

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ, АКТИВИРОВАННЫХ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КАВИТАТОРЕ

Мартынец В. С., Гузий С. Г., Назаренко И. И., Глыва В. А., Гузий Е. И.

1. Введение

Согласно данным [1], одним из наиболее важных этапов формирования бетонов, определяющих качество изготавливаемых строительных изделий, является приготовление бетонных смесей. Любая технология, позволяющая экономить компоненты бетонных смесей, исключая или упрощающая какие-либо технологические операции их приготовления, дает возможность сократить финансовые затраты или при тех же затратах увеличить объем строительства.

В настоящее время, наряду с химической модификацией портландцементных систем путем введения в них органических и минеральных добавок, интенсивно разрабатываются методы физической обработки воды затворения [2–4] (рис. 1). Последнее связано с тем, что присутствующая в бетонной смеси вода является ее наиболее активной составляющей [5–7]. Образуя физико-химические связи и адсорбционные контакты, вода задает скорость и глубину гидратации цемента, условия формирования и твердения цементного камня, темпы набора прочности бетона, которые влияют в конечном итоге на стоимость строительных конструкций [6, 7].

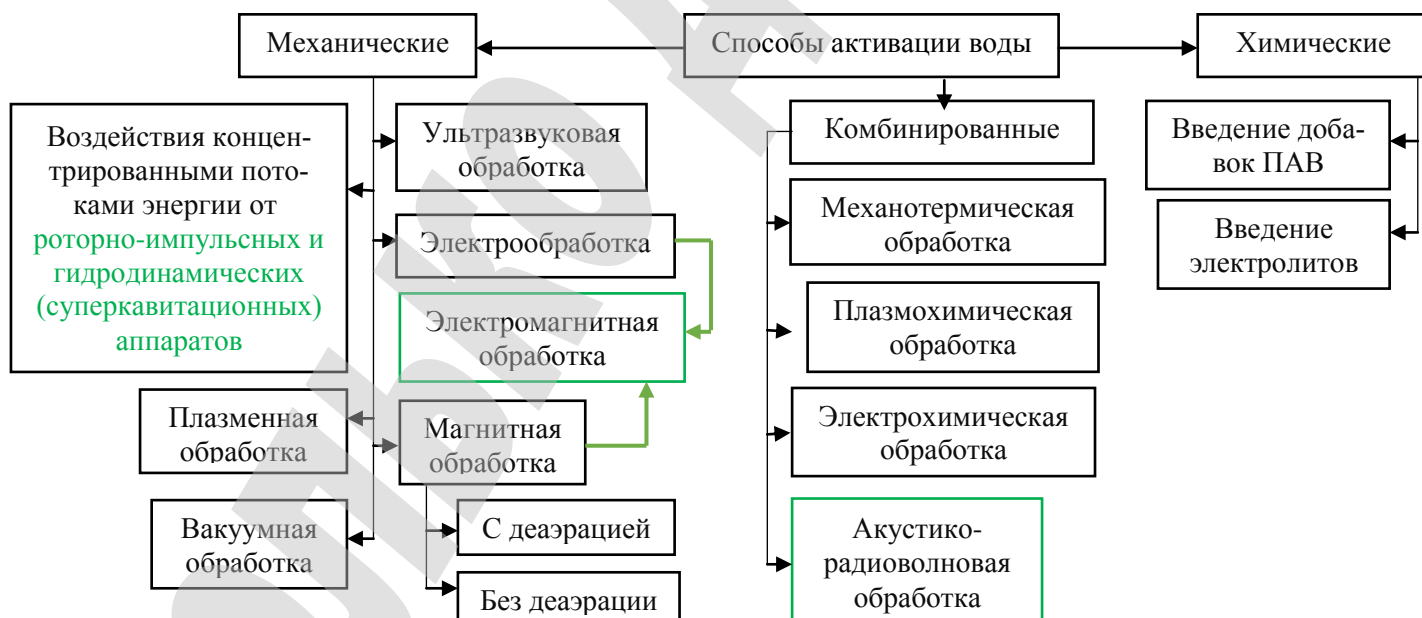


Рис. 1. Способы активации воды затворения [7]. Зеленым цветом выделены более современные разновидности физических воздействий [8–10]

В свою очередь, известно, что активность воды зависит от ее энергетического состояния и разного рода физических воздействий на воду, которые интенсифицируют протекающие с ее участием процессы [8, 9].

В частности, магнитная, электромагнитная или акустическая обработка воды приводит к изменению ее ионного состава, величины показателя активности ионов водорода, вязкости, поверхностного натяжения и удельной электрической проводимости [10–13].

При этом вода приобретает высокую химическую и гидратационную активность, результатом чего является возможность направленного регулирования технологических свойств затворяемых с ее использованием цементных систем. Поэтому актуальным является исследование активированной цементно-водной суспензии с внесенным в ее состав расчетного количества портландцемента на рео-механические свойства, как самих суспензий, так и искусственного камня на их основе.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – цементные суспензии, активированные в гидродинамическом кавитаторе.

Для исследований в данной работе использовали:

- питьевую воду (ДСТУ 7525:2014);
- портландцемент марки ПЦ I-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010), размолотый до удельной поверхности $3550 \text{ см}^2/\text{г}$ (по Блэйну), содержащий клинкерные минералы, масс. %: C_3S – 61,2; $\beta\text{-C}_2\text{S}$ – 15,18; C_3A – 6,45; C_4AF – 11,8;
- песок Днепровский с модулем крупности $M_{кр}=1,47$, средней плотностью $1420 \text{ кг}/\text{м}^3$, пустотностью – 42 %, истинной плотностью – $2,63 \text{ г}/\text{см}^3$, содержанием глинистых частиц – 1,6 %.

Полный остаток на сите № 063 – 4,5 % за массой. Показатели качества песка соответствуют требованиям ДСТУ Б В.2.7-32-95, ДСТУ Б В.2.7-43-96 к мелкому заполнителю для тяжелых бетонов.

Отдельно изучены свойства активированной воды в условиях гидродинамических воздействий и цементных смесей на их основе. Однако отсутствуют данные о влиянии параметров кавитации на свойства цементных суспензий и бетонов на их основе.

Положительным от применения кавитационных воздействий является снижение динамической вязкости цементных суспензий, установление оптимальной скорости перемешивания и повышение прочностных характеристик вяжущего.

