

ГАВРИШ Б. А., магістрант, КОРЖИК М. В., к. т. н., доц.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕЦЕПТУРОЮ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ

Розглянуто актуальну наукову і практичну проблему автоматизації процесу знаходження оптимальної рецептури сировини для виробництва технічного вуглецю. Запропоновано алгоритми оптимального керування для синтезу автоматизованої системи оптимального керування, які дозволять підвищити економіку та швидкодію підприємства і направити кваліфіковані людські ресурси на вирішення інших актуальних проблем.

Ключові слова: технічний вуглець, сажка, індекс кореляції, оптимальна система керування.

© Гавриш Б. А., Коржик М. В., 2019.

Постановка проблеми. Технічний вуглець (далі ТВ) використовується, в основному, для посилення резин. Його додавання дозволяє збільшити супротив резини стиранню та її міцність. Близько сімдесяти відсотків виготовленого ТВ використовується при виробництві шин. За даними, наведеними у [1] видно, що обсяг виробництва ТВ у світі непинно зростає починаючи з 2010 року (у 2008 та 2009 роках був спад через економічну кризу). Через це стає дедалі більш значимим підтримання необхідної якості і дешевизни даного продукту задля здорової конкуренції (і взагалі її можливості) на ринку.

У виробництві ТВ сировиною є суміш багатьох вуглеводнів. Всі вони є побічними продуктами нафтохімічної чи коксохімічної промисловості, тому їх склад може коливатись навіть у одного постачальника [2]. Через це постає питання визначення оптимальної рецептури сировини при кожній поставці.

Аналіз попередніх досліджень. Оптимальна рецептура має бути найбільш економічно вигідною, тобто забезпечувати найбільший вихід технічного вуглецю на одиницю сировини. Таку рецептуру в нинішній час визначають в лабораторії, проводячи серію дослідів над компонентами [3]. Автоматизованої ж системи оптимального керування рецептурою на даний час не існує.

Метою роботи є синтез алгоритмів оптимального керування рецептурою сировини, котрі дозволять збільшити ефективність підприємств з виготовлення технічного вуглецю і направити кваліфіковані людські ресурси на вирішення інших актуальних проблем [4].

Синтез алгоритмів оптимального керування

Щоб зменшити вартість продукту, необхідно знаходити оптимальну рецептуру сировини. Так як склад і вартість компонентів можуть змінюватись, то і оптимальна рецептура має знаходитись при кожній зміні. Для цього необхідно розробити алгоритм знаходження оптимальної рецептури, котрий буде виконуватись за потреби засобами обчислювальної техніки.

Раніше були розроблені рівняння (у [6] згідно з [5, 7]) що описують статистику процесу:

$$\begin{aligned}
 \text{IK} = & 0,91597 \cdot \left(\frac{x_1}{\rho_1^{t_{B1}} + \alpha_1(t_{B1} - 20)} + \frac{x_2}{\rho_2^{t_{B2}} + \alpha_2(t_{B2} - 20)} + \frac{1 - x_1 - x_2}{\rho_3^{t_{B3}} + \alpha_3(t_{B3} - 20)} \right)^{-1} + \\
 & + 2,368 \cdot 10^{-5} \frac{\frac{x_1}{\rho_1^{t_{B1}} + \alpha_1(t_{B1} - 100)} \mu_{100} + \frac{x_2}{\rho_2^{t_{B2}} + \alpha_2(t_{B2} - 100)} \mu_{200} + \frac{1 - x_1 - x_2}{\rho_3^{t_{B3}} + \alpha_3(t_{B3} - 100)} \mu_{300}}{\left(\frac{x_1}{\rho_1^{t_{B1}} + \alpha_1(t_{B1} - 100)} + \frac{x_2}{\rho_2^{t_{B2}} + \alpha_2(t_{B2} - 100)} + \frac{1 - x_1 - x_2}{\rho_3^{t_{B3}} + \alpha_3(t_{B3} - 100)} \right)^2} - \\
 & - 1,9963 \cdot 10^{-4} \left(\frac{x_1}{\rho_1^{t_{B1}} + \alpha_1(t_{B1} - 100)} + \frac{x_2}{\rho_2^{t_{B2}} + \alpha_2(t_{B2} - 100)} + \frac{1 - x_1 - x_2}{\rho_3^{t_{B3}} + \alpha_3(t_{B3} - 100)} \right)^{-2} - 629,76
 \end{aligned}$$

