

## СОНОХИМИЯ ВОДНО-ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

*Я.О. Шабловский*

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,  
Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48*

*Адрес для переписки: Шабловский Ярослав Олегович,  
E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Ультразвуковая обработка водно-цементных смесей – хорошо известный, но недооценённый метод улучшения свойств бетонов. Низкоэнергетический характер ультразвукового воздействия отнюдь не означает столь же низкую эффективность этого воздействия. Разнообразные и притом весьма нетривиальные сонохимические эффекты обусловлены тем, что ультразвуковое воздействие изменяет не энергию, а химическую эксергию реакционной смеси. Ультразвуковая обработка природной воды изменяет её карбонатное равновесие. Вследствие этого кристаллизация солей жёсткости в воде приобретает бифуркационный характер, поскольку результат обработки непосредственно определяется условиями газообмена между обрабатываемой водой и атмосферным воздухом (обработка в открытом либо в закрытом объёме). Положительный технический результат ультразвуковой обработки водно-цементных смесей обеспечивается за счёт фундаментальных сонохимических эффектов, улучшающих гидратацию клинкерных минералов в обработанной воде затворения. Важное практическое значение имеет то обстоятельство, что смена условий газообмена воды затворения и/или водно-цементных смесей при осуществлении ультразвуковой обработки позволяет предсказуемо изменять эксплуатационные характеристики цементного камня. Особое внимание уделено применению ультразвуковой обработки для предотвращения коррозии арматурной стали и для осуществления возможности создания инновационных самовосстанавливающихся бетонов.

**Ключевые слова:** цемент, вода затворения, сонохимическая реакция, сонохимическая эксергия, ультразвуковая обработка

# SONOCHEMISTRY OF WATER-CEMENT SYSTEMS

*Ya.O. Shablovsky*

*Gomel State Technical University,  
Belorussia, 246746, Gomel, prosp. Oktiabria, 48*

*Corresponding author: Shablovsky Yaroslav Olegovich,*

*E-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

Mechanical comminution is widely utilized to enhance the pozzolanic activity of cementitious materials by grinding them into ultrafine powders. As a result of such practice being customary ultrasonic processing for water-cement systems is usually perceived as an advanced technology to deagglomerate and disperse materials. On the contrary, the real effects of ultrasonic treatment of water-cement systems are quite nontrivial and even bifurcative. First of all, ultrasonic treatment of water can suppress scale formation by making the scale being formed to stay loosely suspended in the water rather than tightly adhere to the surfaces of pipes and tanks. Correspondingly, ultrasonic control of carbonate balance strongly affects the properties of tempering water. Secondly, processing the water-cement mixture with ultrasound enables to control the structure-forming processes in it, namely, to increase the dissolution rate of pozzolans, to accelerate the pozzolanic reaction rate and to amplify the strength of concrete in the end. Effects of ultrasonic frequency, acoustic intensity and treating time have been evaluated.

**Keywords:** cement, tempering water, sonochemical reaction, sonochemical exergy, ultrasound treatment

**Введение.** Объёмы потребления строительных материалов столь велики, что при выборе сырья и технологий для их производства главным показателем является дешевизна [1, 2]. На современном этапе достигнуты значительные успехи в совершенствовании технологий цементных систем путём химического модифицирования [3], однако производство эффективных инновационных добавок далеко не всегда низкочестно. Между тем, во многих случаях требуе-

мые эксплуатационные характеристики цементного камня могут быть обеспечены за счёт управления формированием его структуры [4, 5]. Предмет настоящего исследования – управление первичными и вторичными процессами структурообразования в водно-цементных системах путём их ультразвуковой обработки.