Отрицательным моментом в применении кавитационных воздействий является повышение абразивного износа гомогенизатора кавитатора, а также время жизни активированной цементно-водной суспензии.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – изучить параметры кавитационной обработки на реомеханические свойства цементных суспензий.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

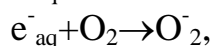
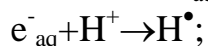
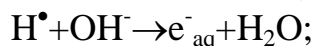
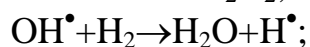
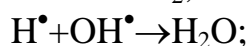
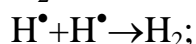
1. Произвести кавитационную обработку воды и установить оптимальное время кавитационного воздействия на изменения рН воды и прочность цементного камня.

2. Определить минимальную вязкость и оптимальную скорость ее достижения в цементной суспензии, активированной в гидродинамическом кавитаторе.

3. Определить прочностные свойства цементно-песчаных смесей, полученных на основе активированной цементно-водной суспензии.

4. Исследование существующих решений проблемы

Как показывает анализ литературных источников [13–18], физическая активация воды, в т. ч. и гидродинамическая, приводит к образованию гидратированных электронов:



способствующих повышению ее рН и, как следствие, ее активности в случае использования как жидкости затворения для цементных систем.

К известным способам увеличения активности цементов можно отнести механохимический, суть которого заключается в увеличении удельной поверхности материалов с одновременным возрастанием поверхностной энергии, что обеспечивает повышение реакционной способности цементного вяжущего. К недостаткам сухого способа активирования цемента следует отнести:

- длительность обработки, достигающую до нескольких часов,
- высокую энергоемкость оборудования и малую его производительность,
- малые сроки и сложность хранения активированного цемента [19].

Более эффективной является кавитационная обработка цементно-водной суспензии в термодинамических или гидродинамических диспергаторах-активаторах (кавитаторах), встроенных в технологический процесс приготовления бетонных смесей [20].

Принцип работы кавитационных установок заключается в создании в жидкой среде, проходящей через рабочие органы установки, эффектов гидродинамической и акустической кавитации, когда возникающие ультразвуковые акустические колебания диспергируют и активируют частицы материала. Интенсивное воздействие на цементно-водную суспензию микроударов, кавитационных разрывов, растяжений и ультразвуковой вибрации приводит к ее нагреву, измельчению частиц дисперсной фазы и образованию устойчивых активированных суспензий.

По данным работы [21] активационная обработка портландцемента путем активации цементного вяжущего в гидродинамических диспергаторах способствует не только увеличению прочности цементного камня в 2 раза, но и улучшает однородность цементно-водной суспензии.

Однако в выше приведенных работах отсутствуют данные по влиянию кавитационной обработки цементно-водных суспензий на изменение рН и их вязкость. Этот недостаток будет частично раскрыт в данной работе.

5. Методы исследований

Активацию воды затворения и водно-цементных суспензий осуществляли в гидродинамическом кавитаторе (рис. 2) [15, 22–26], конструктивная схема которого представлена на рис. 3.



Рис. 2. Гидродинамический кавитатор:
1 – панель управления; 2 – мотор-редуктор; 3 – реактор;
4 – винтовой насос; 5 – гомогенизатор

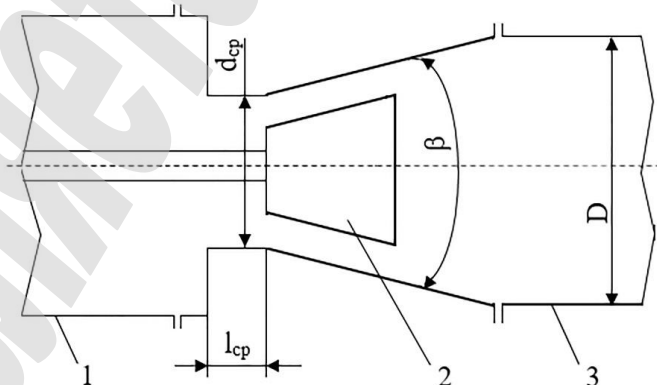


Рис. 3. Конструктивная схема кавитатора:
1 – входной трубопровод; 2 – генератор колебаний – кавитатор: $D_{кр}=35$ мм; $\beta=20^\circ$;
 $D=4d_{кр}$; $l_{кр}=0,6...2d_{кр}$; 3 – выходной трубопровод; $кр$ – критическое сечение

Расчет числа кавитации с определением режима кавитационной обработки осуществляли по формуле:

$$\chi = \frac{2(P - P_s)}{\rho v^2}, \quad (1)$$

где P – давление потока, Па; P_s – давление насыщенного пара, Па; ρ – плотность воды и цементно-водной суспензии, кг/м³; v – скорость потока на входе в сопло, м/с.

Процессы диспергации и аморфизации структуры твердой фазы цементной суспензии определяли методом акустической эмиссии [27–29] (рис. 4).

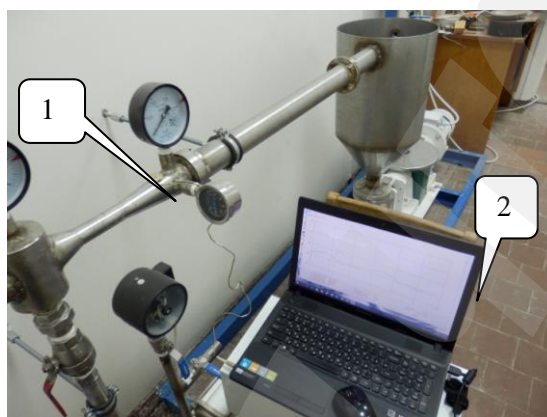


Рис. 4. Оборудование для фиксации и цифровой аудиозаписи шумов, возникающих в гомогенизаторе кавитатора:

- 1 – широкополосной пьезокерамический акустический датчик;
- 2 – ноутбук с программным обеспечением Спектрограм 16

Цифровую аудиозапись шумов, возникающих в процессе кавитационной обработки воды затворения и цементной суспензии, осуществляли в формате WAV программы Спектрограм 16.

Бесперывный спектр акустического шума несет в себе информацию о физических явлениях, которые осуществляются в потоке жидкости проходящей через кавитатор [28]. С увеличением гидродинамического давления происходит более интенсивное схлопывание кавитационных пузырьков, способствующее увеличению интенсивности шума. На спектрограммах фиксируются всплески шума, характеризующие диспергацию частиц цемента в потоке суспензии.

Линейная зависимость скорости потока от шума описывается зависимостью:

$$v = 0,015N + 1,7, \quad (2)$$

где

$$N = 10 \lg(I/I_0),$$

где $I_0 = 10-12$ Вт/м² – мощность звуковой волны через единицу поверхности по отношению к входному уровню.

Интенсивность звука, возникающего в результате схлопывания (коллапса) кавитационных пузырьков, описывается зависимостью:

$$I = \frac{\Delta p_0^2}{2rv}, \quad (3)$$

где Δp_0 – амплитуда звуковой волны, выраженная в количестве децибел N ; v – скорость звуковой волны, которая распространяется в цементной суспензии; ρ – плотность цементной суспензии.

