных и отрицательных температурах, возникает ситуация, когда распалубочная прочность бетона оказывается недостаточной для загрузки конструкций со скоростью, обеспечивающей необходимый темп работ исходя из сроков ввода объекта в эксплуатацию.

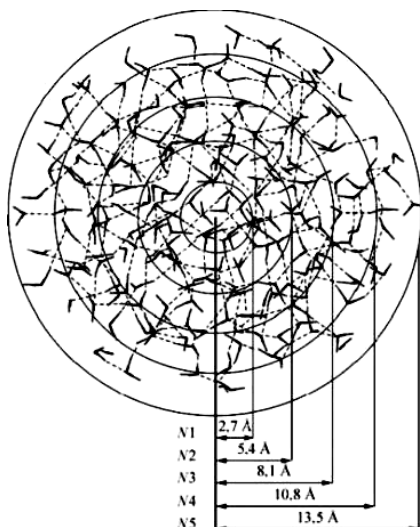
Для обеспечения необходимого режима твердения бетона в зависимости от многих факторов используют разные методы термообработки. Несмотря на большое разнообразие методов термообработки, их высокую эффективность и экономичность, получить 80% и более проектной прочности в ранние сроки методами прогрева бетона весьма проблематично. Для этих целей необходимо разрабатывать новые технологические решения, касающиеся повышения активности компонентов цементных систем. Один из вариантов – использование воды, применяемой для затворения бетонной смеси, подвергнутой обработке электромагнитным воздействием. Вода является одним из основных активных компонентов бетонной смеси, состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Но в природе существует три устойчивых изотопа водорода (протий, дейтерий, тритий) и три изотопа кислорода, поэтому может быть восемнадцать разновидностей воды. Свойства существующей в природе воды во многом аномальны – высокая теплоемкость и диэлектрическая проницаемость, изменение объема и плотности при переходе воды в твердую фазу, способность диссоциации и др. Как показывает анализ данных [1], при электрообработке у воды изменяется величина поверхностного натяжения, окислительно-восстановительный потенциал, водородный показатель, диэлектрическая постоянная. Причем, меняя параметры, можно целенаправленно изменять и свойства, к примеру, скорость и направление химических реакций. Это в первую очередь связано с повышением внутренней энергии воды и растворенных в ней веществ. Но вода имеет сложную внутреннюю структуру, а ее физические свойства зависят от многих факторов.

Полностью соответствует формуле H_2O лишь вода, находящаяся в парообразном состоянии. В температурном интервале от 0 до 100 °С концентрация отдельных (мономерных молекул) жидкой воды не превышает 1%. Все остальные молекулы воды объединены в ассоциаты различной сложности, и их состав описывается общей формулой $(\text{H}_2\text{O})_x$. Непосредственной причиной образования ассоциатов являются водородные связи. Они возникают между ядрами водорода одних молекул и электронными «сгущениями» у ядер кислорода других молекул воды. Эти связи в десятки раз слабее, чем «стандартные» внутримолекулярные химические связи, и достаточно обычных движений молекул, чтобы разрушить их. Под влиянием тепловых колебаний также легко возникают и новые связи этого типа. Возникновение и распад ассоциатов описывается формулой: $x \cdot \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow (\text{H}_2\text{O})_x$.

При этом наличие коллективного движения характеризует способность молекул воды образовывать кластеры – группы молекул $(\text{H}_2\text{O})_x$. Под кластером обычно понимают группу атомов или молекул, объединенных физическим взаимодействием в единый ансамбль (рисунок), но сохраняющих внутри него индивидуальное поведение [2; 3].

Данные математического моделирования применительно к жидкой воде позволяют считать, что наиболее вероятной является однородно-континуальная модель воды с трехмерной «открытой» пространственной сеткой из молекул, содержащих искривленные и разорванные водородные связи [4]. Работы Г.Г. Маленкова [5] показали, что молекулы воды соединены водородными связями, образующими непрерывную трехмерную сетку. Вода представляет собой равновесную систему, которая за 10^{-19} секунд после снятия внешних воздействий должна самопроизвольно вернуться в исходное состояние. Различные внешние воздействия могут привести к изменению свойств воды, которые сохраняются в течение опре-

деленного времени и оказывают влияние на процессы, происходящие с участием воды. Изучение воздействий внешнего электрического поля на воду затворения [6; 7] показало, что оно ускоряет сроки схватывания и увеличивает прочность цементного камня. Регулирование параметров обработки, например, таких как напряженность поля, плотность тока, время обработки и др., позволяет управлять твердением и физико-механическими свойствами вяжущих материалов.