Исследования соноиндуцированных процессов в воде затворения и в водно-цементных системах в целом занимают в современной физической химии весьма специфическое положение. Лабораторные испытания различных методик ультразвуковой обработки проводятся уже несколько десятилетий [6, 7], но выводы разных исследователей, положительно оценивающих результаты такой обработки, плохо согласуются между собой, а иногда являются взаимоисключающими. Более того, при переходе от лабораторных испытаний сонохимических технологий к их практическому внедрению очень часто обнаруживается нестабильность технического результата, а в отдельных случаях – даже его отсутствие. По этой причине существуют сомнения в целесообразности ультразвуковой обработки [8], а некоторые авторы считают её неэффективной [9]. Между тем, испытания ультразвуковых устройств – как успешные, так и неудачные – проводились по наитию, т.к. теоретическая сонохимия в настоящее время ограничена рамками кавитационной теории [10], непригодной для технологических расчётов. Далее мы проанализируем качественные и количественные закономерности сонохимических процессов в водно-цементных системах, используя общую теорию звука [11].

### Сонохимия водных систем

Распространяющаяся в веществе акустическая волна с интенсивностью  $I$  и частотой  $f$  вызывает упругие объёмные деформации этого вещества, эквивалентные воздействию периодически изменяющегося давления  $\tilde{p}$  с амплитудой

$$\tilde{p}_m = \sqrt{2I\mathcal{R}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{R}$  – акустическое сопротивление вещества. В общем случае энергия упругих деформаций выражается равенством

$$W_y = \frac{\beta \tilde{p}^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – объёмная сжимаемость вещества. Энергия  $W_y$  циклично обратимо перераспределяется между регулярно чередующимися областями разрежения и сжатия, поэтому при анализе сонохимических процессов должна оцениваться не энергия, а эксергия реакционной смеси – часть её энергии, доступная для преобразования в другие виды энергии.

В отсутствие статических внешних полей эксергия  $\Xi$  имеет термическую и химическую составляющие [12]. При умеренных частотах поглощение акустических волн незначительно, и в ультразвуковом поле изменяется преимущественно химическая эксергия  $\Xi_{\text{ch}}$  – энергетическая обеспеченность протекания химической реакции в данной системе. Скорость изменения химической эксергии

$$\dot{\Xi}_{\text{ch}} = \dot{W}_y = \beta \tilde{p} \dot{\tilde{p}}. \quad (3)$$

Акустическое давление  $\tilde{p}$  определяется равенством

$$\tilde{p} = \mathcal{R} \tilde{v},$$

где  $\tilde{v}$  – колебательная скорость деформаций. Следовательно, вместо (3) можно записать:

$$\dot{\Xi}_{\text{ch}} = \beta \tilde{p} \tilde{b}, \quad (4)$$

где  $\tilde{b}$  – колебательное ускорение. Воспользовавшись равенством

$$b_m = 4\pi f \sqrt{\frac{I}{2\mathcal{R}}},$$

в итоге из (3) получаем:

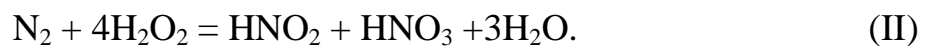
$$\Xi_{\text{ch}} = (\Xi_{\text{ch}})_0 + 4\pi \beta \mathcal{R} I f t, \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{f}, \quad (5)$$

где  $(\Xi_{\text{ch}})_0$  – химическая эксергия реакционной смеси в отсутствие ультразвукового воздействия.

При  $\Xi_{\text{ch}} \geq 232,8 \text{ кДж/моль}$  преодолевается термодинамический порог протекания реакции



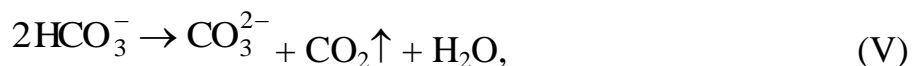
Образование пероксида водорода приводит к связыванию растворённого в воде азота:



Общеизвестно, что если реакция (II) протекает при комнатной температуре, то азотистая кислота  $\text{HNO}_2$  образуется в химически неактивной таутомерной форме  $\text{N(H)O}_2$ . В свою очередь, азотная кислота взаимодействует с кальцитом  $\text{CaCO}_3$  и магнезитом  $\text{MgCO}_3$ :



При проведении ультразвуковой обработки водной системы в закрытом объёме вода насыщается углекислым газом, образующимся в результате реакций (III) и (IV). Это тормозит их протекание и одновременно замедляет разложение гидрокарбонат-ионов



