

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_54

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОННОГО ФИЛЬТРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ СИСТЕМ СПЕЦВОДООЧИСТКИ ЯЭУ

С.М. ДмитриевORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Е. Соборнов**ORCID: 0000-0002-1146-3081 e-mail: wisestjedi@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Р.Р. Рязанов**ORCID: 0000-0002-8777-4337 e-mail: ryazapov.renat@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Мамаев**ORCID: 0000-0001-5951-0492 e-mail: alks_may@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Котин**ORCID: 0000-0001-8539-8158 e-mail: an.kotin@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Легчанов**ORCID: 0000-0002-6195-3804 e-mail: legchanov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.В. Треушников**ORCID: 0000-0003-4791-3395 e-mail: www.mor.ry@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты численного моделирования гидродинамики фильтрующего аппарата, предназначенного для нужд энергетической отрасли. Конструкция фильтра предусматривает использование магнитного поля стационарных магнитов для осаждения железосодержащих примесей. Тангенциальный боковой вход

обеспечивает закрутку потока, что приводит к увеличению времени нахождения примесей в области фильтрации. Анализ сил, действующих на железосодержащие частицы размером 20 мкм, а также результаты численных расчетов позволили оценить эффективность влияния закрутки потока на время нахождения примесей в зоне фильтрации.

Установлено, что массовые и гидродинамические силы утрачивают преобладающее действие над магнитными при уменьшении размера ферромагнитных частиц. В результате превалирование магнитной силы позволяет повысить степень фильтрации рабочей среды. По итогам экспериментов установлено, что на эффективность фильтрации в основном влияет ее продолжительность, в меньшей степени – масса инжектируемой примеси.

Ключевые слова: закрутка потока, закрученное течение, фильтрующий аппарат, компьютерное моделирование, магнитное поле, постоянный магнит, ферромагнитная частица, магнитная сила, гидродинамические силы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дмитриев, С.М. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования циклонного фильтра с постоянными магнитами для систем спецводоочистки ЯЭУ / С.М. Дмитриев, П.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, А.В. Котин, М.А. Легчанов, М.В. Треушников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 54-65. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_54

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL SIMULATION OF CYCLONE FILTER WITH PERMANENT MAGNETS FOR NPP SPECIAL WATER TREATMENT SYSTEMS

S.M. Dmitriev

ORCID: **0000-0003-0637-7004** e-mail: **dmitriev@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.E. Sobornov

ORCID: **0000-0002-1146-3081** e-mail: **wisestjedi@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

R.R. Ryazapov

ORCID: **0000-0002-8777-4337** e-mail: **ryazapov.renat@gmail.com**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Mamayev

ORCID: **0000-0001-5951-0492** e-mail: **alks_may@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Kotin

ORCID: **0000-0001-8539-8158** e-mail: **an.kotin@yandex.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Legchanov

ORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: **legchanov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.V. Treushnikov

ORCID: **0000-0003-4791-3395** e-mail: **www.mor.ry@mail.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Results of numerical simulation of hydrodynamics of filter apparatus designed for the energy industry needs, are presented. Filter design provides for the use of magnetic field of stationary magnets for deposition of iron-containing impurities. Tangential side input provides a twist of flow, which leads to an increase in time of impurities being in the filtration area. Analysis of forces acting on iron-containing particles with a size of 20 microns, as well as the results of numerical calculations, allowed to evaluate the effectiveness of flow twist influence on time of impurities being in the filtration area.

It is found that mass and hydrodynamic forces lose their predominant effect over magnetic ones when the size of ferromagnetic particles decreases. As a result, predominance of the magnetic force makes it possible to increase the degree of filtration of the working medium. According to the results of experiments, it was found that the filtration efficiency is mainly affected by its duration, and to a lesser extent by the mass of the injected impurity.

Key words: twist of flow, swirling flow, filtering apparatus, computer simulation, magnetic field, permanent magnet, ferromagnetic particle, magnetic force, hydrodynamic forces.

FOR CITATION: S.M. Dmitriev, P.E. Sobornov, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, A.V. Kotin, M.A. Legchanov, M.V. Treushnikov. Results of experimental research and numerical simulation of cyclone filter with permanent magnets for NPP special water treatment systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 54-65.

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_54

Введение

Рабочие жидкости, обеспечивающие выполнение технологических процессов на объектах ядерной энергетики, содержат различного рода примеси, значительную часть которых составляют ферромагнитные соединения. Причиной их появления являются, в основном, коррозионные и эрозионные процессы в материале элементов теплообменного оборудования. Присутствие соединений железа в теплоносителе оказывает негативное влияние на надежность и долговечность работы энергетической установки [1-3]. Таким образом, важной задачей современной ядерной отрасли является контроль и поддержание чистоты теплоносителя для обеспечения длительной безаварийной работы ЯЭУ.

