

УДК 66.067.1:538

*О.В. Гаращенко^а, В.І. Гаращенко^а, І.М. Астрелін^б***МАГНІТОСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ РІДКИХ ПРОДУКТІВ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІД ФЕРОМАГНІТНИХ ДОМІШОК**^а Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне^б Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В процесі виробництва продуктів хімічної технології відбувається неперервна корозія та знос технологічного обладнання, при цьому ферумовмісні домішки продуктів корозії впливають як на якість продукції, так і на режими технологічного процесу. Для очищення аміачної води «ч.д.а.» та рідкого аміаку від ферумовмісних домішок запропонований магнітосорбційний метод, заснований на використанні магнітних фільтр-осаджувачів з феромагнітною фільтр-матрицею. Виконані дослідження з впливу довжини шару (L) намагніченої фільтр-матриці, напруженості зовнішнього магнітного поля (H), швидкості фільтрування (V) на величину коефіцієнта очищення (ψ) аміачної води «ч.д.а.» в широкому діапазоні зміни параметрів: $L=0-0,8$ м, $H=0-170$ кА/м, $V=0-400$ м/год. Встановлена аналітична залежність коефіцієнта очищення ψ від L , H , V та λ (де λ – частка феромагнітних домішок), що дозволяє прогнозувати величину коефіцієнта очищення при змінненні зазначених параметрів. Виконані дослідження з впливу довжини шару намагніченої фільтр-матриці на концентрацію феруму в рідкому аміаку при $H=80$ кА/м, $V=300$ м/год. Показано, що при зміні $L=0-0,4$ м концентрація феруму в рідкому аміаці зменшується з $1,17$ мг/дм³ до $0,38$ мг/дм³, тобто в 3 рази. Побудована крива відносної зміни концентрації і диференціальна крива магнітного очищення рідкого аміаку від феруму, які дозволяють показати інтенсивність зменшення концентрації феруму по довжині шару намагніченої фільтр-матриці та визначити зону максимального осадження домішок феруму. Використовуючи результати досліджень, виготовлений і впроваджений магнітний фільтр-осаджувач для очищення аміачної води «ч.д.а.». Результати промислових випробувань у вигляді точкових діаграм концентрації феруму до і після очищення засвідчують, що концентрація феруму зменшується зі $140-160$ мкг/кг до $60-70$ мкг/кг.

Ключові слова: аміачна вода, домішки феруму, магнітосорбційне очищення, фільтр-матриця, магнітний фільтр.

DOI: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-80-85

Вступ

В процесі виробництва продуктів хімічної технології відбувається неперервна корозія та знос технологічного обладнання. Встановлено, що продуктами корозії в більшості випадків є ферумовмісні домішки [1,2]. Ці домішки негативно впливають як на якість продукції, так і на режими технологічного процесу. В деяких випадках їх висока концентрація призводить до зупинки технологічних процесів [1].

Одним із продуктів хімічної технології, до

якого висуваються підвищені вимоги щодо наявності ферумовмісних домішок, є аміачна вода (25 мас.%) реактивної чистоти «ч.д.а.». Згідно з нормативами, масова частка феруму в аміачній воді реактивної чистоти не повинна перевищувати $0,2 \cdot 10^{-7}$. Наявність ферумовмісних домішок у рідкому і газоподібному аміаку ($0,1-1,5$ мг/кг), який використовується у виробництві аміачної води і неконцентрованої нітратної кислоти, призводить до погіршення якості аміачної води і утворення відкладень на платиновмісних катал-

ізаторах контактних апаратів окиснення аміаку. Встановлено, що ці відкладення складаються до 50% із заліза та його оксидів. Поступово відбувається процес хімічного отруєння каталізаторів, і за рахунок цього зменшується ступінь конверсії аміаку на 6–8%, а це призводить до зменшення виробництва високоякісної продукції, перевитрат аміаку, каталізатора та енергії [1].

Відомо, що для дотримання параметрів з залишкового вмісту феруму в аміачній воді (25 мас.%, «ч.д.а.») передбачені подвійна конденсація пари, використання механічних фільтрів і сепараторів для очищення рідкого, газоподібного аміаку і промислової пари. Для збирання і зберігання аміачної води використовуються емальовані ємності, а також ємності і трубопроводи з легованих сталей. Але через високу дисперсність домішок і неперервну корозію, концентрація їх не завжди відповідає нормі. Дослідженнями встановлено, що домішки, в основному, містять Fe_3O_4 , $\alpha-Fe_2O_3$, $\gamma-Fe_2O_3$ [1].

Для очищення аміачної води і рідкого аміаку від ферумвмісних домішок запропонований екобезпечний магнітосорбційний метод, заснований на використанні магнітних фільтр-осаджувачів з феромагнітною гранульованою фільтр-матрицею [1–5]. Відомо також ефективно використання магнітних фільтр-осаджувачів з різними фільтр-матрицями для очищення рідких середовищ в теплоенергетиці, металургії, газоочищенні [6–10]. У шпаринах гранульованої фільтр-матриці створюється неоднорідне магнітне поле з високим значенням силового фактору, величина якого досягає $1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14} \text{ A}^2/\text{m}^3$, і який забезпечує ефективно осадження домішок [2,3]. Як корозійностійка гранульована фільтр-матриця використані гранули стружки зі сталей 0X13-40X13 [1,2]. Ці гранули являють собою мініпаралелепієди з криволінійною поверхнею, еквівалентним діаметром 4–6 мм, виготовлені за певною технологією. Випробування здійснювались в реальних виробничих умовах під час фільтрування 25 мас.% аміачної води реактивної чистоти і рідкого аміаку.

Метою даного дослідження є визначення впливу довжини шару намагніченої фільтр-матриці, напруженості зовнішнього поля та швидкості фільтрування на величину коефіцієнта очищення аміачної води «ч.д.а.» та дослідження впливу довжини шару намагніченої фільтр-матриці на концентрацію феруму в рідкому аміаці.

Методика експерименту

Для дослідження використовували немаг-

нітний циліндричний корпус, заповнений феромагнітною фільтр-матрицею у вигляді гранул стружки зі сталі 40X13, з еквівалентним діаметром 4–6 мм. Щільність пакування гранул матриці складала 0,55. Магнітне поле створювалося самарій-кобальтовими магнітами [10], які розміщені на зовнішній стороні корпусу по всій його висоті. Установка забезпечена ємкостями для досліджуваної рідини і очищеної, які з'єднані з корпусом патрубками. Крім того, ємність з досліджуваною рідиною була підключена до компресора для створення необхідного тиску з метою дослідження процесу фільтрування при різних швидкостях. На вході і виході установки були встановлені пробовідбірники для аналізу проб і визначення коефіцієнта очищення (ψ) досліджуваного середовища від домішок у намагніченій фільтр-матриці при зміні довжини шару фільтр-матриці (L), напруженості зовнішнього магнітного поля (H), швидкості фільтрування досліджуваних рідких середовищ (V) [1,10]. Коефіцієнт очищення визначали за відносною зміною концентрації феруму:

$$\psi = \frac{C_0 - C}{C_0},$$

де C_0 – концентрація феруму на вході магнітного фільтра, C – локальне значення концентрації феруму, що відповідає певним значенням L , H та V .

Концентрацію феруму визначали сульфосаліциловим методом з використанням фотометричних приладів [1]. Оцінювання дисперсного складу домішок здійснювали з використанням електронного мікроскопа. Виявлено, що при збільшенні $2 \cdot 10^3 - 4,6 \cdot 10^3$ ферумвмісні домішки аміачної води виглядають як окремі частинки з розмірами від 0,01 до 5 мкм. Конгломерати з частинок мають розміри 10–30 мкм.

Результати та обговорення

Експериментальні дослідження з впливу L , H , V на величину коефіцієнта очищення ψ ферумовмісних домішок аміачної води у намагніченій фільтр-матриці наведені на рис. 1. Кожна точка на графіку відповідає 5–10 локальним концентраціям феруму до і після очищення аміачної води. Частка феромагнітної фракції домішок в аміачній воді складала 0,6–0,8 та визначалась шляхом циклічного фільтрування за методикою, описаною в роботі [12].