являющееся первой ступенью кристаллизации карбонатов кальция и магния – солей карбонатной жёсткости. Если же ультразвуковая обработка проводится в открытом объёме, то удаление растворённого углекислого газа волнами акустического давления интенсифицирует процесс (V) и тем самым ускоряет кристаллизацию  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  в объёме раствора. Вместо поликристаллических отложений на поверхностях карбонаты кальция и магния образуют высокодисперсный шлам, легко растворимый в азотной кислоте [реакции (III) и (IV)]. Благодаря тому, что равновесия (III) и (IV) в данном случае также смещены вправо, вслед за карбонатным шламом растворяются карбонатные отложения на поверхностях.

### **Ультразвуковая обработка цементных систем**

Из (5) следует, что технический результат ультразвуковой обработки водно-цементной смеси в общем случае зависит от величины  $\dot{E}_{\text{ch}}$ , а для смеси определённого состава – от величины произведения  $If$ .

При допороговых значениях  $If$  будет проявляться только вибромеханический эффект – разрушение «преждевременной» коагуляционной структуры, повышающее текучесть смеси и облегчающее заполнение смесью форм. При значениях  $If$ , обеспечивающих превышение эксергетического порога, определяющим фактором становится сонохимическое изменение кислотности воды [реакции (I), (II), (V)], приводящее к изменению карбонатного равновесия.

Наглядным проявлением этого служит подавление осаждения карбонатных солей жёсткости при ультразвуковой обработке природной воды (см. рис. 1). Вместе с тем, высокая карбонатная жёсткость способна оказаться не недостатком, а достоинством воды, если речь идёт о воде для затворения цементных смесей.

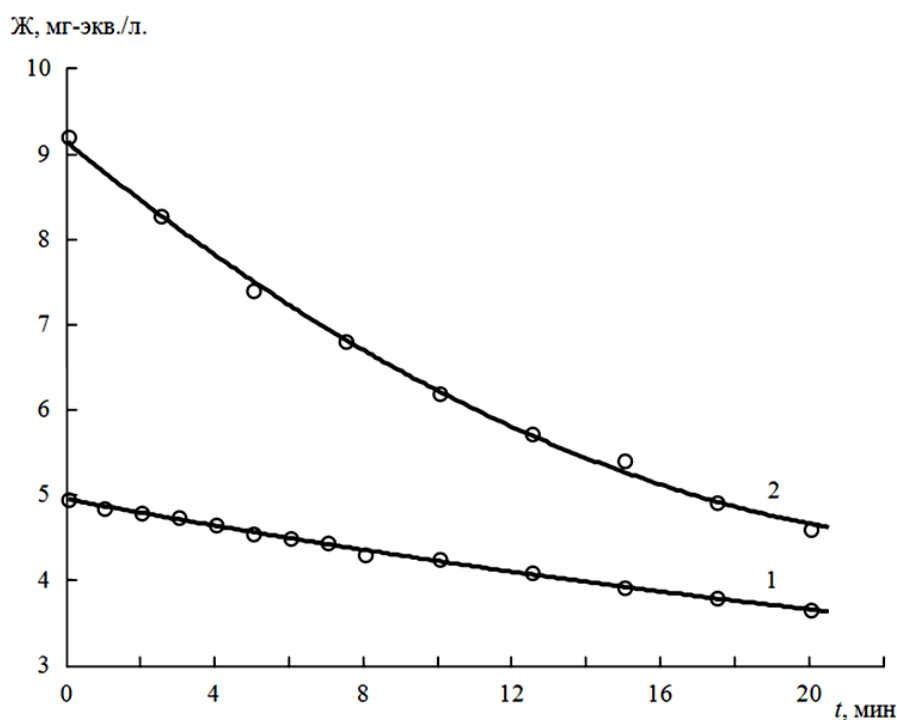


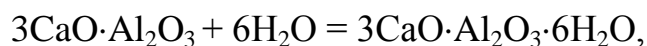
Рис. 1. Зависимость жёсткости природной воды от времени её обработки ультра звуком ( $f = 22$  кГц): 1 – вода артезианского водозабора (г. Гомель, Белоруссия); 2 – вода с выраженной гидрокарбонатной кальциевой минерализацией из подземного источника в долине слияния р. Птичь с Припятью (Полесье, Белоруссия)

