

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 161–175.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 161–175.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.547;691.535

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175

EDN: DQJVSC

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ КОМПЛЕКСНЫМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ВОДОЦЕМЕНТНУЮ СУСПЕНЗИЮ

Георгий Анатольевич Непомнящев, Михаил Михайлович Титов

Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В связи с потребностью строительной отрасли в интенсификации различных технологических процессов (бетонных работ и пр.) необходимо достичь сокращения сроков набора требуемых прочностных показателей бетона (проектная, распалубочная, критическая прочность и др.). Актуальной является разработка технологий, позволяющих ускорить процесс набора требуемых прочностных показателей конструкций из бетонов и повысить прочностные показатели в конкретные интервалы времени выдерживания конструкций.

Проведен анализ существующих технологий активации цементных суспензий, бетонов и растворов. Выявлены наиболее перспективные и менее изученные направления повышения прочностных показателей цементосодержащих материалов.

Основной *целью* исследования является поиск и подбор, сочетание наиболее оптимального режима обработки водоцементной суспензии, позволяющего получить кратное увеличение прочности цементного камня в первые семь суток, по сравнению с образцами на основе необработанной суспензии. В дальнейшем это должно позволить значительно уменьшить сроки производства бетонных работ за счет сокращения сроков набора требуемой распалубочной прочности конструкций.

Методы. Применена комбинация методов электрофизического воздействия, направленная на разработку технологии повышения прочностных показателей и ускорение набора прочности образцов цементного камня. Комбинация включает несколько мето-

дов электрофизической активации на основе электрополяризационной обработки, электрогидравлического удара и ультразвуковой обработки.

Результаты. Экспериментально подтверждено повышение прочностных показателей цементного камня в результате применения предложенной авторами комплексной электрофизической обработки, а также показано оптимальное водоцементное соотношение, которое дает наибольший прирост прочности образцов в возрасте семи суток.

Ключевые слова: водоцементная суспензия, гидратация, прочность, поляризация, электрогидравлический эффект, ультразвуковая обработка, цементный камень

Для цитирования: Непомнящев Г.А., Титов М.М. Повышение прочностных показателей цементного камня комплексным электрофизическим воздействием на водоцементную суспензию // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 161–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175. EDN: DQJVSC

ORIGINAL ARTICLE

INCREASING CEMENT STRENGTH PROPERTIES WITH ELECTROPHYSICAL PROCESSING OF WATER-CEMENT SUSPENSION

Georgy A. Nepomnyashchev, Mikhail M. Titov

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. Due to the need of the construction industry for the intensification of various technological processes, it is necessary to reduce the time of specifying concrete parameters such as design, stripping, critical strength. It is relevant to develop technologies allowing to accelerate the process of setting the required strength parameters of concrete structures and increase them at specific time intervals.

Activation technologies of cement suspensions, concretes and mortars are analyzed. The most promising and less studied directions in the strength properties improvement are identified.

The aim of this work is to identify the physical impact on cement-containing materials to accelerate the strength gain in cement paste. A combination of several methods of electrophysical processing is used to develop the method of strength improvement and gain in cement paste. Electrophysical processing is based on electric polarization, electro-hydraulic shock and ultrasonic treatment.

The paper proposes the most optimum mode for the water-cement suspension treatment, which provides a multiple increase in the strength gain in the first seven days, compared to the untreated suspension.

The proposed electrophysical processing significantly improves the strength of hydrated cement and the best water-cement ratio is obtained to highly increase the concrete strength after seven days.

Keywords: water-cement suspension, hydration, strength, polarization, electro-hydraulic effect, ultrasonic treatment, cement paste

For citation: Nepomnyashchev G.A., Titov M.M. Increasing cement strength properties with electrophysical processing of water-cement suspension. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 161–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175. EDN: DQJVSC

Введение

В строительстве остро стоит проблема необходимости сокращения длительных по времени сроков набора распалубочной прочности бетона в монолитных конструкциях. Интенсифицировать процесс набора прочности бетонных конструкций возможно несколькими способами, одним из которых является способ активации компонентов, входящих в составы бетонов и растворов.

Активность портландцемента зависит от следующих факторов: минералогический состав, удельная поверхность цементных зёрен, наличие химических добавок и компонентов, вводимых в смесь [1].

Основными направлениями активации являются:

1. Химические методы: введение различных добавок (микрокремнезём [2, 3], зола-унос [4, 5, 6], каменная и известняковая мука [7, 8] и др.).

2. Механические методы: ультразвуковая обработка [9, 10], электрообработка, магнитная, плазменная [11, 12, 13, 14], вакуумная [15] и другие виды обработки.

3. Комбинированные методы: механотермическая, плазмохимическая, электрохимическая [11, 12, 13, 14] и другие виды обработки.

Анализ предшествующих исследований с учетом современных реалий показал, что наиболее перспективными для дальнейшего исследования являются способы на основе концентрации энергии электрических полей. Данные методы лежат в русле научно-технического прогресса, предполагающего использование концентрированной энергии для технологических целей и разработку устройств концентрации энергии. Например, лазерные, аддитивные, литографические технологии, т. е. технологии 6-го технологического уклада.

