

Бойко А. І.¹
Савченко В. М.,²
Крот В. В.²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України

² Житомирський національний агрокологічний університет
e-mail: dgs-ua@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАРОБІТКУ ФОРСУНКИ НА ЙМОВІРНІСТІ ВІДМОВ ЗАПІРНОГО КЛАПАНАУ

УДК 62-93:681.5

В статті досліджено вплив наробітку форсунки на ймовірність відмов запірного клапану. Проаналізовано зміну ймовірності відмов клапану від наробітку форсунки. Доведено, що зміна ймовірності відмови клапану носить з часом експоненціальний характер. Функція відмов клапану форсунки наростає по експоненціальному закону від нулевого свого значення до асимптотичного, що представляє собою стаціонарний коефіцієнт відмов цієї підсистеми. Перспективою подальших досліджень є дослідження впливу часу експлуатації на зміну ймовірності відмов фільтра форсунки

Ключові слова: Форсунка, запірний клапан, працездатний стан, технічна система, ймовірність відмов, відмова.

Постановка проблеми

Форсунка представляє собою спеціальний пристрій для механічного розпилення рідини на високому тиску 70-100 Бар в приміщеннях теплиць. При необхідній кількості форсунок і правильному раціональному їх розташуванні досягають можливості активного впливу в регулюванні параметрів мікроклімату в промисловій теплиці [1,2,3,4]. Виходячи з цього можна стверджувати, що форсунки, як елемент системи підвищення вологості та зниження температури внутрішнього середовища індустріальних теплиць, відіграють важливу роль у створенні необхідного мікроклімату при вирощуванні рослин

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження проблем забезпечення надійності технологічного обладнання при вирощуванні продукції захищеного ґрунту досить актуальні для розвитку в АПК України і широко розглянуті в роботах [5,6]. Тому в результаті отриманої в роботі [7] моделі експлуатації форсунки для розпилювання рідини і створення мікроклімату в приміщенні теплиць, а також побудованого графу станів і математичного моделювання переходів форсунки в різні можливі стани [8,9]. В роботі [10] на основі раніше побудованих графів станів та математичного моделювання переходів форсунок автоматизованої системи контролю вологісними та температурним параметрами повітря в зоні культивування рослин в різні можливі стани, визначено функцію готовності форсунки до експлуатації.

Мета статті

Метою роботи є дослідження середнього наробітку до відмови форсунки та середнього часу відновлення роботоздатного стану фільтра і клапану.

Виклад основного матеріалу

Ймовірність виникнення відмов за причиною виходу з ладу клапану форсунки може бути підрахована згідно правила Крамера:

$$\varphi_2(S) = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (1)$$

де Δ_2 - матриця непрацездатного стану «2» [8,9] форсунки за причиною відмови клапану;

Δ - основна матриця системи рівнянь, що описують можливі стани і переходи форсунок (13) [8,9].

Знаменник представленого відношення (1) відомий з раніше проведеного аналізу рівняння (13) [8,9]. Чисельник Δ_2 може бути підрахований виходячи з основної матриці (6) [8,9] шляхом заміни четвертого стовбця, стовбцем вільних членів. Тоді запишемо:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} S + \lambda_{01} + \lambda_{02}, & -\mu_{10} & 0 & 1 \\ -\lambda_{01} & S + \mu_{10} & 0 & 0 \\ S & S & S & 1 \\ 0 & 0 & -\lambda_{2,2} & 0 \end{vmatrix}$$

Для наступного виконання вирішень, необхідно провести пониження рангу матриці. Доцільно розкласти її за елементами першої строчки. В результаті маємо:

$$\Delta_2 = (S + \lambda_{01} + \lambda_{02}) \cdot (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} S + \mu_{10} & 0 & 0 \\ S & S & 1 \\ 0 & -\lambda_{2,2} & 0 \end{vmatrix}$$

Розрахунок матриці після спрощень і групування навколо невідомої S за її степенями буде:

$$\Delta_2 = \lambda_{2,2} S^2 + \lambda_{2,2} (\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02}) S + \lambda_{2,2} \mu_{10} (\lambda_{01} + \lambda_{02}). \quad (2)$$

Еквівалентним рівнянням до визначення ймовірності відмов клапана є наступний поліном:

$$\varphi_2(S) = \frac{A_2}{S - S_1} + \frac{B_2}{S - S_2} + \frac{C_2}{S - S_3} + \frac{D_2}{S - S_4}. \quad (3)$$

де A_2, B_2, C_2 і D_2 - додаткові невідомі сталі величини необхідні для зворотних перетворень Лапласа.