і динаміку процесу в дискретному часі:

$$\text{IK}(k) = 0,91597 \cdot \rho^{20}(k) + 2,368 \cdot 10^{-5} \cdot \rho^{100}(k) / \mu_{100}(k) - 1,9963 \cdot 10^{-4} \cdot (\rho^{20}(k))^2 - 629,76,$$

$$\begin{aligned}
 \rho'(k+1) = & (M_1(k) + M_2(k) + M_3(k) + M(k) - M_c(k)) \cdot \left(\frac{M_1(k)}{\rho_1^{t_{B1}}(k) + \alpha_1(t_{B1}(k) - t)} + \right. \\
 & \left. + \frac{M_2(k)}{\rho_2^{t_{B2}}(k) + \alpha_2(t_{B2}(k) - t)} + \frac{M_3(k)}{\rho_3^{t_{B3}}(k) + \alpha_3(t_{B3}(k) - t)} + \frac{M(k) - M_c(k)}{\rho'(k)} \right)^{-1},
 \end{aligned}$$

$$\mu_{100}(k+1) = \left(\frac{M_1(k)}{\rho_1^{100}(k)} + \frac{M_2(k)}{\rho_2^{100}(k)} + \frac{M_3(k)}{\rho_3^{100}(k)} + \frac{M(k) - M_c(k)}{\rho^{100}(k)} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{M_1(k)}{\rho_1^{100}(k)\mu_{100}(k)} + \frac{M_2(k)}{\rho_2^{100}(k)\mu_{200}(k)} + \frac{M_3(k)}{\rho_3^{100}(k)\mu_{300}(k)} + \frac{M(k) - M_c(k)}{\rho^{100}(k)\mu_{100}(k)} \right)^{-1}$$

$$M(k+1) = M_1(k) + M_2(k) + M_3(k) + M(k) - M_c(k),$$

де $M(k)$ – маса акумульованої у змішувачі суміші, кг; $M_1(k), M_2(k), M_3(k)$ – надходження компонентів у змішувач, кг; $M_c(k)$ – вихід сировини зі змішувача, кг; $\rho_1^t, \rho_2^t, \rho_3^t, \rho^t$ – густини компонентів і сировини за температури t °С, кг/м³; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_t$ – динамічні в'язкості компонентів та сировини при температурі t °С, Па·с; ν_t – кінематична в'язкість сировини при температурі t °С, м²/с; t_{b1}, t_{b2}, t_{b3} – температури, при яких були виміряні густини компонентів, °С; ІК – індекс кореляції сировини; x_1, x_2, x_3 – співвідношення масових витрат компонентів; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – температурні поправки густини компонентів, кг/(м³·°С);

ІК є емпіричним показником і в даній роботі визначається на основі нелінійної залежності від густини та в'язкості компонентів. Через характер цієї залежності з точки зору математики суміш двох компонентів з однаковим ІК окремо може мати інший ІК. Проте, так як не відбувається хімічних реакцій при змішуванні, то структура і склад наявних в суміші молекул буде тією ж, що і в компонентах до змішування. Це дозволяє зробити висновок що при незмінному завданні на ІК і відповідності йому вже готової суміші що акумульована у змішувачі можна знехтувати формальною зміною ІК суміші що утвориться при додаванні до вже наявної новоствореної зі зміненою рецептурою, але тим же ІК. Отже, при умові незмінності завдання на ІК і задовільній готовій сировині, можна не розглядати динаміку процесу при знаходженні нової оптимальної рецептури, а обмежитись рівнянням статики.