Железосодержащие примеси подвержены воздействию магнитного поля, что проявляется в изменении траектории частиц и их дальнейшему осаждению. Поэтому для фильтрации целесообразно использовать аппараты с магнитной системой. Она может быть выполнена на базе постоянных магнитов либо электромагнитов. Однако аппараты с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ, обуславливающих их широкое использование в атомной промышленности: лучшие массогабаритные характеристики, возможность использования в агрессивных и потенциально взрывоопасных средах [4-11]. Однако недостаточная напряженность поля постоянных магнитов в области фильтрации требует проработки проточной части аппарата. Устранение данного недостатка может быть достигнуто за счет тангенциального входа потока фильтруемой жидкости. Такая конструкция аппарата позволит образовать застойные области в результате закрутки потока среды, тем самым обеспечив длительное удержание соединений железа в магнитном поле.

Описание конструкции и принципа действия фильтра

Разработка фильтрующего аппарата, основанного на действии магнитного поля и закрутке фильтруемой среды, проводилась в лаборатории «Парогенерирующие системы» кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [13-14]. Общий вид фильтра представлен на рис. 1.

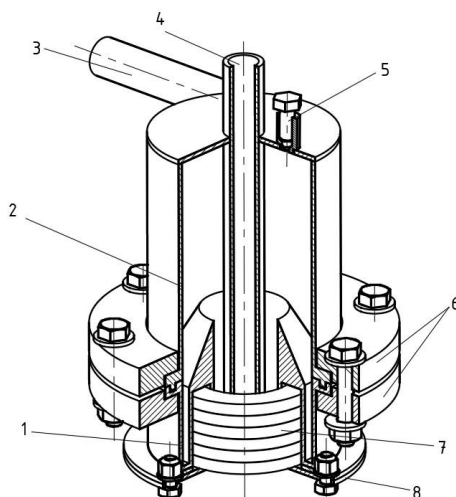


Рис. 1. Магнетогидродинамический фильтр (ФМГ)

Fig. 1. Magneto-hydrodynamic filter (MHF)

Конструкция фильтра включает: нижнюю часть корпуса (1), верхнюю часть корпуса (2), трубки для подвода (3) и отвода (4) фильтруемой среды. Закрутка потока создается за счет тангенциального подвода жидкости. В составе фильтра предусмотрен воздухоотводчик (5) в верхней части корпуса; главное разъемное соединение – типа «шип-паз», с накладными фланцами (6); материал прокладок – фторопласт. В данной конструкции стало возможным существенно увеличить срок службы постоянных магнитов (7) за счет исключения их прямого контакта с рабочей средой. Используются высококоэрцитивные магниты NdBFe с аксиальной намагниченностью. Магнитная система фиксируется в нижней части фильтра с помощью специальной крышки (8). Для очистки и промывки фильтра необходимо извлечь магнитную систему из корпуса с его последующей разгерметизацией.

Во время работы фильтра за счет закрутки потока основной объем примесей направляется в нижнюю часть фильтра, где в специально сформированной застойной области, ферромагнитные частицы подвергаются воздействию магнитного поля. Также за счет закрутки потока увеличивается время нахождения примесей в магнитном поле, что повышает эффективность магнитного воздействия на легкие частицы. Описанные физические процессы во многом определяются соотношением сил, действующих на частицы примеси. Центробежная сила преобладает над силами лобового сопротивления и тяжести. В застойной области скорость потока стремится к нулю и гидродинамические силы, которые перемещают частицы, становятся не существенными. В результате поток поступает в зону, соответствующую размещению магнитной системы. Магнитные силы здесь в несколько раз превышают силу тяжести и становятся непреодолимы для ферромагнитных частиц.

На стадии проектирования проточной части производилась оценка эффективности описанных процессов посредством расчета величин сил, действующих на частицу со стороны потока и магнитного поля. В общем случае второй закон Ньютона, записанный для частицы в потоке фильтруемой среды, выглядит следующим образом:

$$m_p \frac{\partial V_p}{\partial t} = F_{вн} + F_{лс} + F_{пр} + F_{д} + F_{б} + F_{маг} + F_M, \quad (1)$$

где m_p – масса частицы; V_p – скорость взвешенной твердой частицы; $F_{вн}$ – внешние массовые силы; $F_{лс}$ – сила лобового сопротивления; $F_{пр}$ – эффект присоединенной массы шара на половину массы вытесненной им среды; $F_{д}$ – сила, связанная с градиентом давления в жидкости, окружающей частицу; $F_{б}$ – сила Бассе, которая характеризует мгновенное гидродина-

мическое сопротивление, возникающее при большом ускорении; $F_{\text{Маг}}$ – сила Магнуса; F_M – магнитная сила.

Из приведенных сил лишь некоторые оказывают ощутимое влияние на траекторию движения частицы в расчетной области. Силой Бассе можно пренебречь в следствие отсутствия скольжения фаз, а сила Магнуса в сравнении с силой лобового сопротивления пренебрежительно мала. В результате имеет смысл учитывать лишь три силы, количественное значение которых сравнимо с магнитной. На следующем этапе определялись модули сил, действующих на частицу. Во всех экспериментах использовалась фракция примеси ПЖВ 2.160.26 по ГОСТ 9849-86. Для большей точности расчетов была проведена оценка диапазона размеров частиц, встречающихся в примеси. Контроль размеров частиц был выполнен с помощью электронного микроскопа 107 Xsz-107bn Microscope. Установлено, что размер частиц находился в диапазоне от 10 до 150 мкм. Расчет сил проведен для частиц 10, 50, 100, 150 мкм. Результаты расчета сил лобового сопротивления, массовых сил и силы, возникающей за счет градиента давления, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета гидродинамических сил, действующих на частицу

Table 1.

Results of calculation of hydrodynamic forces acting on a particle

Расчетная величина	Размеры частиц			
	$d_p = 10$ мкм	$d_p = 50$ мкм	$d_p = 100$ мкм	$d_p = 150$ мкм
$F_{\text{лс}}, \text{Н}$	$2,96 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$	$5,43 \cdot 10^{-7}$	$9,61 \cdot 10^{-7}$
$F_{\text{вн}}, \text{Н}$	$3,49 \cdot 10^{-11}$	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$3,49 \cdot 10^{-8}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$
$F_{\text{д}}, \text{Н}$	$6,02 \cdot 10^{-10}$	$7,52 \cdot 10^{-8}$	$6,02 \cdot 10^{-7}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$

Сила, с которой магнитное поле постоянного магнита притягивает к себе ферромагнитные частицы, описывается следующим уравнением:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} \oint (\vec{H} (\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B} (\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n} (\vec{H} \cdot \vec{B})) \partial s, \quad (2)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля; \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Данное уравнение рационально решать с помощью численным методов. Для этого с помощью современных программ твердотельного моделирования была создана трехмерная модель исследуемой области (рис. 2). На ее основе создана конечно-элементная модель.

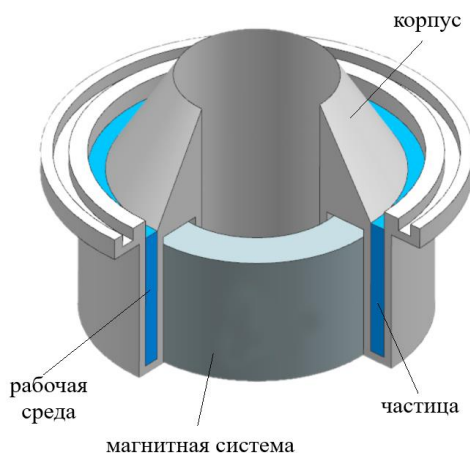


Рис. 2. Расчетная область

Fig. 2. Computational region

В области, где расположена частица, произведено сгущение сетки с целью повышения качества разрешения протекающих физических процессов. Размер сеточного элемента в этой области не превышает 0,15 мм. В результате проведен расчет силы действующей на частицу примеси на заданном расстоянии от внешней поверхности магнита. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Расчетная величина магнитной силы, действующей на частицу

Table 2.

Calculated value of magnetic force acting on a particle

Расчетная величина	Размеры частиц			
	$d_p = 10$ мкм	$d_p = 50$ мкм	$d_p = 100$ мкм	$d_p = 150$ мкм
$F_M, Н$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$2,0186 \cdot 10^{-4}$

Упростив уравнение (1) за счет исключения сил, величина которых значительно меньше магнитной, запишем условие удержания частиц магнитным полем:

$$\vec{F}_M \gg \vec{F}_{вн} + \vec{F}_{лс} + \vec{F}_g \quad (3)$$

Для всего диапазона размеров частиц величина магнитной силы превосходит на несколько порядков суммарную гидродинамическую силу. Данный факт подтверждает эффективность применения данного фильтра для очистки сред, содержащих ферромагнитные примеси. Использование современных *Computational Fluid Dynamics (CFD)* программ позволяет численно определить величину гидравлического сопротивления фильтра и получить траектории движения частиц. CFD-программы и комплексы позволяют в значительной степени ускорить проектирование нового оборудования, а в комплексе с экспериментальными исследованиями позволяет оптимизировать проточную часть фильтра. В качестве инструмента CFD-анализа был выбран *Ansys Fluent*. Для моделирования движения среды в данном случае применима модель напряжений Рейнольдса: *Reynolds stress model (RSM)*. При данном подходе турбулентные напряжения в потоке имеют нелинейную связь с компонентами скорости, что позволяет получить более точное распределение скорости в пограничном слое жидкости. Класс RSM моделей турбулентности является одним из самых прецизионных среди RANS моделей. Конечно-элементная модель состоит из гексаэдрических элементов с призматическими слоями, общее число элементов размером менее 0,8 мм – 5,2 млн, число расчетных узлов – 2,45 млн (рис. 3а). На рис. 3б представлены линии тока среды во внутренней части фильтра.

Анализ поля скорости позволил подтвердить, что скорость в застойной области стремится к 0, что, в свою очередь, повышает вероятность осаждения примесей. При низкой скорости действие гидродинамических сил невелико, и постоянно действующая магнитная сила задерживает частицы в данной области. Однако часть потока среды избегает попадания в застойную область, проходя вдоль центральной трубы в нижнюю центральную часть фильтра. Вместе с этим потоком стремятся покинуть фильтр и частицы примеси. Проходя через нижнюю часть, поток среды разворачивается на 180°, что способствует осаждению частиц на дне фильтра. Здесь также велико действие магнитного поля, так как данная область незначительно удалена от магнитной системы. Наличие областей с пониженным давлением приводит к росту величины гидравлического сопротивления фильтра. Поэтому в ходе расчета определен перепад давления на чистом и «грязном» фильтре. При объемном расходе 0,33 л/с разность величины перепадов составила 25 кПа. Малое отличие величин требуемого давления на прокачку теплоносителя через полный и пустой фильтр является еще одним преимуществом предложенной конструкции.