Изменения pH до и после кавитационной обработки воды и цементных суспензий осуществляли на многофункциональном лабораторном приборе EZODO PL-700AL (Тайвань), совмещающего в себе функции pH-метра/ОВП-метра/Оксиметра/Кондуктомера/Солеметра/Термометра.

Реологические свойства цементных суспензий определяли с помощью вискозиметра Брукфильда RV DV2T (США), шпindelь № 4 (рис. 5).

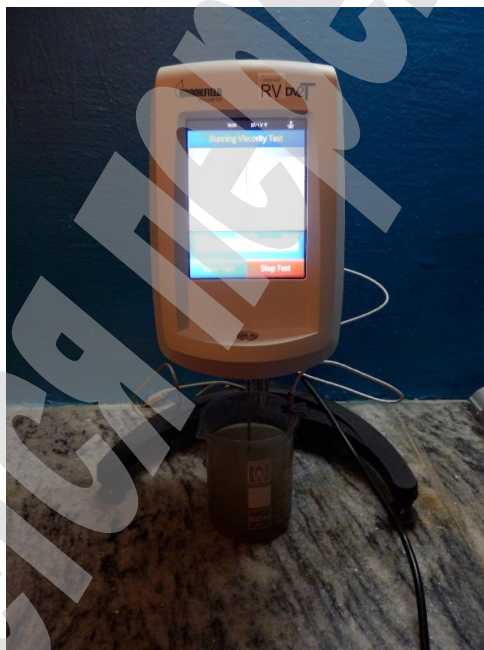


Рис. 5. Вискозиметр Брукфильда RV DV2T

Физико-механические испытания портландцемента проводили согласно ГОСТ В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009, ДСТУ Б В.2.7-188:2009, которые охватывали определения нормальной плотности цементного теста, сроки схватывания, предела прочности на сжатие и изгиб цементного камня.

6. Результаты исследований

Активацию воды проводили в гидродинамическом кавитаторе статического типа (рис. 2). Воду подвергали воздействию кавитации в течение 25 мин и фиксировали контролируемые параметры на заданных экспериментом промежутках времени. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Контролируемые параметры активации воды

Продолжительность кавитационной обработки, мин	Давление на входе в кавитатор P1, МПа	Температура на выходе с проточной камеры кавитатора T1, °С	Температура в реакторе T2, °С
1	0,5	22	21
4	1,1	25	23
6	1,3	29	26
10	1,4	33	30
13	1,5	40	36
15	1,8	42	37
20	2,1	45	40
23	2,2	50	44
24	2,5	52	45
25	3	58	50

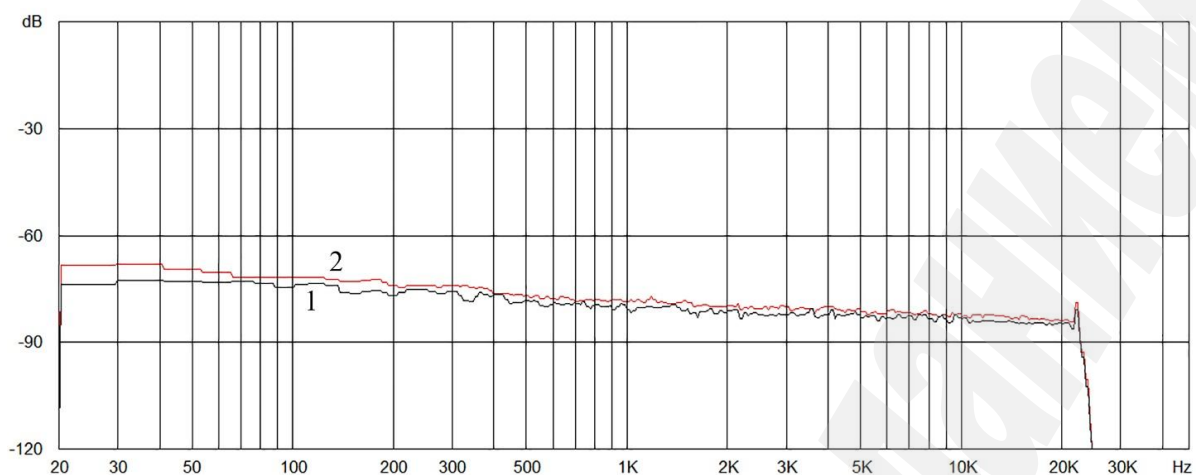
С интервалом в 5 мин активированную воду сливали в емкости, которую, в дальнейшем, использовали для формования цементно-песчаных образцов (табл. 2).

Таблица 2

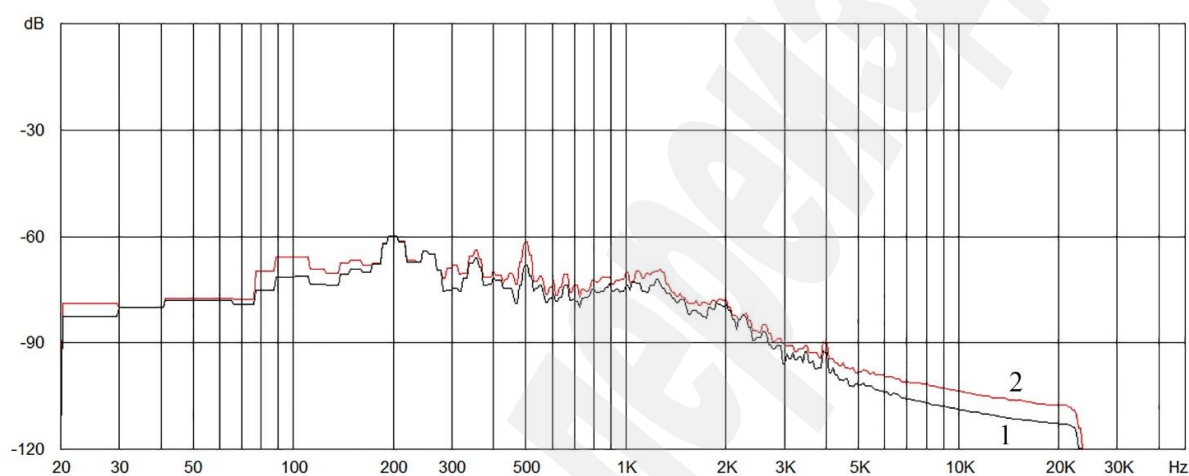
Результаты испытаний цементно-песчаных смесей на активированной воде ($B/C=0,5=const$)

