

УДК 628.113.2; 66.067.1+517.95

**В. Гаращенко, канд. техн. наук; А. Сафоник, канд. техн. наук;  
О. Гаращенко**

Національний університет водного господарства та природокористування

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАГНІТНОГО ФІЛЬТРУВАННЯ І РЕГЕНЕРАЦІЇ ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ**

*Резюме.* Удосконалено математичну модель, що описує закономірності процесу магнітного осадження. Запропоновано методу розрахунку ефективності процесів фільтрування та регенерації. Досліджено результати, отримані при фільтруванні та регенерації у фільтрах, які функціонують за законами, прийнятими в узагальненій моделі Мінца.

*Ключові слова:* магнітне фільтрування, математична модель процесу магнітного фільтрування, фільтрування та регенерація магнітного фільтра.

**V. Garashchenko, A. Safonyk, O. Garashchenko**

## **MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF MAGNETIC FILTRATION AND REGENERATION AND ESTIMATION OF THEIR EFFICIENCY**

*The summary.* The results of the investigations deal with the problem of water system purification from the contaminating admixtures. The problem is urgent in heat and nuclear engineering, chemical and metallurgical industries. Conventional methods of water systems purification from the products of corrosion, which are based on the application of filters, the filtering nozzle of which are organic and inorganic materials, are known not to provide high level of purification. The process of filtration is especially complicated while filtering high temperature water media ( $\approx 100-200^{\circ}\text{C}$ ) and when high-depression iron admixtures are available. Numerous investigations have testified that iron admixtures (up to 70-95%) in waters of thermal station equipment possess ferromagnetic properties. The efficiency of purification is testified to be dependent on the quality of the filtering nozzles regeneration, that is, these processes are interconnected.

It has been proved that for the purification of technological water systems, in which ferromagnetic admixtures are available, the method of magnetic sedimentation of admixtures in ferromagnetic filtering nozzles, which can be realized in the magnetic filters, is worthy being applied. Magnetic filters operating includes the process of admixtures sedimentation in the filtering nozzles and the nozzle regeneration.

It has been testified that nozzles regeneration time affects the filtration cycle duration, that is, the period of time, during which the filter nozzle is maximally saturated by the admixtures.

Basing on the experimental results data on the effect of active parameters of the magnetic purification of liquid media upon the mass exchange coefficient, mathematic model, which describes the regularities of the process of admixtures magnetic sedimentation in the magnetized ferromagnetic nozzle, has been improved. The basis of the mathematic model are regularities of the filtering process, which are similar to the theoretical approaches of the Mints mechanical filtration theory.

The proposed mathematical model includes a wide range of change of the magnetized filtering nozzle length and sedimented admixtures concentration in filtering nozzle. The model takes into account such parameters: magnetic field stress, granulated filtering nozzle diameter, time of the protective action of the magnetic filter, rate of the liquid media filtering, coefficient, which is the characteristic of the mass amount of the magnetic sediment of the ferromagnetic admixture particles per time unit. Basing on the computer experiment and using the proposed mathematic model the regeneration time, during which the maximal specific density of the nozzle saturation by the admixtures was found to be reduced to 0,5; 0,4; 0,2; 0.

*Nomograms for determination of the operating filtration cycle of chip and ball-shaped filtering nozzle, the period of nozzle regeneration depending on the input iron concentration and purification efficiency, have been calculated and built. The rate of the water flow regeneration was found to affect sufficiently the regeneration efficiency. Thus, at the rate  $V=1000$  m/h during 2 min the regeneration efficiency is 85% of the maximum possible efficiency. When  $V=500$ m/h under the same conditions, the regeneration efficiency is.*

**Key words:** magnetic filtration, mathematical model of magnetic filtration process, filtration and regeneration of magnetic filter.