В открытом объёме ультразвуковая обработка водно-цементной смеси интенсифицирует кристаллизацию  $\text{CaCO}_3$ , обеспечивая формирование микровключений карбоната кальция. Хорошо известно, что известняк и цементный камень весьма близки по деформативности. Благодаря этому использование известняка в качестве заполнителя превращает бетон в однородный по структуре материал, лишённый зон концентрации напряжений, но для достижения такого эффекта необходимы высокая дисперсность и чистота карбонатной фракции. При ультразвуковой обработке водно-цементной смеси обеспечивается «автоматическое» выполнение этих требований.

В закрытом объёме ультразвуковая обработка водно-цементной смеси вызывает повышение давления углекислого газа в суспензии. Основным результатом такого воздействия – снижение pH водного раствора [реакции (II) и (V)], ускоряющее гидратацию трёхкальцевого и двухкальцевого силикатов



Благодаря этому уменьшается «отставание» кристаллизации алитовой и белитовой фаз цементного камня от гидратации трёхкальцевого алюмината



что существенно повышает однородность цементного камня, т.е. его прочность. Тот же фактор – соноиндуцированное снижение pH раствора – интенсифицирует гидратацию глинозёмистого цемента, ускоряя выделение аморфного гидроксида алюминия в различных основных формах и экстрагирование оксида кальция из гидратных алюминатов в воду затворения с образованием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Насыщение кальциевой щёлочью даёт важный побочный эффект – позволяет создавать самовосстанавливающиеся бетоны [13], в которых трещины кольтатируются *карбонатом кальция*, продуцируемым специфическими алкалофильными бактериями [14]. Испытания бетонов с бактериальными добавками обнадёживают [15], но для массового внедрения таких технологий необходимо исключить возможность перерождения положительного биохимического эффекта в биокоррозию. Обсудим эту проблему подробнее.

Эффективным средством управления размножением бактерий является воздействие слабых магнитных полей [16]. В идеальном случае магнитное поле повышает жизнестойкость «полезных» для бетона бактерий и одновременно подавляет бактерии, вызывающие биокоррозию. Тогда нужный результат даст обычное армирование бетона: остаточная намагниченность, приобретаемая го-



рячекатаной сталью при её остывании в геомагнитном поле, весьма значительна и достаточна для обеспечения требуемого магнитобиохимического эффекта.

Рассмотренный случай квалифицирован как идеальный, т.к. он наиболее прост в осуществлении, но в то же время требует строгого соблюдения технологии армирования бетона. В реальности возможны некачественное инъецирование каналов, применение загрязненных хлоридами заполнителей, длительное пребывание напряжённой арматуры в каналах без защиты и т.п. В таких условиях намагниченность стальной арматуры, резко интенсифицирующая её коррозию (см. [17]), нежелательна. Остаточная намагниченность арматуры плохо поддаётся устранению размагничиванием, поэтому остывающую горячекатаную арматурную сталь целесообразно подвергать ультразвуковой обработке, препятствующей закреплению границей магнитных доменов на структурных несовершенствах. При разработке составов самовосстанавливающихся бетонов предпочтение следует отдавать магнитофобным бактериальным добавкам. В таком случае при необходимости армирования бетона можно использовать дешёвую (нелегированную) арматурную сталь, ультразвуковое размагничивание которой не только повысит её коррозионную стойкость после горячей прокатки, но и обеспечит благоприятные условия для кольматирующих бактерий.