Время активации, мин	ТНГ, %	Расплав конуса, мм	Начало схватывания, мин	$\Delta R_c/\Delta R_{из}$, МПа, в зависимости от времени твердения, сут.		
				2	7	28
0	28	120	111	20,5/2,7	38,51/4,8	51,4/5,2
5	29	140	95	19,8/2,7	35,0/4,8	58,8/5,6
10	29	145	113	19,4/2,9	35,0/4,9	58,4/5,3
15	29	145	108	19,7/2,7	34,1/4,7	56,3/5,4
20	29	135	114	19,4/3,0	34,1/4,8	55,3/5,5
25	29	145	110	20,0/2,9	36,3/4,9	54,4/5,5

Из спектрограммы (рис. 6, а) видно, в конце первой минуты кавитационной обработки воды затворения при давлении 0,5 МПа фиксируется всплеск шума на частоте 23 кГц, характеризующий начало процесса диспергации примесей в воде и разрыв Ван-Дер-Ваальсовских связей. С увеличением времени кавитационной обработки от 1 до 25 мин при скорости потока 66,5 м/с и числе кавитации $X=0,088$, отмечается рост давления до 3 МПа и температуры до 58 °С. На спектрограмме (рис. 6, б) отмечены всплески амплитуд шума при частотах 500 Гц, 1 и 4 кГц, характеризующие лавинообразное увеличение продуктов термолиза воды с одновременным увеличением рН воды до 8,25 (рис. 7).



a



b

Рис. 6. Спектрограмма акустического шума: *a* – вначале; *b* – в конце кавитационной обработки воды: размах амплитуд – 1 (min), 2 (max)

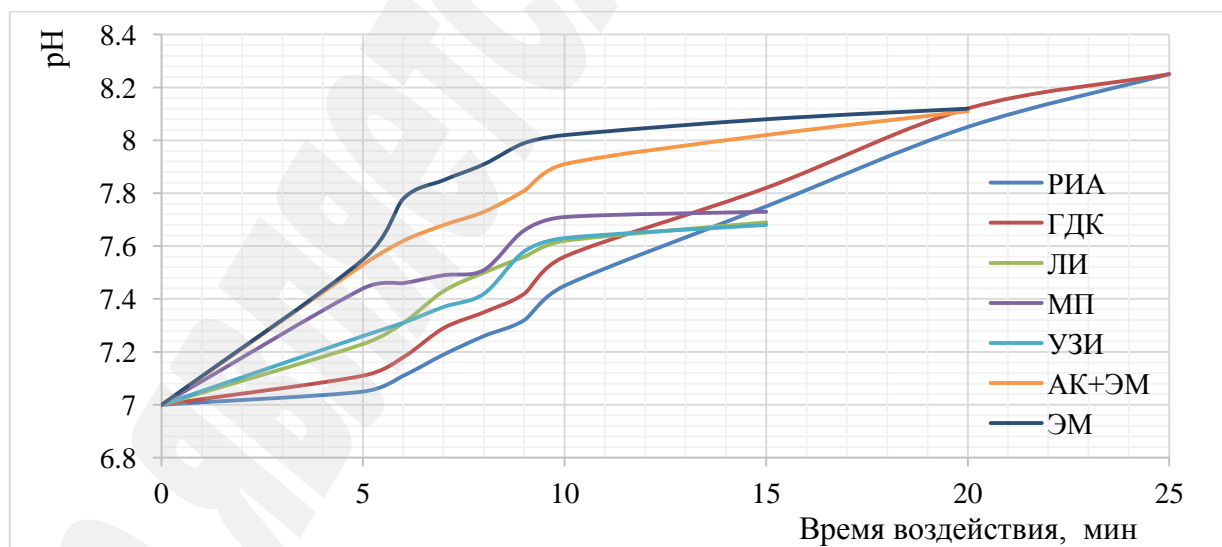


Рис. 7. Изменение рН воды в зависимости от времени энергетических воздействий и вида устройств: РИА – роторно-импульсного аппарата, гидродинамического кавитатора; ЛИ – лазерного излучения; МП – магнитного поля; УЗИ – ультразвукового излучения; АК+ЭМ – совместно акустико-волнового с электромагнитным; ЭМ – электромагнитного

Расчетная энергия, которая выделяется в результате схлопывания кавитационных пузырьков, ($E_s=1046,29 \cdot 10^{-6}$ Дж) при выше приведенных режимах кавитационных воздействий способна разрывать связь О–Н ($E_s=71,63 \cdot 10^{-20}$ Дж) [16, 24, 30–32].

Наблюдаемое увеличение рН воды, независимо от источников физических воздействий, подтверждается и данными работ [14–17].

Из данных табл. 2 видно, что время кавитационной обработки воды влияет на физико-механические свойства цементно-песчаных смесей, а именно:

- на 1 % увеличилось значение ТНГ;
- отмечается увеличение подвижности смеси (расплыва конуса) в 1,13...1,21 раза по сравнению с контрольным составом;
- время начала схватывания находится в пределах ошибки эксперимента;
- в ранние сроки твердения отмечается незначительное уменьшение прочностных характеристик цементно-песчаных смесей на активированной воде по сравнению с контрольным составом;
- в марочном возрасте значения прочности выше в 1,11...1,14 раза по сравнению с марочной прочностью контрольного образца.

Учитывая положительную тенденцию роста марочной прочности цемента на активированной воде, дальнейшие исследования были направлены на активацию водно-цементных суспензий, включающих до 10 % цемента в составе суспензии. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Контролируемые параметры активации водно-цементных суспензий

Продолжительность кавитационной обработки, мин	Давление на входе в кавитатор Р, МПа	Температура на выходе с проточной камеры Т1, °С	Температура в реакторе Т2, °С
5	0,55	26	23
10	0,63	32	28
15	0,65	35	32

Как видно с данных табл. 3, увеличение времени кавитационной обработки способствует повышению давления и температуры на выходе суспензии с проточной камеры. Это свидетельствует о прохождении более интенсивных дисперсионных процессов в диапазоне частот 700–800 Гц и массообменных процессов в диапазоне частот 1,9–3,5 кГц (рис. 8), направленных как на уменьшение размера частиц портландцемента, так и на образование первичных кристаллизационных структур. Начало аморфизации клинкерных минералов фиксируется при частоте порядка 17 кГц на 5 и 10 мин кавитационной обработки (рис. 8, а, б). Судить о развитии данного процесса невозможно вследствие ограниченности по частоте звуковой карты компьютера.