Особый интерес вызвали методы электрофизической активации различных материалов, изучаемые еще в 30-х гг. XX в. Л.А. Юткиным [11, 12]. В дальнейшем изучением этих методов занимались в ТГУ В.И. Курец [14], Б.В. Семкин [16], в ТГАСУ В.Н. Сафронов [13] и др. Вместе с тем все выше-названные исследователи использовали какое-то одно электрофизическое воздействие на различные материалы, и полученные ими величины прироста конечной прочности, как правило, укладывались в диапазон 10–30 % на водцементных суспензиях и 15–25 % на бетонах.

Поскольку любой технологический процесс основан на реализации какого-либо физического закона или эффекта, то и создание новой технологии, как правило, начинается с изучения и разработки физической основы нового технологического процесса.

Объект исследования – трехфакторное воздействие электрофизическими методами на объем водцементной суспензии.

Предмет исследования – величина получаемой прочности цементного камня в Н/мм², достигнутая в результате тех или иных электрофизических воздействий.

Целью проводимого исследования является получение кратного повышения прочностных показателей цементного камня путем применения электрофизических воздействий на водцементную суспензию.

В соответствии с заявленной целью сформулированы следующие задачи:

1. Исследование различных электрофизических воздействий на водоцементную суспензию, позволяющих повысить прочность цементного камня.

2. Подбор оптимального комплекса активационных воздействий, позволяющего получить кратное повышение прочностных показателей цементного камня.

3. Экспериментальное выявление степени влияния водоцементного соотношения активированной суспензии на конечную прочность в сравнении с контрольными образцами и предварительное теоретическое объяснение полученных результатов.

Для решения поставленных задач были изучены перспективные методы и разработаны лабораторные установки активации, на которых проводились экспериментальные исследования.

Наибольшим потенциалом для дальнейшего развития обладают методы на основе электрогидравлического удара [11, 12] на водоцементную систему и метод электрополяризационного воздействия на используемые материалы, достаточно широко применяемый в смежных отраслях знаний [17]. В совокупности с этими методами можно использовать достаточно хорошо изученный метод ультразвуковой обработки смеси [9, 10]. Эти методы хорошо изучены, но их одичное применение к обработке материалов любого типа дает низкий конечный эффект, не превышающий 15–35 % прироста прочностных показателей.

Наиболее эффективно использовать электрополяризационную обработку во время затворения, электроимпульсную обработку – после затворения, ультразвуковое воздействие применять на заключительном этапе, после электроимпульсной обработки.

Данная последовательность вытекает из очевидной физико-химической основы стадий растворения и набора прочности образующегося цементного камня.

На первом этапе – растворение цементного зерна – предполагается применение электрополяризационной технологии.

На основе изучения способа электрополяризации для увеличения глубины проникновения взаимодействующих материалов установлено, что при воздействии на цементосодержащую смесь высоким электростатическим напряжением в ней происходит ориентация молекул воды, поляризация двойного электрического слоя дисперсных частиц, электризация поверхностных зерен [18]. Это приведет к снижению энергии активации процессов гидратации и нуклеации [19, 20]. В результате может быть модифицирована структура новообразований цементного камня и контактной зоны, что даст более высокие показатели его физико-механических свойств.

До смешивания цемента и воды предполагается предварительный заряд разноименными потенциалами цементного порошка и воды затворения, чтобы с дальнейшей подачей цемента через зону высокой напряженности электрического поля к заряженной противоположным знаком воде происходило более глубокое естественное смачивание цемента. Последующее за смачиванием немедленное перемешивание позволяет более равномерно по объему распределить подвергнутые поляризации частицы цемента. В связи с тем, что цементу придается положительный потенциал, а воде отрицательный, из ранее про-

веденных исследований [18, 21] следует, что сила их взаимодействия увеличивается и реакция гидратации протекает более интенсивно.

Приготовленная таким образом водоцементная суспензия перемещается для последующей обработки электроимпульсным воздействием в реактор активации [22].

Электроимпульсное воздействие подразумевает на основе второго закона Ньютона ударное воздействие значительной интенсивности на обрабатываемую суспензию вследствие того, что само время воздействия крайне мало – сотни фемтосекунд, что даже при незначительных размерах цементных зерен и возникающих колоссальных ускорениях создает импульс невероятно большой мощности. Этот процесс сопровождается резким повышением давления, возникновением электромагнитных полей и появлением различного рода излучений: ультразвукового, светового, теплового, ультрафиолетового и рентгеновского [11, 12]. Но основным воздействием является импульс высокого давления, возрастающий мгновенно и создающий мощную ударную волну, воздействующую на цементные зерна. Это уменьшает размеры частиц за счет их раскалывания, трения, и впоследствии происходит открытие дополнительных площадей взаимодействия воды и цементного клинкера, что приводит к увеличению скорости их взаимодействия [23].

Затем водоцементная суспензия перемещается на заключительный этап – ультразвуковую обработку.