При ультразвуковом воздействии на реакционную смесь неизбежно возникновение сонохимических резонансов и антирезонансов – максимумов и минимумов эффективности акустического воздействия. Формально частоты резонансов и антирезонансов можно определить, анализируя частотную зависимость сонохимической эксергии реакционной смеси. Однако поскольку характеристические частоты соответствуют определённому сочетанию компонентов при заданных термобарических условиях, любое изменение состава или режима вызовет изменение частоты сонохимического резонанса (антирезонанса). В связи с этим при технологическом осуществлении сонохимических процессов целесообразно использовать ультразвуковые биения.

Речь идёт об особых («псевдорезонансных») биениях, которые возникают при сложении косинусоидальных колебаний, имеющих частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , одина-

ковые амплитуды  $p_m$  и нулевые начальные фазы. В этом случае амплитуда результирующего колебания давления изменяется со временем по закону

$$\tilde{p}_\Sigma(t) = 2p_m \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t, \quad (6)$$

а само результирующее колебание совершается по косинусоидальному закону с частотой  $(\omega_1 + \omega_2)/2$  и нулевой начальной фазой, но обладает периодичностью только при

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{l+2}{l+1},$$

где  $l$  – натуральное число. Псевдорезонансный эффект обеспечивается при  $l = 0$ , т.е. при

$$\omega_2 = \omega, \quad \omega_1 = 2\omega. \quad (7)$$

При выполнении требования (6) акустическая волна будет содержать непрерывную последовательность частот, кратных основной частоте  $\omega$ .

Генератором псевдорезонансных биений может служить устройство, принципиальная схема которого представлена на рис. 2. Основу генератора составляет пьезоэлектрический кристалл 1, в котором одна и та же упругая деформация может возбуждаться электрическими воздействиями в двух различных кристаллографических направлениях<sup>\*)</sup>. Электрические генераторы задающих одиночных косинусных колебаний с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  подключают к зажимам 2 и 3, соединённым соответственно с парными электродами 4 и 5. Высо-

---

<sup>\*)</sup>Этой способностью обладают пьезоэлектрические кристаллы классов 2, 3, 4,  $\bar{4}$ , 6 *имм*2, у которых гармонические электрические возбуждения, совместно действующие вдоль X- и Y-направлений, порождают сдвиговые биения вдоль этих направлений. По совокупности эксплуатационных характеристик наиболее предпочтительно использование кристалла иодата лития LiIO<sub>3</sub>.

коинтенсивные биения давления легко получить, подавая первичные биения через преобразующее устройство 6 на вход 7 магнитострикционного генератора акустических колебаний.

Существенно, что вышеописанное «обогащение» акустического спектра также позволяет значительно повысить эффективность ультразвуковой обработки жидкофазных систем, проводимой в кавитационном режиме. Указанная возможность обеспечивается тем обстоятельством, что эрозионная и диспергирующая производительность кавитации определяются ультра- и субгармоническими составляющими акустической волны, а также её шумовой компонентой.