Зміна величини L в межах 0,2–0,8 м дозволила отримати максимальне значення коефіці-

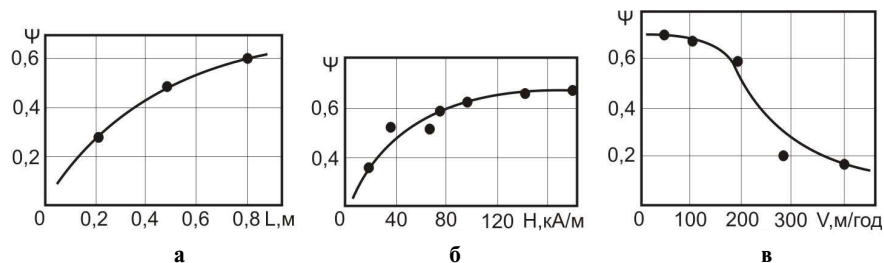


Рис. 1. Вплив довжини шару намагніченої фільтр-матриці (а), напруженості намагнічуючого поля (б) і швидкості фільтрування (в) на коефіцієнт очищення аміачної води від ферумвмісних домішок: а – $H=80$ кА/м, $V=100-150$ м/год; б – $L=0,8$ м, $V=100-150$ м/год; в – $L=1,0$ м, $H=80$ кА/м

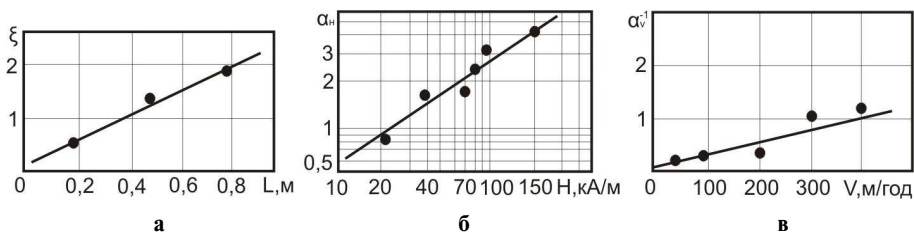


Рис. 2. Вплив довжини шару намагніченої фільтр-матриці (а), напруженості намагнічуючого поля (б) і швидкості фільтрування (в) на логарифмічний коефіцієнт очищення ξ і коефіцієнти поглинання α_n та α_v : а – $H=80$ кА/м, $V=100-150$ м/год; б – $L=0,8$ м, $V=100-150$ м/год; в – $L=1,0$ м, $H=80$ кА/м

ента очищення $\psi=0,6$. При зміні H в межах 20–40 кА/м величина ψ складає 0,35–0,6. Подальше збільшення H до 150 кА/м дозволило отримати $\psi=0,7$.

Особливим є вплив V на величину ψ . Як видно з рис. 1, при збільшенні величини V понад 200 м/год величина ψ суттєво зменшується і вже при $V=400$ м/год складає 0,2. Це пояснюється декількома причинами. На величину ψ впливає значення магнітних властивостей ферумвмісних домішок та частка феромагнітних домішок λ із загальної маси домішок. Збільшення V понад 250 м/год приводить до переходу течії рідини в шпаринах гранул фільтр-матриці з ламінарного режиму в турбулентний.

Отримані данні (рис. 1) оброблювалися з виведенням узагальнюючої напівемпіричної залежності за методикою [10,11], що заснована на моделі експоненціального поглинання фільтр-матрицею феромагнітних часток з протікаючою через неї рідини. Згідно з цією методикою, логарифмічний коефіцієнт осадження ξ , що має вигляд $\xi = -\ln\left(1 - \frac{\psi}{\lambda}\right)$, прямо пропорційний величині L (у формулі λ – це частка феромагнітної фракції ферумвмісних домішок), що також підтверджується і при досліді з аміачною водою (рис. 2,а), при $\lambda=0,6-0,8$.

