

УДК 544.32:66.086

## МАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*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*

Дано аналитическое описание влияния статических магнитных полей на термодинамическое состояние неферромагнитных материалов. Получены выражения для магнитоиндуцированных приращений термодинамических функций. Показано, что магнитостатические воздействия могут повышать либо понижать температурный порог реакции, а также изменять знак её теплового эффекта и знак приращения энергии Гиббса реакционной смеси. Термодинамически запрещённая реакция может оказаться осуществимой при внесении реакционной смеси в электрическое либо магнитное поле, и наоборот, возможно электрическое либо магнитное подавление реакции. Выполнены расчёты, иллюстрирующие пути осуществления таких возможностей. Особое внимание уделено магнитной обработке воды. Показано, что известный эффект омагничивания водных систем представляет собой магнитоиндуцированное проявление феномена редких фёдоровских групп. При наличии магнитного поля кристаллохимически приоритетным является формирование  $\text{CaCO}_3$  в арагонитовой модификации, которая при этом образуется не только в результате «первичной» кристаллизации, но и в результате рекристаллизации присутствующего в реакционной системе кальцита, что внешне проявляется как удаление уже существующей накипи.

**Ключевые слова:** неферромагнитные материалы, магнитостатическое поле, химическая активность, магнитная водоподготовка

## MAGNETIC CONTROLLING CHEMICAL PROPERTIES OF NON-FERROMAGNETIC MATERIALS

*Ya.O. Shablovsky*

*Gomel State Technical University, Belorussia*

*246746, Gomel, prosp. Oktiabria, 84,*

*Corresponding author: Shablovsky Ya.O., E-mail: ya.shablovsky@yandex.ru*

The paper deals with static magnetic fields and provides analytical description of their effect on the reaction mixtures and on chemical processes in them. The expressions for magnetoinduced increments of characteristic thermodynamical functions are obtained. For individual components of a reaction mixture these increments are positive for paramagnetic substances and are negative for diamagnetic substances. The resulting increment of a thermodynamical function in a reaction can have any sign. This fact means that static magnetic fields can enhance or diminish reaction thresholds as well as change both the sign of the reaction thermal effect and the sign of the increment of the Gibbs energy of the reaction mixture. A thermodynamically forbidden reaction can turn out to be realizable when placing the reaction mixture in the static electric and magnetic field and vice versa electric and/or magnetic suppressing a reaction is possible. The former opportunity provides the possibility of implementing new ways of chemical synthesis. The latter opportunity provides stabilizing metastable and even unstable substances by static magnetic fields. We also carried out a series of calculations illustrating the new possibilities we mentioned. Special attention is paid to scale magnetic water treatment. It is shown that the effect of magnetized water systems is a magneto-induced display of the crystallochemical phenomenon of rare Fedorov groups. Magnetic field makes calcium carbonate to crystallize in the form of aragonite which is being formed not only as a result of primary crystallization but also not only as a result of recrystallizing calcite the latter being displayed as removing the previous scale.

**Keywords:** non-ferromagnetic materials, magnetostatic field, chemical activity, magnetic water treatment

**Введение.** Магнитное управление свойствами материалов может осуществляться тремя путями [1]: 1) индуцированием магнитохимических процессов; 2) воздействием переменного магнитного поля; 3) воздействием постоянного магнитного поля.

Магнитохимические процессы крайне специфичны и имеют ограниченную практическую применимость из-за сложностей технической реализации. Переменное магнитное поле, напротив, очень легко реализовать, однако эффект его воздействия, определяющийся поглощением энергии электромагнитного поля в веществе, по своей сущности мало отличается от «обычного» (термического) разогрева [2]. Предмет нашего исследования – влияние постоянного магнитного поля на химические свойства неферромагнитных материалов.