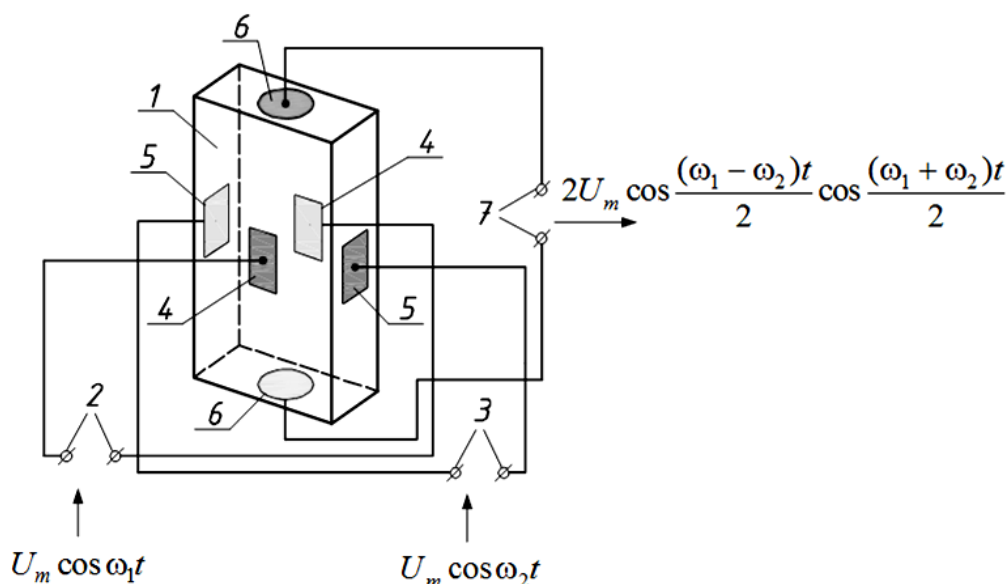


Рис. 2. Схема генератора электрических биений: 1 – пьезоэлектрический кристалл (для наглядности чертежа изображён прозрачным), 2 и 3 – зажимы электрических генераторов одиночных косинусных колебаний, 4 и 5 – электроды, 6 – пьезоэлектрический преобразователь, 7 – выходные зажимы

**Заключение.** Акустическое воздействие может не только инициировать химические реакции (положительный сонохимический эффект), но и подавлять их (отрицательный сонохимический эффект). Из-за необходимости накопления в реакционной смеси химической эксергии  $\Xi_{sch}$  до её порогового значения, отвечающего инициированию либо подавлению реакции, сонохимический эффект возможен только при надпороговых значениях произведения  $I_f$ . Технический результат ультразвуковой обработки водно-цементной смеси в общем случае

зависит от величины  $\dot{\Xi}_{ch}$ , а для смеси определённого состава – от величины произведения  $I_f$ .

При допороговых значениях  $I_f$  будет проявляться только вибромеханический эффект – разрушение «преждевременной» коагуляционной структуры, повышающее текучесть смеси и облегчающее заполнение смесью форм. При значениях  $I_f$ , обеспечивающих превышение эксергетического порога, определяющим фактором становится сонохимическое изменение кислотности воды, приводящее к изменению карбонатного равновесия.

Зависимость  $\dot{\Xi}_{ch}(f)$  полиэкстремальна, вследствие чего существуют частоты сонохимических резонансов и антирезонансов – максимумов и минимумов эффективности акустического воздействия. Существенно, что сонохимические резонансы и антирезонансы могут наблюдаться не только при изменении  $f$ , но и при варьировании качественного и количественного состава смеси.

### Список литературы

1. Рудаков О.Б. Хроматографический анализ строительных материалов // Аналитика. 2017. № 6 (37). С. 64-73.
2. Хорохордин А.М., Рудаков Я.О., Перцев В.Т., Черепихина Р.Г., Рудаков О.Б. Применение гашёного известью шлам-лигнина в качестве добавки в бетон // Химия, физика и механика материалов. 2021. № 2 (29). С. 90-97.
3. Перцев В.Т., Козодаев С.П. Химизация и наномодифицирование – современный путь совершенствования технологии цементных систем // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 1 (24). С. 121-130.
4. Перцев В.Т., Леденев А.А., Рудаков О.Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. Т. 20. № 3. С. 432-442.
5. Шабловский Я.О. Магнитная обработка питьевой и технологической воды // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 4 (27). С. 4-24.
6. Долгополов Н.Н. Звукохимические методы в технологии строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1962. 140 с.

