

УДК 544.6.018+628.164

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ПРОТИВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Томилин Александр Константинович¹,
aktomilin@tpu.ru

Беспалов Владимир Ильич¹,
vibsp@tpu.ru

Беспалов Виктор Владимирович¹,
vic@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определяется широким применением водных георесурсов в качестве рабочих тел в гидро- и теплоэнергетике, в системах теплоснабжения и охлаждения. При этом часто требуется произвести технологическую водоподготовку перед выполнением основного производственного цикла. В частности, воду требуется очищать от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. Наибольшую сложность представляет очистка воды от солей жесткости, то есть ее умягчение. Соли кальция и магния обычно выпадают на поверхностях теплообмена с образованием накипи, что приводит к резкому снижению эффективности работы теплообменного оборудования, перерасходу топлива и частым остановкам для чистки. Удаляют накипь обычно путем кислотных промывок внутренних поверхностей теплообмена или механическим способом. Все эти методы связаны с применением большого количества химических реагентов и сильно загрязняют сточные воды. Кроме того, это значительно увеличивает эксплуатационные расходы.

Цель настоящего исследования заключается в теоретическом описании электрохимических процессов, происходящих в установках с постоянными тороидальными магнитами, при пропускании потока воды с растворенными в ней солями жесткости, а также в анализе опыта практической эксплуатации таких установок.

Объекты: магнитная система тороидального типа, магнитное поле, ионы солей, содержащихся в воде, установки магнитной водоочистки.

Методы: тороидальная электродинамика; эксперименты по взаимодействию тороидальных электромагнитных объектов; гипотезы об электрохимических процессах, происходящих в водном потоке, протекающем вдоль оси магнитного тороида; эксперименты по проверке этих гипотез; теория, объясняющая технологию магнитной водоочистки; анализ многолетней практики эксплуатации установок «Магнуст».

Результаты. Дано теоретическое объяснение технологии магнитной водоподготовки с помощью тороидальных магнитных установок. Описаны электрохимические процессы, происходящие на этапе магнитной обработки и на последующем этапе нагревания омагниченной воды. Показано, что в присутствии магнитного поля ионы разных знаков дрейфуют во взаимно противоположных направлениях. По этой причине образование гидрокарбонатов кальция и магния на поверхности нагревателя затруднено. Как следствие, не происходит и отложения карбонатов на нагреваемых поверхностях. Определена наиболее эффективная конструкция магнитной установки, ее оптимальные параметры. Приведены сведения об эксплуатации установок «Магнуст» на нескольких бытовых и производственных объектах.

Ключевые слова:

Электрохимия, солеотложение, тороидальный магнит, магнитное поле, магнитная сила, магнитная установка.

Введение

Вода в энергетике играет исключительно важную роль – как рабочее тело в турбинах гидроэлектростанций, в виде пара в паротурбинных установках ТЭС и АЭС, как теплоноситель в системах теплоснабжения и охлаждения. Вода берется из естественных поверхностных или подземных водоемов и содержит в себе как взвешенные и растворенные твердые вещества, так и растворенные газы. Поэтому перед введением в тот или иной производственный цикл вода должна быть очищена от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. Наибольшую сложность представляет очистка воды от солей жесткости, то есть ее умягчение. Соли кальция и магния могут выпадать на поверхностях теплообмена с образованием накипи, что приводит к резкому снижению эффективности работы теплообменного оборудования, перерасходу топлива и частым

остановкам для чистки. Удаляют накипь путем кислотных промывок внутренних поверхностей теплообмена или механическим способом.

Наиболее распространенными методами водоподготовки являются химические (коагуляция, ионообменное умягчение или полное химвосколение) и термические (деаэрация, дистилляция) [1–5]. Аналогичные методы применяются для опреснения морской воды [6–9]. Все эти методы связаны с применением большого количества химических реагентов и сильно загрязняют сточные воды от водоподготовительных установок.

Однако, если создать условия кристаллизации веществ непосредственно в объеме воды и периодически удалять образовавшейся шлам путем продувок, можно избежать обрастания поверхностей нагрева отложениями солей. Это позволяет отказаться от промывок, сократить расход химреагентов или вооб-

ще отказаться от них, а значит, уменьшить объем сточных промывочных вод. Методы создания безнакипного режима работы теплообменного оборудования связаны с использованием электрического и магнитного полей [10–17]. Эффект объемной кристаллизации ионов солей жесткости, растворенных в потоке воды, под воздействием магнитного поля замечен давно. Для магнитной обработки воды применяются омагничивающие установки с постоянными магнитами или электромагнитами, а также электромагнитные фильтры. Наиболее перспективным и простыми в эксплуатации являются установки с постоянными редкоземельными магнитами.

Целью настоящего исследования является теоретическое описание электрохимических процессов, происходящих в установках с постоянными тороидальными магнитами, при пропускании потока воды с растворенными в ней солями жесткости, а также анализ опыта практической эксплуатации таких установок.

Магнитные поля тороидальных магнитных систем

Для решения поставленной задачи, прежде всего, требуется рассмотреть движение заряженных частиц (ионов), содержащихся в потоке воды, протекающем во внешнем магнитном поле. Поскольку магнитное поле создается сложной системой постоянных магнитов, необходимо исследовать его конфигурацию и составляющие компоненты.

Обычно при изучении электромагнетизма ограничиваются рассмотрением магнитных полей простейших объектов: бесконечного линейного тока или уединенного замкнутого контура (или соленоида) с током. Для их описания достаточно вектора магнитной индукции \mathbf{B} , определяющего вихревую компоненту магнитного поля. Потенциальные (градиентные) магнитные поля возникают в сложных (многоконтурных) электрических или магнитостатических системах тороидального типа [18–20]. Взаимодействие тороидальных магнитных объектов изучается в научном направлении, которое сформировалось относительно недавно и получило название «тороидальная электродинамика» [21–23]. Тороидальные структуры часто образуются на молекулярном уровне, и взаимодействие между ними влияет на макроскопические характеристики материала [24, 25].