**Постановка проблеми.** Процес очищення водних систем від різного виду домішкових забруднень є актуальним науковим і науково-технічним завданням. Особливо гостро ця задача стоїть у тепловій і атомній енергетиці, хімічній, металургійній промисловості. Існуючі методи очищення водних середовищ від продуктів корозії, засновані на використанні фільтрів-осаджувачів, в яких фільтруючими загрузками є органічні й неорганічні матеріали, не забезпечують високий рівень очищення [1, 6, 7]. Процес осадження домішок особливо ускладнений при очищенні високотемпературних водних середовищ (наприклад, зворотні, дренажні, турбінні конденсати ТЕЦ, ТЕС) і за наявності високодисперсних домішкових забруднень [1, 4]. Ефективність процесу очищення залежить від якості проведення процесу регенерації фільтруючої загрузки. Ці два процеси є взаємопов'язаними. Тому створення моделі, яка визначає параметри й умови, при яких процеси очищення й регенерації будуть ефективні, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі з літератури дослідження засвідчують, що значна частина, а на окремих виробництвах – визначальна частина домішкових забруднень у водних системах складають сполуки заліза: магнетит, гематит, магеміт [1, 3, 4]. Причиною наявності таких домішок є неперервна в часі корозія та знос технологічного обладнання. Навіть незначна концентрація залізовмісних домішок, близько 10–50 мкг/кг, у водах (конденсатах, живильній воді) котельних агрегатів призводить до того, що на внутрішніх поверхнях парогенеруючих труб утворюються залізисті відкладення. Відкладення всього 0,3–0,5мм зумовлюють перегрів труб на 80–120°C [1–7]. При цьому погіршується теплопередача, збільшується перевитрата палива, відбувається перепал і навіть розрив труб. Часто забруднені конденсати скидають у водні басейни, забруднюючи навколишнє середовище. Численними дослідженнями встановлено, що такі залізовмісні домішки (до 70–95%) володіють феромагнітними або феримагнітними властивостями. Це є основою для використання екобезпечного і енергоефективного методу магнітного осадження домішок у феромагнітній фільтруючій загрузці, який реалізується в магнітних фільтрах [1–6].

Експлуатація магнітних фільтрів включає процес осадження (фільтрування) домішок у феромагнітній фільтруючій загрузці і процес регенерації загрузки. Процес фільтрування характеризується періодом фільтроциклу ( $\tau_3$ ) і часом регенерації ( $\tau_p$ ). Період фільтроциклу ( $\tau_3$ ) складає від кількох годин до кількох сотень годин, а час регенерації може складати 3–20хв. При цьому залежно від форми, розмірів, маси гранул фільтруючої загрузки використовуються значні об'єми води для регенерації. Виникає необхідність створити такі умови, й розрахувати такі теоретичні рекомендації,

при яких ефективність процесів фільтрування та регенерації максимальна, а витрати води при регенерації мінімальні.

**Метою даної роботи** є удосконалення математичної моделі процесу магнітного осадження у випадку фільтрування й регенерації, та розрахунок періоду фільтроциклу і часу регенерації магнітного фільтра.

**Виклад основного матеріалу.** Припускаємо, що закономірності в процесах фільтрування й регенерації при магнітному осадженні домішок аналогічні закономірностям у теорії механічного фільтрування Мінца [8].

Виходячи з вищесказаного, запишемо й розглянемо систему рівнянь, яка відповідає як процесу фільтрування, так і регенерації аналогічно підходу, викладеному в [9]

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma(\rho(x,t))c(x,t))}{\partial t} + \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} + V_i \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} = \beta_k c(x,t) - \varepsilon\alpha_k(\rho(x,t))\rho(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

$$c|_{x=0} = c_*(t), \quad c|_{t=0} = 0, \quad \rho|_{x=0} = 0, \quad \rho|_{t=0} = \rho_*(x), \quad (2)$$

де  $c_*(t) = c_*^* = const$ ,  $\rho_*(x) = 0$  у випадку фільтрування і  $c_*(t) = \mu_p c_*^*$ , ( $\mu_p = const \ll 1$ ),  $\rho_*(x) = \rho(L-x, t_3)$  при регенерації;  $0 < x < L$ ,  $0 < t < \infty$ ,  $c(x,t)$  – концентрація домішок у рідкому середовищі, що фільтрується;  $\rho(x,t)$  – концентрація домішок, осаджених у фільтруючій загрузці;  $c_*(t)$  – концентрація завислих домішкових частинок на вході фільтра;  $\rho_*(x)$  – початковий розподіл осаду у фільтруючій загрузці (при регенерації  $\rho_*(x) = \rho(L-x, t_3)$ , де  $t_3$  – час захисної дії фільтра (період фільтроциклу));  $\beta = \frac{\beta_0 H^{0.75}}{V_i d^2}$  – коефіцієнт, що характеризує масові

обсяги магнітного осадження феромагнітних домішкових частинок за одиницю часу;  $\beta_0$  – вільний параметр (встановлюється дослідним шляхом);  $H$  – напруженість магнітного поля;  $d$  – діаметр гранульованої загрузки магнітного фільтра;  $\alpha_k(\rho)$  – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги відірваних за той же час від гранул загрузки домішкових частинок ( $\alpha_k(\rho) = \alpha_0 + \varepsilon\alpha_*\rho(x,t)$ );  $L$  – довжина фільтра;  $V_k$  – швидкість фільтрування ( $k = \text{ф}$ ), або регенерації ( $k = \text{р}$ ) ( $V_k = const$ , що характеризує замкненість технологічного процесу);  $\varepsilon$  – малий параметр.

Припускаємо, що регенерація фільтруючої загрузки магнітного фільтра здійснюється водним потоком при вимкненні магнітного поля у напрямку, протилежному фільтруванню (протитоком), але за тими ж законами. Коефіцієнт ефективної роботи магнітного фільтра визначається за виразом

$$\psi = \frac{c_*^* - c}{c_*^*}, \quad (3)$$

де  $c_*, c$  – вхідна і вихідна концентрація забруднення (феромагнітних домішок) при магнітному очищенні водного середовища. У випадку  $c(t) = c = const$  ефективність очищення фільтром практично не змінюється до моменту часу  $\tau_3$ , після якого ефективність починає спадати, що підтверджує відомий факт розподілу ефективності фільтра з часом [7-11].

На підставі [8-10] можна показати, що час захисної дії фільтра  $\tau_3 = av_\phi t_3$  та час регенерації  $\tau_p = av_p t_p$  знаходяться з виразів

$$\chi = c(L, \tau_3) = c_0(L, \tau_3) + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i c_i(L, \tau_3) + R_\chi(L, \tau_3, \varepsilon) \quad (4)$$

$$\eta = \rho(L, \tau_p) = \rho_0(L, \tau_p) + \sum_{i=1}^n \varepsilon^i \rho_i(L, \tau_p) + R_\eta(L, \tau_p, \varepsilon), \quad (5)$$

де аналогічно до [11] запишемо  $c_0(L, t) = \begin{cases} c_* \left( t - \frac{\sigma_0 L}{V_k} \right) \cdot e^{-\frac{\beta L}{V_k}}, & t \geq \frac{\sigma_0 L}{V_k}, \\ 0, & t < \frac{\sigma_0 L}{V_k}, \end{cases}$

$$\rho_0(L, t) = \beta \int_0^t c_0(L, \tilde{t}) d\tilde{t}, \quad c_i(L, t) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda_i(L, t)}}{V_k} \cdot \int_0^L g_i(\tilde{x}, f_i(\tilde{x}) + L - f_i(L)) \cdot e^{\lambda_i(\tilde{x}, t)} d\tilde{x}, & t \geq f_i(L), \\ 0, & t < f_i(L), \end{cases}$$

$$\rho_i(L, t) = \int_0^t (\beta c_i(L, \tilde{t}) - g_i(L, \tilde{t})) d\tilde{t},$$

де  $g_i(L, t) = \sum_{j=1}^i \rho_{j-1} \left( \alpha_0 + I(i, j) \sum_{j=2}^i (\alpha_* \rho_{i-2}) \right), \quad \lambda_i(L, t) = \frac{1}{V_k} \int_0^L \zeta_i(\tilde{x}, f_i(\tilde{x}) + L - f_i(L)) d\tilde{x},$

$$\zeta_i(L, t) = \sigma_* \frac{\partial \rho_{i-1}(x, t)}{\partial t} + \beta, \quad I(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a \geq b, \\ 0, & \text{якщо } a < b. \end{cases}$$

Наближені значення функцій  $f_i(x)$  знаходяться шляхом інтерполювання масиву  $(x_j, t_j), \quad j = \overline{1, n}$ , де  $x_j = \Delta x \cdot j$ ,

$$t_{j+1} = t_j + \frac{\Delta x}{V_k} \sigma_* \rho_{i-1}(x_j, t_j).$$

Для оцінки залишкових членів  $R_\chi(L, \tau_3, \varepsilon)$  та  $R_\eta(L, \tau_p, \varepsilon)$  маємо відповідну задачу, аналогічну до [11].

Період фільтроциклу ( $\tau_3$ ) визначається за формулою (4) як час, упродовж якого концентрація на виході фільтра  $c(L, \tau_3)$  досягає рівня проскакування  $\psi_\chi = 0.5; 0.6; 0.7; 0.8$ . Також припускається, що процес регенерації фільтруючої загрузки здійснюється фільтратом з концентрацією  $c$ , тобто фільтратом, зібраним за час ( $\tau_3$ ) у деяку ємність, де він повністю перемішується. Час регенерації  $\tau_p$  визначався за формулою (5) як час, упродовж якого максимальна відносна щільність насичення загрузки осадом  $\rho(x, \tau_p)$  знижується до рівня  $\psi_\eta = 0.5; 0.4; 0.2; 0$ .

Наведемо результати розрахунків за формулами (4), (5) при  $c_*(t) = 0.2$  мг/л,

$V = 200 \text{ м/год}$ ,  $L = 1 \text{ м}$ ,  $\beta_0 = 0.7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\alpha_0 = 0.35 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H = 60 \text{ кА/м}$ ,  $d = 2.4 \text{ мм}$ .  
 $\alpha_* = 1$ .

На рис. 1 наведено розраховані за формулами (4), (5) номограми для визначення робочого фільтроциклу стружкової загрузки, періоду регенерації загрузки залежно від вхідної концентрації заліза та ефективності процесу очищення. Наприклад, при  $c_*(t) = 0.2 \text{ мг/л}$  і ефективності  $\psi_\eta = 0.5$  маємо: для кулькової загрузки  $\tau_3 = 70 \text{ год}$ , для стружкової загрузки  $\tau_3 = 85 \text{ год}$ .

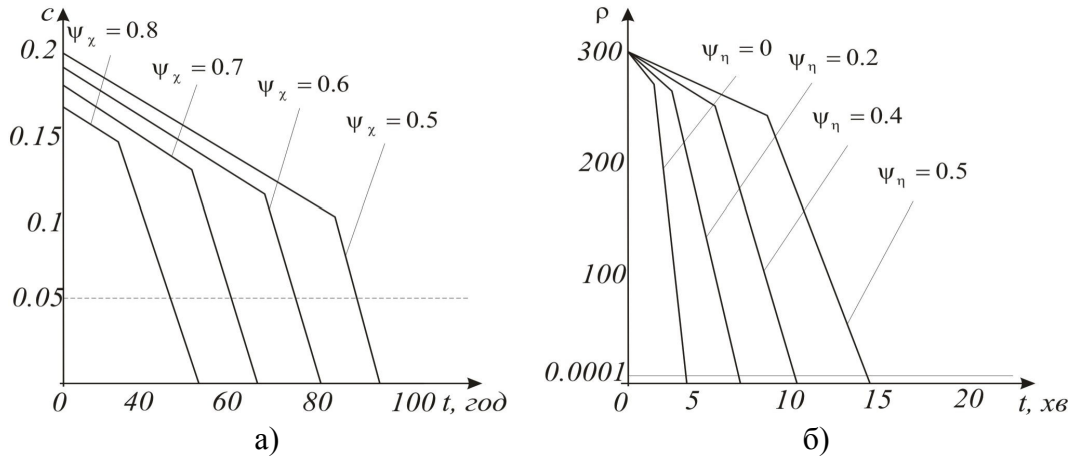


Рисунок 1. Номограми робочого фільтроциклу кулькової загрузки (а) і регенерації (б)

Figure 1. Nomograms of working filtration cycle of ball-shaped nozzle (a) and regeneration (б)

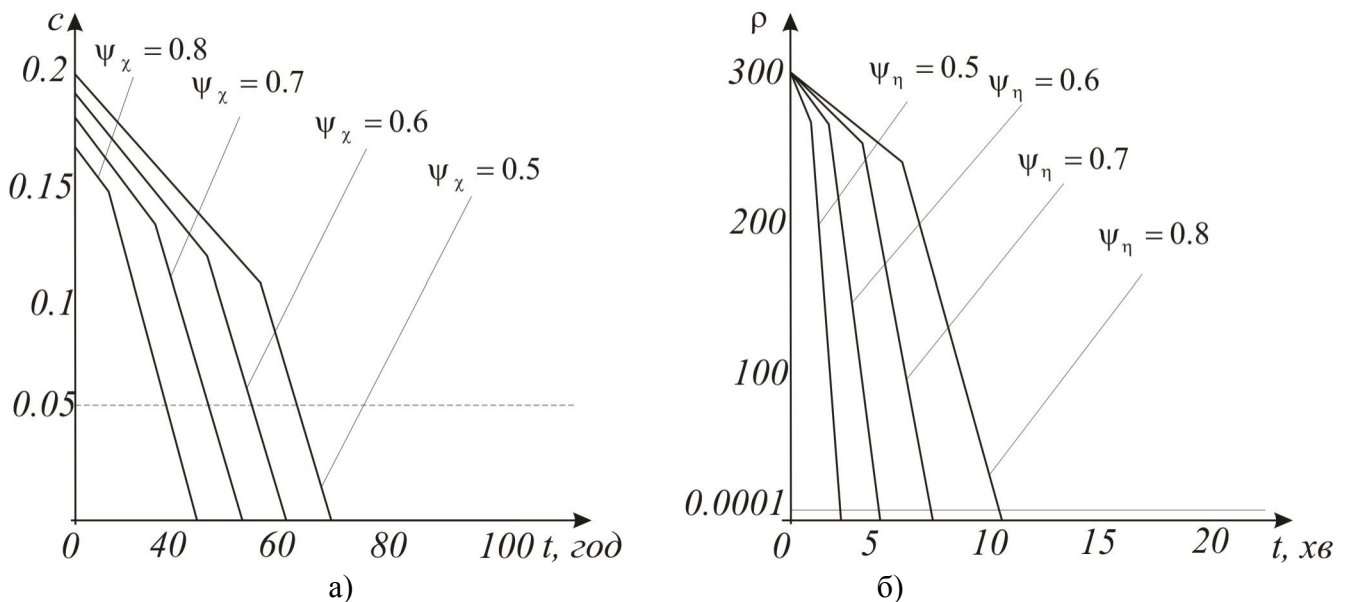


Рисунок 2. Номограми робочого фільтроциклу стружкової загрузки (а) і регенерації (б)

Figure 2. Nomograms of working filtration cycle of chip nozzle (a) and regeneration (б)

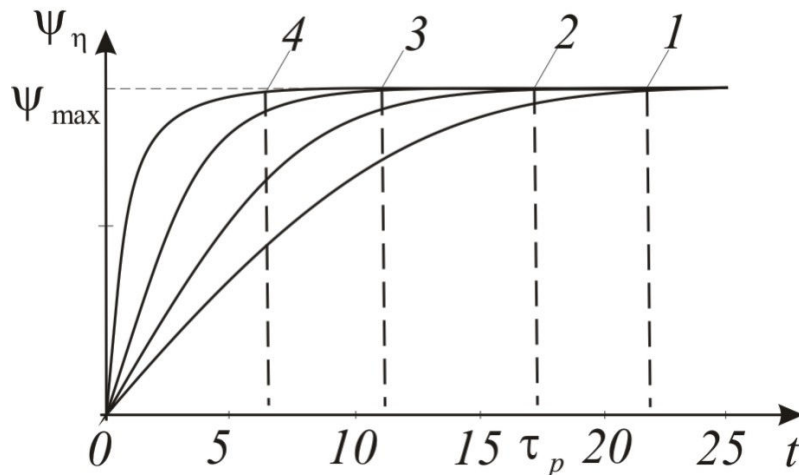


Рисунок 3. Залежність ефективності процесу регенерації загрузки  $\psi_{\eta}$  від швидкості регенераційного водного потоку  $V_p$ , м/год (1 –  $V_p = 250$ , 2 –  $V_p = 500$ , 3 –  $V_p = 750$ , 4 –  $V_p = 1000$ )

Figure 3. Dependence of efficiency of nozzle regeneration process  $\psi_{\eta}$  from speed of regeneration water flow  $V_p$ , m/h (1 –  $V_p = 250$ , 2 –  $V_p = 500$ , 3 –  $V_p = 750$ , 4 –  $V_p = 1000$ )

Як бачимо з рис. 3, швидкість регенераційного водного потоку суттєво впливає на ефективність регенерації, зокрема при  $V_p = 1000$  м/год, за даних умов час регенерації найменший.

**Висновки.** Удосконалено математичну модель, що описує закономірності процесу магнітного осадження домішок у фільтруючій намагніченій загрузці. Отримано розв'язок системи рівнянь, яка відповідає процесам магнітного фільтрування й регенерації загрузки. На основі комп'ютерного експерименту побудовано номограми для визначення робочого фільтроциклу фільтруючої загрузки й періоду регенерації. Показано залежність ефективності процесу регенерації фільтруючої загрузки від швидкості регенераційного водного потоку.

**Conclusions.** A mathematical model which describes conformities of process of the magnetic besieging of admixtures in the filtering magnetized nozzle was improved. The decision of the system of equations, which answers the processes of magnetic filtration and regeneration of nozzle, is got. Nomograms for determination of working filtration cycle of filtering nozzle and period of regeneration was built on the basis of computer experiment. Dependence of efficiency of nozzle regeneration process from speed of regeneration water flow is shown.

#### Список використаної літератури

1. Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок [Текст] / В.І. Гаращенко, І.Г. Скрипник, О.П. Лук'янчук, О.В. Гаращенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування – 2008. – №3. – С.184–191.

2. Гаращенко, В.І. Енергоефективна технологія магнітного очищення водних систем від дисперсних феромагнітних забруднень [Текст] / В.І. Гаращенко, О.В. Гаращенко, О.П. Лук'ячук // Тези XIV міжнародної науково-практичної конференції „Інноваційні енерготехнології. Наукові праці”. – Т.2. – Вип. №39. – Одеса, 2011. – С.281–284.
3. Гаращенко, В.И. Очистка оборотних вод металлургических производств от ферропримесей магнитными фильтрами [Текст] / В.И. Гаращенко, А.В. Гаращенко // Труды международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии». – Днепропетровск, 2011. – С.32–33.
4. Гаращенко, В.І. Намагнічування ферито-феромагнітних гранульованих фільтруючих матеріалів [Текст] / В.І. Гаращенко, О.В. Гаращенко // Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2011. – №3. – С.45–52.
5. Сандуляк, А.В. Электромагнитные фильтр-осадители: монография [Текст] / А.В. Сандуляк, В.И. Гаращенко. – Львов: Выща школа, 1982. – 70с.
6. Гаращенко, В.І. Магніто-фільтраційні властивості композиційної гранульованої загрузки магнітних фільтрів [Текст] / В.І. Гаращенко, І.М. Астрелін, О.В. Гаращенко // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2011. – №2. – С.11–17.
7. Сандуляк, А.В. Очистка жидкостей в магнитном поле [Текст] / А.В. Сандуляк. – Львів: Выща школа, 1984. – 168 с.
8. Минц, Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды [Текст] / Д.М. Минц. – М.: Стройиздат, 1964. – 156с.
9. Моделювання процесу магнітного очищення рідких середовищ від феродомішок у випадку змінної швидкості [Текст] / А.Я. Бомба, В.І. Гаращенко, А.П. Сафоник, О.В. Гаращенко // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2011. – №3. – С.49–56.
10. Бомба, А.Я. Математичне моделювання процесу фільтрування та регенерації фільтру [Текст] / А.Я. Бомба, В.М. Сівак, А.П. Сафоник // Вісник Національного університету водного господарства і природокористування: зб. наук. пр. – Вип. 2 (42). – Рівне: НУВГП. – 2008. – С. 263–268.
11. Нелінійне математичне моделювання процесу магнітного осадження домішок [Текст] / А.Я. Бомба, В.І. Гаращенко, А.П. Сафоник, О.В. Гаращенко // Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2009. – №3. – С.118–123.

*Отримано 19.01.2012*