Представлений поліном, використовуючи загальний знаменник і додаткові множники, можна записати наступним чином:

$$\varphi_2(S) = \frac{S^3 (A_2 + B_2 + C_2 + D_2) - S^2 (A_2 S_3 + A_2 S_2 + A_2 S_4 + B_2 S_4 + B_2 S_3 + C_2 S_4 + C_2 S_2 + D_2 S_3 + D_2 S_2) + S (A_2 S_2 S_3 + A_2 S_4 S_3 + A_2 S_4 S_2 + B_2 S_3 S_4 + C_2 S_2 S_4 + D_2 S_2 S_3) + A_2 S_4 S_2 S_3}{(S - S_1)(S - S_2)(S - S_3)(S - S_4)}. \quad (4)$$

Знаменники, що представляються формулою (13) [8,9] і входить у формулу (4) рівні. В наслідок умови еквівалентності чисельники (2) і (4) теж будуть рівні між собою, якщо коефіцієнти при невідомих однакових ступенів також будуть рівними. Виходячи з цього запишемо додаткову систему рівнянь для встановлення сталих величин (A_2, B_2, C_2 і D_2)

$$\begin{cases} A_2 + B_2 + C_2 + D_2 = 0; \\ -(A_2 S_3 + A_2 S_2 + A_2 S_4 + B_2 S_4 + B_2 S_3 + C_2 S_4 + C_2 S_2 + D_2 S_3 + D_2 S_2) = \lambda_{2,2}; \\ A_2 S_2 S_3 + A_2 S_4 S_3 + A_2 S_4 S_2 + B_2 S_3 S_4 + C_2 S_2 S_4 + D_2 S_2 S_3 = \lambda_{2,2} (\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02}); \\ A_2 S_4 S_2 S_3 = \lambda_{2,2} \mu_{10} (\lambda_{01} + \lambda_{02}). \end{cases} \quad (5)$$

З четвертого рівняння для сталої (A_2) маємо:

$$A_2 = \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3}. \quad (6)$$

Підставляючи (A_2) в третє рівняння, запишемо:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3}(S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) + B_2S_3S_4 + C_2S_2S_4 + D_2S_2S_3 = \\ & = \lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'}) \end{aligned}$$

З отриманої рівності знаходимо сталу (B_2):

$$\begin{aligned} B_2 = & \frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} - \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) - \\ & - C_2 \frac{S_2}{S_3} - D_2 \frac{S_2}{S_4}. \end{aligned} \quad (7)$$

Сталу (C_2) визначимо з третього рівняння системи (2.56) шляхом підстановки (A_2 і B_2):

$$\begin{aligned} & -A_2(S_3 + S_2 + S_4) - B_2(S_4 + S_3) - C_2(S_4 + S_2) + D_2(S_3 + S_2) = \lambda_{2,2}; \\ & -\frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3}(S_3 + S_2 + S_4) - \left[\frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} \right] \times \\ & \times (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) + C_2 \frac{S_2}{S_3} - D_2 \frac{S_2}{S_4} \end{aligned}$$

$$\times (S_4 + S_2) - C_2(S_4 + S_2) + D_2(S_3 + S_2) = \lambda_{2,2}.$$

Виділимо сталу (C_2):

$$\begin{aligned} & -\frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3}(S_3 + S_2 + S_4) - \left[\frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} \right] \times \\ & \times (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) + D_2 \frac{S_2}{S_4} \\ & \times (S_4 + S_2) - C_2[(S_4 - S_3) - (S_4 + S_2)] - D_2(S_3 + S_2) = \lambda_{2,2}. \\ & C_2 = \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3(S_3 + S_2)} + \left[\frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} \right] \times \\ & \times \frac{S_4 + S_3}{S_3 + S_2} + D_2 \frac{S_2}{S_3} \cdot \frac{S_4 + S_3}{S_3 + S_2} + D_2(S_3 + S_4) \cdot \frac{1}{S_3 + S_2} + \frac{\lambda_{2,2}}{S_3 + S_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Зведемо вирішення до однієї невідомої величини (D_2) підставляючи значення (A_2, B_2 і C_2) в четверте рівняння системи (5):