Простейшую тороидальную магнитную структуру образуют два плоских магнита с аксиальной намагниченностью (рис. 1). В «пустых» областях слева и справа от линии соединения магнитов концентрируется градиентное магнитное поле. Его свойства в настоящее время достаточно полно исследованы теоретически и экспериментально, что позволяет применять его в технике и технологиях [18–20, 26–28]. В качестве характеристик градиентного магнитного поля используются скалярные функции: H^* – напряженности (А/м) и B^* – индукции (Тл). По этой причине часто используется термин «скалярное магнитное поле» (СМП) [18]. Различают положительное и отрицательное СМП. На рис. 1 представлен график распределения напряженности СМП магнитной пары с учетом знаков этой функции. Следует обратить

внимание на направление градиента СМП вдоль линии соединения магнитов, указанное на рис. 1. Для обозначения градиента СМП в 1957 г. академик Я. Зельдович ввел термин «тороидальный момент» [29].

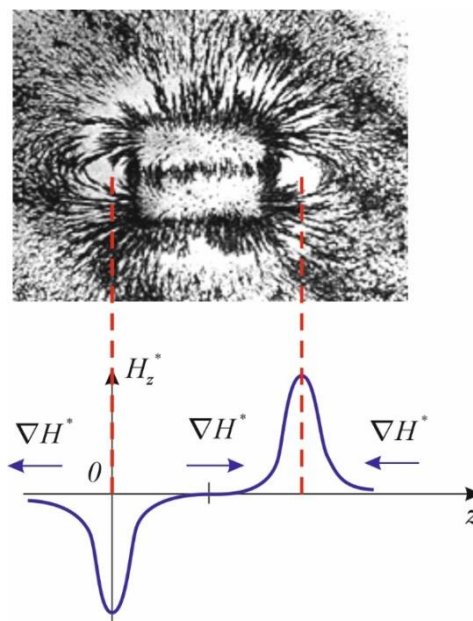


Рис. 1. Поле магнитной пары

Fig. 1. Field of the magnetic pair

Магнитное поле обладает соленоидальной (векторной) \mathbf{H} и потенциальной (скалярной или градиентной) H^* компонентами. Оно в общем случае описывается четырехмерным вектором (\mathbf{H}, H^*) , или кватернионом [19].

Тороидальная катушка с током (или магнитный тороид) создает магнитное поле, в котором эти компоненты позиционно разделены: вихревое поле заключено внутри обмотки, а потенциальное находится снаружи, вблизи торцов (рис. 2) [19, 20]. Такую же конфигурацию имеет магнитное поле движущейся заряженной частицы, например, иона. Следовательно, при исследовании движения заряженных частиц в поле магнитного тороида одной лишь силы Лоренца недостаточно, необходимо учитывать еще и взаимодействие тороидальных магнитных объектов между собой за счет СМП.

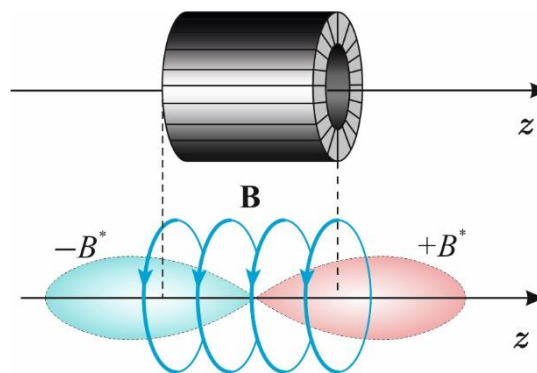


Рис. 2. Магнитное поле тороида

Fig. 2. Toroid magnetic field

Рассмотрим два экспериментальных факта. В первом эксперименте (рис. 3) миниатюрный тороид располагается над линией соединения пары магнитов в области СМП [19]. На рис. 3, а представлен случай, когда тороидальная катушка находится в положительном СМП. Установлено, что в этом случае на него действует сила \mathbf{F}^* , направленная вдоль тока плотности \mathbf{j} , текущего по внутренней части витков. Если магниты расположить, как показано на рис. 3, б, то тороид находится в отрицательном СМП. В этом случае на него действует сила \mathbf{F}^* , направленная противоположно внутреннему току. Заметим, что градиент СМП, созданного магнитной парой, в данном случае направлен перпендикулярно оси тороидальной катушки, то есть ортогонально внутреннему току \mathbf{j} .

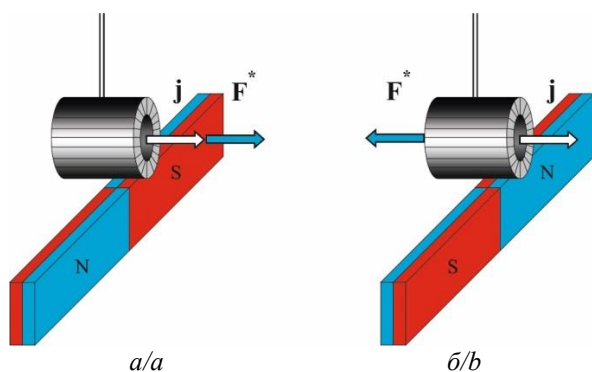


Рис. 3. Движение тороида в СМП в случае $\nabla H^* \perp \mathbf{j}$: а) $H^* > 0$; б) $H^* < 0$

Fig. 3. Motion of the toroid in a scalar magnetic field (SMF) in the case of $\nabla H^* \perp \mathbf{j}$: а) $H^* > 0$; б) $H^* < 0$

Этому экспериментальному факту соответствует формула, определяющая плотность магнитной силы при $\nabla H^* \perp \mathbf{j}$:

$$\mathbf{f}_{\perp}^* = \mathbf{j}_{\perp} B^*. \quad (1)$$

Здесь символ \mathbf{j}_{\perp} означает, что ток направлен ортогонально градиенту внешнего СМП ∇H^* .

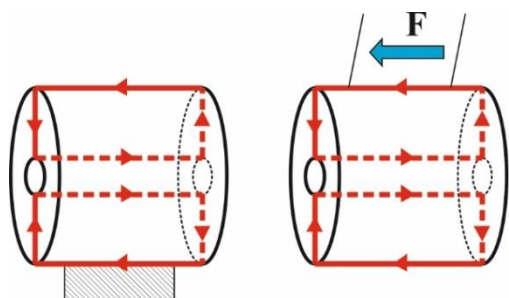


Рис. 4. Взаимодействие тороидов при одинаковом направлении токов

Fig. 4. Interaction of toroids in the same direction of currents

Второй экспериментальный факт обнаружен Г.В. Николаевым [18] (рис. 4). Две расположенные на одной оси тороидальные катушки (со скомпенсированными набегающими витками) при однонаправлен-

ных токах в них испытывают силы продольного притяжения. Градиенты СМП тороидов совпадают с их осями, расположенными на одной линии.

Этот экспериментальный факт выражается законом:

$$\mathbf{f}_{\parallel}^* = -\mathbf{j}_{\parallel} B^*, \quad (2)$$

где \mathbf{j}_{\parallel} – ток, расположенный на одной оси с градиентом внешнего СМП ∇H^* .

Объединив формулы (1) и (2), получим закон для определения потенциальной компоненты магнитной силы:

$$\mathbf{f}^* = B^* (\mathbf{j}_{\perp} - \mathbf{j}_{\parallel}). \quad (3)$$

С учетом (3) обобщенный закон электромагнитного взаимодействия тороидальных структур запишется в виде:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} + B^* (\mathbf{j}_{\perp} - \mathbf{j}_{\parallel}). \quad (4)$$

Согласно формуле (4), полная магнитная сила представляется в виде суперпозиции вихревой \mathbf{f} и потенциальной компонент \mathbf{f}^* [19].

Если заряд q движется в обобщенном магнитном поле (\mathbf{B}, B^*) со скоростью \mathbf{v} , то на него действует магнитная сила в виде суперпозиции вихревой силы Лоренца \mathbf{F}_L и потенциальной силы \mathbf{F}^* :

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}^* = q [\mathbf{v} \times \mathbf{B} + B^* (\mathbf{v}_{\perp} - \mathbf{v}_{\parallel})], \quad (5)$$

где \mathbf{v}_{\perp} и \mathbf{v}_{\parallel} – проекции скорости заряда на направление, ортогональное градиенту внешнего СМП и на направление этого градиента, соответственно.

Воздействие поля тороидального магнита на ионы в потоке воды

В водных растворах подавляющее большинство солей существует в виде ионов. В природных водах преобладают три аниона (гидрокарбонат HCO_3^- , хлорид Cl^- и сульфат SO_4^{2-}) и четыре катиона (кальций Ca^{2+} , магний Mg^{2+} , натрий Na^+ и калий K^+) – их называют главными ионами. Электрохимические процессы, происходящие в воде при воздействии магнитного поля, сложны и до конца не исследованы. В работах [16, 17] выделены три основные группы гипотез, объясняющих происходящие процессы: коллоидные, ионные и водные.

1. Коллоидные. Под влиянием магнитного поля в обрабатываемой воде происходит спонтанное образование и распад коллоидных комплексов ионов металлов (Fe^{3+}) и микровключений из ферромагнитных частиц железа (Fe_2O_3). Фрагменты их распада формируют центры кристаллизации, на которых адсорбируются катионы кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} .
2. Ионные. Магнитное поле поляризует растворенные в воде ионы и деформирует их гидратные оболочки, уменьшая гидратацию. Это повышает вероятность сближения гидратов ионов и процессы седиментации и кристаллизации неорганических солей.

3. Водные. Магнитное поле за счет поляризации дипольных молекул воды оказывает воздействие непосредственно на структуру ассоциатов воды. Содержащиеся в воде соли жесткости теряют способность формировать плотные отложения, образуется более щадящая мелкокристаллическая полиморфная форма, рост кристаллов останавливается на стадии микрокристаллов. Подобная гипотеза образования микрокристаллов используется также в работе [30] для объяснения результатов экспериментального исследования объемной кристаллизации в магнитном поле.

Авторы настоящей статьи (Беспалов В.И. и Беспалов В.В.) совместно с аспирантами под руководством профессора В.В. Лопатина в 2008 г. выполнили эксперименты, которые могут быть воспроизведены в обычных лабораторных условиях. В дистиллированной воде растворялись соли кальция и магния. Измерялась электрическая проводимость исходного раствора, что подтвердило наличие ионов. Затем раствор прокачивался вдоль оси тороидального магнита, расположенного снаружи водовода, с целью оценки воздействия преимущественно градиентной компоненты магнитного поля B^* . Затем вновь проводились измерения. Электрическая проводимость раствора после магнитной обработки резко снижалась, что говорит об уменьшении

числа ионов за счет кристаллизации солей жесткости. В растворе отсутствовали ионы металлов, что свидетельствует в пользу 2 и 3 группы гипотез образования микрокристаллов. Далее кристаллы солей жесткости транзитом могут проходить через любые поверхности нагрева, не образуя на них отложения. Более того, образование кристаллов резко снижает ионную жесткость воды, что приводит к растворению в ней старых отложений и к общей очистке системы.

При помощи закона (5) можно определить направление дрейфа ионов разных знаков в потоке воды, проходящей через тороидальный магнит. Рассмотрим поток воды, направленный вдоль оси Oz и проходящий через магнитный тороид, то есть движущийся в СМП (рис. 5). Скорость водного потока обозначим вектором v . Области СМП ($-B^*$ и $+B^*$) на рисунке изображены разными цветами. Рассмотрим воздействие СМП на положительные и отрицательные ионы в каждой из двух областей. Градиент СМП, созданного магнитным тороидом, направлен по линии, соединяющей точку положения иона с точкой O в центре тороида. Проецируем скорости ионов на соответствующее направление градиента СМП и в соответствии с законом (5) определяем компоненты магнитной силы F^* : F_{\perp}^* и F_{\parallel}^* .

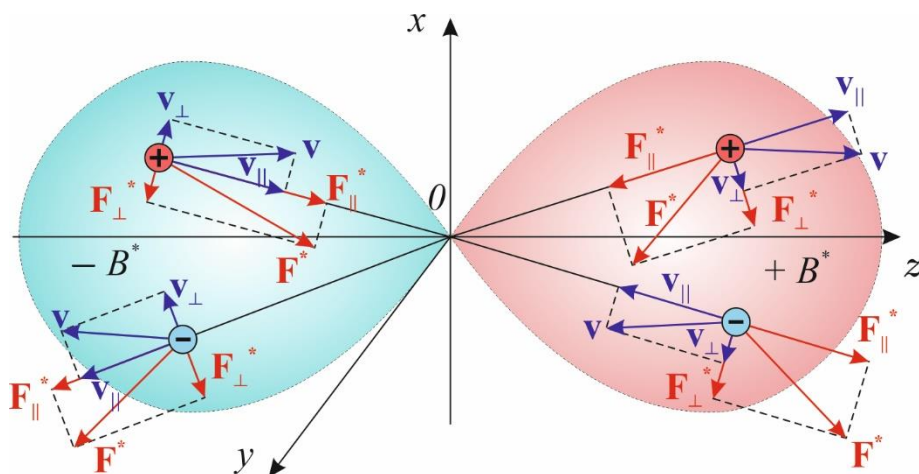


Рис. 5. Силы, действующие на ионы, в потоке воды, движущемся в СМП

Fig. 5. Forces acting on ions in a stream of water, moving in the SMF

- Анализируя рисунок, приходим к заключению:
- 1) на положительные ионы, движущиеся в СМП тороидального магнита, действует сила F^* , направленная к центральной оси течения z ;
 - 2) отрицательные ионы под действием силы F^* дрейфуют от центральной оси z ;
 - 3) положительные ионы при движении в отрицательном СМП ($-B^*$) ускоряются, а в положительном СМП ($+B^*$) замедляются;
 - 4) отрицательные ионы, наоборот, в отрицательном СМП ($-B^*$) замедляются, а в положительном СМП ($+B^*$) ускоряются.