7. Ganjian E., Ehsani A., Mason T.J., Tyrer M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives // *Materials & Design*. 2018. Vol. 160, № 1. P. 503-513.
8. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4(37). С. 85-99.
9. Василяк Л.М. Применение ультразвука в системах обработки воды // *Электронная обработка материалов*. 2010. № 5. С. 106-111.
10. Margulis, M.A. *Sonochemistry and cavitation*. London: Gordon and Breach, 1995. 546 p.
11. Мартынов Г. А. Общая теория распространения звуковых волн // *Теоретическая и математическая физика*. 2006. Т. 146. № 2. С. 340-352.
12. Шабловский Я.О. Особенности эксергетического анализа реакций с участием твёрдых фаз // *Теоретич. основы химич. технологии*. 2013. Т. 47. № 5. С. 558-565.
13. Vijay K, Murmu M., Deo S.V. Bacteria based self-healing concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 15. № 1. P. 1008-1014.
14. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // *Транспортные сооружения*. 2018. Т. 5. № 4. С. 7-1–7-13.
15. Ерофеев В.Т. Исследование изменений прочностных характеристик цементных композитов в зависимости от концентрации в них бактерий и возраста образцов // *Приволжский научный журнал*. 2018. № 3. С. 70-77.
16. Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Мальцева Е.Л. Сверхслабые воздействия химических соединений и физических факторов на биологические системы // *Биофизика*. 2004. Т. 49. № 3. С. 551-564.
17. Шабловский Я.О. Магнитное управление химическими свойствами ферромагнитных материалов // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 4 (23). С. 93-109.

## References

1. Rudakov O.B. Chromatographic analysis of building materials. *Analytics*, 2017, no. 6 (37).P. 64-73. (in Russian).
2. Khorokhordin A.M., Rudakov Ya.O., Perzev V.T., Cherepakhina R.G., Rudakov O.B. [Application of slime-lignin with slaked lime as an organomineral additive in cement]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]*, 2021, no. 2 (29).P. 90-97. (in Russian).
3. Pertsev V.T., Kozodaev S.P. [Chemization and nanomodifying for the aims of developing cement technologies] *Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]*, 2020, no. 1 (24).P. 121-130. (in Russian).
4. Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. [Physical and chemical approaches to the development of effective organomineral additives for concrete] *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy [Condensed Matter and Interphases]*, 2018, vol. 20, no. 3.P. 432-442. (in Russian).
5. Shablovsky Ya.O. Magnetic treatment for freshwater supply and for technology // *Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]*, 2020, no. 4 (27).P. 4-24. (in Russian).
6. Dolgopolov N.N. *Zvukohimicheskie metody v tehnologii stroitel'nykh materialov*. M.: Gosstrojizdat, 1962. (in Russian).
7. Ganjian E., Ehsani A., Mason T.J., Tyrer M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives // *Materials & Design*. 2018. Vol. 160, no. 1.P. 503-513.
8. Fedjuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. *Sovremennyye sposoby aktivatsii vjazhushhego i betonnykh smesey (obzor) // Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2018, no. 4(37).P. 85-99. (in Russian).
9. Vasiljak L.M. *Primenenie ul'trazvuka v sistemah obrabotki vody // Elektron'naya obrabotka materialov*, 2010, no. 5.P. 106-111.
10. Margulis, M.A. *Sonochemistry and cavitation*. London: Gordon and Breach, 1995. 546 p.

11. Martynov G.A. The general theory of acoustic waves propagation // Theoretical and Mathematical Physics, 2006, vol. 146, no. 2.P. 285-294.
12. Shablovsky Ya.O. Exergetic analysis of solid-phase reactions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2013, vol. 47, no. 5.P. 558-565.
13. Vijay K, Murmu M., Deo S.V. Bacteria based self-healing concrete – A review // Construction and Building Materials, 2017, vol. 152, no. 1.P. 1008-1014.
14. Erofeev V.T., Smirnov V.F. [Bacteria for self-healing concretes]. Russian journal of transport engineering, 2018, vol. 5, no. 4.P. 7-1–7-13. (in Russian).
15. Erofeev V.T. [Study of changes in strength characteristics of cement composites, depending on the bacteria concentration in them and age of samples]. Pri-volzhskij nauchnyj zhurnal, 2018, no. 3.P. 70-77. (in Russian).
16. Burlakova E.B., Konradov A.A., Maltseva E.L. Effects of extremely weak chemical and physical stimuli on biological systems // Biophysics, 2004, vol. 49, no. 3.P. 522-534.
17. Shablovsky Ya.O. [Magnetic controlling chemical properties of non-ferromagnetic materials]. Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2019, no. 4 (23).P. 93-109. (inRussian).

---

**Шабловский Ярослав Олегович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и электротехники Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого