

УДК 66.067.3:66.086.4 + 621.039.534.4:66.067

Высокоградиентные магнитные фильтры для очистки водного теплоносителя от продуктов коррозии

Б.А. Гусев¹, Л.Н. Москвин^{1,2}

¹ ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Недостатки органических ионообменных смол, а именно их радиационное и термическое разрушение при использовании в системах очистки теплоносителя, вызвали необходимость поиска альтернативных ионообменным фильтрам методов очистки теплоносителя объектов тепловой и атомной энергетики. Для очистки теплоносителя от диспергированных продуктов коррозии накоплен положительный опыт применения электромагнитных фильтров, которые эффективно удерживают только ферромагнитную составляющую взвешенных форм продуктов коррозии. Для удерживания парамагнитных и диамагнитных частиц были предложены высокоградиентные электромагнитные фильтры с магнитными системами на сверхпроводящих соленоидах, применение которых ограничено большими габаритами и соображениями безопасной эксплуатации в момент внезапных отказов электропитания. Поэтому сохраняет актуальность поиск новых объектов тепловой и атомной энергетики и других водных сред, содержащих взвешенные формы продуктов коррозии. В данной статье, кроме исторической справки, приведены результаты разработки в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» эффективных и простых в эксплуатации высокоградиентных фильтров с магнитными системами.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, ферро-, пара- и диамагнитные продукты коррозии, фазовый и дисперсный состав, теплоноситель, очистка, высокоградиентная магнитная фильтрация.

UDC 66.067.3:66.086.4 + 621.039.534.4:66.067

High gradient magnetic filters for separation of corrosion products from coolant water

B.A. Gusev¹, L.N. Moskvina^{1,2}

¹ FSUE «Alexandrov NITI», Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg University, Institute of Chemistry», Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Organic ion-exchange resins widely used for treatment of coolant water in nuclear and non-nuclear power plants are prone to radiation and thermal degradation. Therefore, the power industry has been seeking alternative solutions to clean the cooling water. Good practices in application of electro-magnetic filters for this purpose have been developed; however, such filters efficiently remove only ferromagnetic corrosion products. Superconducting solenoid electromagnet systems have been proposed for retaining paramagnetic and diamagnetic particles, but the application is limited due to the large size of these systems and safety considerations in case of sudden loss of power supply. Therefore, of current importance is

searching new solutions to the problem of corrosion product removal from coolant water in nuclear and non-nuclear power plants. The paper presents the background of the problem and proposes efficient and simple in use high gradient magnetic filters that are developed at FSUE «Alexandrov NITI» and use new generation high energy permanent magnets.

Key words: nuclear power facilities, ferro-, para-, and diamagnetic corrosion products, phase and size composition, coolant, cleanup, high gradient magnetic filtration

Введение

Водные среды различного назначения, обеспечивающие жизнедеятельность человека, начиная с водопроводной воды и заканчивая технологическими средами, применяемыми в различных отраслях промышленности, а также в тепловой и атомной энергетике, практически всегда контактируют с основным конструкционным материалом трубопроводов, по которым они перемещаются, и емкостей, которые они заполняют. Этим материалом являются стали – сплавы на основе железа. Все стали в большей или меньшей степени подвержены коррозии, в результате которой в контактирующих с ними водных средах постоянно присутствуют продукты коррозии (ПК) в различных химических формах, начиная с ионных и заканчивая взвесями, фазовый и дисперсный состав которых, в зависимости от типа сталей и состава контактирующих с ними водных сред, может варьироваться в очень широких пределах [1]. Очистка водных сред от ПК, находящихся в них во взвешенном состоянии, является сложной технической проблемой, до сих пор не имеющей однозначного решения. Повсеместно применяемые для глубокой очистки воды ионообменные фильтры (ИОФ) обеспечивают эффективную очистку воды только от ионных форм ПК, в то время, как их так называемая «шламовая емкость», т.е. способность удерживать взвеси, как правило, недостаточна для глубокой очистки воды.

Поскольку основу твердофазных примесей ПК в водном теплоносителе энергетических установок составляют обладающие магнитными свойствами оксиды и гидроксиды железа [1–4], в этой связи на практике уже давно предпринимались попытки по использованию магнитных сил для очистки водных сред от продуктов коррозии [5–7]. Подход по использованию метода магнитного «обезжелезивания» теплоносителя основан на известном физическом явлении: магнитные частицы в магнитном поле становятся постоянными магнитными диполями, удерживаемыми полюсами магнитной системы, в которой создается достаточно сильное полиградиентное магнитное поле при загрузке межполюсного пространства ферромагнитными элементами. При этом существенную роль играет материал и конфигурация этих элементов.

На начальном этапе развития магнитной фильтрации считалось, что наилучшим материалом для фильтрующих матриц магнитных фильтров являются стальные шарики [8–14]. Однако первые же попытки практического внедрения подобных фильтров в атомной энергетике показали [15–17], что электромагнитные фильтры с такой загрузкой не обеспечивают необходимой эффективности очистки. Кроме того, шарики из слаболегированной стали марки ШХ15 в значительной мере подвержены коррозии и в условиях воды высокой чистоты сами являются источниками поступления продуктов коррозии в теплоноситель.

Исторически, разработка технологии высокоградиентной магнитной фильтрации в НИТИ связана с именем бывшего директора НИТИ Е.П. Рязанцева. По поручению академика А.П. Александрова в 80-е годы двадцатого века в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова разрабатывались физические основы технологии объёмно-градиентной магнитной сепарации (ОГМС) для разделения веществ с магнитной восприимчивостью (т.е. парамагнетиков) под руководством П.А. Черемных, Н.Н. Михайлова и Н.А. Черноплёкова в отделении академика С.Н. Беяева [18, 19]. Тогда же Е.П. Рязанцев, хорошо зная возможности отдела химико-технологических и материаловедческих исследований (ОХТМИ) НИТИ, обратился

к Л.Н. Москвину с предложением подключиться к этим работам. На первом этапе, большую помощь в постановке задачи и формировании направления работ оказал А.А. Ефимов.

В поиске решений проблемы «магнитной» очистки технологических водных сред в тепловой и атомной энергетике потребовались как детальное изучение состава и морфологии взвесей продуктов коррозии в водных технологических контурах ЯЭУ с различными типами реакторов, так и теоретическая разработка новых принципов магнитной фильтрации (МФ) и новых конструкций магнитных фильтров.

Как уже отмечалось выше, главным фактором, определяющим возможность применения МФ, является фазовый состав ПК, диспергированных в теплоносителях. Обычные электромагнитные фильтры (ЭМФ) обеспечивают выделение только ферромагнитных частиц. В тоже время, результаты исследования фазового состава продуктов коррозии оборудования технологических контуров, присутствующих в виде взвешенных частиц и в форме коррозионных отложений на теплопередающих поверхностях ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [20, 21], показали, что, независимо от типа реакторных установок (канальные реакторы или реакторы с водой под давлением), фазовый состав продуктов коррозии (как взвесей, так и отложений) определяется кроме магнетита (Fe_3O_4), также гематитом ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и лепидокрокитом ($\gamma\text{-FeOOH}$), соотношение количеств которых зависит от применяемого водно-химического режима, температуры и состава конструкционных материалов.

Из перечисленных форм продуктов коррозии только магнетит обладает ферромагнитными свойствами, что позволяет выделять его частицы на магнитных фильтрах с относительно небольшими градиентами магнитного поля, создававшимися ЭМФ, применявшимися на начальном этапе развития магнитной фильтрации.

В качестве возможной альтернативы обычным ЭМФ в 70-е годы 20 века в Национальной магнитной лаборатории США началось интенсивное изучение возможностей технологии высокоградиентной магнитной очистки технологических сред [22–24].

Математическая модель высокоградиентной магнитной фильтрации

В первом приближении эффективность высокоградиентных магнитных фильтров (ВГМФ) можно охарактеризовать значением максимальной магнитной силы, которая действует на парамагнитную частицу объемом V с магнитной восприимчивостью χ и магнитным моментом μ_0 , находящуюся в непосредственной близости от элемента матрицы цилиндрической формы радиусом a с индукцией насыщения B_s .

Если матрица помещена во внешнее магнитное поле с напряженностью H_0 , достаточной для намагничивания материала матрицы до насыщения, то величина магнитной силы F_m , действующей на поверхности этой матрицы, может быть определена по уравнению (1) [25–27]:

$$F_m = \mu_0 \chi V H_0 \frac{B_s}{a} . \quad (1)$$

Отсюда следует, что чем меньше диаметр элемента матрицы, тем больше действующая максимальная магнитная сила. Поэтому для того, чтобы фильтр мог успешно захватывать парамагнитные частицы, магнитная восприимчивость которых в 10^3 – 10^4 раз меньше, чем восприимчивость ферромагнитных материалов, необходимо при прочих равных условиях во столько же раз увеличить величину $H_0 \frac{B_s}{a}$. Значение B_s определяется магнитными свойствами материала, применяемого для изготовления матрицы.

Для обладающей магнитными свойствами сферической частицы радиуса b и элемента матрицы цилиндрической формы радиусом a максимальная магнитная сила, действующая на частицу, определяется выражением (2) [27]:

$$F_{\max} = -\frac{8}{3}\pi b^3 (\kappa_r - \kappa_c) \left(H_0 + H_0 \frac{a^2}{r^2} \right) B \frac{a^2}{r^3}, \quad (2)$$

где

$r = a + b$; κ_r – магнитная проницаемость частицы; B – индукция магнитного поля;
 κ_c – магнитная проницаемость среды, в которой она находится.

Следовательно, наиболее высокие градиенты магнитного поля создаются на элементах матрицы, имеющих наименьший радиус кривизны. При этом максимальная сила магнитного взаимодействия проявляется тогда, когда частица находится в близком контакте с элементами матрицы.

Как следует из уравнения (2), для увеличения градиента магнитного поля необходимо введение матричных ферромагнитных элементов в рабочий объем фильтра, где происходит удержание частиц.

Как следует из уравнения (2), наиболее высоких градиентов, а, следовательно, и максимальных магнитных сил, действующих на частицы, попадающие в зазор между полюсами магнита можно добиться, если совмещать эффекты, приводящие к искажению траектории магнитных силовых линий как за счет встречного включения магнитов, так и за счет внесения в зазор концентраторов магнитных силовых линий. Введение множества таких ферромагнитных концентраторов в рабочий объем магнитного фильтра позволяет наиболее эффективно использовать весь объем для высокоградиентной магнитной фильтрации.

Для экспериментальной проверки высказанных теоретических предпосылок сотрудниками НИТИ совместно с сотрудниками ИАЭ им. И.В. Курчатова [28, 29] была разработана экспериментальная установка со сверхпроводящим соленоидом, применение которого позволяло исследовать процессы магнитной фильтрации теплоносителя в широком диапазоне напряженностей магнитного поля (H_0). В качестве матрицы была использована просечно-вытяжная сетка, изготовленная из коррозионностойкой стали ООХ13 с высокими магнитными характеристиками, где высокоградиентное поле формируется на острых гранях ячеек сетки. Применение на данном этапе исследований для моделирования идей высокоградиентной магнитной фильтрации на сверхпроводящих магнитах являлось оптимальным решением, так как при этом обеспечивалась возможность изменения в широких пределах напряженности магнитного поля.

При переходе к практической реализации идеи ВГМФ на этапе выбора конструкции ВГМФ для их установки на байпасных линиях первого контура, в условиях, когда дисперсный и фазовый состав выделяемых взвесей ПК остается практически постоянным, впервые в отечественной практике высокоградиентной магнитной фильтрации предпочтение было отдано конструкциям фильтров с постоянными магнитами из интерметаллида SmCo_5 или NdFeB .

Создание ВГМФ на постоянных магнитах позволило резко упростить их конструкцию, повысить надежность и упростить обслуживание по сравнению с электромагнитными фильтрами. Для создания конкретных конструкций ВГМФ, соответствующих заданным условиям эксплуатации, и для выбора оптимальных параметров их функционирования нами была разработана математическая модель процесса высокоградиентной магнитной фильтрации, основанная на результатах теоретического анализа поведения слабомагнитных частиц в неоднородном магнитном поле.

родных магнитных полях [26—43], в основу которой были положены следующие допущения: при магнитной фильтрации, помимо магнитной силы, на частицу действуют конкурирующие силы: гравитации, гидродинамической вязкости, трения и инерции. При этом, в зависимости от условий, в которых осуществляется магнитная фильтрация, и от размера частиц эти силы вносят больший или меньший вклад в результирующую траекторию движения выделяемых частиц при фильтрации. Для очень малых частиц определяющей силой является сила гидродинамической вязкости, для крупных – гравитации.

При моделировании процесса высокоградиентной магнитной фильтрации авторы исходили из целесообразности использования в дальнейшем в конструкциях ВГМФ постоянных магнитов.

Для выполнения расчетов магнитной системы авторами разработан расчетный код и создана программа расчета рабочих характеристик высокоградиентных магнитных фильтров «MagFiltr» [44]. Программа предназначена для расчета вероятности удержания частиц, фазового и дисперсного состава [44], проходящих через рабочий объем высокоградиентных магнитных фильтров различных конструкций с учётом следующих параметров процесса фильтрации:

- величина и конфигурация градиентов высокоградиентных магнитных полей;
- физические и геометрические параметры внутреннего объема фильтра, в котором размещается матрица и удерживаются частицы;
- параметры несущей среды и удерживаемых частиц.

С точки зрения выбора конструкции ВГМФ, программа обеспечивает сравнение возможностей двух наиболее привлекательных конструкций магнитных систем: лабиринтной и стержневой. В процессе моделирования высокоградиентной магнитной фильтрации частиц параметры магнитных полей задавались исходя из технических характеристик промышленно-выпускаемых постоянных магнитов.

Создание ВГМФ в НИТИ

Разработка конструкции магнитной системы фильтра основывалась на результатах математического моделирования с учетом необходимых технических характеристик фильтра, особенностей водно-химического режима технологического контура объекта, а также фазового и дисперсного состава продуктов коррозии [44].

При выборе матрицы исходили из экспериментально установленного факта, что наиболее высокие градиенты магнитного поля достигаются на нитевидных ферромагнитных элементах. Поскольку на момент начала разработки в НИТИ ВГМФ на постоянных магнитах отечественная промышленность не производила магнитно-мягкие коррозионностойкие стали типа 00X13 и 16X, оптимальным вариантом является использование металлической ваты из магнитных сортов коррозионностойких хромистых сталей типа 20X13 и 09X17Н.

При разработке конструкции ВГМФ, наряду с выбором типа магнитов, важное значение имеет конфигурация магнитной системы, обеспечивающая максимальную напряженность магнитного поля, в котором находится фильтрующая матрица. На основании результатов математического моделирования в качестве оптимального решения с точки зрения конфигурации магнитной системы, минимальной массы и габаритов в сочетании с высокой удерживающей способностью частиц продуктов коррозии сталей выбрана конструкция ВГМФ с лабиринтной траекторией движения очищаемого потока (рис. 1).

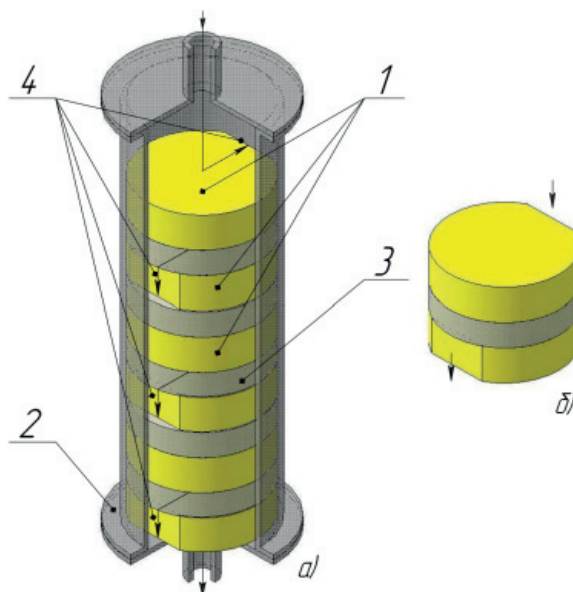


Рис.1. Высокорадиентный магнитный фильтр лабиринтного типа (а) и схема расположения магнитных элементов (б):

1 – магнитные элементы; 2 – корпус фильтра; 3 – матрица;
4 – соединительные каналы между секциями с матрицей.

Лабиринтные конструкции обладают преимуществом перед другими типами ВГМФ за счет удлинения траектории пробега выделяемых частиц продуктов коррозии внутри фильтра благодаря наиболее рациональному расположению магнитных элементов. Благодаря этим качествам они при прочих равных условиях обеспечивают наиболее высокую эффективность очистки водных потоков.

Для представленного на рис.1 ВГМФ фильтрующая матрица выполнена из металлической ваты из стали марки 09Х17Н. Магниты защищены от контакта с теплоносителем чехлами из немагнитной нержавеющей стали, что допускает их длительное использование без замены. Напряженность магнитного поля в зазорах между постоянными магнитами соответствует оптимальным значениям, полученным на предварительном этапе испытаний с помощью электромагнитов со сверхпроводящими соленоидами. Предложенная конструкция фильтра свободна от основного недостатка фильтров, функционирующих на принципах механической фильтрации, – увеличения его гидравлического сопротивления по мере накопления выделяемого шлама. Это объясняется тем, что непосредственный объем ферромагнитной насадки составляет не более 10–20 % от общего объема рабочей камеры фильтра. Конструкции ВГМФ лабиринтного типа защищены авторскими свидетельствами и патентами сотрудников НИТИ и ИАЭ им. И.В. Курчатова [45, 46]. Как показали результаты математического моделирования и предварительных испытаний, несмотря на все положительные стороны ВГМФ лабиринтного типа (такие как простота конструкции, сборка и разборка фильтров) однозначно утверждать об их относительных преимуществах перед другими возможными схемами фильтров представляется преждевременным, так как удовлетворительной фильтрующей способностью обладают и ВГМФ стержневого типа. Кроме того, данные математического моделирования свидетельствуют об их отдельных преимуществах перед лабиринтными конструкциями.

Схематическое изображение ВГМФ со стержневой магнитной системой приведено на рис.2. Конструкции ВГМФ стержневого типа в свою очередь защищены авторскими свидетельствами и патентами сотрудников НИТИ [47–50].

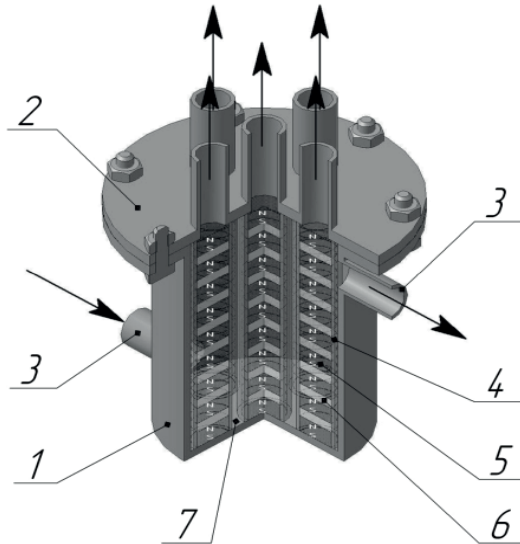


Рис. 2. ВГМФ со стержневой магнитной системой:

- 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – входной и выходной патрубки;
- 4 – герметичный корпус; 5 – постоянные магниты;
- 6 – полюсные наконечники; 7 – матрица.

После проведения лабораторных исследований в ОХТМИ НИТИ, подтвердивших выводы, сделанные на основании математического моделирования, для проверки принципиальных возможностей высокоградиентной магнитной фильтрации в атомной энергетике, в НИТИ были изготовлены опытные образцы фильтров того и другого типа и проведены их предварительные промышленные испытания на воде бассейна выдержки облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) станда-прототипа транспортной ЯЭУ. Внешний вид, габаритные размеры и технические характеристики магнитных систем ВГМФ лабиринтного и стержневого типа практически идентичны (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид опытных образцов высокоградиентных магнитных фильтров независимо от их типа

Влияние величины напряженности внешнего магнитного поля на эффективность очистки технологических сред от парамагнитных частиц $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в широком диапазоне их размеров, реализующемся в реальных условиях теплоносителя первого контура ЯЭУ на ВГМФ с магнитными системами различного типа иллюстрирует рис. 4, из которого следует, что при достижении определенной для каждой магнитной системы напряженности внешнего магнитного поля наблюдается относительная независимость эффективности захвата парамагнитных частиц в объеме ВГМФ от напряженности внешнего магнитного поля. На основании полученных данных была выбрана оптимальная напряженность внешнего магнитного поля, найденная в предварительных экспериментах, которая соответствовало величине 2 кЭ. При этом значении напряженности в дальнейшем исследовалось влияние скорости фильтрации на эффективность очистки технологических сред от парамагнитных частиц $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

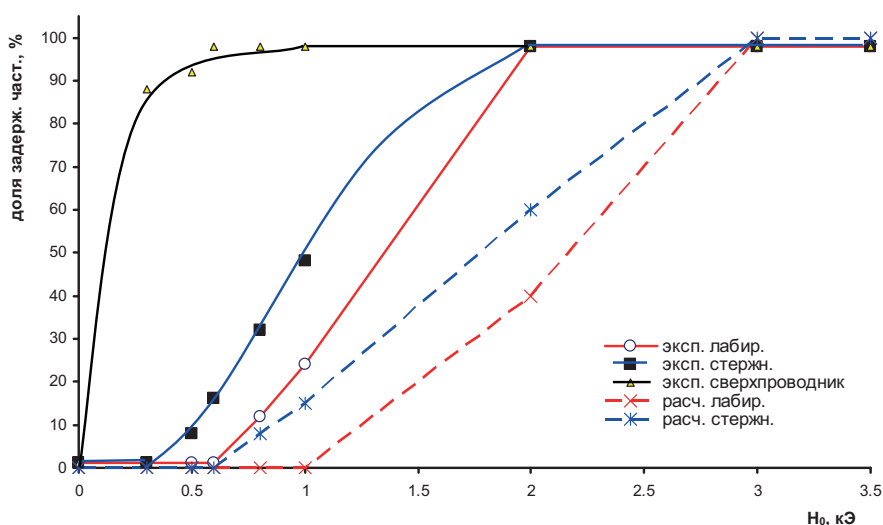


Рис. 4. Зависимость эффективности работы ВГМФ с различными магнитными системами от напряженности внешнего магнитного поля

Результаты сравнительных испытаний ВГМФ с различной конфигурацией магнитной системы показали независимость эффективности работы ВГМФ по очистке технологических сред от парамагнитных частиц до некоторой скорости фильтрации, определяемой типом и параметрами магнитной системы. Ранее полученные данные по определению эффективности очистки модельных взвесей парамагнитных частиц на макете ВГМФ со сверхпроводниковыми электромагнитами подтвердили предположение, что все три типа магнитных систем при определенных параметрах процесса обеспечивают полноту выделения парамагнитных частиц.

Результаты проверки принципиальных возможностей высокоградиентной магнитной фильтрации, полученные при проведении промышленных испытаний опытных образцов фильтров того и другого типа на стендовой базе НИТИ на воде бассейна выдержки ОТВС подтвердили теоретические предпосылки и данные, полученные на этапе предварительных исследований. Зафиксированные в этих экспериментах уменьшения удельной активности ^{60}Co в воде в процессе очистки на ВГМФ стержневого типа и рост мощности дозы от корпуса фильтра свидетельствуют о высокой эффективности выделения частиц АПК, присутствующих в воде бассейнов выдержки ОТВС. Аналогичные результаты были получены и для фильтра лабиринтного типа.

Проведенное сравнение фильтров с магнитными системами различных типов на воде бассейнов выдержки показало их практически полную идентичность по эффективности выделения АПК. Для очистки воды стендовой ЯЭУ транспортного назначения ввиду отсутствия возможности варьирования параметров процесса очистки в широких пределах при проведе-

нии испытаний ВГМФ выбор предпочтительной конструкции фильтра по результатам проведенных испытаний не представляется возможным. В настоящее время выбор фильтра с той или иной магнитной системой может быть сделан на основании результатов математического моделирования и лабораторных экспериментов. О такой возможности, в частности, свидетельствует экспериментальная оценка влияния величины напряженности внешнего магнитного поля на эффективность очистки от парамагнитных частиц на ВГМФ стержневого типа, которая свидетельствует, что при превышении определенного критического значения напряженности внешнего магнитного поля наблюдается относительная независимость эффективности захвата парамагнитных частиц в объеме ВГМФ от напряженности внешнего магнитного поля, что хорошо согласуется с результатами математического моделирования. Полученные данные свидетельствуют о том, что для создания высокоградиентных магнитных полей, достаточных для удержания в матрице фильтра парамагнитных частиц, необходимы внешние магнитные поля, сравнимые с магнитными полями в электромагнитных фильтрах, широко используемых в практике очистки водных потоков от ферромагнитных частиц продуктов коррозии.

Поскольку разработка ВГМФ во многом инициировалась решением проблемы «безреагентной дезактивации первого контура ЯЭУ («дезактивации на ходу»)), основная проверка эффективности разработанного фильтра проводилась на стенде-прототипе транспортной ЯЭУ в соответствующих режимах.

На рис. 5 приведены данные, полученные в результате испытаний ВГМФ на байпасной линии потока теплоносителя первого контура ВВЭР транспортного назначения, отражающие изменение в теплоносителе удельной суммарной активности $\Sigma A_{уд}$ ($\Sigma A_{уд} = A/A_{исх}$, отн. ед.) долгоживущих радионуклидов – продуктов коррозии и деления, выведенных на фильтре. Менее чем за двое суток проведения испытаний из первого контура было выведено $\approx 70\%$ радиоактивных загрязнений, находившихся в нем в форме рыхлых отложений, что практически эквивалентно проведению его дезактивации на остановленном реакторе с использованием самых эффективных технологий дезактивации контуров ЯЭУ в сборе растворами химических реагентов.

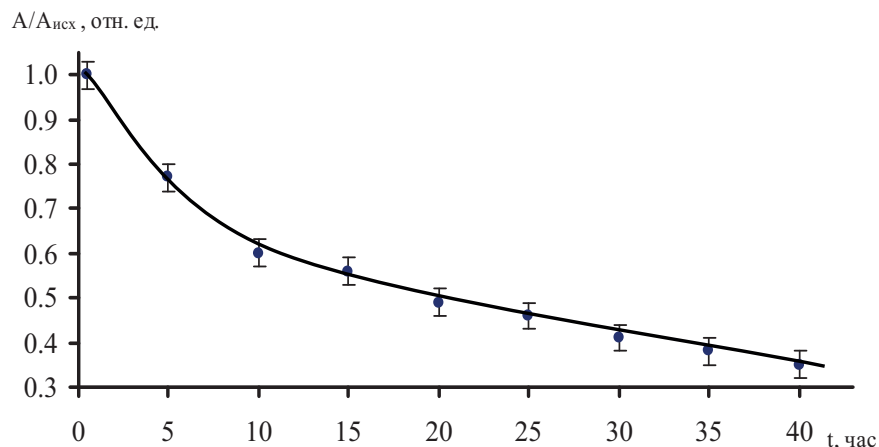


Рис. 5. Изменение амплитуды удельной суммарной активности долгоживущих радионуклидов теплоносителя первого контура в зависимости от времени очистки (t)

Одновременно персоналом ОХТИ проводилось сравнение эффективности выведения радионуклидов из контура на штатном ионообменном фильтре (ИОФ) и ВГМФ.

Ниже в таблице представлены значения коэффициентов очистки $K_{оч}$ теплоносителя на фильтрах обоих типов от присутствующих в нем наиболее долгоживущих радионуклидов из технологического контура на ВГМФ и на штатном ионообменном фильтре.

Таблица

Средние значения коэффициентов очистки $K_{оч}$ теплоносителя от радионуклидов на штатном ИОФ и ВГМФ

Нуклид	Коэффициент очистки ($K_{оч} = A_{до\ фильтра} / A_{после\ фильтра}$)*		$\frac{K_{оч}(ВГМФ)}{K_{оч}(штатн.фильтр)}$
	ВГМФ	ИОФ	
Zr-95	2.4	1.7	1.4
Nb-95	2.5	1.7	1.5
Co-58	9.4	1.8	> 5
Co-60	10.4	1.6	> 6
Mn-54	11.3	1.4	> 8

* обусловленная наличием радионуклида активность теплоносителя до фильтра ($A_{до\ фильтра}$) и после фильтра ($A_{после\ фильтра}$) (кБк/кг).

Из представленных в таблице данных следует, что применение высокоградиентного магнитного фильтра существенно увеличивает эффективность извлечения активированных продуктов коррозии. Обращает на себя внимание разница в коэффициентах очистки радионуклидов ПК и ПД. Можно предположить, что это связано с различиями в предыстории формирования радионуклидного состава тех и других в теплоносителе первого контура ЯЭУ, на которой проводились испытания ВГМФ. Взвеси ПК образовались в теплоносителе на начальной стадии эксплуатации ЯЭУ при полностью герметичных твэлах, когда концентрация в нем НПД минимальна. Поэтому при гидролитических превращениях ПК эффект соосаждения с ними ПД на начальном этапе эксплуатации ЯЭУ проявился в минимальной степени. Основное количество ПД попало в теплоноситель на заключительном этапе работы стендовой ЯЭУ и они преимущественно находятся в форме коллоидных частиц, эффективность удерживания которых ВГМФ значительно меньше, чем взвесей.