При взаимодействии ионов с полоидальным (круговым) векторным магнитным полем \mathbf{B} также происходит дрейф ионов под действием силы Лоренца F_L ;

положительные ионы дрейфуют к оси z , а отрицательные от нее удаляются. Таким образом, радиальный дрейф ионов с одинаковыми зарядами за счет обеих компонент магнитного поля происходит в одном направлении. По этой причине имеет смысл размещать магнитный тороид внутри водовода. Это приводит к максимальному разделению положительных и отрицательных ионов в потоке воды.

Если изменить направление движения потока жидкости на противоположное при том же положении тороидального магнита, то направления всех магнитных сил тоже изменятся на противоположные.

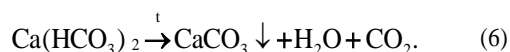
Можно сделать общий вывод: при движении воды в магнитном поле тороида положительные и отрицательные ионы дрейфуют противоположно в радиаль-

ном направлении. Ионы одного знака концентрируются вблизи оси течения, а другого – на его периферии. Этот эффект предлагается использовать для очистки воды от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. На основании изложенных выше теоретических соображений и экспериментальных фактов можно описать происходящие процессы следующим образом.

Рассмотрим процесс образования накипи при отсутствии магнитного поля. При нормальной температуре ионы, содержащиеся в воде, между собой не объединяются, поскольку вокруг них образуются гидратные оболочки из поляризованных молекул воды. Разрушение гидратных оболочек может произойти в результате нагревания воды.

Ионы, лишенные гидратных оболочек, образуют гидрокарбонаты кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, вода становится жесткой. Следует различать два типа жесткости: временную (карбонатную), обусловленную гидрокарбонатами кальция и магния, а также постоянную (некарбонатную), вызванную присутствием других солей, не выделяющихся при кипячении воды (в основном это сульфаты и хлориды кальция и магния: CaSO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 , MgCl_2).

Гидрокарбонаты при дальнейшем нагревании раствора разлагаются с образованием карбонатов. Например, гидрокарбонат кальция разлагается по схеме:



Это происходит в основном на поверхности нагревателя, где и осаждается накипь. Накипь – это нерастворимый карбонат кальция CaCO_3 и карбонат магния MgCO_3 .

Если поток воды движется в магнитном поле, то гидратные оболочки на поверхности ионов деформируются и разрушаются без нагревания. Это происходит потому, что в электрическом поле

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} + B^* (\mathbf{v}_\perp - \mathbf{v}_\parallel)$$

поляризованные молекулы воды ориентируются по направлению вектора \mathbf{E} , что приводит к их отрыву от ионов. Свободные ионы различных знаков дрейфуют во взаимно противоположных направлениях, поэтому на поверхности нагревателя присутствуют преимущественно ионы одного знака, например, катионы Ca^{2+} . При отсутствии в этой области анионов HCO_3^- образование гидрокарбонатов не происходит. Поэтому вблизи поверхности нагревателя карбонаты по схеме (6) не образуются, и накипь не осаждается.

Часть ионов, потерявших гидратную оболочку, объединяются в микрокристаллы вдали от нагреваемых поверхностей. Этот процесс описан О.В. Мосиным: «Известно, что наличие в воде ионов металлов (особенно железа Fe^{3+}) и микровключений из ферромагнитных частиц железа Fe_2O_3 интенсифицирует образование коллоидных гидрофобных зольей ионов Fe^{3+} с ионами хлора Cl^- и молекулами воды, что может привести к появлению центров кристаллизации, на поверхности которых адсорбируются катионы кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} , составляющие основу карбо-

натной жесткости воды, и образованию мелкодисперсного кристаллического осадка, выпадающего в виде шлама» [16. С. 21].

Конструкция аппаратов «Магнуст»

Конструктивные различия установок с постоянными магнитами сводятся к варьированию трех основных факторов, которые напрямую влияют на эффективность образования микрокристаллов шлама при заданных значениях температуры воды, состава и концентрации примесей в ней:

- 1) скорость потока жидкости в магнитном поле;
- 2) время прохождения ионов через магнитное поле;
- 3) тип основной составляющей магнитного поля, воздействующего на поток.

Как показано выше, на ионы, содержащиеся в водном потоке, проходящем через тороид, способны воздействовать обе составляющие его магнитного поля: векторная (полоидальная) и потенциальная (градиентная). При этом от конструкции магнитной системы и от организованного в установке потока воды зависит, какая из магнитных составляющих преимущественно воздействует на поток. Можно выделить три различных по конструкции типа магнитных установок:

- 1) с преимущественным воздействием векторной компоненты магнитного поля, когда поток воды движется поперек линий магнитного поля \mathbf{B} ;
- 2) с преимущественным воздействием градиентной компоненты магнитного поля B^* , когда поток воды движется вдоль оси магнитного тороида, расположенного снаружи водовода;
- 3) с одновременным воздействием двух компонент магнитного поля, когда магнитный тороид располагается внутри водовода.

Большинство установок магнитной водоочистки, производимых в настоящее время, можно отнести к первому типу. Однако, как показывает теория и подтверждает многолетняя практика, установки с тороидальными магнитами, расположенными внутри водовода, обладают наибольшей эффективностью. Идею разработки таких систем предложил Г.В. Николаев в 90-х гг. прошлого века [31]. Однако адекватное теоретическое описание процессов, происходящих в магнитных установках, в то время не было дано. К таким установкам относятся аппараты «Декарбон» и «Магнуст» [32–34]. Они отличаются лишь некоторыми конструктивными особенностями.

Магнитная система аппаратов располагается внутри отрезка трубы большего диаметра, чем трубопровод, на котором монтируется установка (рис. 6). Это минимизирует гидравлические потери и обеспечивает номинальную скорость потока через магнитное поле 0,5...1,5 м/с. Корпус врезается в трубопровод при помощи фланцевых или резьбовых соединений.

Экспериментально определенная оптимальная длина области активного магнитного поля составляет 25...30 см. Если установка располагается перед нагревательными устройствами, то температура потока холодной воды обычно меняется в пределах 4...30 °С. Экспериментально установлено, что изме-

нение температуры в этих пределах не оказывает существенного влияния на рассматриваемые процессы.

Расположение нагревательного прибора также не влияет на действие магнитной установки.

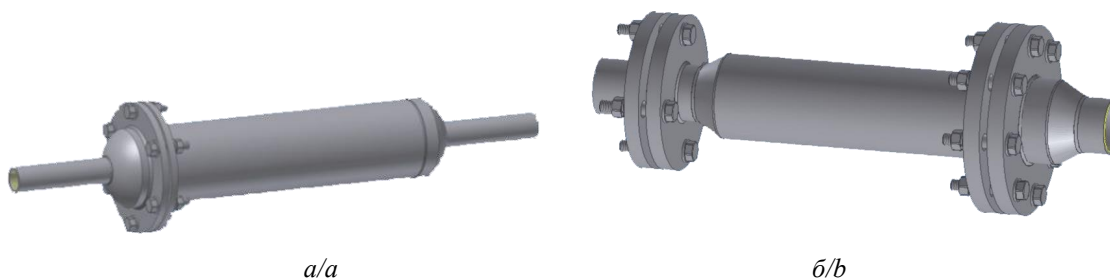


Рис. 6. Установки типа «Магнуст»: а) с фланцевым и резьбовым соединениями; б) с фланцевыми соединениями
Fig. 6. Installations of the «Magnust» type: a) with flange and threaded connections; b) with flanged connections

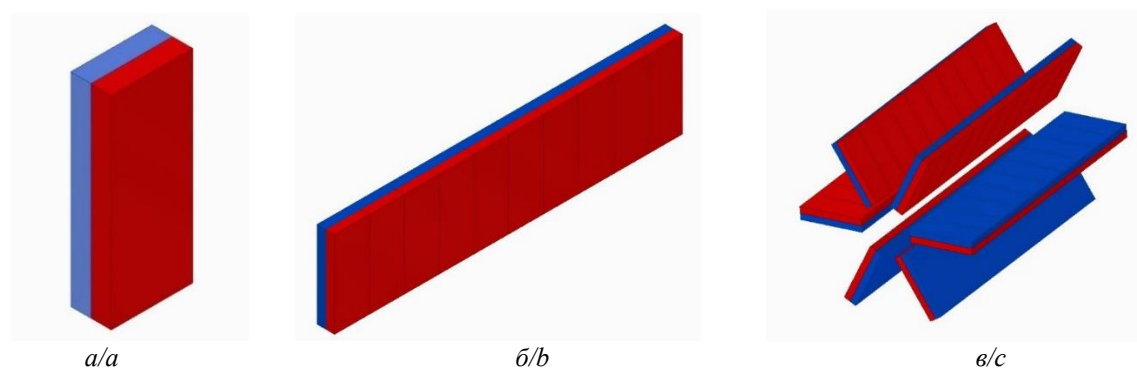


Рис. 7. Сборный модуль из постоянных магнитов: а) отдельный магнит; б) магнитная пластина; в) магнитный модуль
Fig. 7. Assembled permanent magnet module: a) separate magnet; b) magnetic plate; c) magnetic module

Изготовить цельные постоянные тороидальные магниты такой длины технологически сложно, поэтому применяются магнитные модули в виде сборки из магнитов меньшего размера (рис. 7, а). Они запрессовываются в герметично запаиваемый кожух из немагнитной листовой нержавеющей стали (рис. 7, б). Модули располагаются в виде звезды (рис. 7, в). Рабочие поверхности лучей такой звезды повернуты друг к другу разными полюсами, то есть образуется магнитный тороид, который индуцирует магнитное поле достаточной индукции в составе двух компонент: \mathbf{B} и \mathbf{B}^* . Используются современные неодимовые магниты, создающие полоидальное магнитное поле порядка 1 Тл. Их остаточная намагниченность сохраняется в течение десятилетий. Сборка магнитов (рис. 7, в) помещается внутри трубы водовода (рис. 6).

Практика водоподготовки с использованием тороидальных магнитных систем

Пластинчатые теплообменники часто используют в системе ЖКХ в силу высокой эффективности и надежности работы. В то же время они требуют постоянного контроля и ежегодного обслуживания из-за образования накипи (отложения солей жесткости) на поверхностях нагрева. Можно выделить три фактора, которые способствуют этому:

1) для нужд горячего водоснабжения в качестве исходной используется холодная вода городской си-

стемы водоснабжения, которая не подвергается умягчению и в ряде регионов России имеет повышенную жесткость;

- 2) особенностью эксплуатации такого теплообменника является переменный расход подогретой воды: он уменьшается в период малого или нулевого водоразбора, что приводит к снижению скорости воды в каналах теплообменника;
- 3) пластинчатые теплообменники имеют конструктивно узкие каналы для прохода нагреваемой воды, что приводит к быстрому нарастанию в них отложения солей жесткости.

Установка магнитной обработки воды типа «Магнуст» перед пластинчатым теплообменником исключает образование в нем накипи и значительно снижает затраты на его эксплуатацию. Промышленные испытания установок «Магнуст» (рис. 8), произведенные в достаточном количестве, показали их высокую эффективность. Они обеспечивают безнакипный режим работы пластинчатых теплообменников, применяемых в тепловых узлах домов для подогрева воды с целью горячего водоснабжения по закрытой схеме. Имеется положительный опыт такого применения. В декабре 2009 г. подобная установка «Магнуст», рассчитанная на расход воды 0,5...1,5 м³/ч, установлена перед пластинчатым теплообменником на вводе в 20-ти квартирный жилой дом г. Томска. На сегодняшний момент установка эксплуатируется более 10 лет.