Враховуючи коефіцієнт поглинання α ($\alpha = \xi/L$) [11] і використовуючи при цьому дослідні дані, надані на рис. 1,б, можна встановити, що часткові коефіцієнти поглинання α_n і α_v в діапазонах $H=20-150$ кА/м та $V=50-100$ м/год підпорядковуються степеневим залежностям $\alpha_n \sim H^{0,75}$ та $\alpha_v \sim V^{-1}$ (рис. 2,б,в). Тоді, з врахуванням [10,11], вираз для коефіцієнта очищення матиме наступний вигляд:

$$\Psi = \lambda \cdot \left[1 - \exp\left(-K \cdot \frac{\bar{H}^{0,75} \cdot L}{\bar{V}}\right) \right], \quad (1)$$

де $K=(8,3-9,1) \cdot 10^{-2}$ м – емпіричний коефіцієнт, $\bar{H} = \frac{H}{1}$ кА/м та $\bar{V} = \frac{V}{1}$ м/год – приведені до безрозмірного вигляду напруженість намагнічуючого поля та швидкість фільтрування, відповідно.

Досліджено вплив довжини шару L намагніченої фільтр-матриці на концентрацію феруму в рідкому аміачі (рис. 3). Для цього використовували експериментальну установку, описану вище.

Під час магнітного очищення рідкого аміаку при зміні L від 0 до 0,5 м концентрація феруму зменшилась з 1,17 мг/дм³ до 0,38 мг/дм³, тобто в 3 рази.

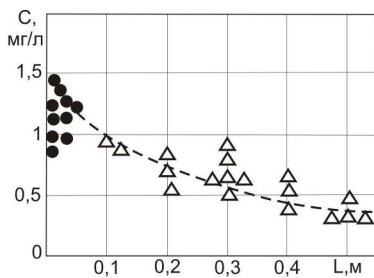


Рис. 3. Вплив довжини шару L намагніченої фільтр-матриці на концентрацію феруму в рідкому аміаці ($\Psi=0,55$; $H=80$ кА/м; $V=300$ м/год)

На рис. 4 зображена крива відносної зміни концентрації і диференціальна крива магнітного очищення рідкого аміаку від домішок феруму. З рис. 4 (крива а), видно, що інтенсивне зменшення концентрації домішок феруму C/C_0 по довжині шару намагніченої фільтр-матриці спостерігається, при зміні L/L_0 від 0 до 0,5. В цьому діапазоні величина C/C_0 зменшилась з 1,00 до 0,496, тобто в 2 рази, а при $L/L_0=0,83$, величина C/C_0 зменшилась до 0,234, в 4,3 рази (C_0 – концентрація феруму на вході фільтра, C – концентрація, що відповідає L , Ψ – щільність пакування гранул фільтр-матриці). Диференціальна крива (рис. 4,б) характеризує зону максимального осадження домішок феруму при вказаних параметрах магнітного очищення аміаку. Видно, що величина $d(C/C_0)/d(L/L_0)$ має максимальне значення $-0,463$, а величина L/L_0 при цьому дорівнює 0,765. З врахуванням того, що $L_0=0,6$ м, відповідно, $L=0,46$ м, а коефіцієнт осадження – 0,65.

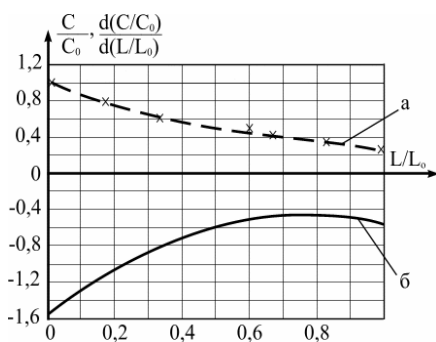


Рис. 4. Крива відносної зміни концентрації (а) і диференціальна крива (б) магнітного очищення рідкого аміаку від домішок феруму. $\Psi=0,55$; $H=80$ кА/м; $V=300$ м/год

Апроксимація кривої відносної зміни концентрації (рис. 4,а) описується наступним

рівнянням полінома третього порядку:

$$C/C_0 = -0,627(L/L_0)^3 + 1,439(L/L_0)^2 - 1,564(L/L_0) + 1. \quad (2)$$

Це рівняння ефективно описує криву. Розрахована максимальна відносна похибка теоретичних і дослідних точок на графіку (рис. 5,б), яка не перевищує 4,6%.