Расчет траектории частиц в проточной части фильтра стало одной из задач использования CFD-подхода в данной работе. Визуализация движения частиц с учетом действия гидродинамических сил позволяет качественно и количественно оценить процесс фильтрации

примесей различной фракции. Численное решение выполнено в *Ansys Fluent* с применением специальной расчетной модели – DPM. При этом подходе осуществляется решение уравнения движения в Лагранжевых координатах при уже известном поле скорости среды. В рамках подхода могут быть рассмотрены частицы различной формы (сферы, пузырька, капли или твердой частицы). Закон распределения частиц внутри потока среды также может быть задан уравнением. В ходе исследований произведен расчет траекторий сферических частиц размером 10, 50, 100 и 150 мкм. Результаты представлены на рис. 4.

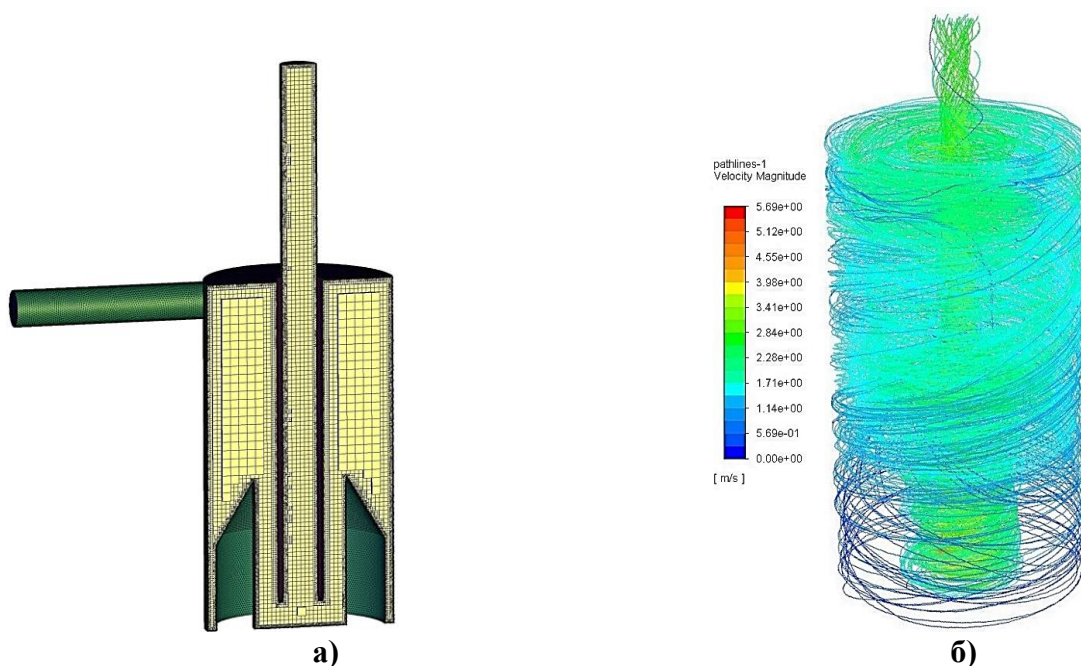
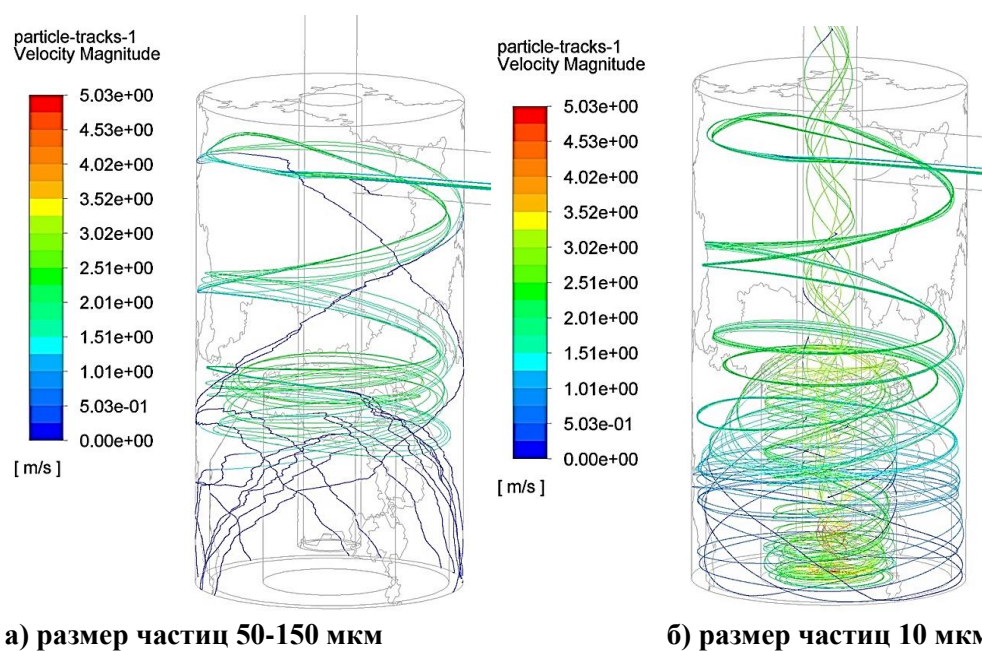


Рис. 3. Расчетная сетка

Fig. 3. Computational grid



а) размер частиц 50-150 мкм

б) размер частиц 10 мкм

Рис. 4. Траектории движения частиц

Fig. 4. Particle trajectories

Для частиц размерами 50-150 мкм характерным является практически моментальное смещение к стенкам фильтра после входа во внутренне пространство. Далее подавляющая часть таких частиц осаждается в застойной области. В дальнейшем гидродинамические силы уже не могут «поднять» эти частицы и поэтому эффективность удержания таких частиц стремится к 100 %. Из рис. 4б становится очевидно, что при значительно меньших размерах частиц, они увлекаются потоком и покидают застойную область проточной части. Количественный анализ показал, что в среднем 20 % инжестрированных частиц покидают фильтр. Такой эффект объясняется низкой инерционностью частиц малого размера. Массовые силы в таком случае значительно меньше гидродинамических и не способны удержать такую частицу в застойной области, или в областях с поворотом потока. Линии тока на рис. 4б подтверждают, что значительная часть потока частиц минует зону осаждения. Несмотря на то, что в застойной области под выходной трубкой происходит поворот потока, легкие частицы все же увлекаются потоком среды наверх, на выход из фильтра.

Описание экспериментальной установки

Исследовательский стенд для оценки эффективности фильтрации представляет собой замкнутый гидравлический контур, включающий центробежный насос, запорно-регулирующую арматуру, контрольно-измерительную аппаратуру (рис. 5).

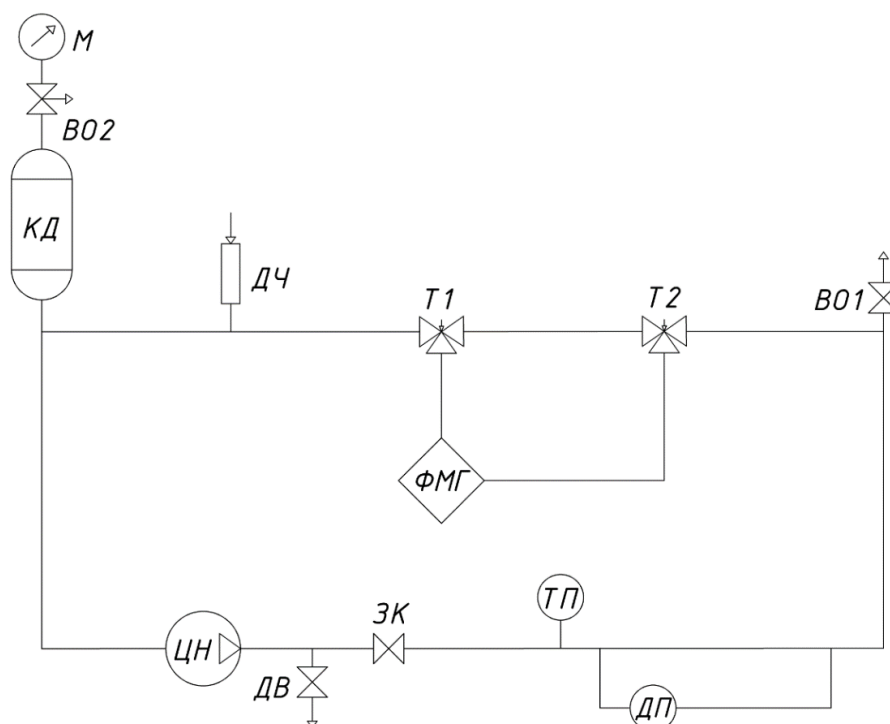


Рис. 5. Гидравлическая схема экспериментального стенда:

ФМГ – магнито-гидродинамический фильтр; ЦН – центробежный насос;
ЗК – запорно-регулирующий клапан; Т1, Т2 – трехходовой шаровый кран; ДВ – вентиль дренажа;
КД – компенсатор давления; ВО1, ВО2 – воздухоотводчики; ТП – термоэлектрический преобразователь; ДП – дифференциальный преобразователь давления;
М – манометр; ДЧ – дозатор частиц

Fig. 5. Hydraulic scheme of the experimental stand:

MHF – magneto-hydrodynamic filter; CP – centrifugal pump;
SCV – shut-off and control valve; T1, T2 – three-way ball valve; DV – drainage valve;
PC – pressure compensator; VO1, VO2 – air vents; TC – thermoelectric converter;
DP – differential pressure converter; PG – pressure gauge; PD – particle dispenser

Для предотвращения нежелательных процессов коррозии, способных негативно повлиять на результаты испытаний, контур был изготовлен из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18Н10Т, а в качестве фильтруемой среды использовалась дистиллированная вода ГОСТ 6709-72. Стенд предусматривает установку внешних кольцевых электронагревателей и имеет в составе компенсатор давления для компенсации температурных расширений жидкости. Фильтр включен в состав стенда с помощью трехходовых шаровых кранов, позволяющих организовывать циркуляцию фильтруемой жидкости как через фильтр, так и по обводному участку. Дозатор частиц предназначен для ввода в контур контрольной массы ферромагнитных примесей.

Метрологическое обеспечение испытаний

Измерение расхода осуществляется по перепаду давления на прямом участке трубы посредством датчика EJX110А. Длина участка между отборами давления составила 1700 мм. Выбор данного подхода обусловлен ограничениями, накладываемыми условиями эксперимента. Применение сужающих устройств неприемлемо ввиду создания механического препятствия свободному прохождению примесей, а использование турбинных преобразователей – ввиду наличия в их конструкции элементов, использующих магнитное поле. Измерение температуры осуществлялось термоэлектрическим преобразователем КТХА 02.01-064-К1-И-С321-1-500\2000. Измерение контрольной массы вводимых в контур ферромагнитных примесей проводилось по аналогии с [14]. Погрешность измеряемых величин не превысила 2 %.

Методика проведения экспериментальных исследований

К основным этапам эксперимента следует отнести: определение чистоты фильтра после регенерации; испытания фильтрующей способности без установленной магнитной системы; испытания фильтрующей способности с установленной магнитной системой; определение массы примесей, оставшихся в результате промывки контура, после экспериментов с фильтром, и массы частиц оставшейся в фильтре после регенерации. Время прохождения фильтруемой среды по контуру определяется следующим образом:

$$\tau = \frac{V_{\text{осн.к}}}{G} \quad (4)$$

где G – расход жидкости; $V_{\text{осн.к}}$ – объем трубопроводов основного контура, исключаяющего петлю с подключенным фильтром.

Время одного прохода рабочей среды по контуру на режиме, характеризующемся максимальной скоростью, составляет 3,36 с. Диапазон регулирования расхода составил от 0 до 38 л/мин с шагом 6,5 л/мин. Время фильтрации различно и определяется кратностью прохода жидкости по замкнутому контуру:

$$t = \tau \cdot N \quad (5)$$

где N – количество прохождений жидкости по контуру. Величина N различна для разных экспериментов и принимает значения в диапазоне 20-1000. Масса вводимых в контур примесей в ходе эксперимента варьируется от 0,1 до 1 г. Таким образом, зная объем всего контура и массу вводимых частиц, нетрудно рассчитать их концентрацию, которая составила от 45 до 456 г/м³. Степень фильтрации ϵ разработанного фильтра оценена по методике [14].

Результаты экспериментальных исследований

В ходе обработки результатов исследования рассмотрим зависимость отфильтрованной массы примеси (m_f) от исходной (m_0), инжектируемой в контур. Для рассматриваемого фильтра без магнитной системы имеем результат, приведенный на рис. 6.

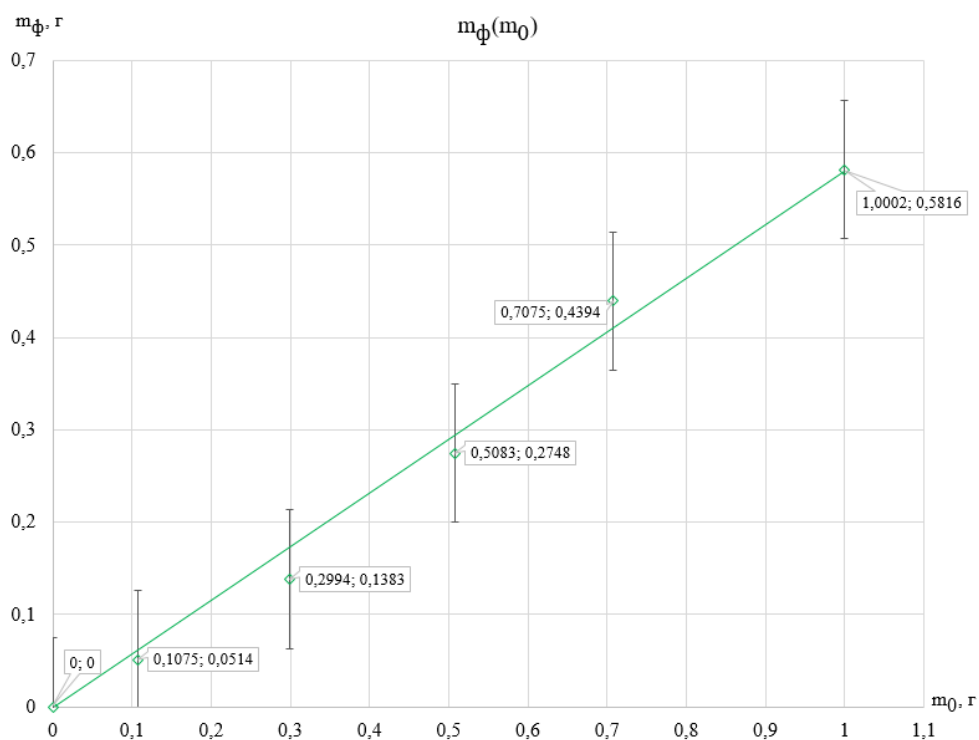


Рис. 6. Зависимость отфильтрованной массы от инжектируемой для фильтра без магнитной системы