Ультразвук способен генерировать акустическую кавитацию в жидкой среде, а кавитация является движущей силой химических реакций. Вследствие данного процесса в суспензии образуется большой рост и схлопывание газовых микропузырьков, по теории горячих точек получают микровзрывы [24]. Кроме этого, ультразвук снижает вязкость и поверхностное натяжение воды, что увеличивает ее проникающую способность и смачивание открывшихся поверхностей цементных зерен [25].

По известному физическому принципу суперпозиции суммарный эффект от трех различных по физической природе воздействий на водоцементную суспензию должен позволить получить заметно больший конечный эффект по приросту прочности цементного камня на сжатие, что в итоге, как конечная цель, позволит сократить срок набора требуемой (распалубочной) прочности бетона в конструкциях.

Эксперимент проводился на базе лаборатории кафедры ТОС НГАСУ (Сибстрин).

В целях проведения экспериментальной работы выполнены установки для электрополяризационной, электроимпульсной и ультразвуковой обработки.

Электрополяризационная обработка. Такая обработка выполнялась при помощи установки, принципиальная схема которой в разрезе представлена на рис. 1, на рис. 2 показан вид установки в плане, на рис. 3 – фотография одного из первых вариантов такой установки.

Компоненты цементной суспензии, воду и цемент, делят по массе на заранее рассчитанные порции, необходимые для получения требуемого водоцементного соотношения. Выполненные навески материалов помещают в специальные емкости для цемента 6 и для воды 7. Ёмкость с цементом 6 распола-

гается в непосредственной близости (на высоте на 10–15 % больше, чем высота пробоя воздушного промежутка при заданном напряжении) к поверхности воды в емкости 7. После подключения требуемого напряжения наблюдается равномерное движение емкости 6 над поверхностью воды. Происходит поляризация цементного порошка при просеивании цемента через металлическое сито внизу емкости 6 и последующее его оседание на поверхность поляризованной противоположным знаком воды. При этом выполняется непрерывное перемешивание в зоне 2 цемента, смоченного водой в зоне 3. Само перемещение вдоль емкости с водой происходит со скоростью, определяемой скоростью процесса смачивания цемента водой.

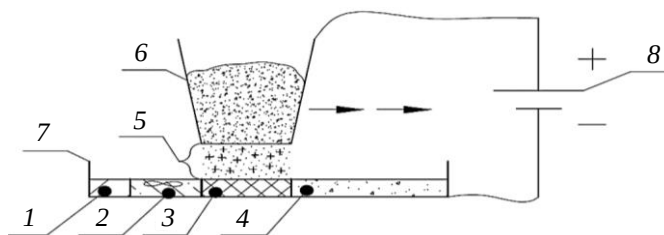


Рис. 1. Принципиальная схема поляризационной установки:

1 – зона обработанной водоцементной суспензии; 2 – зона смешивания просеянного цемента с водой; 3 – зона смешения противоположно заряженных цемента и воды; 4 – зона заряженной воды; 5 – зона напряженности высокого электрического потенциала; 6 – емкость с ситом в нижней горизонтальной плоскости для просеивания и поляризации цемента; 7 – емкость для поляризации воды; 8 – источник высокого напряжения (15 кВ)

Fig. 1. Schematic of polarization unit:

1 – treated water-cement suspension; 2 – sieved cement mixed with water; 3 – oppositely charged cement and water mix; 4 – charged water; 5 – high electric potential intensity; 6 – vessel with a sieve in the lower horizontal plane for cement sieving and polarization; 7 – vessel for water polarization; 8 – 15 kV source

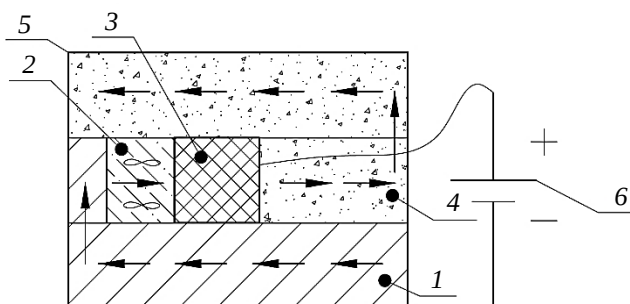


Рис. 2. Вид в плане схемы поляризационной установки:

1 – зона обработанной водоцементной суспензии; 2 – зона смешивания просеянного цемента с водой; 3 – зона смешения противоположно заряженных цемента и воды; 4 – зона заряженной воды; 5 – емкость для поляризации воды; 6 – источник высокого напряжения (15 кВ)

Fig. 2. Plan view of polarization unit:

1 – treated water-cement suspension; 2 – sieved cement mixed with water; 3 – oppositely charged cement and water mix; 4 – charged water; 5 – vessel for water polarization; 6 – 15 kV source

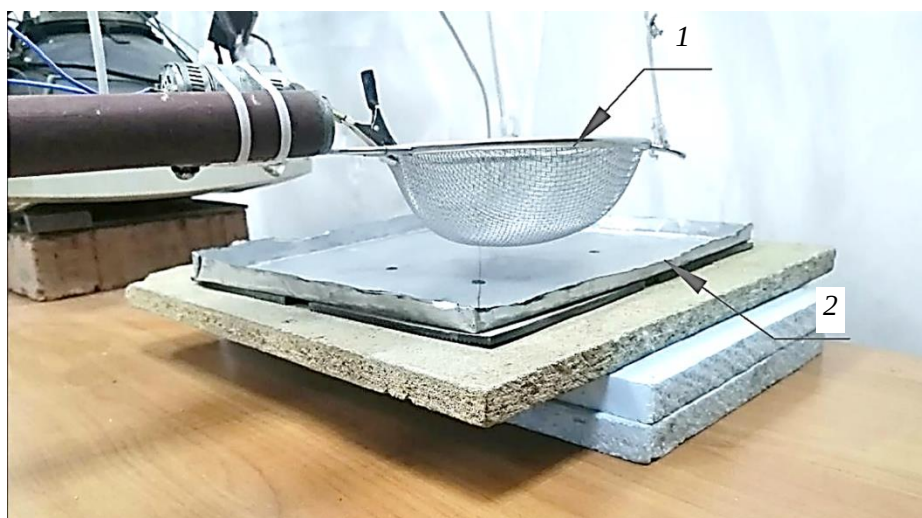


Рис. 3. Фото поляризационной установки:

1 – емкость с ситом в нижней горизонтальной плоскости для просеивания и поляризации цемента; 2 – емкость для поляризации воды

Fig. 3. Photograph of polarization unit:

1 – vessel with a sieve in the lower horizontal plane for cement sieving and polarization; 2 – vessel for water polarization

Представленная технологическая установка для выполнения поляризационной обработки запатентована авторами статьи.

После завершения процесса электрополяризации всего приготовленного объема суспензии его перемещают на следующий этап – электроимпульсную обработку.

Электроимпульсная обработка. Анализ ранее описанных в литературе устройств [11, 12, 13, 14] для электрогидравлического воздействия показал, что практически на всех устройствах воздействие производилось на применяемые материалы сверху или в объеме материала, но всегда при свободной (открытой) верхней горизонтальной поверхности, что значительно снижало образование вторичных волн воздействия на обрабатываемый материал. С целью усовершенствования технологии авторами данной работы был предложен и запатентован способ активации цементной суспензии [22]. Для более рационального использования энергии электрогидравлического удара (взрыва) обрабатываемый объем смеси помещают в жесткую металлическую камеру и сверху закрывают плотной металлической крышкой, при помощи которой предварительно создается избыточное давление.

Установка выполнена по схеме на рис. 4. Реактор активации представлен на рис. 5, а фото всей экспериментальной установки дано на рис. 6.

Цементная суспензия помещается в разрядную зону 2 в промежутке между разрядниками 1 (рис. 5), и ей придается небольшое избыточное давление посредством затягивания четырех болтов, расположенных по контуру реактора.

Затем включается источник высокого напряжения 1 (рис. 4), напряжение стабилизуется диодом 2, выполняется заряд конденсаторов 3. При достижении

требуемой величины заряда происходит пробой воздушного разрядника 4, замыкание цепи в реакторе активации 5, образуется электрический разряд в цементной суспензии (электрогидравлический удар), сопровождающийся комплексом сопутствующих явлений (резкое повышение давления в разрядной области; мощные импульсно возникающие кавитационные процессы; механические резонансные явления с амплитудами, позволяющими осуществлять взаимное отслаивание друг от друга многокомпонентных твердых тел; магнитное воздействие; ионизация суспензии). Время выполнения электрогидравлического удара от начала затворения цемента водой варьируется в зависимости от исходного сырья и целей обработки. Как правило, оптимальное время от смешивания компонентов сырья до начала обработки при использовании ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б АО «Искитимцемент» составляет 30–45 мин [22].

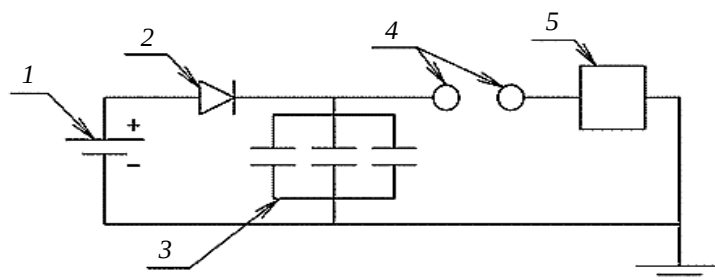


Рис. 4. Принципиальная схема установки электроимпульсной обработки водоцементной суспензии:

1 – источник высокого напряжения (15 кВ); 2 – высоковольтный диод; 3 – заряжаемые конденсаторы; 4 – воздушный разрядник; 5 – реактор активации

Fig. 4. Schematic diagram of electric pulse unit for treatment of water-cement suspension:

1 – 15 kV source; 2 – high voltage diode; 3 – chargeable capacitors; 4 – air-gap arrester; 5 – activation reactor

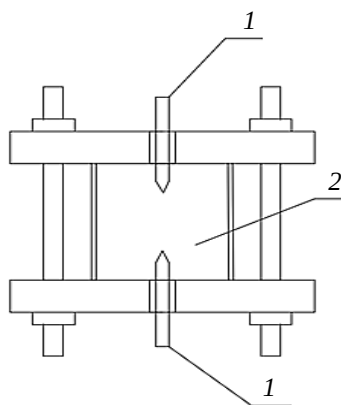


Рис. 5. Схема реактора активации:

1 – разрядники; 2 – разрядная область (зона активации водоцементной суспензии небольшим избыточным давлением)

Fig. 5. Schematic of activation reactor:

1 – dischargers; 2 – discharge area (water-cement suspension activation with slight overpressure)

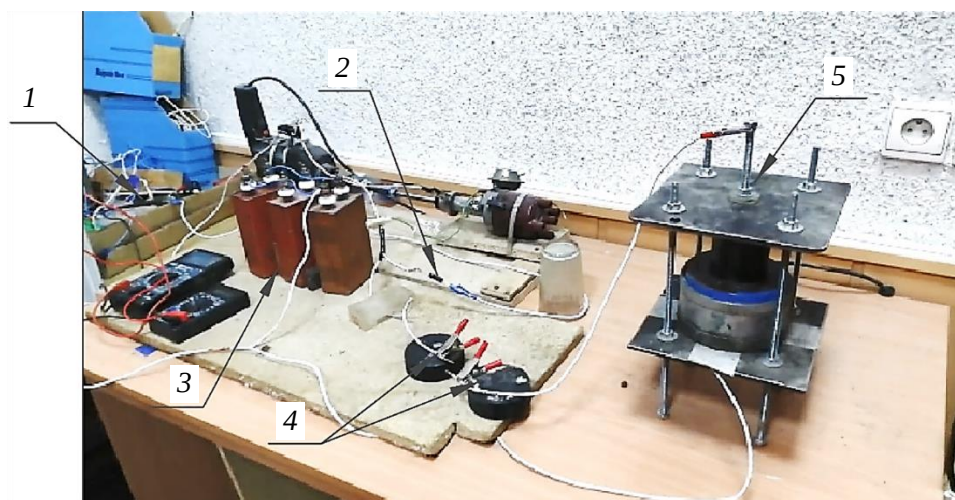


Рис. 6. Фото экспериментальной установки по активации методом электрогидравлического удара:

1 – источник высокого напряжения (15 кВ); 2 – высоковольтный диод; 3 – заряжаемые конденсаторы; 4 – воздушный разрядник; 5 – реактор активации

Fig. 6. Photograph of experimental unit for electrohydraulic shock activation:

1 – 15 kV source; 2 – high-voltage diode; 3 – chargeable capacitors; 4 – air-gap arrester; 5 – activation reactor

После прохождения обработки суспензия извлекается из реактора активации и укладывается в емкость для последующей ультразвуковой обработки.

Ультразвуковая обработка. Для проведения ультразвуковой обработки использовался прибор Ultrasonic Cleaner SUS304 с ультразвуковой частотой 40 кГц (рис. 7).



Рис. 7. Прибор для ультразвуковой обработки цементной суспензии

Fig. 7. Ultrasonic cleaner for water-cement suspension

Извлеченная из реактора суспензия помещается в установку для ультразвуковой обработки и подвергается воздействию в течение 5 мин, срок обработки был определен экспериментально, и увеличение времени не показало заметного набора конечной прочности.

Прошедшая все 3 стадии электрофизической обработки водоцементная суспензия помещалась в три стандартные металлические формы для получения 18 стандартных образцов цементного камня размером 20×20×20 мм.

При достижении образцами возраста 1, 3 и 7 сут производилось испытание прочности на одноосное сжатие при помощи испытательного комплекса КСИМ-40, результаты которого представлены в табл. 1 и 2, также на рис. 8 и рис. 9 при водоцементном соотношении 0,3 и 0,5 соответственно.

Все образцы, подвергнутые обработке, и необработанные выдерживались в одинаковых условиях при соблюдении нормального температурно-влажностного режима твердения в соответствии с ГОСТ 30744–2001 «Цементы».

Результаты проведенного экспериментального исследования

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде табл. 1 и 2, а также диаграмм на рис. 8 и 9.

Таблица 1

Показатели прочности на сжатие образцов в различные сроки твердения при В/Ц = 0,3, Н/мм²

Table 1

Compressive strength at different curing time at w/c ratio 0.3, N/mm²

Вид обработки	Выдержка, сут		
	1	3	7
Обработка	26,8	67,2	96,5
Без обработки	16,4	40,8	57

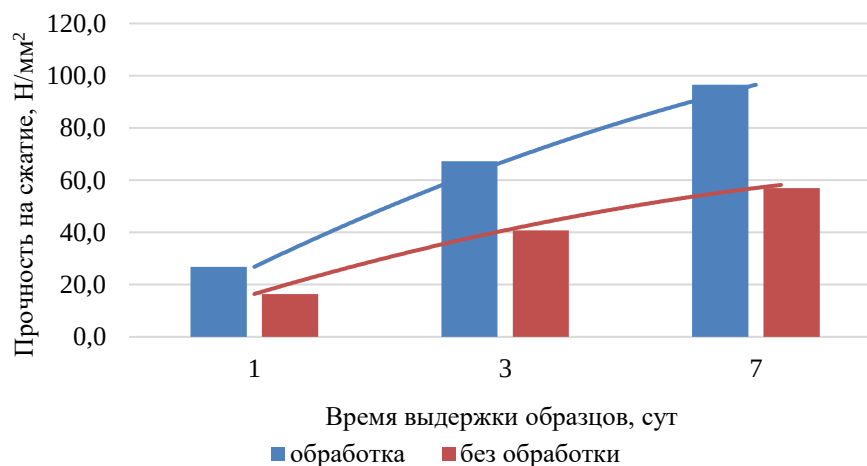


Рис. 8. График результатов комплексного эксперимента при водоцементном соотношении 0,3
Fig. 8. Block diagram of integrated experiment at w/c ratio 0.3 N/mm²