За прошедшее время образование отложений солей жесткости не обнаружено. Ежегодно производится контроль давления воды на входе и выходе пластинчатого теплообменника, повышение давления не об-

наружено. Промывка и механическая чистка с разборкой теплообменника не проводилась ни разу. Эффективность работы теплообменника за эти годы не изменилась.



а/а



б/б

Рис. 8. Магнитная установка «Магнуст»: а) магнитный модуль из 4 пластин; б) магнитный модуль из 12 пластин
Fig. 8. Magnetic installation «Magnust»: a) magnetic module of 4 plates; b) magnetic module of 12 plates

Аналогичный положительный опыт был получен для установок большей производительности на теплообменниках трубчатого типа. Имеются акты применения установок «Магнуст» для предотвращения отложения солей жесткости в системе горячего водоснабжения района «Академгородок» г. Томска (от 5.12.2001), Чебаркульского молочного завода (от 31.05.2002), а также в корпусах санатория «Ключи» г. Томска (от 22.04.2002).

Заключение

Открытие потенциального магнитного поля, изучение его свойств и условий проявления позволяет успешно решать актуальные технические и технологические задачи. Одна из них связана с устранением солеотложений в теплообменниках систем водоснаб-

жения. Теоретически описан эффект разделения положительных и отрицательных ионов солей, содержащихся в водном потоке, за счет дрейфа в поле магнитного тороида. Описаны электрохимические процессы, происходящие в водном потоке, протекающем вдоль оси магнитного тороида с последующим нагреванием. Экспериментально определена оптимальная конструкция аппарата магнитной водоочистки, преимуществами которого являются: максимальная производительность, простота в изготовлении и эксплуатации, низкая себестоимость, длительный срок эксплуатации без изменения технологических свойств. Магнитная водоподготовка не требует применения химических реагентов и является экологически чистой технологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольфович Ю.М. Емкостная деионизация воды (обзор) // Электрохимия. – 2020. – Т. 56. – № 1. – С. 20–55. DOI: 10.31857/S0424857020010090
2. Ушаков Г.В., Солодов Г.А., Мочальников С.В. Разработка ингибитора процессов отложений солей жесткости и коррозии в водных средах на основе органического фосфоната для систем оборотного водоснабжения предприятий химической и коксохимической промышленности // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 144–148.
3. Рудакова Г.Я., Ларченко В.К., Цирульникова Н.В. Теория и практика применения комплексонов в энергетике // ГУ «Кузбасский центр энергосбережения». URL: <http://www.energosoвет.ru/stat77.html> (дата обращения 09.05.2020).
4. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов / В.М. Бахир, Ю.Г. Задорожний, Б.И. Леонов, С.А. Паничева. – М.: ВНИИИМТ, 2001. – 176 с.
5. Костылева С.С., Джумабаев Х.К., Тюсенков А.С. Влияние электрохимической активации воды на солеотложение // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 89–95. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-89-96.
6. A protic salt-derived porous carbon for efficient capacitive deionization: Balance between porous structure and chemical composition / Li Yang, J. She, Li Jiansheng, X. Sun, J. Shen, W. Han, L. Wang // Carbon. – 2017. – V. 116. – P. 21–32.
7. Hydrogen-treated, sub-micrometer carbon beads for fast capacitive deionization with high performance stability / B. Krüner, P. Srimuk, S. Fleischmann, M. Zeiger, A. Schreiber, M. Aslan, A. Quade, P. Volker // Carbon. – 2017. – V. 117. – P. 46–54.
8. Energy-efficient hybrid FCDI-NF desalination process with tunable salt rejection and high water recovery/ S. Choi, B. Chang, J.H. Kang, M.S. Diallo, J.W. Choi // Journal of Membrane Science. – 2017. – V. 541. – P. 580–586.
9. Optimization of sulfate removal from brackish water by membrane capacitive deionization (MCDI) / W. Tang, D. He, C.T. Zhang, D. Waite // Water Research. – 2017. – V. 121. – P. 302–310.
10. Smith K.C. Theoretical evaluation of electrochemical cell architectures using cation intercalation electrodes for desalination // Electrochimica Acta. – 2017. – V. 230. – P. 333–341.
11. Theory of water treatment by capacitive deionization with redox active porous electrodes / F. He, P.M. Biesheuvel, M.Z. Bazant, T.A. Hatton // Water Research. – 2018. – V. 132. – P. 282–291.
12. Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecular-level interactions to electrochemical cell design // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2017. – V. 19. – P. 23570–23584.