Fig. 6. Dependence of the filtered mass on the mass injected for the filter without a magnetic system

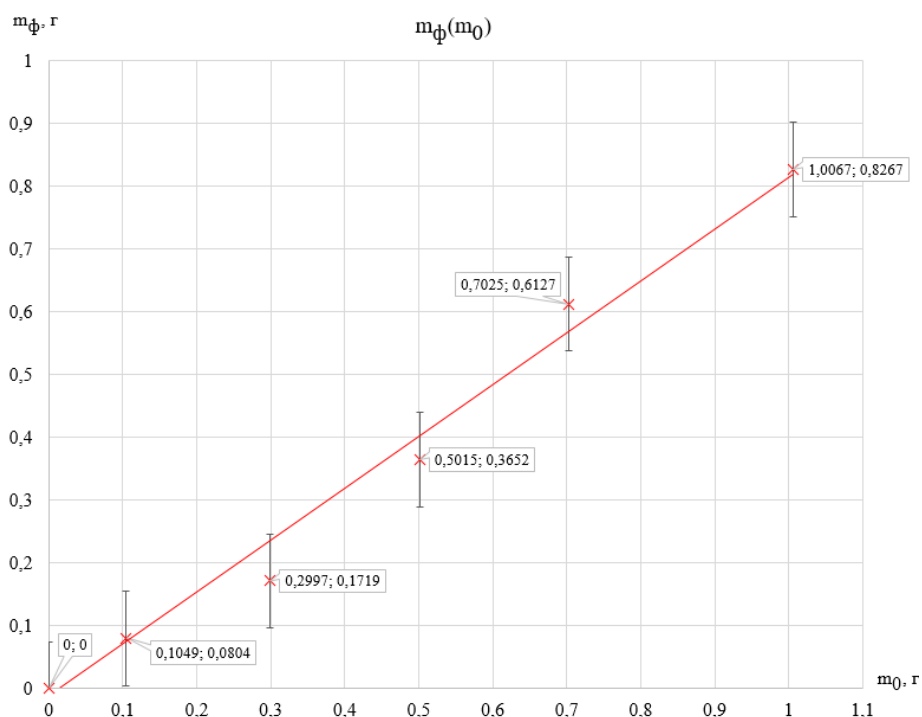


Рис. 7. Зависимость отфильтрованной массы от инжектируемой для фильтра с установленной магнитной системой

Fig. 7. Dependence of the filtered mass on the mass injected for the filter with a magnetic system installed

Аппроксимирующая значения кривая имеет вид линейной функции:

$$m_{\phi} = 0,5801 \cdot m_0 \quad (6)$$

Фильтрующая способность фильтра без магнитной системы не изменяется в зависимости от увеличения массы инжектируемой примеси. Степень фильтрации в среднем составляет 53,7 %. При рассмотрении той же зависимости, полученной на фильтре с установленной магнитной системой, имеем данные, аппроксимируемые кривой (рис. 7):

$$m_{\phi} = 0,8239 \cdot m_0 - 0,01 \quad (7)$$

Фильтрующая способность фильтра с установленной магнитной системой также не меняется в зависимости от увеличения массы инжектируемой примеси, однако степень фильтрации существенно выше и составляет в среднем 75,22 %.

Из рассмотрения зависимости массы отфильтрованной примеси от времени и числа проходов (рис. 8), следует, что зависимость фильтрующей способности от времени выражается логарифмическим законом, а именно: для фильтра без магнитной системы:

$$m_{\phi} = 0,0565 \cdot \ln(m_0) + 0,3756 \quad (8)$$

для фильтра с установленной магнитной системой:

$$m_{\phi} = 0,0759 \cdot \ln(m_0) + 0,4342 \quad (9)$$

В результате анализа полученных экспериментальных данных нетрудно видеть, что эффективность фильтрации с установленной магнитной системой выше, чем без нее. Величина ε достигает 94 %, тогда как степень фильтрации без магнитной системы не превышает 80 %.

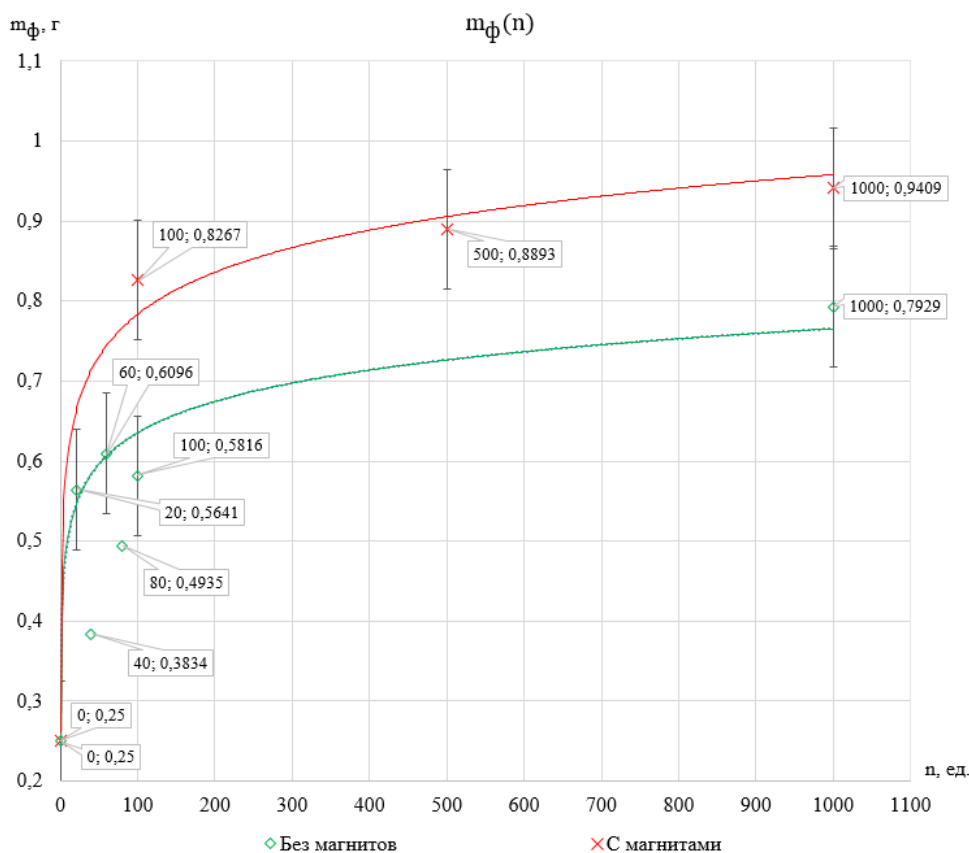


Рис. 8. Зависимость отфильтрованной массы от времени/количества проходов

Fig. 8. Dependence of the filtered mass on time /number of passes

Заключение

Проведенные исследования подтверждают не только работоспособность фильтра представленной конструкции, но и предположение о том, что степень фильтрации данного фильтра не зависит массы примеси, а является функцией времени фильтрации (числа полных проходов среды через фильтр). Необходимо отметить способность фильтра улавливать фракцию ферромагнитной примеси величиной 15 мкм и менее, которая либо трудно-, либо вовсе неуловима циклонами и прочими гидродинамическими фильтрами. Эффективность циклонного фильтра с магнитной системой до 20 % выше, чем без установленной магнитной системы. Таким образом, магнитная система необходима в фильтрующих устройствах, которые применяются в контурах высокой чистоты, где недопустимо содержание ферромагнитных примесей с фракцией менее 40 мкм в рабочей среде, что весьма актуально для контуров и систем энергоустановок.

Библиографический список

1. **Сандуляк, А.А.** Совершенствование режимов и систем магнитной очистки технологических сред для предупреждения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации энергетического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02. – Москва, 2005 – 127 с.
2. **Гусев, Б.А.** Разработка и совершенствование технологий очистки контуров ЯЭУ с водяным теплоносителем от продуктов коррозии: дис. ... д. техн. наук: 05.14.03. – Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова, СПб., 2014 – 193 с.
3. **Сандуляк, А.В.** Магнитофильтрационная очистка жидкостей и газов / А.В. Сандуляк – М.: Химия, 1988. – 136 с.
4. **Антонов, С.Н.** Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование / С.Н. Антонов, А.И. Адошев, И.К. Шарипов, В.Н. Шемякин. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2014. – 220 с.
5. Пат. RU2429045C1. Электромагнитный фильтр / А.А. Цынаева, Д.А. Генералов, А.В. Прохоров, А.С. Долгов, 2011.
6. Пат. RU2206371C2. Электромагнитный фильтр осадитель / А.И. Елшин, Н.Е. Киреев, 2003.
7. Пат. RU2160148C1. Магнитный фильтр / Ю.В. Данченко, 2000.
8. Пат. RU2203124C1. Высокоградиентный магнитный фильтр / Б.А. Гусев, Л.Л. Чилипенко, Е.П. Козлов и др., 2003.
9. Пат. RU2360740C1. Высокоградиентный магнитный фильтр / Б.А. Гусев, Д.А. Кирпиков, 2009.
10. **Федорова, Н.Н.** Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс 2017. – 210 с.
11. **Гусев, Б.А.** Численное моделирование процесса высокоградиентной фильтрации / Б.А. Гусев, В.Г. Семенов, В.В. Панчук // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 9. С. 13-19.
12. **Соборнов, А.Е.** Определение гидравлических характеристики элементов теплообменного оборудования ЯЭУ с помощью ANSYS CFD 14.0: методические указания / А.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов. – Н. Новгород: НГТУ, 2017. – 46 с.
13. Патент RU197879U1. Магнито-гидродинамический фильтр / Дмитриев С.М., Треушников М.В., Соборнов А.Е. и др., 2020.
14. **Треушников, М.В.** Расчетно-экспериментальное исследование магнитных фильтров на постоянных магнитах применительно к контурам водо-водяных РУ / М.В. Треушников, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Мамаев, А.В. Котин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1(128). С. 86-95.

*Дата поступления
в редакцию: 30.11.2021*