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности технологии высокоградиентной магнитной фильтрации и перспективности её применения для очистки теплоносителя первого контура ЯЭУ и других водных сред от диспергированных в них продуктов коррозии, в том числе при реализации процесса «деактивации на ходу», заключающегося в «возмущающем» воздействии на слабофиксированные (диспозитивные) поверхностные отложения для их перевода в состояние взвесей в теплоноситель с последующим выведением на фильтрах очистки.

Помимо «деактивации на ходу» для ВГМФ в атомной энергетике было найдено еще одно важное применение. На основе полученных данных в НИТИ был спроектирован и изготовлен ВГМФ стержневого типа в составе технической установки ультразвуковой очистки рабочих кассет и тепловыделяющих сборок энергоблоков № 3 и № 4 НВАЭС. Конструктивно фильтр производительностью до 35 м³/час установлен после установки ультразвуковой очистки ОТВС и предназначен для очистки воды бассейна выдержки от АПК, удаленных с ОТВС при их ультразвуковой обработке.

На НВАЭС была проведена ультразвуковая очистка (УЗО) от коррозионных отложений 349 ТВС активной зоны энергоблока № 3. В период проведения УЗО ежедневно контролировалась активность воды бассейна выдержки. Результаты контроля представлены на рис. 6.

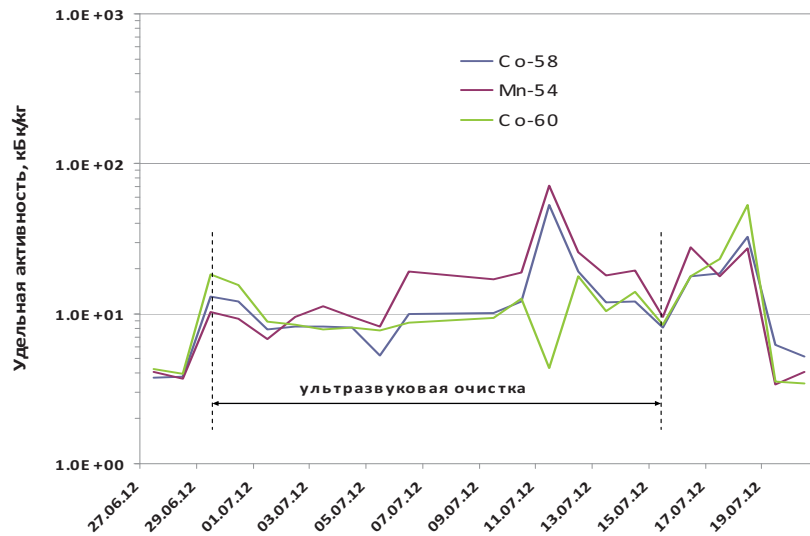


Рис. 6. Удельная активность радионуклидов в воде бассейна выдержки

Из рис. 6 следует, что в период проведения УЗО значимого роста активности продуктов коррозии в воде бассейна выдержки не произошло, что свидетельствует о том, что отложения АПК, переведенные с поверхностей ТВС в воду бассейна выдержки, практически полностью выводились на ВГМФ. Этот вывод подтверждается и результатами измерений мощности дозы излучения от корпуса ВГМФ в течение периода испытаний.

В отчете по результатам испытаний было отмечено, что за время УЗО ТВС всей активной зоны (349 шт.) в течение 16 сут. на ВГМФ отфильтрованы смывы из ТВС отложения в количестве до 700 г с активностью радионуклидов до 170 ГБк (4.6 Ки), в том числе более 50 ГБк (≥ 1.4 Ки) ^{60}Co , а состав осадка на фильтре соответствует составу отложений на ТВС.

Результаты, полученные в НИТИ при отработке технологии «деактивации на ходу», позволили включить высокоградиентный магнитный фильтр в состав макета береговой модульной системы очистки теплоносителя (МСО), предназначенной для перспективных проектов транспортных ЯЭУ, в которых система очистки теплоносителя не включена в состав оборудования первого контура. Схема МСО приведена на рис. 7а. Здесь же на рис. 7б приведены результаты испытаний ВГМФ в составе МСО. Рост мощности дозы гамма-излучения от корпуса фильтрующего картриджа свидетельствуют об эффективности выделения на ВГМФ частиц АПК широкого спектра дисперсности, присутствующих в теплоносителе, рис. 8.

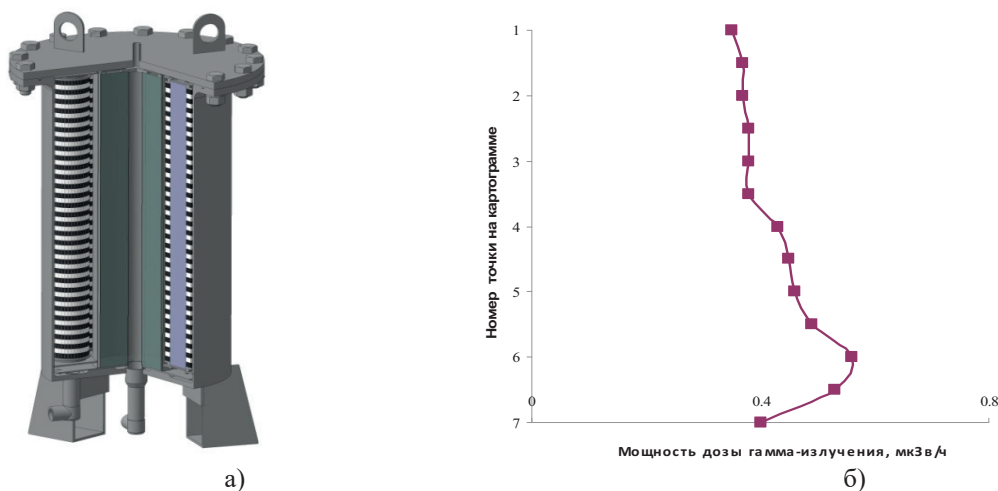


Рис. 7. Фильтрующее устройство (а) и распределение мощности дозы гамма-излучения по высоте ВГМФ (б):
1 – картридж ВГМФ (9 шт.), 2 – матрица ВГМФ, 3 – ионообменный фильтр