Апроксимація диференціальної кривої (рис. 4,б) описується наступним рівнянням:

$$\frac{d(C/C_0)}{d(L/L_0)} = -1,881(L/L_0)^2 + 2,878(L/L_0) - 1,564. \quad (3)$$

Використовуючи дослідні дані щодо L/L_0 і користуючись рівнянням (3), розраховуються координати диференціальної кривої для довільної точки при зміні L/L_0 від 0 до 1. Використовуючи дані експериментів і відповідну методику розрахунку, виготовлений і впроваджений у виробництво магнітний фільтр-осаджувач для очищення аміачної води «ч.д.а.». Фільтр виготовлений з немагнітної сталі, внутрішнім діаметром 100 мм. Для створення магнітного поля виготовлені секційні соленоїди, які розміщені на зовнішній поверхні корпусу фільтра. Всередині корпус розділений немагнітною перегородкою на дві поздовжні камери сегментного перерізу, в одній з яких розміщена феромагнітна фільтр-матриця з гранул стружки, еквівалентним діаметром 4–6 мм зі сталі 40X13 [1,2]. Висота завантаження фільтр-матриці дорівнює 0,8 м. Призначення другої камери сегментного перерізу, що знаходиться під впливом магнітного поля, – додатково намагнічувати частинки домішок феруму, що знаходяться в аміачній воді. Це створює умови для додаткової флокуляції частинок і, відповідно, збільшує величину коефіцієнта осадження. При швидкості фільтрування 130–170 м/год, продуктивність фільтра складає 500–700 кг/год, потужність намагнічуючої системи – 1,5 кВт; максимальна напруженість магнітного поля – 90 кА/м.

Для регенерації фільтруючої матриці здійснюється її розмагнічування з одночасним змиванням затриманих домішок у бак дренажів.

Результати промислових випробувань фільтра у вигляді точкових діаграм концентрації феруму до і після очищення наведені на рис. 5.

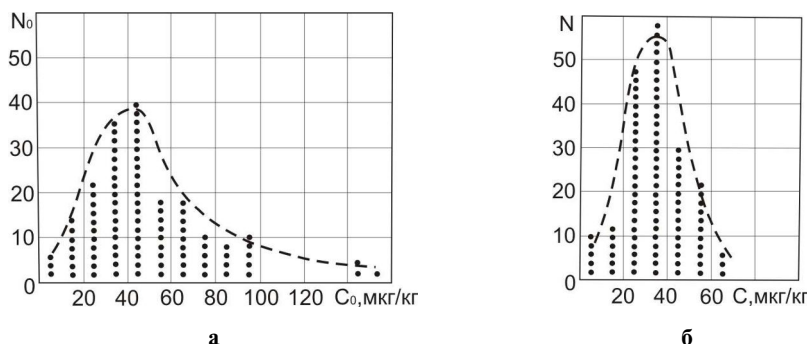


Рис. 5. Концентрація домішок феруму в аміачній воді „ч.д.а” до (а) та після (б) магнітного очищення: N – кількість вимірювань концентрації

Впровадження магнітного фільтр-осаджувача з феромагнітною фільтр-матрицею дозволило зменшити концентрацію феруму в аміачній воді з 140–160 мг/кг до 60–70 мг/кг.

Висновки

Встановлено, що перспективним методом очищення аміачної води реактивної чистоти та рідкого аміаку від феромагнітних ферумовмісних домішок є магнітосорбційний метод з використанням магнітних фільтр-осаджувачів з феромагнітною фільтр-матрицею. Дослідження показали вплив довжини шару (L) намагніченої фільтр-матриці, напруженості зовнішнього магнітного поля (H) та швидкості фільтрування (V) на величину коефіцієнта очищення (ψ) аміачної води «ч.д.а.» в широкому діапазоні зміни параметрів $L=0-0,8$ м, $H=0-170$ кА/м, $V=0-400$ м/год, що дозволило отримати значення $\psi=0,6-0,7$.