13. Su X., Hatton T.A. Redox-electrodes for selective electrochemical separations // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2017. – V. 244. – P. 6–20.
14. Asymmetric Faradaic systems for selective electrochemical separations / X. Su, K.-J. Tan, J. Elbert, C. Rüttiger, M. Gallei, T.F. Jamison, T.A. Hatton // *Energy Environmental Science*. – 2017. – V. 10. – P. 1272–1283.
15. Nativ P., Badash Y., Gendel Y. New insights into the mechanism of flow-electrode capacitive deionization // *Electrochemistry Communications*. – 2017. – V. 76. – P. 24–31.
16. Мосин О.В. Магнитные системы обработки воды. Основные перспективы и направления // *Сантехника*. – 2011. – № 1. – С. 21–25.
17. Мосин О.В. Конструктивные особенности магнитогидродинамической ячейки для магнитной обработки воды // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2014. – № 6 (92). – С. 21–26.
18. Николаев Г.В. Электродинамика физического вакуума. Новые концепции физического мира. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 700 с.
19. Томилин А.К. Обобщенная электродинамика. Издание второе, переработанное и дополненное. – М.: Изд-во «Триумф», «Лучшие книги», 2020. – 300 с. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
20. Томилин А.К. Потенциально-вихревая электродинамика // *Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот*. – 2012. – Т. 17. – № 1 (46). – С. 169–173.
21. Dubovik V.M., Tosunyan L.A., Tugushev V.V. Axial toroidal moments in electrodynamics and solid-state physics // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1986. – Т. 90. – С. 590–605.
22. Dubovik V.M., Saha B. Electrodynamics with toroid polarization // *Turkish Journal of Physics*. – 1999. – V. 23 (7–12). – P. 1065–1074.
23. Talebi N., Guo S., van Aken P.A. Theory and applications of toroidal moments in electrodynamics: their emergence, characteristics, and technological relevance // *Nanophotonics*. – 2018. – V. 7 (1). – P. 93–110. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0017
24. Spaldin N.A., Fiebig M., Mostovoy M. The toroidal moment in condensed-matter physics and its relation to the magnetoelectric effect // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2008. – V. 20. – P. 434203(15). DOI: 10.1088/0953-8984/20/43/434203
25. Dielectric metamaterials with toroidal dipolar response / A.A. Basharin, M. Kafesaki, E.N. Economou, C.M. Soukoulis, V.A. Fedotov, V. Savinov, N.I. Zheludev // *Physical Review X*. – 2015. – V. 5. – P. 011036 (11). DOI: 10.1103/PhysRevX.5.011036
26. Woodside D.A. Three-vector and scalar field identities and uniqueness theorems in Euclidean and Minkowski spaces // *American Journal of Physics*. – 2009. – V. 77 (5). – P. 438–446.
27. Arbab A.I., Satti Z.A. On the generalized Maxwell equations and their prediction of electroscalar wave // *Progress in physics*. – 2009. – V. 2. – P. 8–13.
28. Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves: Patent № US 9,306,527 B1. Publ. 05.04.2016.
29. Зельдович Ю.Б. Электромагнитное взаимодействие при нарушениях четности // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1957. – № 33. – С. 1531–1544.
30. Павлова М.Л. Исследование объемной кристаллизации в магнитном поле // *Современные техника и технологии сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ТПУ*. – Томск, 2010. – Т. 3. – С. 196–197. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2010/C01/V1/092.pdf> (дата обращения 09.05.2020).
31. Николаев Г.В. Устройство для магнитной обработки жидкости. Пат. Рос. Федерации № 2092446, 1997. URL: www.freepatent.ru/patents/2092446 (дата обращения 09.05.2020).
32. Беспалов В.И., Загорнов М.А. Особенности магнитной обработки воды при применении технологии ее обеззараживания гипохлоридом натрия // *Известия Томского политехнического университета*. – 2002. – Т. 305. – Вып. 2: Труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Томск, 2001. – С. 180–183.
33. Беспалов В.И., Лапицкий М.Ю., Загорнов М.А. Основные факторы, определяющие эффективность обработки воды на ТЭС магнитными полями // *Известия Томского политехнического университета*. – 2002. – Т. 305. – Вып. 2: Труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Томск, 2001. – С. 183–187.
34. Беспалов В.И., Кривошеев В.В., Быстров В.Л. Некоторые результаты практического использования нетрадиционных магнитных систем для обработки воды // *Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов 6 Всероссийской научно-технической конференции*, Томск, 2000. – Томск: Томский политехнический университет, 2000. – Т. 1. – С. 78–80.

Поступила 11.05.2020 г.

Информация об авторах

Томилин А.К., доктор физико-математических наук, профессор отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалов В.И., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалов В.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.6.018+628.164

WATER MAGNETIC PROCESSING TECHNOLOGY AGAINST SALT DEPOSITION: THEORY AND PRACTICE

Aleksandr K. Tomilin¹,
aktomilin@tpu.ru

Vladimir I. Bespalov¹,
vibsp@tpu.ru

Viktor V. Bespalov¹,
vic@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this research is determined by the widespread use of water georesources as working fluids in hydro- and heat power engineering, in heat supply and cooling systems. In this case, it is often required to carry out technological water treatment before using in the main production cycle. In particular, water needs to be cleaned of colloidal, scale-forming and gaseous impurities. The greatest difficulty is the water treatment from hardness salts, that is, its softening. Calcium and magnesium salts usually precipitate on heat exchange surfaces with the formation of scale, that leads to a sharp decrease in the efficiency of the heat exchange equipment, excessive fuel consumption and frequent stops for cleaning. Descaling is usually done by acid washing of the internal heat exchange surfaces or mechanically. All these methods involve the use of a large number of chemical reagents, and strongly pollute wastewater from water treatment units. In addition, it significantly increases operating costs.

The purpose of this research is to theoretically describe the electrochemical processes that occur in installations with permanent toroidal magnets when passing a stream of water with hardness salts dissolved in it, as well as to analyze the practical operation experience of such installations.

Objects: toroidal magnetic system, magnetic field, salt ions contained in water, magnetic water treatment units.

Methods: toroidal electrostatics; experiments on the interaction of toroidal electromagnetic objects; hypotheses about electrochemical processes occurring in a water stream flowing along the axis of a magnetic toroid; experiments to test these hypotheses; theory explaining magnetic water treatment technology; analysis of the «Magnust» apparatus long-term operating.

Results. The paper introduces the theoretical explanation of the magnetic water treatment technology using toroidal magnetic installations and describes the electrochemical processes occurring at the stage of magnetic treatment and the subsequent stage of heating magnetized water. It is shown that ions of different signs drift in mutually opposite directions in the magnetic field presence. For this reason, the formation of calcium and magnesium hydrocarbonate on the heat exchange surface is difficult. As a result, the deposition of carbonates on heated surfaces does not occur. The authors have determined the most effective design of the magnetic installation and its optimal parameters as well. The paper introduces the information on the «Magnust» apparatus operation at several civil and industrial facilities.

Key words:

Electrochemistry, salt deposition, toroidal magnet, magnetic field, magnetic force, magnetic installation.