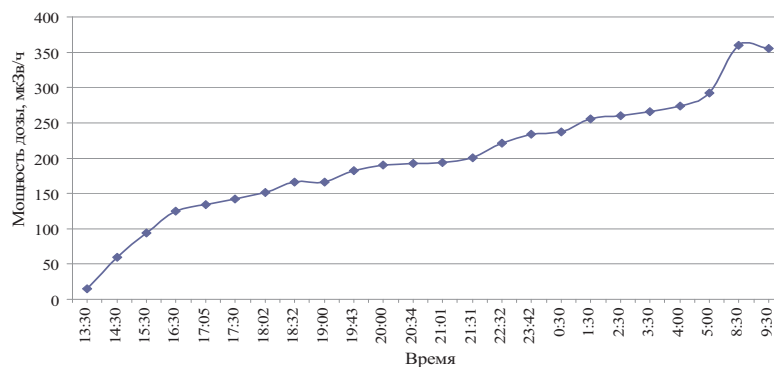


Рис. 8. Изменение мощности дозы гамма-излучения от корпуса ВГМФ в процессе испытаний

Высокая эффективность удерживания на ВГМФ продуктов коррозии позволила распространить область применения высокоградиентной магнитной фильтрации на объекты теплоэнергетики. В рамках внедрения инновационных технологий в народное хозяйство по заданию правительства Ленинградской области был разработан сертифицированный опытный образец высокоградиентного магнитного фильтра для очистки воды тепловых сетей, производительностью 300 м³/час с рабочей температурой теплоносителя до 120 °С [51]. Преимуществами разработанного ВГМФ по сравнению с испытывавшимися ранее магнитными фильтрами является значительно более высокая эффективность очистки водных потоков за счет удерживания всего спектра фазового и дисперсного состава частиц продуктов коррозии, а также простота его регенерации, которая осуществляется простой водной промывкой магнитной системы после её вывода из рабочей зоны фильтра.

Заключение

Итоги натурных испытаний различных типов ВГМФ в НИТИ и на других объектах атомной энергетики и промышленной тепловой энергетики подтвердили корректность концептуальных представлений, заложенных при создании физической модели высокоградиентной магнитной фильтрации и программы расчета характеристик магнитных систем, а также обоснованность выбора конструктивных решений, использованных при создании ВГМФ. Полученные результаты свидетельствуют об универсальности метода и возможности выведения на высокоградиентных магнитных фильтрах практически всех форм продуктов коррозии, присутствующих в технологических средах как ЯЭУ, так и теплоэнергетических установок, а метод магнитной фильтрации в предлагаемой версии может рассматриваться как перспективный для очистки технологических сред как в атомной, так и в тепловой энергетике.

Литература

1. Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов / И.К. Морозова, А.И. Громова, В.В. Герасимов [и др.]. – М.: Атомиздат, 1975.
2. Анализ продуктов коррозии в тракте циркуляции теплоносителя АЭС с РБМК / А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, В.Я. Бредихин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1984. – № 11. – С. 8–10.

3. Фазовый анализ диспергированных в теплоносителе АЭС продуктов коррозии методом мессбауэровской спектроскопии / А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, Г.Н. Белозерский [и др.] // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67, вып. 6. – С. 389–392.
4. Продукты коррозии в контурах атомных станций / К.Н. Брусов, П.Г. Крутиков, В.С. Осминин, А.М. Чекмарев. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. *Кульский Л.А.* Магнитное поле и процессы водообработки / Л.А. Кульский, С.С. Душкин. – Киев: Наукова Думка, 1987.
6. *Сандуляк А.В.* Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов / Сандуляк А.В. – М.: Химия, 1988. – 136 с.
7. *Тебенихин Е.Ф.* Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Тебенихин Е.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 144 с.
8. Работа электромагнитного фильтра в схеме энергоблока сверхкритического давления / И.В. Зубов, Л.В. Кузмичева, Ю.И. Богачко [и др.] // Теплоэнергетика. – 1976. – № 12. – С. 66–69.
9. *Мартынова О.И.* О применении электромагнитных фильтров для удаления из воды ферромагнитных примесей / О.И. Мартынова, А.С. Копылов // Теплоэнергетика. – 1972. – № 3. – С. 67–69.
10. *Тебенихин Е.Ф.* Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Е.Ф. Тебенихин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 144 с.
11. *Сандуляк А.В.* Магнитное обезжелезивание конденсата / А.В. Сандуляк, И.М. Федоткин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. Работа электромагнитного фильтра в схеме энергоблока СКД / И.В. Зубов, Л.В. Кузмичева, Ю.И. Богачко [и др.] // Теплоэнергетика. – 1976. – № 12. – С. 66–69.
13. Обезжелезивание вод теплоэнергетических установок с помощью ЭМФ/ В.С. Кириченко, М.Я. Полянский, К.А. Бликов, Е.В. Шевченко // Водоподготовка, водный режим и химический контроль. – 1976. – Вып.6. – С.139–142.
14. *Мартынова О.И.* Вопросы очистки и обработки добавочной воды на крупных ТЭС / О.И. Мартынова. – М.: Энергия, 1974.
15. Промышленные испытания электромагнитного фильтра на питательной воде АЭС / Л.А. Кудряшов, Г.Д. Волгин, А.П. Еперин, М.Н. Леонов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика и техника ядерных реакторов. – 1986. – Вып. 3. – С. 40–43.
16. *Schneider V.* Versuchergebnisse mit Hochleistungs – Electromagnetfilter und deren genetable Bedeutung fur die Korrosionsproductfiltration in kraftwerke / V. Schneider, H.G. Heitman, H. Rehfild // V.G.B. – kraftwerkstecnic. – 1987. – V. 67. – № 5. – S. 514–519.
17. Результаты испытаний ЭМФ на Пк АЭС с ВВЭР-440 / Д.Л. Цырульников, Е.В. Юрчевский, Ф.И. Велан [и др.] // Теплоэнергетика. – 1987. – № 4. – С. 34–37.
18. *Черемных П.А.* Магнитная сепарация: обзор ИАЭ им. И.В. Курчатова. – М., 1979.
19. *Черемных П.А.* Физическое обоснование магнитного обогащения окисленных железистых кварцитов Криворожского бассейна в объёмно-градиентных магнитных сепараторах: отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, инв. № 50. 05/55 / П.А. Черемных, В.К. Федоров, А.И. Пискунов, А.И. Волков. – М., 1981.
20. Патент ФРГ, № 1277488. Einrichtung zur elektromagnetischen Entfernung von Eisenoxyden aus Flussigkeit / H.G. Heitmann, G. Donath, W. Beyer. – Оpubл. 30.04.1969.