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3} + \frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} - \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) - \\ & - \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})S_2}{S_4S_2S_3(S_3 + S_2)} (S_3 + S_2 + S_4) + \left[\frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} \right] \times \\ & \times (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) \\ & \times \frac{(S_4 + S_3)S_2}{S_3(S_3 + S_2)} + D_2 \frac{S_2(S_4 + S_3)}{S_3(S_3 + S_2)} \left(\frac{S_2}{S_3} + 1 \right) + \frac{\lambda_{2,2}S_2}{S_3(S_3 + S_2)} - D_2 \frac{S_2}{S_4} + \\ & + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3(S_3 + S_2)} (S_3 + S_2 + S_4) + \left[\frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} \right] \times \\ & \times (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) \\ & \times \frac{S_4 + S_3}{S_3 + S_2} + D_2 \frac{(S_4 + S_3)}{(S_3 + S_2)} \left(\frac{S_2}{S_3} + 1 \right) + \frac{\lambda_{2,2}}{(S_3 + S_2)} + D_2 = 0. \end{aligned}$$

Після алгебраїчних перетворень і спрощень в кінцевому вигляді для сталої (D_2) можна записати:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_2S_3^2S_4^2} (S_2S_3 + S_4S_3 + S_4S_2) \left[\frac{(S_4 + S_3)S_2}{(S_3 + S_2)S_3} + \frac{(S_4 + S_3)}{(S_3 + S_2)} - 1 \right] + \\ & + \frac{\lambda_{2,2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4S_2S_3(S_3 + S_2)} \left[1 - \frac{S_2}{S_3} \right] + \frac{\lambda_{2,2}(\mu_{10} + \lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_3S_4} \left[1 + \frac{(S_4 + S_3)S_2}{(S_3 + S_2)S_3} + \frac{(S_4 + S_3)}{(S_3 + S_2)} \right] + \\ & + \frac{\lambda_{2,2}S_2}{S_3(S_3 + S_2)} + \frac{\lambda_{2,2}}{(S_3 + S_2)} \\ D_2 = & \frac{\frac{S_2}{S_4} - \frac{S_2(S_4 + S_3)}{S_3(S_3 + S_2)} \left(\frac{S_2}{S_3} + 1 \right) - \frac{(S_4 + S_3)}{(S_3 + S_2)} \left(\frac{S_2}{S_3} + 1 \right) - 1}{\dots} \end{aligned} \quad (9)$$

Таким чином, рішення сталої (D_2) доведено до елементарних складових, що представляють собою λ , μ – характеристики технічної системи (форсунки) в її переходах з справного стану в можливі несправні. Корені (S_1, S_2, S_3, S_4) в розкладанні також зведені до виразу їх через λ , μ – характеристики. Таким чином, всі дані для визначення сталої (D_2) є. В подальшому, через неї зворотною підстановкою у формули (7 і 8) визначаються і інші сталі величини (B_2, C_2).

Отримані величини (A_2, B_2, C_2 і D_2), а також корені S_1, S_2, S_3, S_4 дають можливість виконати зворотне перетворення Лапласа. Повертаючись до (3) враховуючи, що $S_1 = 0$ у зворотному перетворенні для ймовірності стану відмов форсунки можна записати:

$$P_2(t) = A_2 + B_2 \exp(-S_2t) + C_2 \exp(-S_3t) + D_2 \exp(-S_4t) \quad (10)$$

Всі складові рівняння отримані раніше. Представляє науковий інтерес загальний аналіз поведінки технічної системи при появі відмови клапану. Якщо розглянути ймовірність відмови на початку експлуатації при $t = 0$, то підставляючи це значення в рівняння

(10) маємо:

$$P_2(t=0) = A_2 + B_2 + C_2 + D_2,$$

що згідно першого рівняння системи (5) дорівнює нулеві. Тобто $P_2(t=0) = 0$. Звідси на початку експлуатації клапан однозначно справний, що відповідає дійсності початкових умов.

Важливим, також, є встановлення значення ймовірності відмови клапана при $t \rightarrow \infty$. Підставляючи це значення часу в рівняння (10) отримаємо, що ймовірність $P_2(t \rightarrow \infty)$ асимптотично наближається до своєї стаціонарної величини, яка дорівнює сталій (A_2). Тобто, маємо:

$$P_2(t \rightarrow \infty) \rightarrow A_2 = \frac{\lambda_{2'2}\mu_{10}(\lambda_{01} + \lambda_{02'})}{S_4 S_2 S_3}.$$

Таким чином, можна стверджувати, що зміна ймовірності відмови клапану носить з часом експоненціальний характер. Ймовірність відмови на початку експлуатації дорівнює нулеві, що логічно відображує реальну експлуатацію технічного пристрою. При збільшенні терміну експлуатації ймовірність відмови, також, збільшується асимптотично наближається до свого стаціонарного значення.

Більш точно вид кривої відмови клапану при наявності в системі і другого виду відмов (відмов фільтру) можна встановити підставляючи в рівняння (10) конкретні значення λ , μ – характеристик форсунки. На рисунку 1 представлений такий графік із вказаними характеристиками.

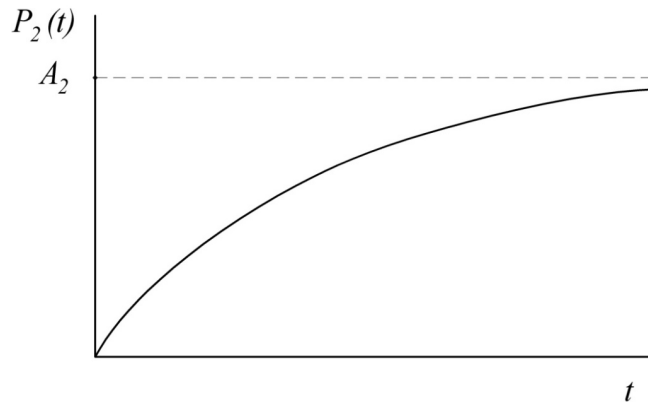


Рис. 1. Зміна ймовірності відмов (функція відмов) клапана ($\lambda_{01} \approx 0,001$ 1/год; $\mu_{10} \approx 1,7$ 1/год; $\lambda_{02'} \approx 0,0008$ 1/год; $\mu_{20} \approx 0,5$ 1/год).

Висновок

Функція відмов клапана форсунки наростає по експоненціальному закону від нулевого свого значення до асимптотичного, що представляє собою стаціонарний коефіцієнт відмов цієї підсистеми.

Література

1. Міненко С. В. Вплив шторних екранів на внутрішню температуру в скляних теплицях /С. В. Міненко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2012. – Вип. 16 (30), кн. 2. – С. 270–274.

2. Савченко В.М. Вплив культиваційних споруд та технологічних систем на параметри мікроклімату при вирощуванні продукції захищеного ґрунту/ В. М. Савченко, В. В. Крот // Крамаровські читання: зб. тез доп. II міжнар. наук.-техн. конф., 3 квіт. 2013. – К.: НУБіП, 2013. – С. 72–74.
3. Міненко С. В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустриальних теплицях / С. В. Міненко // Вісник ЖНАЕУ. – 2016. – № 1 (53), т. 1. – С. 270–276.
4. Міненко С. В. Класифікація способів зняття перегріву рослин в індустриальних теплицях / С. В. Міненко// Вісник ЖНАЕУ. – 2016. – № 1 (53), т. 1. – С. 276–282.
5. Бойко А.І. Проблеми забезпечення надійності технологічного обладнання при вирощуванні продукції захищеного ґрунту в АПК України / А.І. Бойко, В. М. Савченко, В. В. Крот // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2016. – № 6. – С. 200–203.
6. Бойко А.І. Основні несправності форсунок систем автоматизованого контролю вологісними та температурними параметрами повітря в приміщеннях теплиць / А.І. Бойко, В. М. Савченко, В. В. Крот // Крамаровські читання: зб. тез доп. IV міжнар. наук.-техн. конф., 16-17 лют. 2017. – К.: НУБіП, 2017. – С. 61–64.
7. Minenko S. Researching indexes of reliability of systems of microclimate control onto productivity of products of protected soil/ S. Minenko// Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 46. – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С. 105–108.
8. Boiko A.I. Charts of conditions and mathematical modelling of transition of nozzles into various possible conditions/A. Boiko, V. Savchenko, V. Krot// Вісн. ХНТУСГ ім. Василенка – 2017 – Вип. 181– С. 173–178.
9. Boiko A.I. Mathematical modelling of transition of nozzles for liquid sprayer and generation of microclimate in the premises of greenhouses into various possible conditions /A. Boiko, V. Savchenko, V. Krot// Вісн. ХНТУСГ ім. Василенка – 2017 – Вип. 180– С. 72–77.
10. Boiko A.I. Determination of readiness function of nozzle for operation/ A.I. Boiko, V. M. Savchenko, V. V. Krot // Вісник ЖНАЕУ. – 2017. – № 1 (55), т. 1. – С.