За результатами досліджень магнітного очищення рідкого аміаку від ферумовмісних домішок побудовані крива відносної зміни концентрації і диференціальна крива, які показують інтенсивність зменшення концентрації феруму по довжині шару намагніченої фільтр-матриці та визначають зону максимального осадження домішок феруму.

Результати промислових випробувань магнітного фільтр-осаджувача для очищення аміачної води «ч.д.а.» засвідчують, що концентрація феруму зменшується з 140–160 мг/кг до 60–70 мг/кг.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сандуляк А.В., Гаращенко В.И. Электромагнитные фильтр-осадители. – Львов: Вища школа, 1982. – 72 с.
2. Garashchenko V.I., Garashchenko A.V., Luk'yanchuk A.P. The precipitation of the dispersed phase of liquid medium impurities in a magnetized ferrite-ferromagnetic nozzle. // *Rus. J. Phys. Chem. A.* – 2012. – Vol.86. – P.685-688.
3. Патент США № 5076914, МКИ В01D 35/06. Apparatus for separating ferromagnetic materials from fluid media / Garashchenko V., Sandulyak A., Korkhov O. – № 415,281; Заявл. 24.12.1987; Опубл. 29.06.1989; НКИ 210/186. – 12 с.
4. Ambashta R.D., Sillanpaa M. Water purification using magnetic assistance: a review // *J. Hazard. Mater.* – 2010. – Vol.180. – P.38-49.
5. Harikishore Kumar Reddy D., Yun Yeoung-Sang. Spinel ferrite magnetic adsorbents: alternative future materials for water purification? // *Coord. Chem. Rev.* – 2016. – Vol.315. – P.90-111.
6. Asghari E., Moosavi A., Hannani S.K. Simulation of water purification using magnetically ultra-responsive micro- and nanoscavengers. // *J. Water Process Eng.* – 2018. – Vol.24. – P.63-73.
7. Purification of condenser water in thermal power station by superconducting magnetic separation / Ha D.W., Kwon J.M., Baik S.K., Lee Y.J., Han K.S., Ko R.K., Sohn M.H., Seong K.C. // *Phys. C.* – 2011. – Vol.471. – P.1530-1532.
8. Mehta D., Mazumdar S., Singh S.K. Magnetic adsorbents for the treatment of water/wastewater – a review. // *J. Water Process Eng.* – 2015. – Vol.7. – P.244-265.
9. Effects of association with impurities in ammonia purification / Petukhov A.N., Shabbylykin D.N., Vorotyntsev A.V., Vorotyntsev I.V., Vorotyntsev V.M. // *Fluid Phase Equilibria.* – 2015. – Vol.406. – P.163-167.
10. Гаращенко В.И., Астрелин И.М., Гаращенко А.В. Исследование активных параметров процесса магнитной очистки водных сред теплоэнергетики. // *Вода и экология: проблемы и решения.* – 2014. – № 4. – С.46-57.
11. Сандуляк А.В. Использование модели поглощающего экрана при исследовании режимов магнитного фильтрования. // *Электрические станции.* – 1983. – № 1. – С.30-32.
12. Сандуляк А.В. Магнитное обезжелезивание конденсата. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 88 с.

