

# Magnetic Ultrasonic Water Treatment

S.I. Koshoridze, Yu.K. Levin

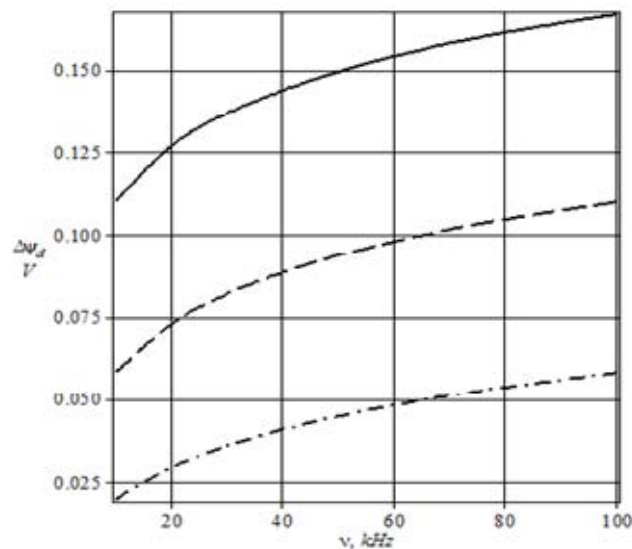
*Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, 125040, Russia*

Iam-ras@mail.ru

## Abstract

We consider the problem of the combined action of ultrasound and magnetic field on supersaturated aqueous solution. In this paper we propose a new method for correction of mass transfer processes and stimulate phase transitions in a supersaturated fixed aqueous solution while exposed to the magnetic field.

On the basis of the methods used previously to build a physical model of the magnetic treatment of the water flow was analyzed other physical situation - the imposition of ultrasound on a fixed volume of water in a magnetic field.



The estimates made show that with sufficient power of the ultrasonic wave and counter-desorption time of colloidal particles, water treatment by ultrasound in the presence of a static magnetic field can have a marked anti-scale effect. The figure shows the dependence of the Z-potential reduction on the frequency ultrasound  $\nu$ . The solid, dashed and dashed-point curves for desorption time  $t_d = 10$  s,  $t_d = 1$  s,  $t_d = 0.1$  s respectively.

The figure shows the calculated curves which show that Z-reduction potential and, accordingly, the effect of magnetic treatment increases with the frequency of the ultrasound.

water micro volumes are set in motion due to ultrasound. The Lorentz force moves the ions diffuse layer of colloidal particles in the Stern layer. Z-potential of the colloidal particles reduces, colloidal particles begin to coagulate. Colloidal solution loses stability. The particle size increases and to them the solution becomes considerably supersaturated.

Dissolved salts to crystallize the slurry rather than on the pipe walls. This leads to a decrease in scaling, observed in practice. The accounting estimates made show that with sufficient power values of the ultrasonic wave and counter-desorption time of colloidal particles, water treatment ultrasound in the presence of a static magnetic field can have a marked anti-scale effect.

Keywords: ultrasound and magnetic treatment of water, anti-scaling effect, coagulation, critical nucleus, oversaturated solution, mass transfer coefficient.

УДК 621.311.25

# Магнитно–ультразвуковая обработка воды

С.И. Кошоридзе, Ю.К. Левин

*Институт Прикладной Механики РАН, Россия, Москва, 125040, Ленинградский пр., 7  
iam-ras@mail.ru*

## Аннотация

Рассмотрена задача о совместном действии ультразвука и магнитного поля на пересыщенный водный раствор.

Предложен новый метод коррекции процессов массопереноса и стимулирования фазовых переходов в пересыщенном неподвижном водном растворе при одновременном воздействии магнитным полем. На базе методов, использованных ранее для построения физической модели магнитной обработки водного потока, был произведен анализ другой физической ситуации – наложение ультразвука на неподвижный водный объем в магнитном поле. Как всегда предполагали, что в пересыщенном растворе всегда присутствуют в «равновесной» концентрации критические зародыши. Под действием ультразвука микрообласти водного объема приходят в движение. При движении воды в магнитном поле возникает сила Лоренца, под действием которой часть ионов диффузионного слоя коллоидной частицы смещаются в слой Штерна. Таким образом, деформация двойного электрического слоя снижает  $Z$ -потенциал коллоидных частиц, силы кулоновского отталкивания уменьшаются и под действием лондоновских сил молекулярного притяжения коллоидные частицы начинают коагулировать. Коллоидный раствор теряет устойчивость. При этом критические зародыши, которые всегда присутствуют в пересыщенном растворе в «равновесной» концентрации, слипаются. Размер частиц возрастает и по отношению к ним раствор становится существенно пересыщенным.

На поверхности частиц активно идет кристаллизация растворенных солей. Поверхность взвеси многократно возрастает и поток молекул растворенной соли на взвесь пропорционально увеличивается, уменьшая поток молекул на стенки. Это приводит к уменьшению накипи, наблюдаемому на практике. В произведенных расчетных оценках показано, что при достаточных значениях мощности ультразвуковой волны и времени десорбции противоионов от коллоидной частицы, обработка воды ультразвуком в присутствии статического магнитного поля может обладать заметным противонакипным эффектом.

Ключевые слова: магнитная обработка воды, противонакипный эффект, коагуляция, критический зародыш, пересыщенный раствор, коэффициент массопереноса

## 1. Введение

Сложность многих реальных практических задач неизбежно приводит к необходимости создания моделей современной механики с учетом интегрированного подхода к задачам физической механики, объединяющего эти модели на разном уровне описания процессов и явлений.

К числу таких задач относится известное с середины прошлого века явление снижения накипи при воздействии магнитного поля на водный поток.

Однако долгое время наука не могла понять причины проявления всех этих эффектов. Сложность проблемы, очевидно, состоит в том, что процессы, ответственные за наблюдаемые эффекты, происходят на наноразмерном уровне и необходимые подходы для понимания существа явления еще не были сформированы – методы физической кинетики и нано-

механики получили свое развитие в новейший период времени. В частности, совсем недавно было показано, что наноразмерные эффекты проявляются влиянием межфазного слоя на энергию образования новой поверхности и на размер критических зародышей, формируемых при гомогенной генерации, а также на их равновесную концентрацию.

В работах [1–6] рассмотрена физическая модель стимулирования магнитным полем фазовых переходов из растворенного состояния в твердую фазу (накипь). В основу модели положена известная теория ДЛФО. (Дерягин и Ландау – 1938–1941 г.г., Фервей и Овербек – 1948 г.), по которой коллоидные частицы в растворе взаимодействуют друг с другом, причем силы кулоновского отталкивания зарядами диффузного слоя уравниваются силами молекулярного притяжения, чем обеспечивается устойчивость коллоидного раствора. При движении воды в магнитном поле возникает сила Лоренца, под действием которой часть ионов диффузионного слоя коллоидной частицы смещаются в слой Штерна. Таким образом, деформация двойного электрического слоя снижает  $Z$ -потенциал коллоидных частиц, силы кулоновского отталкивания уменьшаются и под действием лондоновских сил молекулярного притяжения коллоидные частицы начинают коагулировать. Коллоидный раствор теряет устойчивость. При этом критические зародыши, которые всегда присутствуют в пересыщенном растворе в «равновесной» концентрации, слипаются. Размер частиц возрастает и по отношению к ним раствор становится существенно пересыщенным. На поверхности частиц активно идет кристаллизация растворенных солей. Поверхность взвеси многократно возрастает и поток молекул растворенной соли на взвесь пропорционально увеличивается, уменьшая поток молекул на стенки. Это приводит к уменьшению накипи, наблюдаемому на практике. На базе данной физической модели была разработана математическая модель магнитной обработки воды для компьютерного моделирования процессов массопереноса и фазовых трансформаций в пересыщенном водном потоке [1, 3]. Ее адекватность была подтверждена сопоставлением с известным экспериментом [7].

Итак, ключевым моментом влияния магнитного поля является движение ионов диффузного слоя в магнитном поле, которое задавалось скоростью водного потока по трубе. Вместе с тем, движение ионов можно осуществить при наложении ультразвуковой волны на неподвижный омагничиваемый водный объем. Разработанную ранее модель [1, 6] можно адаптировать, применить аналогичные методы в новой физической ситуации – рассчитать возможность получения противонакипного эффекта в неподвижной жидкости, подвергнув ее действию ультразвука вместе с магнитным полем. Это является предметом настоящего рассмотрения.

## 2. Исходная физическая модель

Выше отмечалось, что магнитная обработка воды (МОВ) снижает накипь и повышает КПД установок. Природа явления обсуждалась в ряде статей [1–6], где показано, что при движении воды в магнитном поле силы Лоренца, деформируя двойной электрический слой (ДЭС) и уменьшая электрокинетический потенциал (ЭКП), стимулируют коагуляцию коллоидных частиц (КЧ) критического размера. Пересыщение раствора по отношению к укрупненным КЧ вызывает лавинную кристаллизацию на них солей накипи, что снижает их поток на стенки трубы. Этим и обусловлен противонакипный эффект МОВ. Вместе с тем, в поле звуковых волн частицы воды также движутся. Поэтому при наложении магнитного поля будут возникать силы Лоренца, способные вызвать противонакипный эффект, как и при традиционной реализации МОВ. Рассмотрим [2, 4] положительно заряженную коллоидную частицу, состоящую из молекул  $CaCO_3$  (в данном случае не важно, какую кристаллическую структуру – кальцита или арагонита имеет частица с эффективным радиусом  $a$ ). На рис.1 показаны т.н. потенциалобразующие, или ко-ионы  $Ca^{2+}$  и  $CaHCO_3^+$ . Они химически закреплены на поверхности частицы и образуют ее положительный заряд. Вокруг коллоидной частицы расположен очень тонкий слой Штерна (порядка 1–2 атомных размеров),

содержащий кроме потенциалообразующих ионов также захваченные отрицательные противоионы  $HC0_3^-$ . Дальше в водном растворе, окружающем коллоидную частицу, расположен диффузионный ДЭС, состоящий из катионов (ко-ионов) кальцита  $Ca^{2+}$  и анионов (противоионов) бикарбоната  $HC0_3^-$  причем концентрация анионов значительно превосходит концентрацию катионов. Внутри границы диффузионного и штерновского слоев распределен заряд с удельной поверхностной плотностью  $\sigma_d$ .

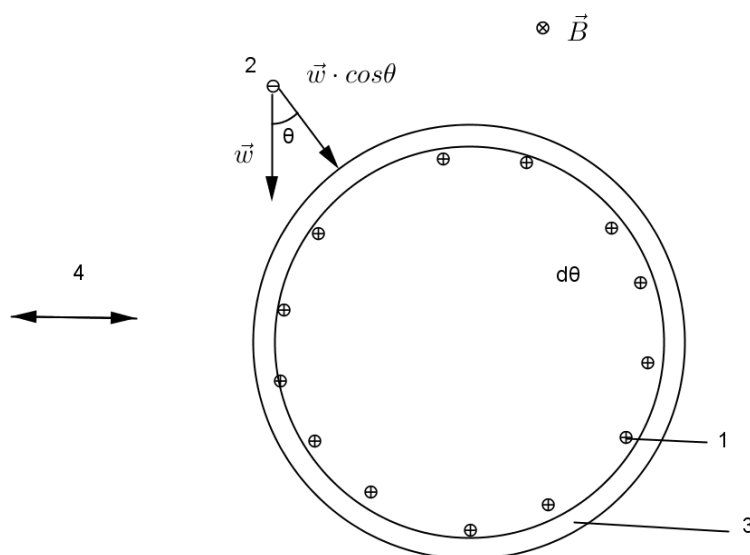


Рис.1. Схема, поясняющая лоренцовское смещение отрицательных противоионов в сторону заряженной коллоидной частицы  $CaCO_3$  в поле ультразвуковой волны. Обозначения: 1 – потенциалообразующие ионы  $Ca^{2+}$ ,  $CaHC0_3^+$ ; 2 – противоионы  $HC0_3^-$ ; 4 – слой Штерна; 5 – направление колебания элемента воды вместе с находящейся в нем коллоидной частицей радиуса  $a$  в поле ультразвуковой стоячей волны.

Пусть на рис.1 магнитное поле перпендикулярно направлению распространения звуковой волны в воде и направлено от нас. Будем считать, что в сосуде стоячая звуковая волна. Для частоты колебаний  $\nu = 20 \text{ кГц}$ , при скорости звука в воде  $c = 1480 \text{ м/с}$  получаем длину волны  $\lambda_0 = c / \nu = 74 \text{ мм}$ . Если излучатель колеблется с частотой  $\nu$  и амплитудой  $x_0$  (к примеру  $x_0 = 50 \text{ мкм}$ ), вблизи от излучателя каждый элемент водного массива будет совершать гармонические колебания (для простоты пространственное затухание амплитуды колебаний не учтем). Зависимость скорости колебательного движения от времени описывается законом

$$V(t) = k2\pi\nu x_0 \sin(2\pi\nu t) \quad (1)$$

где

$$V_0 = k2\pi\nu x_0 \quad (2)$$

амплитуда скорости. Параметр  $k$  меняется от 0 (узел стоячей волны) до 1 (пучность) (в нашем примере  $0 \leq V_0 \leq 6.2 \text{ м/с}$ ). Уравнение зависимости удельной поверхностной плотности заряда на "сфере Штерна" от времени  $\sigma_d(t)$  удовлетворяет уравнению [2,4]:

$$\frac{d\sigma_d(t)}{dt} = -0.25\lambda FzC \cdot \exp\left(\frac{Fz\psi_d(t)}{RT}\right) |V(t)| B + \frac{\sigma_d(0) - \sigma_d(t)}{t_d} \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_d(0)$  – поверхностная плотность заряда перед началом магнитной обработки;  $F = 96486 \text{ Кл/моль}$  – число Фарадея;  $z$  – кратность заряда противоиона;  $C \left( \frac{\text{моль}}{\text{м}^3} \right)$  – концентрация раствора,  $t_d$  – т.н. время десорбции, определяющей через какое время захваченный коллоидной частицей противоион возвратится обратно в диффузионный слой,  $\lambda$  – подвижность противоионов, связанная с индукцией магнитного поля  $B$ , скоростью элемента воды в трубе  $V$  и скоростью дрейфа противоионов относительно водного раствора  $w$  соотношением:

$$\lambda = \frac{w(t)}{V(t)B} \quad (4)$$

Так как период колебаний значительно больше времени релаксации (времени свободного пробега иона), дрейфовая скорость ионов и скорость элемента воды колеблются синфазно. Формула (4) требует разъяснений: согласно теории Гамаюнова [14],  $w$  пропорционально  $V$  для противоионов, находящихся от штерновского слоя на расстоянии порядка  $\bar{V} \cdot \nu$  (см.(6)) только для одного полупериода. Для другого полупериода эти противоионы будут «неподвижны», так как уже захвачены двойным слоем. Однако формула (4) в этом случае будет работать уже для противоионов, прилипающих к коллоидной частице с противоположной стороны. Таким образом, к коллоидной частице прилипание происходит попеременно то с одной, то с другой «полусферы».

Подвижность  $\lambda$  ионов связана с их коэффициентом диффузии  $D$  формулой Эйнштейна:

$$D = \frac{RT\lambda}{zF} \quad (5)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная. Знак модуля для скорости  $|V(t)|$  в (3) учитывает тот факт, что при изменении направления скорости элемента воды  $V$  через полупериод, противоионы начинают прилипать к противоположной "полусфере" коллоидной частицы. При этом средний заряд частицы не будет зависеть от знака скорости. В формуле (3) мгновенная скорость  $|V(t)|$  – быстро осциллирующая функция времени. Для удобства расчетов ее можно заменить средним за полупериод значением

$$\bar{V} = 2\nu \int_0^{\frac{1}{2\nu}} V(t) dt = \frac{2V_0}{\pi} \quad (6)$$

Так как средняя по времени плотность звуковой энергии  $\bar{E}$  плоской волны, распространяющейся в среде с массовой плотностью  $\rho$ , равна [15]  $\bar{E} = \rho V^2 = 0.5\rho V_0^2$ , то согласно (2) при фиксированной амплитуде колебаний излучателя  $x_0$  величина  $\bar{E}$  будет прямо пропорциональна квадрату частоты  $\nu^2$  звуковой волны.

В приближении плоского двойного электрического (ДЭС) слоя существует простая связь между поверхностной плотностью заряда и электрокинетическим потенциалом (ЭКП)  $\psi_d(t)$  коллоидной частицы [3, 5]:

$$\sigma_d(t) = 2\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon RTC} \cdot \text{sh}\left(\frac{Fz\psi_d(t)}{2RT}\right) \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды. После подстановки (7) в (3) и интегрирования, получается аналитическое соотношение, позволяющее рассчитать уменьшение в магнитном аппарате ЭКП по времени  $\Delta\psi_d(t) = \psi_d(0) - \psi_d(t)$ .

### 3. Обсуждение результатов

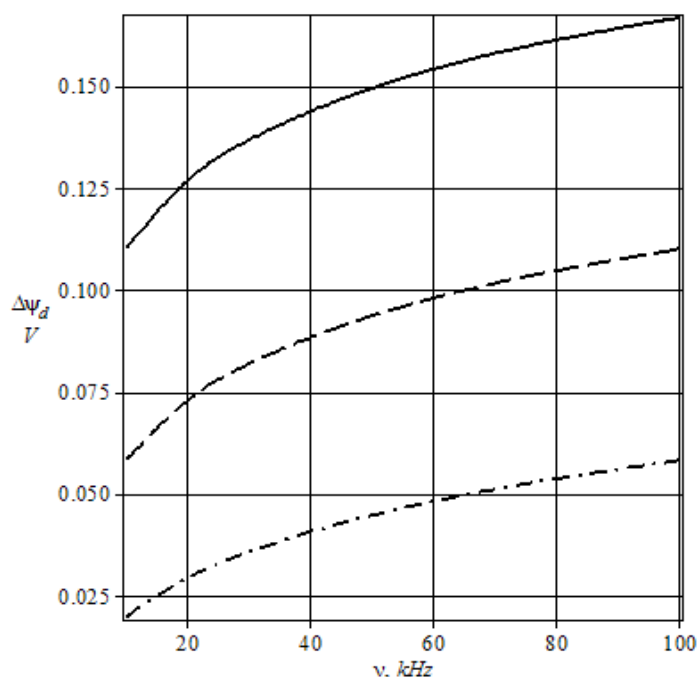


Рис.2. Зависимость понижения ЭКП коллоидной частицы  $\Delta\psi_d$  от частоты воздействующего ультразвука  $\nu$  после обработки в течение времени  $\tau$  при фиксированной амплитуде колебаний  $x_0$  излучателя.

Расчетные параметры:  $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $z = 1$ ;  $T = 300\text{ К}$ ;  $B = 0.25 \text{ Тл}$ ;  $\psi_0 \equiv \psi(0) = 0.19 \text{ В}$ ;  $C = 2.6 \text{ моль}/\text{м}^3$ ;  $a = 2 \text{ нм}$ ;  $x_0 = 50 \text{ мкм}$ ;  $\tau = 10 \text{ с}$ .

Сплошная кривая –  $t_d = 10 \text{ с}$ , пунктирная кривая  $t_d = 1 \text{ с}$ , штрих-пунктир  $t_d = 0.1 \text{ с}$ . Расчет проведен в приближении плоского ДЭС.

Наш расчет показывает, что при достаточных значениях мощности ультразвуковой волны и времени десорбции противоионов от коллоидной частицы, обработка воды ультразвуком в присутствии статического магнитного поля может обладать эффективным противонакипным эффектом. Действительно, при начальном значении ЭКП КЧ 0.15–0.3 В полученное смещение ЭКП в диапазоне времен десорбции 0.1 с – 10 с составляет (15–50)%. С учетом экспоненциальной зависимости эффективности МОВ от ЭКП можно ожидать снижения накипи в десятки раз при соответствующих параметрах установок МОВ.

### 4. Заключение

Рассмотрено поведение пересыщенного раствора солей  $\text{CaCO}_3$  при магнитной обработке водного потока. Использована гипотеза Гамаюнова Н.И. [14], согласно которой после воздействия магнитного поля из-за деформации двойного электрического слоя коллоидный раствор теряет устойчивость и в нем начинается коагуляция критических зародышей. Далее учтено, что в растворе возникают частицы с радиусом больше критического и на них путем гетерогенной кристаллизации оседают молекулы накипи из пересыщенного раствора. Напомним, что в более ранних работах [2–7] при обсуждении модели противонакипной эффективности магнитного поля было показано, что шесть основных обстоятельств определяют величину противонакипного эффекта:

1. Деформация двойного электрического слоя дает начало процессу коагуляции коллоидных частиц.
2. По отношению к коагулированным частицам на начальных этапах коагуляции пересыщение раствора резко возрастает.

3. Массоперенос кристаллизующихся молекул из водного раствора на наноразмерную взвесь протекает намного активнее, чем на стенки теплообменника.

4. Удельная энергия образования новой поверхности существенно уменьшается при наноразмерах критических зародышей, экспоненциально увеличивая скорость их гомогенной генерации и концентрацию в растворе.

5. Убыль концентрации критических зародышей непрерывно восполняется за счет гомогенной генерации новых критических зародышей для сохранения динамического равновесия жидкой и твердой фаз в пересыщенном растворе, в соответствии с [4].

6. Увеличение концентрации взвеси в объеме омагниченного водного потока приводит к радикальному перераспределению накипи между стенкой и взвесью в пользу последней, что и определяет наблюдаемый противонакипный эффект магнитной обработки.

Хотя в данной работе мы коснулись только первых трех из шести составляющих, сочли для полноты картины напомнить все черты рассматриваемого эффекта, чтобы определить место данного фрагментарного анализа в полной картине явления. При этом понятно, что нерассмотренные здесь составляющие 4–6 общего эффекта сохраняют свое влияние на величину противонакипной эффективности при наложении ультразвука так же, как и в традиционной ситуации движения водного потока в магнитном поле. Численные оценки эффекта в целом также не проведены, т.к. являются темой дальнейшего анализа.

Тем не менее, представляется важным сам вывод об альтернативной возможности реализации магнитной обработки неподвижного водного объема с помощью ультразвука.

В заключение следует отметить, что только с применением инструментов физической кинетики и наномеханики и с учетом закономерностей, характерных для наноразмерных объектов, стало возможным внести ясность в проблему магнитной обработки водного потока, которая оставалась непонятной с первой половины прошлого века. Это подтверждает эффективность новых подходов путем перехода к анализу в наноразмерных масштабах, а также предсказательную силу и практическую значимость указанных подходов. Особо отметим приоритет русских ученых – Дерягина и Ландау (1938–1941гг), а также Гамаюнова Н.И. (1983–1994гг), своими работами заложивших основы решения задачи омагничивания водных систем.

## Литература

1. Быков Н.Ю., Горбачев Ю.Е. Прямое статистическое моделирование процессов роста кластеров на базе классической теории нуклеации с поправкой на размер // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Том.13, вып.1. 14 с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/304/>
2. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Механизм снижения накипи при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах. Теплоэнергетика. 2013. № 3. С.74–77
3. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Влияние магнитного поля на коагуляцию наноразмерных коллоидных частиц // ПЖТФ. 2014. Т.40. Вып.16. С.80–87.
4. Koshoridze S. I., Levin Yu. K. Model of scale deposition with magnetic water treatment // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2014. Vol.5 . №1. P.51–72.
5. Koshoridze S. I., Levin Yu. K. Z-potential of colloidal nanoparticles as a function of magnetic treatment time and temperature // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2014. Vol. 5. № 2. P.1–11.
6. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Влияние коагуляции коллоидных частиц на снижение накипеобразования при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах. Теплоэнергетика. 2011. №7. С.13–16.

7. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Механизм снижения накипи при магнитной обработке водного потока // *Фундаментальные исследования*, №9 (часть 11), 2014 С.2433–2439.
8. S. I. Koshoridze, Yu. K. Levin. Determining the range of dimensions of nanomechanics objects//*Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*.2014. Vol. 5 . №2. P.12–22.
9. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Расчет противонакипного эффекта в омагниченном водном потоке // *Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015) 24–31 мая 2015 г., Алушта. Москва. Издательство МАИ. 2015. С.469–471.*
10. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. О возможности применения ультразвука для магнитной обработки воды // *Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием (к 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова) "Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред" (15-17 декабря 2015 года, г. Москва). М.: ФГУБН Институт прикладной механики Российской академии наук, 2015. С.374–376.*
11. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Моделирование концентрации критических зародышей пересыщенных растворах // *Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием (к 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова) "Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред" (15–17 декабря 2015 года, г. Москва). М.: ФГУБН Институт прикладной механики Российской академии наук, 2015. С.371–373.*
12. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Совместное действие генерации и коагуляции критических зародышей в пересыщенных растворах // *Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием (к 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова) "Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред" (15-17 декабря 2015 года, г. Москва). М.: ФГУБН Институт прикладной механики Российской академии наук, 2015. С.377–379.*
13. Szkatula A, Balanda M., Kopeć M. Magnetic treatment of industrial water. Silica activation // *The Europ. Phys. J. – Appl. Phys.* 2002. V.18. P. 41–49.
14. Гамаюнов Н.И. Воздействие постоянного магнитного поля на движущиеся растворы и суспензии // *Коллоидный журнал*. 1994. Т.56. №2. С.290–298.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 6. Гидродинамика. Издательство. «Наука». Москва. 1986. 736 с.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2015 г.