REFERENCES

- Volkovich Yu. M. Emkostnaya deionizatsiya vody (obzor) [Capacitive deionization of water (Review)]. *Electrochemistry*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 20–55. DOI: 10.31857/S0424857020010090
- Ushakov G.V., Solodov G.A., Mochalnikov S.V. Development of an inhibitor of processes of deposition of salts of hardness and corrosion in aqueous media based on organic phosphonate for water recycling systems of chemical and coke industry. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 144–148. In Rus.
- Rudakova G.Ya., Larchenko V.K., Tsirolnikova N.V. Teoriya i praktika primeneniya kompleksionov v energetike [Theory and practice of applying complexones in the energy sector]. *State Institution «Kuzbass Center for Energy Saving»*. Available at: <http://www.energsovet.ru/stat77.html> (accessed 9 May 2020).
- Bakhr V.M., Zadorozhnyi Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A. *Elektrokhimicheskaya aktivatsiya: ochistka vody i poluchenie poleznykh rastvorov* [Electrochemical activation: water purification and obtaining beneficial solutions]. Moscow, VNIIMT Publ., 2001. 176 p.
- Kostyleva S.S., Dzhumabaev H.K., Tusenkov A.S. The effect of electrochemical activation of water on scaling. *Oil and gas business*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 89–95. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-89-96.
- Yang Li, She J., Jiansheng Li., Sun X., Shen J., Han W., Wang L. A protic salt-derived porous carbon for efficient capacitive deionization: Balance between porous structure and chemical composition. *Carbon*, 2017, vol. 116, pp. 21–32.
- Krüner B., Srimuk P., Fleischmann S., Zeiger M., Schreiber A., Aslan M., Quade A., Volker P. Hydrogen-treated, sub-micrometer carbon beads for fast capacitive deionization with high performance stability. *Carbon*, 2017, vol. 117, pp. 46–54.
- Choi S., Chang B., Kang J.H., Diallo M.S., Choi J.W. Energy-efficient hybrid FCDI-NF desalination process with tunable salt rejection and high water recovery. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 541, pp. 580–586.
- Tang W., He D., Zhang C.T., Waite D. Optimization of sulfate removal from brackish water by membrane capacitive deionization (MCDI). *Water Research*, 2017, vol. 121, pp. 302–310.
- Smith K.C. Theoretical evaluation of electrochemical cell architectures using cation intercalation electrodes for desalination. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 230, pp. 333–341.
- He F., Biesheuvel P.M., Bazant M.Z., Hatton T.A. Theory of water treatment by capacitive deionization with redox active porous electrodes. *Water Research*, 2018, vol. 132, pp. 282–291.
- Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecular-level interactions to electrochemical cell design. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, vol. 19, pp. 23570–23584.
- Su X., Hatton T.A. Redox-electrodes for selective electrochemical separations. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 244, pp. 6–20.
- Su X., Tan K.-J., Elbert J., Rüttiger C., Gallei M., Jamison T.F., Hatton T.A. Asymmetric Faradaic systems for selective electrochemical separations. *Energy Environmental Science*, 2017, vol. 10, pp. 1272–1283.

15. Nativ P., Badash Y., Gendel Y. New insights into the mechanism of flow-electrode capacitive deionization. *Electrochemistry Communications*, 2017, vol. 76, pp. 24–31.
16. Mosin O.V. Magnetic water treatment systems. The main prospects and directions. *Plumbing*, 2011, no. 1, pp. 21–25. In Rus.
17. Mosin O.V. Design features of a magnetohydrodynamic cell for magnetic treatment of water. *Energy saving and water treatment*, 2014, no. 6 (92), pp. 21–26. In Rus.
18. Nikolayev G.V. *Elektrodinamika fizicheskogo vakuuma. Novye kontseptsii fizicheskogo mira* [Electrodynamics of physical vacuum. New concepts of the physical world]. Tomsk, NTL Publ. House, 2004. 700 p.
19. Tomilin A.K. *Obobshchennaya elektrodinamika* [Generalized electrodynamics]. Moscow, Triumph Publ. House, 2020. 300 p. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
20. Tomilin A.K. Potentsialno-vikhrevaya elektrodinamika [Potentially-vortex electrodynamics]. *Elektrodinamika i tekhnika SVCH, KVCH i opticheskikh chastot*, 2012, vol. 17, no. 1 (46), pp. 169–173.
21. Dubovik V.M., Tosunyan L.A., Tugushev V.V. Axial toroidal moments in electrodynamics and solid-state physics. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1986, vol. 90, pp. 590–605.
22. Dubovik V.M., Saha B. Electrodynamics with Toroid Polarization. *Turkish Journal of Physics*, 1999, vol. 23 (7–12), pp. 1065–1074.
23. Talebi N., Guo S., Van Aken P.A. Theory and applications of toroidal moments in electrodynamics: their emergence, characteristics, and technological relevance. *Nanophotonics*, 2018, vol. 7 (1), pp. 93–110. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0017
24. Spaldin N.A., Fiebig M., Mostovoy M. The toroidal moment in condensed-matter physics and its relation to the magnetoelectric effect. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, vol. 20, pp. 434203 (15). DOI:10.1088/0953-8984/20/43/434203
25. Basharin A.A., Kafesaki M., Economou E.N., Soukoulis C.M., Fedotov V.A., Savinov V., Zheludev N.I. Dielectric Metamaterials with Toroidal Dipolar Response. *Physical Review X*, 2015, vol. 5, pp. 011036 (11). DOI: 10.1103/PhysRevX.5.011036
26. Woodside D.A. Three-vector and scalar field identities and uniqueness theorems in Euclidean and Minkowski spaces. *American Journal of Physics*, 2009, vol. 77 (5), pp. 438–446.
27. Arbab A.I., Satti Z.A. On the generalized Maxwell equations and their prediction of electroscalar wave. *Progress in physics*, 2009, vol. 2, pp. 8–13.
28. Hively L. *Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves*. Patent US no. 306,527 B1. 2016.
29. Zeldovich Yu.B. Elektromagnitnoe vzaimodeystvie pri narusheniyakh chetnosti [Electromagnetic interaction for parity violations]. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 1957, no. 33, pp. 1531–1544.
30. Pavlova M.L. Issledovaniye obemnoy kristallizatsii v magnitnom pole [The study of bulk crystallization in a magnetic field]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii. Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh TPU* [Modern Engineering and Technology. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists of TPU]. Tomsk, 2010. Vol. 3, pp. 196–197. Available at: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2010/C01/V1/092.pdf> (accessed 9 May 2020).
31. Nikolayev G.V. *Ustroystvo dlya magnitnoy obrabotki zhidkosti* [Device for magnetic fluid processing]. Patent RF no. 2092446, 1997. Available at: www.freepatent.ru/patents/2092446 (accessed 9 May 2020).
32. Bespalov V.I., Zagornov M.A. Features of magnetic treatment of water when using the technology of its disinfection with sodium hypochloride. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 180–183. In Rus.
33. Bespalov V.I., Lapitskiy M.Yu., Zagornov M.A. The main factors determining the effectiveness of water treatment at thermal power plants by magnetic fields. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 183–187. In Rus.
34. Bespalov V.I., Krivosheyev V.V., Bystrov V.L. Nekotorye rezultaty prakticheskogo ispolzovaniya netraditsionnykh magnitnykh sistem dlya obrabotki vody [Some results of the practical use of non-traditional magnetic systems for water treatment]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov 6 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Energy: ecology, reliability, safety. Materials of the reports of the 6th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2000. Vol. 1, pp. 78–80.

Received: 11 May 2020.

Information about the authors

Aleksandr K. Tomilin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Bespalov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor V. Bespalov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.