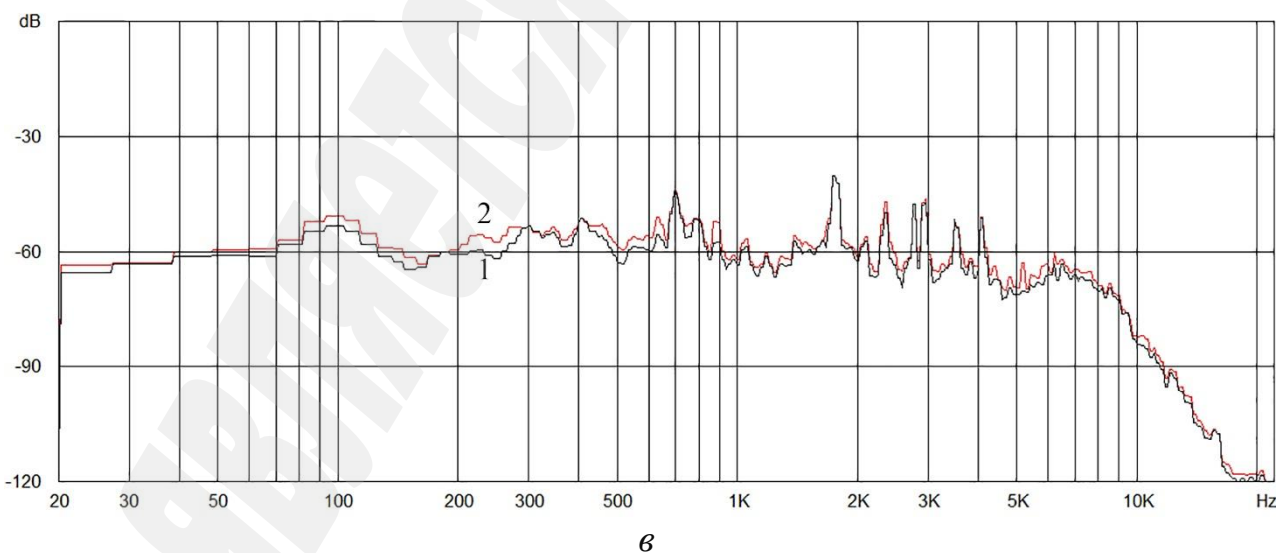
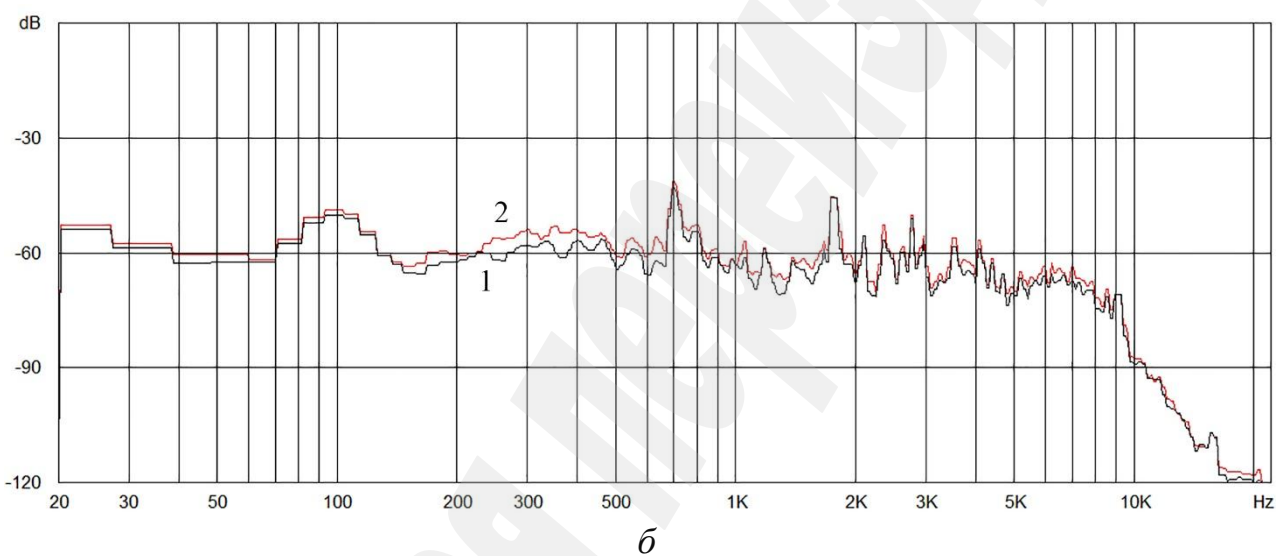
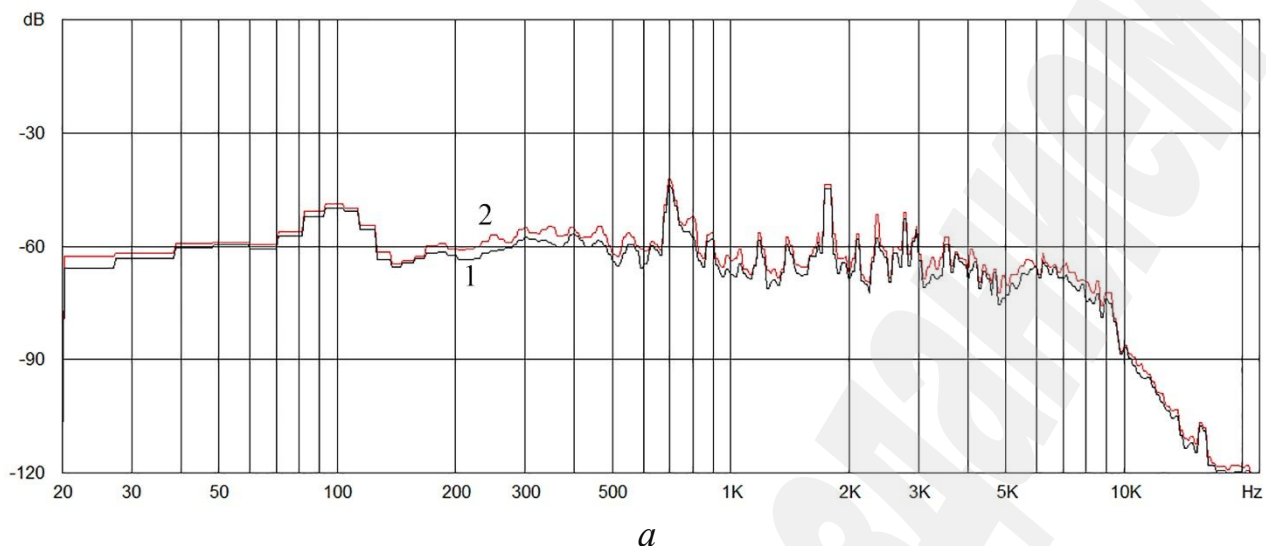


Рис. 8. Спектрограмма акустического шума после: *а* – 5 мин; *б* – 10 мин; *в* – 15 мин кавитационной обработки водно-цементных суспензий: размах амплитуд – 1 (min), 2 (max)

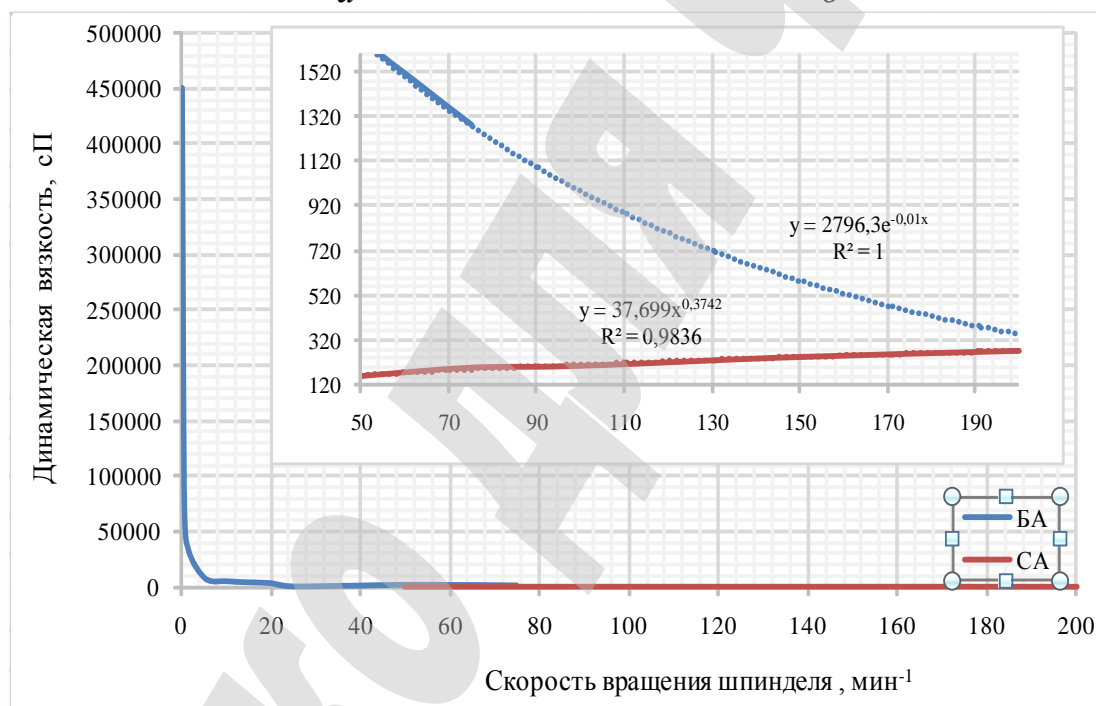
Кавитационную обработку водно-цементной суспензии более 15 мин (рис. 8, *в*) производить нецелесообразно, так как повышается ее температура,

вследствие чего возрастает скорость кристаллизации и происходит загустевание суспензии. Это подтверждается реологическими исследованиями (рис. 9).



a

б



в

Рис. 9. Изменение вязкости 10 % цементно-водной суспензии в зависимости от скорости вращения шпинделя: *a* – без кавитационной обработки; *б* – после кавитационной обработки; *в* – реологические кривые течения

Как видно с рис. 9, не активированная водно-цементная суспензия относится к псевдопластичным жидкостям, т. е. уменьшает свою вязкость от 451000 сП до 1279 сП при увеличении скорости вращения шпинделя от 0,1 до 75 мин⁻¹. Активированная на протяжении 10 мин водно-цементная суспензия относится к дилатантным жидкостям, т. е. увеличивает свою вязкость от 160 до 273,5 сП при увеличении скорости вращения шпинделя от 50 до 200 мин⁻¹.

В целом, изученная цементно-водная суспензия относится к тиксотропным жидкостям и при наложении внешнего воздействия, например вибрации, переходит в вязко-текучее состояние [33]. Однако съем полной реологической картины затруднен вследствие интенсивной седиментации твердой фазы (частиц цемента) в жидкой фазе суспензии.

Устранение этого недостатка возможно за счет введения добавок-стабилизаторов, например эфиров крахмала.

В табл. 4 приведены результаты физико-механических испытаний цементно-песчаных смесей, полученных на основе активированной в течение 11 мин 10 % цементно-водной суспензии. В отличие от традиционной схемы приготовления цементно-песчаных смесей исследованный подход базировался на следующем:

- во-первых, вводилось недостающее количество цемента с учетом того, который уже находился в активированной цементно-водной суспензии;
- во-вторых, шли по пути уменьшения количества цемента в исследуемой системе. Составы смесей: № 1 – В – 247,5 мл; Ц – 0,45 кг; П – 1,35 кг; № 2 – В – 242 мл; Ц – 0,44 кг; П – 1,35 кг; № 3 – В – 236,5 мл; Ц – 0,43 кг; П – 1,35 кг.

Из полученных результатов испытаний вытекает следующее: незначительно возросла водопотребность смесей (на 0,5 %), значительно увеличился расплыв конуса в 1,33...1,38 раз больше по сравнению с не активированной системой. В 1,14 раз по сравнению с активированной водой затворения.

Таблица 4

Результаты испытаний цементно-песчаных смесей на активированной 10 % цементно-водной суспензии ($V/C=0,55=const$)

Расход цемента, кг	Расплыв конуса, мм	Начало схватывания, мин	ТНГ, %	$\Delta R_c / \Delta R_{из}$, МПа, в зависимости от времени твердения, сут.		
				2	7	28
0,45	160	105	29,5	20,1/2,4	32,0/4,5	58,5/6,9
0,44	165	115	29,5	20,6/2,5	33,3/4,6	57,3/6,7
0,43	160	103	29,5	19,8/2,3	34,8/4,7	56,0/6,5

Прочность при сжатии на 28 суток твердения возросла в 1,14 раза по сравнению с не активированной цементной системой и осталась на уровне прочности вяжущих, полученных на активированной воде затворения. Следует отметить, что снижение количества портландцемента от 10 до 14 % позволяет получить искусственный камень с прочностью при сжатии $57,3 \pm 1,3$ МПа.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Отмечено положительное влияние кавитационной обработки как на активацию воды затворения, так и на активацию цементно-водных суспензий. Отмечено, что на 10 минуте кавитационной обработки при давлениях 0,63–1,4 МПа:

- возрастает рН среды ($pH=7,56$);
- снижается в 10,38 раз динамическая вязкость суспензий;

– увеличивается в 1,14...1,38 раза марочная прочность исследуемых вяжущих композиций.