Таблица 2

Показатели прочности на сжатие образцов в различные сроки твердения при В/Ц = 0,5, Н/мм²

Table 2

Compressive strength at different curing time at w/c ratio 0.5 N/mm²

Вид обработки	Выдержка, сут		
	1	3	7
С обработкой	13,6	34,0	49
Без обработки	7,1	17,4	24

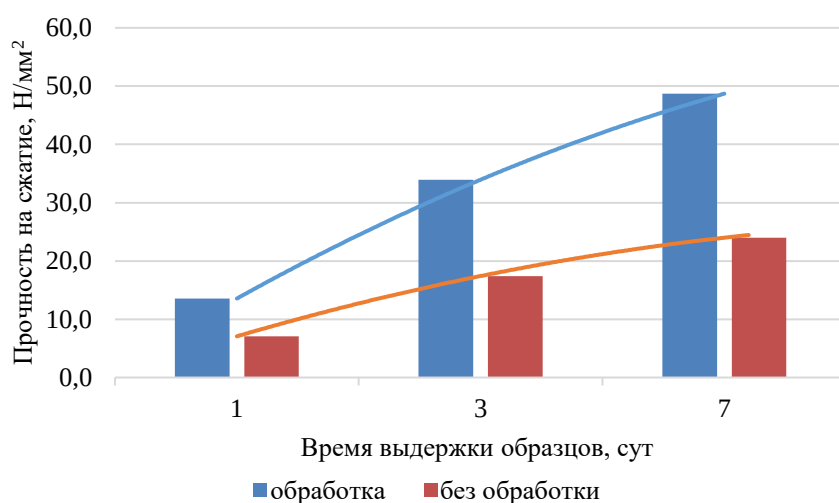


Рис. 9. График результатов комплексного эксперимента при водоцементном соотношении 0,5

Fig. 9. Block diagram of integrated experiment at w/c ratio 0.5 N/mm²

Визуально представленные результаты по проведенным экспериментальным исследованиям показывают весьма значительный прирост прочностных показателей получаемого цементного камня на основе обработанной трехстадийным методом водоцементной суспензии по сравнению с образцами, выполненными на основе необработанной суспензии.

Показатели прироста прочности на сжатие практически одинаковы на первые, третьи и седьмые сутки при В/Ц 0,3 в районе 65 %, а для В/Ц 0,5 – в районе 95 %. Постоянство этих показателей говорит о том, что сами по себе условия твердения практически не влияют на процент прироста прочности.

Можно говорить о том, что никаких новых физических процессов при самом процессе твердения не происходит, а сами процессы от стадии приготовления суспензии к стадии кристаллизации проходили глубже, большая часть цемента подверглась растворению, и тем самым повысилась его активность.

Поскольку среды идентичны во всей партии экспериментов, то и логарифмический закон набора прочности не изменился, а изменилась лишь активность цемента, интенсивность набора прочности цементного камня.

Мы достигли повышения активности цемента, поскольку ни температурных воздействий, ни добавок, никаких других способов повышения прочности на суспензию не применяли, воздействуя только электрофизическим методом на суспензию. По предварительным оценкам, в проведенном эксперименте затраты электроэнергии значительно меньше, чем при увеличении температуры выдерживания образцов паропрогревом или электротермическим прогревом для достижения аналогичных показателей прочности цементного камня.

Сравнение влияния каждого отдельного этапа комплексных воздействий на конечную прочность в данной серии экспериментов не проводилось. Однако, основываясь на материалах литературных источников и вышеописанных предварительных экспериментальных данных, можно заключить, что в целом суммарный эффект достигается не только за счет принципа суперпозиции (путем складывания всех эффектов, от каждого метода по отдельности), но также и за счет оптимально подобранной последовательности воздействий, позволяющей повысить эффективность каждого из предложенных методов. При этом итоговый результат больше примерно на 25 % суммарного процента. Авторы предполагают, что этот процент может быть увеличен при использовании более энергетически мощного оборудования, позволяющего увеличить напряжение, силу тока, емкость конденсаторных батарей, а также больших объемов водоцементной суспензии.

Выводы

Установлено, что применение комплекса предлагаемых электрофизических воздействий повышает прочность цементного камня на 63,4–104,2 % по сравнению с контрольными образцами в зависимости от В/Ц.

Установлено, что влияние В/Ц на результаты весьма значительно, и при использовании В/Ц 0,5 удельный прирост прочности выше, чем при В/Ц 0,3, на 30 % в течение всего периода твердения.