21. Штереншис И.П. Исследование магнитных фильтров для обезжелезивания питательной воды парогенераторов АЭС / И.П. Штереншис, И.П. Лазарев, С.В. Фартуков // Теплоэнергетика. – 1976. – № 9. – С. 18–20.
22. Kolm H.H. Magnetism and Magnetic Materials Conference, Proceedings / Kolm H.H. – Abstract. – 1971.
23. Patent U.S. 3.676.337. Magnetic Devesce / H.H. Kolm. – 1972.
24. Patent U.S. 3.627.678. Magnetic Separator / P. Marston. – 1971.
25. Kolm H.H. Research needs in magnetic separation / H.H. Kolm // IEEE Trans. Magnetics. – 1976. – V. MAG-12. – N 5. – P. 450–454.
26. Melville D. High gradient magnetic separation of red cells from whole blood / D. Melville, F. Paul, S. Roath // IEEE Trans. Magnetics. – 1975. – V. MAG-11, N 6. – P. 1701–1704.
27. Gill S. Force on a small particle in the vicinity of a cylinder in a homogeneous magnetic field / S. Gill, C. Malone // Rev. Sci. Instrum. – 1963 – V. 34, N 7. – P. 788–790.
28. Исследование высокоградиентных магнитных фильтров для очистки воды от парамагнитных частиц / Б.А. Гусев, А.А. Ефимов, Р.С. Ларина [и др.] // Атомная энергия. – 1988. – Т. 64, № 1. – С. 69–71.
29. Очистка воды высокоградиентным магнитным фильтром / Б.А. Гусев, А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин [и др.] // Атомная энергия. – 1991. – Т. 70, Вып. 6. – С. 412–413.
30. Watson J.H.P. Magnetic filtration // J. Appl. Phys. – 1973. – V. 44, N 9. – P. 4209–4213.
31. Watson Y.H.P. Theory of capture of particles in magnetic high-intensity filters // IEEE Trans. Magnetics. – 1975. – V. MAC-11, N 5. – P. 1597–1599.
32. А.с. № 194677. Магнитный сепаратор / В.Г. Дергач, Т.Е. Владимиров, В.В. Кармазин, О.С. Павлов. – Бюл. изобр. – 1967. – № 9.
33. Maxwell S. Magnetic separation – The prospects for superconductivity // Criogenics Journal. – 1975. – N 4. – P. 179–184.
34. Watson J.H.P. The beneficiation of clay using a superconducting magnetic separator / J.H.P. Watson, D. Hocking // IEEE Trans. Magnetics. – 1975. – V. MAG-11. – N 5. – P. 1588–1590.
35. Stekly Z.J.J. Shape effect of the matrix on the capture cross section of particles in high gradient magnetic separation / Z.J.J. Stekly, J.V. Minervini // IEEE Trans. Magnetics. – 1976. – V. MAG-12, N 5. – P. 474–479.
36. Gunning D.L. The motion of small paramagnetic particles in a high gradient magnetic separator / D.L. Gunning, D.C. Prieve, G.J. Powers // IEEE Trans. Magnetics. – 1976. – V. MAG-12, N 5. – P. 471–473.
37. Zebel G.J. Deposition of aerosol flowing past a cylindrical fiber in a uniform electric field // Colloid Science. – 1965. – V. 20. – P. 522–543.
38. Luborsky F.E. High gradient magnetic separation: Theory versus experiment / F.E. Luborsky, B.J. Drummond // IEEE Trans. Magnetics. – 1975. – V. MAG-11, N 6. – P. 1696–1700.
39. Luborsky F.E. Buildup of particles on fibers in a high field-high gradient separator / F.E. Luborsky, B.J. Drummond // IEEE Trans. Magnetics. – 1976. – ЦВ. MAG-12, N 5. – P. 463–465.
40. Cowen CM Friedlaender F.J. High gradient magnetic field particle capture on a single wire / F.J. Friedlaender, R. Jaluria // IEEE Trans. Magnetics. – 1975. – V. MAG-11, N 5. – P. 1600–1602.
41. Cowen C. Single wire model of high gradient magnetic separation processes / C. Cowen, F.J. Friedlaender, R. Jaluria // IEEE Trans. Magnetics. – 1976. – V. MAG-12, N 5. – P. 466–470.

42. Применение ЯГР-спектроскопии для определения фазового состава мелкодисперсных продуктов коррозии реакторных материалов в водном теплоносителе / А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, Б.А. Гусев [и др.] // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51, вып. 6. – С. 383–386.
43. Фазовый анализ диспергированных в теплоносителе АЭС продуктов коррозии методом мессбауэровской спектроскопии / А.А. Ефимов, Л.Н. Москвин, Г.Н. Белозерский [и др.] // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67, вып. 6. – С. 389–392.
44. Гусев Б.А. Численное моделирование процесса высокоградиентной магнитной фильтрации / Б.А. Гусев, В.Г. Семенов, В.В. Панчук // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 61, № 9. – С. 1292–1298.
45. А.с. № 1785104. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 1992.
46. Патент РФ № 2190453. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 2002.
47. А.с. № 1777269. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 1991.
48. Патент РФ № 2203124. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 2003.
49. Патент РФ № 2360740. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 2007.
50. Патент на полезную модель № 109004. Высокоградиентный магнитный фильтр. – 2010.
51. Сертификат соответствия, № РОСС RU.ГC03. C00021 от 06.12.2007.