Эта проблема занимает в современном химическом материаловедении особое положение. Принципиальная возможность магнитного управления химическими свойствами неферромагнитных веществ была обоснована ещё в первой половине прошлого века [3]. Однако неудачно сделанный в работе [4] выбор объекта для экспериментальной проверки выводов [3] перечеркнул их, и в последующем применение магнитных воздействий в химико-технологической практике ограничивалось обработкой воды и водных растворов [5]. Такая обработка, в частности, позволяет эффективно управлять процессами гидратации и структурообразования цементных систем [6, 7], а также интенсифицировать очистку сточных вод [8]. Вместе с тем, попытки количественно оценить соответствующие магнитоиндуцированные эффекты в неферромагнитных средах неизменно приводят к парадоксальному выводу [9]: для достижения технически значимого результата требуются недостижимо сильные магнитные поля. В связи с этим сложилось мнение, что ощутимые магнитоиндуцированные эффекты возможны только в материалах со специфической структурной организацией [9].

Большинство труднообъяснимых магнитоиндуцированных эффектов наблюдалось в водных системах, которым, как известно [10], свойственны сложные и многообразные процессы структурообразования. Однако магнитное поле столь же существенно влияет на химические свойства веществ совершенно иной природы [3, 11], в том числе на реакционную способность азидов тяжёлых металлов [12], не отличающихся чрезмерно сложным строением. Это

побуждает согласиться с мнением [13] о необходимости уточнений и дополнений традиционной методики расчёта электромагнитных эффектов в веществе.

В следующих разделах нашей работы мы дадим количественную оценку влияния магнитостатического поля на химические свойства неферромагнитных материалов. Магнитоиндуцированные эффекты в органических системах были проанализированы в работе [14]. В настоящей работе исследовано влияние магнитостатического поля на неорганические вещества.

### Теоретический анализ

Магнитное поле создаётся только движущимися зарядами, т. е. электрическими токами. В общем случае напряжённость магнитного поля определяется равенством [15]

$$\mathbf{h} = \frac{1}{4\pi} \int_{\nu} \frac{[\mathbf{J} \times \mathbf{r}]}{r^3} d\nu,$$

где  $\mathbf{J}$  – вектор плотности тока, создающего магнитное поле. Согласно общепринятым представлениям, воздействие магнитного поля на вещество заключается в упорядочении молекулярных токов – движений заряда внутри ионов и молекул. Результатом такого упорядочения является намагничивание вещества, создаваемое суперпозицией его молекулярных токов.

Намагничивание характеризуется вектором намагничения  $\mathcal{M}$  – магнитным моментом единицы объёма. Намагничивание не сопровождается совершением работы, поэтому термодинамический результат воздействия магнитного поля на вещество будет определяться величиной потенциальной функции системы молекулярных токов в магнитном поле. Для произвольной системы токов такая функция выражается равенством [15]

$$U_m = - \frac{1}{8\pi} \int_{\nu} \mathcal{A} \mathbf{J} d\nu, \quad (1)$$

где  $\upsilon$  – объём образца. Чтобы найти векторный потенциал

$$\mathcal{A} = \int_{\upsilon} \frac{[\mathcal{M} \times \mathbf{r}]}{r^3} d\upsilon$$

поля молекулярных токов, воспользуемся тем, что

$$\frac{[\mathcal{M} \times \mathbf{r}]}{r^3} = -[\mathcal{M} \times \nabla r^{-1}] = [\nabla \times (r^{-1} \mathcal{M})] - r^{-1}[\nabla \times \mathcal{M}], \quad (2)$$

$$\mathfrak{I} \equiv \int_{\upsilon} [\nabla \times (r^{-1} \mathcal{M})] d\upsilon = \int_{\Omega} \frac{[\ell \times \mathcal{M}]}{r} d\Omega.$$

Рассечём трёхмерную область объёма  $\upsilon$  на плоскопараллельные слои, перпендикулярные координатной оси  $OX$ , тем самым заменив в выражении для вспомогательной величины  $\mathfrak{I}$  интегрирование по поверхности  $\Omega$  интегрированием по боковым поверхностям этих слоёв. Без ограничения общности можно считать, что вектор  $\mathcal{M}$  сонаправлен координатной оси  $OZ$ . Тогда в выражениях для компонент вектора  $\mathcal{N} = [\ell \times \mathcal{M}]$  будем иметь  $\ell_x = 0$ ,  $\mathcal{M}_x = \mathcal{M}_y = 0$ , вследствие чего  $\mathcal{N}_y = \mathcal{N}_z = 0$ .

В предельном случае бесконечно тонких плоскопараллельных слоёв интегрирование по боковой поверхности слоя сведётся к циркуляции вектора  $r^{-1} \mathcal{N}$  по соответствующему замкнутому контуру. По теореме Стокса такая циркуляция равна потоку ротора этого вектора через поверхность, опирающуюся на контур. Непосредственное вычисление позволяет убедиться, что указанный поток тождественно равен нулю, т.е.  $\mathfrak{I} \equiv 0$ . Тогда с учётом (2) будем иметь

$$\mathcal{A} = - \int_{\upsilon} \frac{[\nabla \times \mathcal{M}]}{r} d\upsilon.$$

В общем случае векторный потенциал произвольной системы токов, характеризующейся вектором плотности  $\mathbf{J}$ , определяется равенством

$$\mathcal{A} = \frac{1}{4\pi} \int_{\nu} \frac{\mathbf{J}}{r} d\nu,$$

следовательно, вектор плотности молекулярных токов

$$\mathbf{j} = -4\pi [\nabla \times \mathcal{M}]. \quad (3)$$

С учётом (3) выражение (1) приобретает вид

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{\nu} (\mathcal{A} \cdot [\nabla \times \mathcal{M}]) d\nu. \quad (4)$$

Примем во внимание соотношения

$$\mathcal{A} \cdot [\nabla \times \mathcal{M}] = \mathcal{M} \cdot [\nabla \times \mathcal{A}] + \nabla \cdot [\mathcal{M} \times \mathcal{A}], \quad \mathbf{h} = [\nabla \times \mathcal{A}].$$

Применив теорему Гаусса для перехода от объёмного интеграла к поверхностному, вместо (4) получим:

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{\nu} \mathcal{M} \mathbf{h} d\nu + \frac{1}{2} \int_{\Omega} [\mathcal{M} \times \mathcal{A}]_n d\Omega.$$

Во втором слагаемом данного равенства имеем выражение для потока вектора  $[\mathcal{M} \times \mathcal{A}]$  через поверхность  $\Omega$ . Величину этого потока легко определить, воспользовавшись тем, что в общем случае поток произвольного вектора  $\mathbf{a}$

$$\int_{\Omega} a_n d\Omega = \int_{\Omega} a_x dydz + a_y dxdz + a_z dydx.$$

Если, как и ранее, направить вектор  $\mathcal{M}$  вдоль координатной оси  $OZ$ , то в такой системе координат вектор  $[\mathcal{M} \times \mathcal{A}]$  будет располагаться в плоскости  $XY$ . Это означает, что  $\int_{\Omega} [\mathcal{M} \times \mathcal{A}]_n d\Omega = 0$ . Следовательно, воздействие магнитного поля напряжённостью  $h$  на образец вещества объёмом  $v$  изменяет его внутреннюю энергию  $U$  на величину

$$\Delta_m U = \frac{1}{2} \int_v \mathcal{M} h dv.$$

Для однородного вещества  $\mathcal{M} = \chi h$ , где  $\chi$  – магнитная восприимчивость. Следовательно, для одного моля вещества

$$\Delta_m U = \frac{\chi h^2 V}{2}, \quad (5)$$

где  $V$  – молярный объём.

### **Влияние магнитостатического поля на реакционную способность**

Воздействие магнитостатического поля на образец вещества вызывает соответствующее магнитострикционное изменение его объёма: при  $h \neq 0$

$$U = U_0 + \Delta_m U,$$

где  $U_0$  – молярная внутренняя энергия вещества в отсутствие поля. Следовательно, давление  $p$ , отвечающее состоянию вещества, изменённому воздействием поля, с учётом (5) определится равенством

$$p = - \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_S = p_0 - p_m, \quad (6)$$

где

$$p_m = \frac{\chi h^2}{2} \quad (7)$$

– магнитострикционное давление,  $S$  – молярная энтропия. Поскольку внешнее давление  $p_0$ , создаваемое окружающей образец средой, неизменно ( $p = p_0$  при  $h = 0$ ), из (6) следует, что воздействие магнитоэстатического поля на вещество термодинамически эквивалентно воздействию добавочного давления  $p_m$ .

Рассмотрим вытекающее из (6) и (7) равенство

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_h = -\frac{h^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial \chi}{\partial T}\right)_h,$$

где  $T$  – температура. У неферромагнитных материалов температурная зависимость магнитной восприимчивости проявляется только в области сверхнизких температур. Вне этой области  $(\partial \chi / \partial T)_h \approx 0$ , так что  $(\partial p / \partial T)_h \approx 0$ . Поскольку

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_h = -\left(\frac{\partial p}{\partial h}\right)_T / \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p,$$

имеем  $(\partial T / \partial h)_p \rightarrow \infty$  либо  $(\partial p / \partial h)_T \rightarrow 0$ . Первая из указанных формальных возможностей исключена в силу общего термодинамического соотношения

$$\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p = \frac{T}{C_h} \left[ \left(\frac{\partial S}{\partial h}\right)_p - \left(\frac{\partial S}{\partial h}\right)_T \right] < \infty,$$

где  $C_h$  – молярная теплоёмкость при  $h = \text{const}$ . Следовательно,

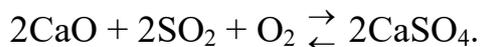
$$\left(\frac{\partial p}{\partial h}\right)_T = -\frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T \rightarrow 0,$$

где  $F$  – молярная свободная энергия. Это означает, что магнитостатическое поле не изменяет свободную энергию неферромагнитного вещества. Поскольку  $F = U - TS$ , приращения молярной энтропии  $S$ , молярной энтальпии  $H = U + pV$  и молярной энергии Гиббса  $G = F + pV$ , вызванные воздействием магнитостатического поля, выражаются равенствами

$$\Delta_m S = \frac{V\chi h^2}{2T}; \quad \Delta_m H = 2p_m V; \quad \Delta_m G = p_m V. \quad (8)$$

Из формул (8) вытекает, что суммарное приращение термодинамической функции в результате химической реакции может оказаться как положительным, так и отрицательным, т.е. магнитостатические воздействия могут изменять знак теплового эффекта реакции, а также знак приращения энергии Гиббса реакционной смеси, тем самым смещая химическое равновесие.

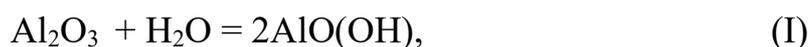
Наглядным примером может служить обратимый процесс

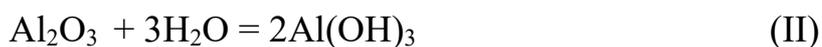


При умеренных температурах это равновесие смещено вправо. При  $T > 1723^\circ \text{K}$  инициируется обратный процесс (термолиз сульфата кальция), который, однако, легко подавить воздействием магнитостатического поля благодаря сильному парамагнетизму кислорода.

Из формул (8) также следует, что в зависимости от соотношения магнитных характеристик компонентов реакционной смеси температурный порог реакции повышается либо понижается, так что при внесении реакционной смеси в магнитостатическое поле происходит магнитное подавление реакции либо наоборот, термодинамически запрещённая реакция становится возможной.

В свете сказанного показательное взаимодействие оксида алюминия с водой. В обычных условиях реакции

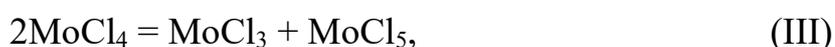




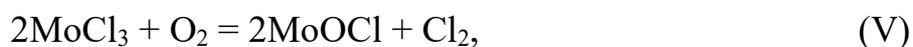
не протекают, т.к. являются термодинамически запрещёнными: соответствующие этим реакциям величины  $(\Delta G)_{\Sigma}$  суммарного приращения энергии Гиббса реакционной смеси положительны<sup>\*)</sup>. Однако поскольку в данном случае избытки  $(\Delta G)_{\Sigma}$  чрезвычайно малы и сопоставимы с величиной погрешности определения молярной энергии Гиббса для отдельных компонентов реакционной смеси, взаимодействие оксида алюминия с водой очень легко индуцировать даже весьма слабыми магнитными полями, что и было недавно обнаружено [18].

Реакции (I) и (II) иллюстрируют возможность усиления химической коррозии в постоянном магнитном поле. Наряду с этим, на некоторые коррозионные процессы магнитостатическое поле оказывает противоположное (подавляющее) действие. Примером может служить инактивация марганца по отношению к галогенам. Проведённый нами расчёт по формулам (8) показал, что фторирование, хлорирование, бромирование и йодирование марганца будут подавлены магнитостатическим полем при  $h > 12,57 \text{ кЭ}$ ,  $h > 7,98 \text{ кЭ}$ ,  $h > 7,44 \text{ кЭ}$  и  $h > 6,15 \text{ кЭ}$  соответственно.

В завершение данного раздела особо отметим возможность использования магнитостатического поля для стабилизации неустойчивых продуктов реакции при синтезе неорганических материалов. В качестве иллюстрации рассмотрим реакции получения хлорида молибдена(III):



Хорошо известно, что  $\text{MoCl}_3$  неустойчив: при стандартных условиях он окисляется кислородом воздуха



---

<sup>\*)</sup> Здесь и далее при расчётах использованы справочные данные [16, 17]; во всех случаях, кроме особо оговоренных, подразумеваются стандартные условия.

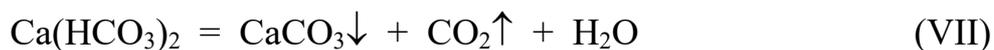
а при нагревании разлагается



Наши расчёты показали, что для протекания реакций (III) и (IV) необходимо воздействие магнитостатического поля, имеющего напряжённость  $h > 5,62$  кЭ и  $h > 14,16$  кЭ соответственно. В то же время, для подавления нежелательных процессов (V) и (VI) достаточно воздействия магнитостатического поля, имеющего напряжённость  $h > 3,87$  кЭ. Указанная величина меньше пороговых значений напряжённости магнитного поля, индуцирующей реакции (III) и (IV), благодаря чему образующийся в ходе этих реакций  $\text{MoCl}_3$  будет оставаться стабильным на всём протяжении действия магнитного поля на реакционную смесь.

### Магнитная обработка воды

Как уже отмечалось во Введении, из неферромагнитных сред, подвергаемых магнитным воздействиям, наибольшее практическое значение имеют водные системы. Технологические характеристики воды в значительной степени определяются её карбонатной жёсткостью, чувствительной к воздействиям магнитного поля. Физико-химическая сущность магнитной водоподготовки хорошо известна [5]: при  $h \neq 0$  образующийся в ходе реакции



карбонат кальция кристаллизуется не в форме кальцита, образующего плотную и трудноудаляемую накипь, а в форме арагонита, остающегося во взвешенном состоянии либо образующего легкоудаляемые отложения. В то же время, причина, по которой магнитное поле столь радикально меняет ход кристаллизации  $\text{CaCO}_3$ , до настоящего времени не выявлена. Проанализируем её.

Термодинамически запрещённая при стандартных условиях реакция (VII) становится возможной при  $T > 343^\circ \text{ К}$ . При этом образование арагонита остаётся термодинамически запрещённым, и  $\text{CaCO}_3$  осаждается в форме кальцита. Однако "запрещающий" образование арагонита избыток  $(\Delta G)_\Sigma$  весьма мал ( $1 \div 2$  кДж/моль) и легко компенсируется воздействием магнитного поля {ср. обсуждение реакций (I) и (II)}. В условиях, когда благодаря магнитному воздействию термодинамически разрешено образование обеих структурных модификаций  $\text{CaCO}_3$ , определяющим фактором становится феномен редких фёдоровских групп.

Речь идёт о выраженной неравномерности распределения кристаллических структур по группам пространственной симметрии. Хорошо известно, что поддержание кристаллического порядка в структуре вещества обеспечивается симметрией межатомных взаимодействий, предопределяющей симметрию расположения атомных центров, т.е. пространственную симметрию этой структуры. Поскольку формирующаяся при кристаллизации структура должна соответствовать какой-либо из групп пространственной симметрии (фёдоровских групп),\*) вариативность кристаллических структур определяют кристаллохимические барьеры – ограничения возможностей выбора положений структурных единиц в кристаллической решётке, накладываемые фёдоровской группой этой решётки.

Кристаллохимические барьеры диктуют «структурные предпочтения» кристаллизующихся фаз и тем самым обуславливают феномен редких фёдоровских групп – существование редких («малозаселённых») групп, воплощённых лишь в единичных кристаллических структурах. Эта кристаллохимическая проблема потребовала отдельного исследования [20], результаты которого позволили оценить взаимное соотношение частотностей реализации структур арагонита (пр.гр.  $Pnma$ ) и кальцита (пр.гр.  $R\bar{3}c$ ). Наши расчёты показали, что вероятности реализации такой симметрии в кристаллических структурах находят-

---

\*) Имеются основания полагать, что это требование является универсальным и распространяется не только на «обычную» кристаллизацию, но и на формирование нанокристаллических структур [19].

ся в соотношении  $R_{\text{пма}}: R_{\bar{3}c} = 26.42 : 1$ . Это означает, что в отсутствие термодинамического запрета на формирование структуры арагонита такая структура является кристаллохимически приоритетной. Вследствие этого при  $h \neq 0$  вместо кальцита в жёсткой воде кристаллизуется арагонит, который благодаря приоритетности его структуры образуется не только как «первичный» кристаллизант {т.е. непосредственно из водного раствора согласно уравнению (VII)}, но и в результате рекристаллизации присутствующего в реакционной системе кальцита, что внешне проявляется как удаление уже существующей накипи.

**Выводы.** Суммарное индуцированное приращение термодинамической функции в результате реакции может оказаться как положительным, так и отрицательным, т. е. магнитостатические воздействия могут изменять знак теплового эффекта реакции, а также знак приращения энергии Гиббса реакционной смеси, тем самым смещая химическое равновесие. В зависимости от соотношения магнитных характеристик компонентов реакционной смеси температурный порог реакции повышается либо понижается, так что при внесении реакционной смеси в магнитостатическое поле происходит магнитное подавление реакции либо наоборот термодинамически запрещённая реакция становится возможной. Это позволяет использовать магнитостатическое поле, во-первых, для стабилизации неустойчивых продуктов реакции при синтезе материалов, а во-вторых, для их синтеза альтернативными путями.

Известный эффект омагничивания водных систем представляет собой магнитоиндуцированное проявление кристаллохимического феномена редких фёдоровских групп. При наличии магнитного поля кристаллохимически приоритетным является формирование  $\text{CaCO}_3$  в арагонитовой модификации, которая при этом образуется не только в результате «первичной» кристаллизации, но и в результате рекристаллизации присутствующего в реакционной системе кальцита, что внешне проявляется как удаление уже существующей накипи.

## Список литературы

1. Роль магнитной обработки воды в управлении процессами гидратации и структурообразования цементных систем / В.Н. Сафронов [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2014. № 4. С. 135-148.
2. Makul N. Microwave heating on cement-pozzolan pastes // Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering. 2013. V. 1, № 3. P. 9-14.
3. Bhatnagar S.S., Mathur R.N., Kapur R.N. The effects of magnetic field on certain chemical reactions // Philosoph. Magazine. 1929. V. 8, № 7. P. 457-473.
4. Kornfeld G., Klingler E. Die Kinetik der Reaktion  $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$  bei geringen Drucken und unter der Wirkung eines starken Magnetfeldes // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1929. Bd. 4B, № 1. S. 37-66.
5. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. 2015. Vol. 1, № 4. P. 408-425.
6. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть II. Структурные характеристики минералов в ранние сроки твердения цементного камня при использовании магнитно-активированной воды затворения / Ю.А. Абзаев [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 150-159.
7. Комбинированная обработка жидкости затворения цементных систем / Ю.С. Саркисов [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 2. С. 163-170.
8. Давыдова Е.Г. Анализ качества природной воды водоёма, находящегося вблизи рудодобывающего предприятия // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1 (49). С. 37-45.
9. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Часть I. Теоретические предпосылки влияния магнитного поля на физико-химические процессы / Н.П. Горленко [и др.] // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 134-150.
10. Верещагин А.Л., Захарьева Ю.И. Структурирование воды наноконцентрациями дикарбоновых кислот // Химия, физика и механика материалов. 2018. № 4 (19). С. 168-181.

11. Rodgers C.T. Magnetic field effects in chemical systems // *Pure & Applied Chemistry*. 2009. V. 81, № 1. P. 19-43.
12. Крашенинин В.И., Кузьмина Л.В., Дорохов М.А., Храменко В.Е. Реакционная способность кристаллов азида серебра в постоянном и переменном магнитных полях // *Материаловедение*. 2005. № 1. С. 14-18.
13. Павлов Б.Л., Никишина А.И., Давыдова Е.Г. Двухкомпонентная модель вырожденного идеального электронного газа // *Химия, физика и механика материалов*. 2016. № 2 (13). С 100-108.
14. Пивоварова Н.А. Технологические аспекты выбора параметров магнитного активирования углеводородных систем // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2004. Т. 47, № 9. С. 142-146.
15. Lungu R. Thermodynamics of Electric and Magnetic Systems // *Trends in Electromagnetism – From Fundamentals to Applications*. Ed. by V. Barsan & R. Lungu. Bucharest: InTech, 2016. P. 113-152.
16. Handbook of chemistry and physics / Ed.: D.R. Lide. – 90<sup>th</sup> ed. – New York: CRC Press LLC, 2010. 2758 p.
17. Speight J. Lange's Handbook of Chemistry. N.Y.: McGraw-Hill Education, 2017. 1291 p.
18. Коржов А.В., Рябухин А.Г. Влияние электрического и магнитного полей на коррозию алюминиевых оболочек силовых кабелей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. 2013. Т. 5, № 1. С. 40-46.
19. Небольсин В.А. О некоторых размерных эффектах в процессах роста нитевидных нанокристаллов // *Химия, физика и механика материалов*. 2017. № 2 (15). С. 33-76.
20. Шабловский Я.О. Редкие фёдоровские группы в структурной минералогии // *Минералогия*. 2019. Т. 5, № 2. С. 3-9.

### **References**

1. Safronov V.N., Gorlenko N.P., Sarkisov Ju.S., Abzaev Ju.A., Kugaevskaja S.N. [The role of magnetic water processing for controlling hydration and structure

forming in cement systems]. Journal of construction and architecture, 2014, no. 4, P. 135-148. (in Russian).

2. Makul N. Microwave heating on cement-pozzolan pastes // Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering. 2013. vol. 1, no. 3. P. 9-14.

3. Bhatnagar S.S., Mathur R.N., Kapur R.N. The effects of magnetic field on certain chemical reactions // Philosoph. Magazine. 1929. vol. 8, no. 7. P. 457-473.

4. Kornfeld G., Klingler E. Die Kinetik der Reaktion  $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$  bei geringen Drucken und unter der Wirkung eines starken Magnetfeldes // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1929. Bd. 4B, no. 1. P. 37-66.

5. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. 2015. Vol. 1, no. 4, P. 408-425.

6. Abzaev Ju.A., Safronov V.N., Sarkisov Ju.S., Gorlenko N.P., Kugaevskaja S.N. [Magnetic field as control for the structure and properties of cement systems. Part 2. Structural properties of minerals at cement brick early hardening using mixing water magnetic activation]. Journal of construction and architecture, 2015, no 4, P. 150-159. (in Russian).

7. Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P., Rubanov A.A., Vergasov V.V. [Combined processing of mixing water for cement systems]. Journal of construction and architecture, 2018, vol. 20, no 2, P. 163-170. (in Russian).

8. Davydova E.G. [Analysis of the quality of natural water of a reservoir near an ore extraction plant]. Scientific journal of construction and architecture, 2018, no 1 (49), P. 37-45. (in Russian).

9. Gorlenko N.P., Safronov V.N., Abzaev Y.A., Sarkisov Y.S., Kugaevskaya S.N., Ermilova T.A. [Magnetic field as factor of control for structure and properties of cement systems. Part 1. Theoretical prerequisites for magnetic effect on physico-chemical processes], Journal of construction and architecture, 2015, no 3, P. 134-150. (in Russian).

10. Vereshhagin A.L., Zahar'eva Ju.I. [Water structuring by dicarbonic acids nanoconcentrations] Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2018, no 4 (19), P. 168-181. (in Russian).

11. Rodgers C.T. Magnetic field effects in chemical systems // *Pure & Applied Chemistry*, 2009, V. 81, no 1, P. 19-43.
12. Krashenin V.I., Kuz'mina L.V., Dorohov M.A., Hramchenko V.E. [Reactivity of silver azide crystals in constant and alternating magnetic fields]. *Materi-alovedenie. [Materials science]*, 2005, no 1, P. 14-18. (in Russian).
13. Pavlov B.L., Nikishina A.I., Davydova E.G. [Two-component model of a degenerate ideal electron gas]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]*, 2016. no 2 (13). P. 100-108. (in Russian).
14. Pivovarova N.A. [Technological aspects of choosing the parameters of magnetic activating hydrocarbonic systems]. *Transactions on chemistry and chemical technology*. 2004. v. 47, no 9, P. 142-146. (in Russian).
15. Lungu R. *Thermodynamics of Electric and Magnetic Systems // Trends in Electromagnetism – From Fundamentals to Applications*. Ed. by V. Barsan & R. Lungu. Bucharest: InTech, 2016. P. 113-152.
16. *Handbook of chemistry and physics / Ed.: D.R. Lide. – 90<sup>th</sup> ed. – New York: CRC Press LLC, 2010. 2758 p.*
17. Speight J. *Lange's Handbook of Chemistry*. N.Y.: McGraw-Hill Education, 2017. 1291 p.
18. Korzhov A.V., Rjabuhin A.G. [Electric and magnetic fields affecting corrosion of aluminum casings]. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Chemistry»*, 2013, v. 5, no 1, P. 40-46. (in Russian).
19. Nebol'sin V.A. [On some different effects in the processes of growth of nanowires]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials]*, 2017. no 2 (15). P. 33-76. (in Russian).
20. Shablovsky Ya.O. [Rare Fedorov groups in structural mineralogy]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2019, v.5, no 2, P. 3-9. (in Russian)