Установлено, что оптимальным комплексом воздействия является электрополяризационное, электроимпульсное и ультразвуковое электрофизическое воздействие.

Установлено, что твердение цементного камня на основе обработанной суспензии происходит по тем же закономерностям, что и на основе необработанной суспензии.

Таким образом, цель проводимого исследования достигнута, поскольку установлено повышение прочности цементного камня до 2 раз вследствие применения комплексного электрофизического воздействия. Также определены наиболее эффективные виды электрофизических воздействий на водоцементную суспензию.

В дальнейшем предполагается изучение влияния различных напряженностей электрических полей при электрополяризационном воздействии, влияния электрической мощности при электрогидравлическом воздействии и результат их суммарного воздействия на конечную прочность.

Также необходимо выявить степень влияния комплексного воздействия на конечную прочность цементного камня в возрасте до 28 сут, а также на технологические параметры водоцементной суспензии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A., Nonat A., Scherer G.W., Schweitzer J.S., Scrivener K.L., Thomas J.J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011(41); № 12:1208–1223.
2. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шуляков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 147–157.
3. Ильина Л.В., Кудяков А.И., Туляганов А.К. Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 12 (732). С. 32–43.
4. Губарь В.Н., Петрик И.Ю., Жибоедов А.В. Способы повышения качества золы-уноса ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 63–70.
5. Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Куразов М.С., Индарбаев М.И., Эльмурзаев Р.А. Разработка составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на основе комплексных модификаторов // Устойчивое развитие науки и образования. 2017. № 11. С. 102–108.
6. Матвеева М.А., Солонина В.А., Ильясова С.В. Наполнение матрицы цементного вяжущего // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов, посвященной 10-летию создания Института промышленных технологий и инжиниринга. Тюмень : ТИУ, 2018. Т. 2. С. 71–73.
7. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Никоненко Н.И. Влияние дисперсных минеральных наполнителей на прочность цементного камня // Актуальные вопросы строительства : материалы V Всероссийской научно-технической конференции / отв. за выпуск Ю.Л. Сколупович. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2012. Т. 1. С. 257–260.
8. Палома А., Малышева О., Фернандес-Хименес А. Промышленность в XXI веке. Новые добавки в цемент и бетон. Ч. I // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2015. № 2–3 (39). С. 30–41.
9. Hielscher K. Ultrasonic Milling and Dispersing Technology for Nano-Particles // Materials Research Society symposia proceedings. Materials Research Society. 2012. № 1479. P. 21–26.
10. Ganjiana E., Ehsania A., Mason J.T., Tyrera M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives // Materials & Design. 2018. P. 503–513.
11. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
12. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. Москва ; Ленинград : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. 54 с.
13. Сафронов В.Н. Электрофизические технологии в производстве строительных материалов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2014. 420 с.
14. Курец В.И., Лобанова Г.Л., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Активация цементных растворов электрическими разрядами // Электронная обработка материалов. 2003. № 1. С. 76–80.
15. Соколов И.А., Березюк А.Н., Дикарев К.Б., Аббасова А.Р. Вакуумная технология возведения конструкций из монолитного бетона // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013. № 5. С. 16–21.
16. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов / под. ред. Н.П. Тузова. Санкт-Петербург : Наука, 1995. 276 с.
17. Патент № 2343010 Российская Федерация, МПК B05D 1/04 (2006.01). Способ электро-статического окрашивания диэлектрических изделий : № 2007110451 : заявл. 30.05.2007 : опубл. 01.10.2010 / Шангин А.П., Звоник В.В., Лапицкий А.Г., Цугленок В.Н., Вержболович Н.А., Дыба Д.С. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Производственная компания “Теплофон”». – 4 с.
18. Матвиенко В.А. Электрическая активация в технологии бетона и изделий : специальность 05.23.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харьковский инженерно-строительный институт. Харьков, 1993. 34 с.
19. Матвиенко В.А., Черешня О.Ф. Электрическая поляризация и структурообразование вяжущих систем / Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции : доклады и тезисы

- докладов III Всесоюзной научно-практической конференции. Киев : КИСИ, 1989. Т. 1. С. 152–153.
20. *Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А.* Электрические свойства бетона / под ред. Ю.Н. Вершинина. Москва : Энергия, 1980. 199 с.
 21. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы / под ред. Е.Д. Щукина. Москва : Наука, 1985. 400 с.
 22. *Патент № 2769495* Российская Федерация, МПК C04B 40/00 (2006.01). Способ активации цементной суспензии : № 2021110875 : заявл. 15.04.2021 : опубл. 01.04.2022 / Титов М.М., Непомняцев Г.А., Дорофеева Д.А. ; заявитель НГАСУ (Сибстрин). Бюл. № 10. 8 с.
 23. *Бордунов С.В., Кулага И.Г.* Использование высоковольтного импульсного разряда для повышения прочности бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 4. С. 58–61.
 24. *Fitzgerald M.E., Griffing V., Sullivan J.* Chemical effects of ultrasonics – «hot spot» chemistry // *Journal of Chemical Physics*. 1956. V. 25. I. 5. P. 926–933.
 25. *Себелев И.М.* Закономерности гидратации клинкерных минералов и повышение эффективности использования цемента по результатам лазерной гранулометрии : специальность 05.17.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Томск : ТПУ, 1998. 38 с.