Weaknesses. Отрицательное действие объекта исследования на свои внутренние факторы проявляется в замедлении кинетики набора прочности в ранние сроки твердения на 2 и 7 сутки.

Opportunities. Перспективы дальнейших исследований будут направлены на изучение процессов структурообразования активированных цементно-водных суспензий, усовершенствование конструкции кавитатора и камеры смешения для повышения скоростей потока, усиления физических воздействий.

Внедрение объекта исследования в производство будет способствовать получению более однородных бетонных смесей и качественных изделий на их основе.

Threats. На объект исследования могут оказывать отрицательное действие внешние поля, а также ограниченность по частоте звуковой карты компьютера, что будет учтено при дальнейших исследованиях. Предложенный способ активации вяжущих относится к нанотехнологиям и изначально будет для предприятий строительной отрасли затратным. Однако окупаемость данной технологии проявиться начнет через 1,5 года с момента внедрения.

В мире существует достаточное разнообразие кавитационных устройств, но исследуемое относится к разряду суперкавитационных смесителей, в которых физико-химические процессы осуществляются в кавитационной камере, но не в пристеночных областях, характерных для более простых конструкций кавитаторов.

8. Выводы

1. После кавитационной обработки воды затверения при давлении 0,5 МПа фиксируется всплеск шума на частоте 23 кГц, характеризующий начало процесса диспергации примесей в воде и разрыв Ван-Дер-Ваальсовских связей. С увеличением времени кавитационной обработки от 1 до 25 мин при скорости потока до 66,5 м/с при числе кавитации $X=0,088$, отмечается рост давления до 3 МПа и температуры до 58 °С. Фиксируемые всплески амплитуд шума при частотах 500 Гц, 1 и 4 кГц, характеризуют лавинообразное увеличение продуктов термоллиза воды с одновременным увеличением ее рН до 8,25. Марочная прочность цементного камня в 1,14 раза выше по сравнению с прочностью контрольного состава.

Увеличение давления и температуры в цементно-водной суспензии способствует интенсификации процесса диспергации частиц цемента в диапазоне частот 700–800 Гц и прохождению интенсивных массообменных процессов в диапазоне частот 1,9–3,5 кГц, способствующих образованию первичных кристаллизационных структур. Начало аморфизации клинкерных минералов фиксируется при частоте порядка 17 кГц на 5 и 10 мин кавитационной обработки. Судить о развитии данного процесса невозможно вследствие ограниченности по частоте звуковой карты компьютера.

2. Установлено, что не активированная водно-цементная суспензия относится к псевдопластичным жидкостям, т. е. уменьшает свою вязкость от 451000 сП до 1279 сП при увеличении скорости вращения шпинделя от 0,1 до 75 мин⁻¹. Активированная на протяжении 10 мин водно-цементная суспензия

относится к дилатантным жидкостям, т. е. увеличивает свою вязкость от 160 до 273,5 сП при увеличении скорости вращения шпинделя от 50 до 200 мин⁻¹.

3. Показано, что кавитационная обработка цементно-водных суспензий способствует возрастанию марочной прочности в 1,14 раза по сравнению с не активированной цементной системой и осталась на уровне прочности вяжущих, полученных на активированной воде затворения. Следует отметить, что снижение количества портландцемента от 10 до 14 % позволяет получить искусственный камень с прочностью при сжатии $57,3 \pm 1,3$ МПа.

Благодарность

Авторы хотели бы поблагодарить за финансовую поддержку Министерство образования и науки Украины, выделенную на следующие проекты:

– исследовательский проект «Физико-химические основы регулирования процесса формирования структуры и свойств минеральной щелочной алюмосиликатного связующего в качестве адгезива для использования в экологически безопасных древесных продуктах для различного использования» (№ 0117U004842);

– исследовательский проект «Физико-химические основы для создания геоцемента и покрытий на их основе для защиты бетона от коррозии» (№ 0115U000332);

– исследовательский проект «Разработка рецептурных и технологических решения для пластификации щелочного бетона для дорожного строительства с использованием связанных продуктов металлургии и теплоэнергетики» (№ 0116U008073).

Литература

1. Ajaronok, V. V. Akusto-radiovolnovaia aktivatsiia vody zatvoreniia portlandtsementnyh sistem [Text] / V. V. Ajaronok, S. V. Goncharik, N. I. Chubrik, N. H. Belous, S. P. Rodtsevich, V. D. Koshevar, V. V. Rubanik, O. N. Mahanovskaia, A. I. Orlovich // Elektronnaia obrabotka materialov. – 2011. – Vol. 47, No. 5. – P. 50–59.

2. Kasatkina, V. I. Vliianie mehanomagnitnoi aktivatsii vodnyh sistem na svoistva betona [Text] / V. I. Kasatkina, S. V. Fedosov, M. V. Akulova // Stroitel'nye materialy. – 2007. – No. 11. – P. 58–59.

3. Pomazkin, V. A. Fizicheskaiia aktivatsiia vody zatvoreniia betonnyh smesei [Text] / V. A. Pomazkin // Stroitel'nye materialy. – 2003. – No. 2. – P. 14–16.

4. Pomazkin, V. A. Perspektivnye napravleniia primeneniia magnitnoi aktivatsii [Text] / V. A. Pomazkin, A. A. Makeeva // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2001. – No. 1. – P. 109–114.

5. Taylor, H. F. W. Cement chemistry [Text] / H. F. W. Taylor. – Thomas Telford Publishing, 1997. – 459 p. doi:[10.1680/cc.25929](https://doi.org/10.1680/cc.25929)

6. Ratinov, V. B. Dobavki v beton [Text] / V. B. Ratinov, T. I. Rozenberg. – Moscow: Stroiizdat, 1978. – 190 p.

7. Kudiakov, A. I. Uluchshenie kachestva tsementnogo kamnia putem mnogochastotnoi ul'trazvukovoi aktivatsii vody zatvoreniia [Text] / A. I. Kudiakov, A. G. Petrov, G. G. Petrov, K. V. Ikonnikova // Vestnik TGASU. – 2012. – No. 3. – P. 143–152.

8. Batrakov, V. G. Modifitsirovannye betony [Text] / V. G. Batrakov. – Moscow: Stroiizdat, 1998. – 748 p.

9. Ramachandran, V. S. Concrete Admixtures Handbook, Second Edition: Properties, Science and Technology (Building Materials Science Series) [Text] / V. S. Ramachandran. – William Andrew, 1997. – 1183 p.
10. Dolinskii, A. A. Voda v usloviiah obrabotki putem diskretno-impul'snogo vvoda energii [Text] / A. A. Dolinskii, Yu. A. Shurchkova // Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. – 2013. – No. 9. – P. 93–100.
11. Akopyan, S. N. A study of the specific conductivity of water exposed to constant magnetic field, electromagnetic field, and low-frequency mechanical vibration [Text] / S. N. Akopyan, S. N. Airapetyan // Biophysics. – 2005. – Vol. 50, No. 2. – P. 255–259.
12. Stas, I. E. Vliianie vysokochastotnogo elektromagnitnogo polia na fiziko-himicheskie svoistva distillirovannoi vody [Text] / I. E. Stas, A. P. Mihailova, A. P. Bessonova // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2006. – No. 62. – P. 43–51.
13. Kulagin, V. A. Metody i sredstva tehnologicheskoi obrabotki mnogokomponentnyh sred s ispol'zovaniem efektov kavitatsii [Text]: Thesis of the Doctor of Technical Sciences: 01.04.14, 01.02.05 / V. A. Kulagin. – Krasnoiar'sk, 2004. – 406 p.
14. Margulis, M. A. Osnovy zvukohimii (himicheskie reaktsii v akusticheskikh poliah) [Text]: Handbook / M. A. Margulis. – Moscow: Vyssha shkola, 1984. – 272 p.
15. Nazarenko, I. Intensification of hydrodynamic cavitation processes for obtaining astringents when preparing concrete mixture [Text] / I. Nazarenko, V. Martyntsev, S. Guzii // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2017. – Vol. 19, No 3. – P. 89–93.
16. Vitenko, T. N. Mehanizm aktiviruiushchego deistviia gidrodinamicheskoi kavitatsii na vodu [Text] / T. N. Vitenko, Ya. M. Gumnitskii // Himiia i tehnologiia vody. – 2007. – Vol. 29, No. 5. – P. 422–432.
17. Promptov, M. A. Cavitation Treatment for Wastewater Disinfection [Text] / M. A. Promptov, A. V. Aleshin, M. M. Kolesnikova, D. S. Karpov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. – 2015. – Vol. 21, No. 1. – P. 105–111. doi:[10.17277/vestnik.2015.01.pp.105-111](https://doi.org/10.17277/vestnik.2015.01.pp.105-111)
18. Kirsanov, E. A. Nen'iutonovskoe povedenie strukturirovannyh sistem [Text] / E. A. Kirsanov, V. N. Matveenko. – Moscow: TEHNOSFERA, 2016. – 384 p.
19. Sovalov, I. G. Metody aktivatsii tsementov i vliianie aktivatsii na svoistva betonov [Text] / I. G. Sovalov. – Moscow: TsBTI NIOMTP, 1963. – 41 p.
20. Lamekin, N. S. Kavitatsiia: teoriia i primenenie [Text] / N. S. Lamekin. – Moscow: Rusaki, 2000. – 246 p.
21. Zibnitskaia, N. E. Perspektivy aktivirovaniia tsementnyh viazhushchih v tehnologii betonov [Text] / N. E. Zibnitskaia, D. I. Zhivetev, A. N. Mashkin // Trudy NGASU. – 2005. – Vol. 8, No. 2 (32). – P. 87–91.
22. Guzii, S. G. Issledovaniia fizicheskikh svoistv shchelochnyh aliumosilikatnyh suspenzii posle kavitatsionnoi obrabotki [Text] / S. G. Guzii, S. A. Terenchuk // Vestnik NTU «HPI». Himiia, himicheskaiia tehnologiia ta ekologiia. – 2010. – Vol. 65. – P. 119–126.
23. Krivenko, P. V. The Influence of Cavitation Treatment on Nano Structuring of Alkali Aluminosilicate Binder for Intumescent Coatings [Text] / P. V. Krivenko, S. Guzii, R. Hela // Materials Science Forum. – Vol. 908. – P. 63–70. doi:[10.4028/www.scientific.net/msf.908.63](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.908.63)

24. Saksena, T. K. Sonoluminescence from Stable Cavitation [Text] / T. K. Saksena, W. L. Nyborg // The Journal of Chemical Physics. – 1970. – Vol. 53, No. 5. – P. 1722–1734. doi:[10.1063/1.1674249](https://doi.org/10.1063/1.1674249)
25. Ozonek, J. Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering [Text] / J. Ozonek. – London: CRC Press, 2012. – 144 p. doi:[10.1201/b11825](https://doi.org/10.1201/b11825)
26. Krivenko, P. The Influence of Cavitation Treatment on Amorphization of Kaolinite in the Dispersion of the «Kaolin–Na₂O·nSiO₂·mH₂O–NaOH–H₂O» Composition [Text] / P. Krivenko, S. Guziy, J. Abdullah Al Musa // Calcined Clays for Sustainable Concrete. RILEM Bookseries. – Netherlands: Springer, 2015. – P. 387–393. doi:[10.1007/978-94-017-9939-3_48](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_48)
27. Glyva, V. A. Neperervnyi akustychnyi kontrol ta identyfikatsiia trishchynoutvorennia v metalevykh konstruktsiiah [Text] / V. A. Glyva, M. I. Delas, B. M. Yeremenko // Management of Development of Complex Systems. – 2013. – Vol. 15. – P. 115–118.
28. Smirnov, A. I. Generatsiia akusticheskikh kolebanii v himicheskikh reaktsiiah i fiziko-himicheskikh protsessah [Text] / A. I. Smirnov // Rossiiskii himicheskii zhurnal. – 2001. – Vol. 45. – P. 29–34.
29. Semashko, R. A. Akusticheskaia emissiia v eksperimental'nom materialovedenii [Text] / R. A. Semashko, V. I. Shport, B. I. Marin et al.; ed. by N. A. Semashko. – Moscow: Mashinostroenie, 2002. – 240 p.
30. Volkov, A. I. Bol'shoi himicheskii spravochnik [Text] / A. I. Volkov, I. M. Zharskii. – Minsk: Sovremennaia shkola, 2005. – 608 p.
31. Kumar, J. K. Cavitation – a New Horizon in Water Disinfection. Water disinfection by ultrasonic and hydrodynamic cavitation [Text] / J. K. Kumar, A. B. Pandit. – Verlag: VDM, 2010. – 304 p.
32. Gogate, P. R. Application of cavitation reactors for water disinfection: Current status and path forward [Text] / P. R. Gogate // Journal of Environmental Management. – 2007. – Vol. 85, No. 4. – P. 801–815. doi:[10.1016/j.jenvman.2007.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.001)
33. Frolov, Yu. G. Kurs kolloidnoi himii [Text] / Yu. G. Frolov. – Moscow: Himiia, 1982. – 400 p.