Кластер из 216 молекул воды с выделенными слоями толщиной 2,7 Å

мени года (природных условий), поэтому испытания проводились в разное время года. Данные экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние видов обработки на подвижность бетонной смеси и прочность бетона при изготовлении смеси в разное время года

Вид обработки	Подвижность бетонной смеси, см			Прочность бетона, МПа		
	Период изготовления			Период изготовления		
	весна	лето	осень	весна	лето	осень
Напряженность поля 25 В/см; продолжительность обработки 6 минут	12,5	12,5	13,0	27,0	27,3	24,7
Изменение водородного показателя воды затворения ($pH \leq 3$ и $pH \geq 11$)	12,0	11,5	12,5	28,1	26,9	25,4
Вода, не подвергнутая обработке	11,0	11,0	11,0	23,4	23,4	23,4

Как показывают результаты исследований, разные виды обработки по-разному влияют как на подвижность бетонной смеси, так и на прочность бетона. Также наблюдается зависимость величины воздействия обработки от времени года, что в принципе логично, так как для затворения используется не питьевая очищенная вода, а вода, удовлетворяющая требованиям нормативов, и количество ионов в ней может меняться в зависимости от времени года.

Работы многочисленных авторов [8; 10 и др.] позволяют утверждать, что при использовании электрообработки воды возрастает прочность бетонных изделий, увеличивается пластичность бетонной смеси. Несмотря на перспективность данного направления, оно не получило широкого развития. Одна из причин – нестабильная воспроизводимость результатов, в частности из-за сезонных условий изготовления бетонных смесей. Также существенным недостатком данного метода является сложность нахождения оптимальных режимов электрообработки (напряженность электрического поля, плотность тока, продолжительность обработки), которые, в свою очередь, зависят от множества других параметров (свойства используемых материалов, физико-химических характеристик исходной воды, температуры среды и пр.). Их можно определить только экспериментальным путем в заводских условиях, то есть в каждом конкретном случае они будут меняться, что значительно снижает возможность широкого распространения данного метода активации.

Ученые И.Н. Ахвердов, Б.А. Крылов, А.Н. Ли и другие объясняют воздействие электрического поля на процессы гидратации и структурообразования рядом факторов, важными из которых являются: *оптическая анизотропность новообразований*, что свидетельствует, в частности, об их диэлектрической анизотропности (диэлектрическая проницаемость в направлении трех главных осей соответственно равна 11; 12; 5,4); ярко выраженная *анизотропия формы*; существенные различия *диэлектрических постоянных*

твердой фазы (от 5 до 15) и жидкой (от 5 до 81) в твердом цементном камне. По данным их исследований, в водных коллоидах и суспензиях под действием низкочастотного поля наблюдаются макроскопические эффекты двух видов: колебание частиц твердой фазы, вызванное электрофорезом; их ориентация относительно силовых линий поля. Исследования также подтверждают, что кратковременная контактная и бесконтактная обработка твердеющего цементного теста в электрическом поле переменной частоты приводит к заметному изменению конечной прочности цементного камня.

В ряде своих работ А.И. Бирюков установил влияние электрического поля на физико-химические процессы гидратации цемента и структурообразования цементного камня при предварительной электрообработке бетонной смеси и воды затворения для бетона.

Данные, свидетельствующие о приросте прочности вяжущих при их обработке переменным электрическим током приводятся в работе [13]. Здесь же отмечается, что при частоте 50...100 Гц возникает электрическая ориентация у частиц размером $5 \cdot 10^{-8}$... $2 \cdot 10^{-6}$ м. На влияние электрического тока частотой 50 Гц указывается в работе [14]. Авторы этих работ указывают также и на величину напряжения, которая, по их мнению, зависит от момента времени приложения воздействия до или после начала структурообразования. По данным работы [13], обработку рекомендуется проводить электрическим током напряженностью 250...350 В/м, при этом продолжительность воздействия находится в пределах 0,1...0,15 длительности индукционного периода. Вместе с тем имеются данные, позволяющие сделать вывод о том, что начальная активация должна осуществляться в течение первых минут, так как более длительное энергетическое воздействие может привести к уменьшению достигнутых эффектов упрочнения камня. На положительное влияние обработки переменным электрическим током указывают авторы работ [15]. Для исследования они использовали ток с частотой 850...1250 Гц. Обработка велась в течение 10 мин при плотности тока $0,4 \text{ А/м}^2$, при этом повышение прочности составляет около 20%. Положительно влияет на прочность бетона и его предварительная обработка переменным током, полученным путем суммирования тока, изменяющегося по синусоидальному закону, и тока, изменяющегося по синусоидальному закону в области от $(0,5\omega^{-1} + \pi n) \geq t \geq (5 \cdot 10^{-2}\omega^{-1} + \pi n)$ до $(0,5\omega^{-1} + \pi n) \geq t \geq (0,46\omega^{-1} + \pi n)$ [16].

На основании вышеизложенного можно отметить, что нет однозначного мнения об эффективности использования переменного тока для обработки бетонных смесей, как нет и единых параметров выполнения обработки.

Положительный эффект также отмечают при различных комбинированных воздействиях, одной из составляющих которых является переменное электрическое поле или постоянное со всеми его разновидностями. Но и здесь не все однозначно. К примеру, автор работ [17] придерживается мнения, что постоянный ток переменной полярности, проходя через цементные системы, способствует глубине гидратации цементных зерен, ускоряет прохождение химических реакций и вызывает ряд сопутствующих явлений – электроосмос, электрофорез, которые положительно влияют на ускорение твердения бетона.

Имеются данные по сокращению сроков схватывания с 50...60 до 6...8 мин с одновременным увеличением конечной прочности при применении для обработки постоянного тока переменной полярности [17]. При применении постоянного тока без перемены полярности, по данным одних авторов, наблюдается сброс прочности, конечная величина которой находится в прямой зависимости от количества, пройденного через бетон электричества. По другим источникам, имеет место ухудшение свойств бетона, подвергнутого такому виду обработки.

Таким образом, отсутствует стабильность полученных результатов, труднообъясним и сам результат, так как известно, что постоянный ток переменной полярности есть составная часть постоянного тока вообще. Также необходимо отметить, что практически все данные были получены при повышенных напряжениях, при которых возможно протекание тех же процессов, что и при применении постоянного тока.

На протяжении последних лет в различных отраслях промышленности находят применение разрядно-импульсные методы, основанные на быстрой передаче энергии электрического поля обрабатываемой среде. Это характерно и для технологии бетонных работ, где также разрабатываются и внедряются различные варианты электроактивации с использованием электрического разряда. Одним из возможных вариантов является обработка компонентов бетонной смеси высоковольтным электрическим разрядом [18]. В этом случае обработке может подвергаться цементно-водная суспензия. Для обработки используются импульсы с частотой 1...10 Гц, длительностью 10^{-3} ... 10^{-5} с, напряжением на электродах до 10 кВ. В результате после использования активированной цементно-водной суспензии для приготовления бетонной смеси прочность изделий из них возрастает до 30%.

Автор работы [19] приводит данные о том, что при обработке уложенного бетона в момент начала схватывания цемента электрическим импульсом длительностью 10...60 с, напряженностью 18 кВ/м его прочность повышается в среднем до 30%.

Согласно данным работы [20], повышение прочности растворной смеси достигает 30% при её обработке импульсным электрическим полем высокого напряжения в пределах 50...60 кВ. При этом длительность обработки составляет 10 мин при напряженности поля в растворной смеси 1 В/м. Время приложения воздействия должно совпадать с периодом начала схватывания растворной смеси.

Для сравнения эффективности разработанных способов нами проведены исследования с использованием различных технологий обработки. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние видов обработки на подвижность бетонной смеси и прочность бетона

Вид обработки	Подвижность, см			Прочность бетона, МПа		
	Период изготовления			Период изготовления		
	весна	лето	осень	весна	лето	осень
Знакопеременным полем с реверсированием полярности, напряженность 430 В/м	12,0	12,0	11,0	27,8	30,0	30,0
Высоковольтным электрическим разрядом с напряжением на электродах 8,5 кВ	12,5	12,0	11,5	27,4	27,0	27,3
Электрическим импульсом с напряженностью 18 кВ/м	12,5	12,5	13,0	27,6	27,5	30,0
Импульсы с частотой 1...10 Гц длительностью 10^{-3} ... 10^{-5} с, напряжением на электродах до 10 кВ	13,0	13,5	13,5	27,3	27,0	30,0
Без обработки	11,0	11,0	11,5	23,4	23,4	23,0

В большинстве работ механизм электроактивации объясняется удалением продуктов гидратации с поверхности цементных частиц за счет энергии электрического поля или аффектов, сопутствующих прохождению электрического тока через цементную систему.

При удалении продуктов гидратации от зерен цемента они перемещаются из водной среды с большей плотностью в водную среду с меньшей плотностью. Вода, имеющая разную плотность, по данным исследований, имеет и другие различия. К примеру, диэлектрическая постоянная у воды с плотностью 2000 кг/м³ составляет от 2 до 3. Различие в диэлектрической проницаемости означает, что ее полярность при разной плотности также различна. При разной полярности растворимость жидкостей друг в друге ограничена, поэтому на границе раздела фаз с разной плотностью возникает пограничное или межфазное натяжение. Для отвода продуктов гидратации необходимо преодолеть силу поверхностного натяжения. Значение необходимого для этой цели градиента напряжения электрического поля в первом приближении может определиться по зависимости, полученной с использованием формулы Бачинского, и зависимости параметров пленочной воды, представленных в работах Н.П. Блещика.

В соответствии с кинетической теорией электропроводности электролитов движение ионов происходит не плавно, а скачкообразно, из одного положения равновесия в другое. Такое движение возможно после получения ионом (частицей) определенного количества энергии, достаточного для преодоления работы сил поверхностного натяжения и занятия нового энергетического уровня. До момента приложения электрического поля частица или ион находятся в тепловом движении, следовательно, обладают определенной энергией. Связь средней кинетической энергии частиц с температурой описывается распределением Максвелла. Для эффективного отвода продукты реакции должны получать энергию в момент начала воздействия, тогда энергия всей системы (уровней) не будет повышаться, а энергия электрического поля в основном будет расходоваться на перемещение продуктов взаимодействия.

Заключение. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие *выводы*:

1) принимая за основу однородно-континуальную модель воды с трехмерной «открытой» пространственной сеткой из молекул, содержащих искривленные и разорванные водородные связи, напоминающие планетарную модель атома, можно объяснить данные по увеличению подвижности и прочности отводом отдельных молекул H₂O от кластера. При отводе за счёт увеличения электрическим полем энергии молекул H₂O, от кластера увеличивается количество несвязанных молекул H₂O, а это приводит к увеличению подвижности бетонной смеси;

2) за счёт уменьшения размеров кластеров уменьшается толщина сольватных оболочек, создавая тем самым условия для роста прочности;

3) при электроактивации цементных суспензий заряд цементной частицы формирует упорядоченное расположение водных кластеров, что приводит к более управляемому процессу активации и стабилизации данных экспериментов. При этом благодаря большому заряду цементных частиц уменьшается величина воздействия посторонних ионов на электромагнитное поле, используемое для электроактивации. С этим связано и то, что при электроактивации цементных суспензий отсутствует фактор времени года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Латышев, В. Неожиданная вода / В. Латышев // Изобретатель и рационализатор. – 1981. – № 2. – С. 20–22.
2. Волошин, В.П. Выявление коллективных аффектов в компьютерных моделях воды / В.П. Волошин, Г.Г. Маленков, Ю.И. Наберухин // Журнал структурной химии. – 2007. – Т. 48. – С. 1133–1138.

3. Тытик, Д.Л. Молекулярные процессы в водном кластере / Д.Л. Тытик // Журнал структурной химии. – 2007. – Т. 48. – С. 921–925.
4. Дьяконова, Л.П. Моделирование структуры жидкой воды методом Монте-Карло / Л.П. Дьяконова, Г.Г. Маленков // Журн. структурной химии. – 1979. – Т. 20. – С. 854–861.
5. Маленков, Г.Г. Структура и динамика жидкой воды / Г.Г. Маленков // Журн. структурной химии. – 2006. – Т. 47. – С. 5–35.
6. Повх, И.Л. Магнитная и электролитическая обработка воды при производстве бетона / И.Л. Повх, В.Б. Совпель, И.А. Бычин // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. – М. : Цветметинформация, 1971. – С. 227–229.
7. Юдина, А.Ф. Электрообработка воды затворения для приготовления бетонной смеси / А.Ф. Юдина, А.И. Борец // Современная технология производства бетонных работ в строительстве : материалы семинара. – Л., 1983. – С. 67–71.
8. Евдокимов, В.А. Об использовании электрообработки в технологии строительного производства / В.А. Евдокимов, О.В. Смирнов, А.Ф. Юдина // Исследования технологии строительных процессов : межвуз. темат. сб. тр. – Л. : ЛИСИ, 1982. – С. 5–14.
9. Круглицкий, Н.Н. Исследование влияния активированной воды затворения на физико-механические свойства и реологические характеристики бетонной смеси / Н.Н. Круглицкий, Е.В. Глуховская, О.З. Тейхман // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи : тез. докл. IV Всесоюз. симп. – Юрмала, 1982. – С. 192–195.
10. Капранов, В.В. Влияние ионизации воды затворения на гидратацию вяжущих веществ / В.В. Капранов, Н.И. Горбунов // Исследование процессов образования дисперсных структур. – Минск, 1971. – С. 97.
11. Пилипенко, В.В. К вопросу влияния обогащения воды затворения ионами OH^- и H^+ , механизм взаимодействия вяжущего с водой / В.В. Пилипенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1973. – № 1. – С. 34–36.
12. Грановский, М.Г. Электрообработка жидкостей / М.Г. Грановский, И.С. Лавров, О.В. Смирнов. – Л. : Химия, 1976. – С. 45.
13. Вершинин, Ю.Н. О влиянии переменных электрических полей на процессы кристаллизационного структурообразования в водных пересыщенных растворах / Ю.Н. Вершинин // Кристаллизация и фазовые переходы : сборник. – Минск : Акад. наук БССР, 1962. – С. 133–141.
14. Norton, F.I. Influence of frequency on the electrooptical effect on colloids / F.I. Norton // Phys Rev. – 1939. – 56 с.
15. Бирюков, А.И. Исследование влияния частоты электрического поля на твердение вяжущих / А.И. Бирюков, А.Н. Плугин, А.П. Старосельский // Коллоидный журнал АН СССР. – 1980. – Т. XLII. – Вып. 2. – С. 326–329.
16. Способ возведения железобетонных конструкций и устройство для его осуществления : а. с. 1522814 СССР, МКИ 4E04 G9/10 / А.П. Шведов, С.С. Атаев, Л.Ф. Калмыков, К.А. Кунцевич, В.С. Войтенков, И.П. Шведов, А.Н. Леонович (СССР). – № 4262761/29-331. – Заявл. 15.06.87.
17. Степаненко, М.Г. Формирование цементного камня при электрохимической активации / М.Г. Степаненко // Тр. ХИИТА. – Вып. 2. – Харьков : Харьк. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1966. – С. 72–74.
18. Файнер, М.Ш. Энергосберегающие модификаторы цементов и бетонов / М.Ш. Файнер // Энергосбережение в строительстве : тез. докл. науч.-техн. конф. – Киев-Черновцы, 1996. – С. 64–85.
19. Клименко, В.М. Электрофизическая обработка бетонных смесей с химическими добавками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.10; 02.00.05 / В.М. Клименко ; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2002. – 17 с.
20. Данилова, Ю.С. Активация цементных растворов при воздействии электрического поля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Ю.С. Данилова ; Самар. гос. архитектурно-строительная акад. – Самара, 2002. – 19 с.

Поступила 10.10.2016

ELECTRIC ACTIVATION METHODS OF CONCRETE MIXTURES AND THEIR EFFICIENCY

A. SHVEDOV, L. PARFENOVA

The methods of increasing the activity of the main component of the concrete mix-water are analyzed. The instability of the results when used for increasing the water activity of electric current with different characteristics is shown. The effect on the results of activation of water, seasonal conditions of the work is given. The analysis of the theoretical aspects of the mechanism of the electric activation of the mixing water on the basis of structural features of the mixing water as a complex anomalous structure is done. Due to the complexity of the selection of the modes of the electric activation in many cases, it is advisable to use more energy intensive methods of electric activation of the cement suspensions. The paper presents the data at least based on the results of electroactivation cement suspensions than electroactivity of mixing water from the seasonality of the work.

Keywords: concrete mix, mixing, electroactivity, selection of modes, efficiency.