Надійшла до редакції 31.08.2018

MAGNETOSORPTION PURIFICATION OF LIQUID CHEMICAL PRODUCTS FROM FERROMAGNETIC IMPURITIES

O.V. Garashchenko ^a, V.I. Garashchenko ^{a*}, I.M. Astrelin ^b

^a National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

^b National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

* e-mail: v.i.harashchenko@nuwm.edu.ua

There is a continuous corrosion and wear of technological equipment in the fabrication of chemical products, iron-containing impurities as corrosion products affecting both the quality of the products and the operating conditions of the technological processes. These issues concern the production of ammonia water. A magnetosorption method is proposed for the purification of ammonia water and liquid ammonia from iron-containing impurities, the method is based on the use of magnetic filters with a ferromagnetic filter-matrix. We carried out the investigations into the influence of the magnetized filter-matrix length (L), the intensity of the external magnetic field (H), and the velocity of the filtration (V) upon the value of the ammonia water purification factor (ψ) in the wide range of the parameters changes: $L=0-0.8$ m, $H=0-170$ kA/m, and $V=0-400$ m/h. The analytical dependence of the purification coefficient ψ on the values of L , H , V and λ has been derived (where λ is the fraction of ferromagnetic impurities). It allows predicting the purification coefficient with the change of L , H , and V . The influence of the magnetized filter matrix length on the iron concentration in liquid ammonia was investigated at $H=80$ kA/m and $V=300$ m/h. It was shown that the concentration of iron in liquid ammonia decreases from 1.17 mg/dm³ to 0.38 mg/dm³ when the value of L changes from 0 to 0.4 m (i.e. it decreases about 3 times). The curve of the relative concentration change and the differential curve of liquid ammonia magnetic purification from iron have been plotted, they allow demonstrating the intensity of the reduction of the iron concentration over the length of the magnetized filter-matrix and determining the zone of iron impurities maximum deposition. Using the results of our findings, we fabricated a magnetic filter for the purification of ammonia water. The results of industrial tests were presented in the form of point diagrams of the iron concentrations before and after purification, they indicate that the concentration of iron decreases from 140–160 µg/kg to 60–70 µg/kg.

Keywords: ammonia water; iron impurity; magnetosorption purification; filter-matrix; magnetic filter.

REFERENCES

1. Sandulyak A.V., Garashchenko V.I., *Elektromagnitnye fil'tr-osaditeli*. [Electromagnetic filter-depositors.] Vyscha Shkola Publishers, Lviv, 1982. 72 p. (in Russian).
2. Garashchenko V.I., Garashchenko A.V., Luk'yanchuk A.P. The precipitation of the dispersed phase of liquid medium impurities in a magnetized ferrite-ferromagnetic nozzle. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2012, vol. 86, pp. 685-688.
3. Garashchenko V.I., Sandulyak A.V., Korkhov O.J., *Apparatus for separating ferromagnetic materials from fluid media*. Patent US, no. 5076914, 1991.
4. Ambashta R.D., Sillanpaa M. Water purification using magnetic assistance: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 180, pp. 38-49.
5. Reddy D.H.K., Yun Y.-S. Spinel ferrite magnetic adsorbents: alternative future materials for water purification? *Coordination Chemistry Reviews*, 2016, vol. 315, pp. 90-111.
6. Asghari E., Moosavi A., Hannani S.K. Simulation of water purification using magnetically ultra-responsive micro- and nanoscavengers. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, vol. 24, pp. 63-73.
7. Ha D.W., Kwon J.M., Baik S.K., Lee Y.J., Han K.S., Ko R.K., Sohn M.H., Seong K.C. Purification of condenser water in thermal power station by superconducting magnetic separation. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2011, vol. 471, pp. 1530-1532.
8. Mehta D., Mazumdar S., Singh S.K. Magnetic adsorbents for the treatment of water/wastewater – a review. *Journal of Water Process Engineering*, 2015, vol. 7, pp. 244-265.
9. Petukhov A.N., Shablykin D.N., Vorotyntsev A.V., Vorotyntsev I.V., Vorotyntsev V.M. Effects of association with impurities in ammonia purification. *Fluid Phase Equilibria*, 2015, vol. 406, pp. 163-167.
10. Garashchenko V.I., Astrelin I.M., Garashchenko A.V. *Issledovanie aktivnykh parametrov protsessa magnitnoi ochistki vodnykh sred teploenergetiki* [Investigation of active parameters of the magnetic purification process of thermal power engineering aqueous media]. *Voda i Ekologiya: Problemy i Resheniya*, 2014, no. 4, pp. 46-57. (in Russian).
11. Sandulyak A.V. Ispol'zovanie modeli pogloshchay ushchego ekrana pri issledovanii rezhimov magnitnogo fil'trovaniya. [Using the absorbing screen model in the study of magnetic filtering modes]. *Elektricheskie Stantsii*, 1983, no. 1, pp. 30-32. (in Russian).
12. Sandulyak A.V., *Magnitnoe obezhezhezhivanie kondensata* [Magnetic iron removal from condensate]. Energoatomizdat Publishers, Moscow, 1983. 88 p. (in Russian).