REFERENCES

1. *Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A., Nonat A., Scherer G.W., Schweitzer J.S., Scrivener K.L., Thomas J.J.* Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011; 12 (41):1208–1223.
2. *Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V.* Cement heavy concretes for highway construction. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 4 (63): 147–157. (In Russian)
3. *Il'ina L.V., Kudyakov A.I., Tulyaganov A.K.* Cement mortars with fine mineral additives. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019; 12 (732): 32–43. (In Russian)
4. *Gubar' V.N., Petrik I.Yu., Zhiboedov A.V.* Quality improvement of TPP fly ash used in high quality concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2016; 3 (119): 63–70. (In Russian)
5. *Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Kurazov M.S., Indarbaev M.I., El'murzaev R.A.* Development of high-strength self-compacting concrete compositions based on complex modifiers. *Ustoichivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2017; 11: 102–108. (In Russian)
6. *Matveeva M.A., Solonina V.A., Ilyasova S.V.* Filling of the cement binder matrix. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists 'Energy Saving and Innovation Technologies in Fuel and Energy Sector'*. Vol. 2. Tyumen, 2018. Pp. 71–73. (In Russian)
7. *Berdov G.I., Il'ina L.V., Nikonenko N.I.* Effect of dispersed mineral fillers on the strength of cement stone. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Construction'*. V. 1. 2012. Pp. 257–260. (In Russian)
8. *Palomo A., Mal'tseva O., Fernandes-Khimenos A.* Industry in the 21st century. New additives in cement and concrete. Part I. *Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2015; 2–3 (39): 30–41. (In Russian)
9. *Hielscher K.* Ultrasonic milling and dispersing technology for nano-particles. *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 2012; (1479): 21–26.
10. *Ganjiana E., Ehsania A., Mason J.T., Tyrera M.* Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives. *Materials & Design*. 2018; 503–513.
11. *Yutkin L.A.* Electrohydraulic effect and its application in industry. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 253 p. (In Russian)
12. *Yutkin L.A.* Electrohydraulic effect. Moscow; Leningrad, 1955. 54 p. (In Russian)
13. *Safronov V.N.* Electrophysical technologies in the production of construction materials. Tomsk: TSUAB, 2014. 420 p. (In Russian)
14. *Kurets V.I., Lobanova G.L., Filatov G.P., Yushkov A.Yu.* Activation of cement mortars by electric discharges. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2003; 1): 76–80. (In Russian)
15. *Sokolov I.A., Berezyuk A.N., Dikarev K.B., Abbasova A.R.* Vacuum technology of monolithic concrete structures. *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi*. 2013; (5):16–21. (In Russian)

16. Semkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I. Fundamentals of electric pulse fracture of materials. N.P. Tuzov, Ed. Saint-Petersburg: Nauka, 1995. 276 p. (In Russian)
17. Shangin A.P., Zvonik V.V., Lapitskii A.G., Tsuglenok V.N., Verzhbovich N.A., Dyba D.S. "Method of electrostatic coloring of dielectric articles", Patent Russ. Fed. No. 2007110451, 2010, 4 p. (In Russian)
18. Matvienko V.A. Electrical activation in the technology of concrete and products. DSc Abstract. Kharkov, 1993. 34 p. (In Russian)
19. Matvienko V.A., Chereshnya O.F. Electric polarization and structure formation of binding systems. In: *Proc. 3rd All-Union Sci. Conf. 'Alkali Cements, Concretes and Structures'*. Vol. 1. Kiev: KISI, 1989. Pp. 152–153. (In Russian)
20. Bernatskii A.F., Tselebrovskii Yu.V., Chunchin V.A. Electrical properties of concrete. Yu.N. Vershinin, Ed. Moscow: Energiya, 1980. 199 p. (In Russian)
21. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. Surface forces. E.D. Shchukin, Ed., Moscow: Nauka, 1985. 400 p. (In Russian)
22. Titov M.M., Nepomnyashchev G.A., Dorofeeva D.A. "Method of activation of cement slurry", Patent Russ. Fed. No. 2769495, 2022, 8 p. (In Russian)
23. Bordunov S.V., Kulaga I.G. Utilization of high-voltage pulse discharge for concrete strength improvement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012; (4): 58–61. (In Russian)
24. Fitzgerald M.E., Griffing V., Sullivan J. Chemical effects of ultrasonics – "hot spot" chemistry. *Journal of Chemical Physics*. 1956; 25 (5): 926–933.
25. Sebelev I.M. Clinker mineral hydration and efficiency improvement of cement utilization based on laser granulometry results. DSc Abstract. Tomsk: TPU, 1998. 38 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Непомняцев Георгий Анатольевич, аспирант, ст. преподаватель, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Georg060593@mail.ru

Титов Михаил Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, agd_tmm48@mail.ru

Authors Details

Georgii A Nepomnyashchev, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, Georg060593@mail.ru

Mikhail M Titov, DSc, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, agd_tmm48@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.03.2023
Одобрена после рецензирования 12.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 22.03.2023
Approved after review 12.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023