Summary

Boiko A.I., Savchenko V.M., Krot V.V. The impact of operation timing to a change of probability to failures of nozzle's stopper valve

The article describes the impact of operation timing to a change of probability to failures of nozzle's stopper valve. It is mathematically proven that the average operation capacity before the failure of nozzle is an inverse value to the number of intensity of failures stopper valve. With the increase of types of failure and number of sub-systems and elements of the system, the average operation capacity to the failure decreases. The perspective for further researches is researching the impact of operation timing to a change of probability to failures of nozzle filter.

Keywords: Nozzle, stopper valve, working condition, technical system, failure rate, failure

References

1. Minenko S. V. Vpliv shtornih ekraniv na vnutrishnyu temperaturu v sklyanih teplitsyah /S. V. Minenko // Tehniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoyi tehniki i

- tehnologiy dlya sllskogo gospodarstva UkraYini. – 2012. – Vip. 16 (30), kn. 2. – S. 270–274.
2. Savchenko V.M. Vpliv kultivatsIynih sporud ta tehnologIchnih sistem na parametri mlkroklImatu pri viroschuvanni produktsIYi zahischenogo Gruntu/ V. M. Savchenko, V. V. Krot // KramarovskI chitannya: zb. tez dop. II mlzhnar. nauk.-tehn. konf., 3 kvIt. 2013. – K.: NUBIP, 2013. – S. 72–74.
 3. MInenko S. V. Anallz zalezhnostI IntensivnostI produktivnogo fotosintezu vId rezhimIv mlkroklImatu v IndustrIalnih teplitsyah / S. V. MInenko // VIsnik ZhNAEU. – 2016. – # 1 (53), t. 1. – S. 270–276.
 4. MInenko S. V. KlasiflkatsIya sposobIv znyattya peregrIvu roslin v IndustrIalnih teplitsyah / S. V. MInenko// VIsnik ZhNAEU. – 2016. – # 1 (53), t. 1. – S. 276–282.
 5. Boyko A.I. Problemi zabezpechennya nadIynostI tehnologIchnogo obladnannya pri viroschuvanni produktsIYi zahischenogo Gruntu v APK UkraYini / A.I. Boyko, V. M. Savchenko, V. V. Krot // TehnIchniy servIs agropromislovogo, llsovogo ta transportnogo kompleksIv. – 2016. – # 6. – S. 200–2003.
 6. Boyko A.I. OsnovnI nespravnostI forsunok sistem avtomatizovanogo kontrolyu vologIsnimi ta temperaturnimi parametrami povItrya v primIschennyah teplits / A.I. Boyko, V. M. Savchenko, V. V. Krot // KramarovskI chitannya: zb. tez dop. IV mlzhnar. nauk.-tehn. konf., 16-17 lyut. 2017. – K.: NUBIP, 2017. – S. 61–64.
 7. Minenko S. Researching indexes of reliability of systems of microclimate control onto productivity of products of protected soil/ S. Minenko// Zagalnodержavniy mlzhvIdomchiy naukovو-tehnIchniy zblrnik. Konstruyuvannya, virobnitstvo ta ekspluatatsIya sllskogospodarskih mashin, vip. 46. – KIrovograd: KNTU, 2016. – S. 105–108.
 8. Boiko A.I. Charts of conditions and mathematical modelling of transition of nozzles into various possible conditions/A. Boiko, V. Savchenko, V. Krot// VIsn. HNTUSG Im. Vasilenka – 2017 – Vip. 181– S. 173–178.
 9. Boiko A.I. Mathematical modelling of transition of nozzles for liquid sprayer and generation of microclimate in the premises of greenhouses into various possible conditions /A. Boiko, V. Savchenko, V. Krot// VIsn. HNTUSG Im. Vasilenka – 2017 – Vip. 180– S. 72–77.
 10. Boiko A.I. Determination of readiness function of nozzle for operation/ A.I. Boiko, V. M. Savchenko, V. V. Krot // VIsnik ZhNAEU. – 2017. – # 1 (55), t. 1. – S.