Запишемо цільову функцію (далі ЦФ) і обмеження:

$$F(x_1, x_2) = x_1(g_1 - g_3) + x_2(g_2 - g_3) \rightarrow \min, \text{ІК} \geq \text{ІК}_{\text{зад}}, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, 1 - x_1 - x_2 \geq 0$$

де g_1, g_2, g_3 – вартості одиниці маси компонента; $\text{ІК}_{\text{зад}}$ – завдання на ІК.

Тут ІК знаходиться згідно моделі статичного режиму роботи. Через наявне нелінійне обмеження типу нерівність постає необхідність використання ітеративних способів знаходження оптимуму. Пропонується використання сучасних методів за допомогою MATLAB. Використаємо вбудовану функцію `fmincon`. Ця підпрограма дозволяє знаходити мінімум нелінійної функції при наявності лінійних та нелінійних обмежень типу рівність та нерівність. В даній роботі використано алгоритм `ActiveSet`.

Так як у виробничому процесі може виникнути необхідність зміни завдання на ІК (наприклад, при переході на виробництво іншої марки ТВ на даній лінії), то постає задача розрахунку оптимального плану керування, котрий забезпечить швидкий перехід до нового заданого режиму. Тут можливі три варіанти розвитку подій:

1. Порожній змішувач заповнюється новою сировиною. Рецептūra знаходиться як наведено вище.
2. Змішувач не порожній, але сировина з нього не виходить.
3. Витрата зі змішувача не припиняється.

При другому варіанті розвитку подій можна скористатись модифікованим методом з попереднього розділу, а саме обмеження та критерій оптимальності представити в наступному вигляді:

$$F(M_1, M_2) = M_1(g_1 - g_3) + M_2(g_2 - g_3) \rightarrow \min, M_1 + M_2 \leq M_{\text{зд}} - M_{\text{зм}},$$

$$0,91597 \cdot \frac{M_{\text{зд}}}{\frac{M_1}{\rho_1^{tb1} + \alpha_1(t_{b1} - 20)} + \frac{M_2}{\rho_2^{tb2} + \alpha_2(t_{b2} - 20)} + \frac{M_{\text{зд}} - M_1 - M_2 - M_{\text{зм}}}{\rho_3^{tb3} + \alpha_3(t_{b3} - 20)} + \frac{M_{\text{зм}}}{\rho_{\text{зм}}^{20}}} +$$

$$+ 2,368 \cdot 10^{-5} \frac{M_1}{(\rho_1^{tb1} + \alpha_1(t_{b1} - 100))\mu_{100}} + \frac{M_2}{(\rho_2^{tb2} + \alpha_2(t_{b2} - 100))\mu_{200}} + \frac{M_{\text{зд}} - M_1 - M_2 - M_{\text{зм}}}{(\rho_3^{tb3} + \alpha_3(t_{b3} - 100))\mu_{300}} + \frac{M_{\text{зм}}}{\rho_{\text{зм}}^{100}\mu_{\text{зм}100}} -$$

$$\left(\frac{M_1}{\rho_1^{tb1} + \alpha_1(t_{b1} - 100)} + \frac{M_2}{\rho_2^{tb2} + \alpha_2(t_{b2} - 100)} + \frac{M_{\text{зд}} - M_1 - M_2 - M_{\text{зм}}}{\rho_3^{tb3} + \alpha_3(t_{b3} - 100)} + \frac{M_{\text{зм}}}{\rho_{\text{зм}}^{100}} \right)^2$$

$$- 1,9963 \cdot 10^{-4} \left[\frac{M_{\text{зд}}}{\frac{M_1}{\rho_1^{tb1} + \alpha_1(t_{b1} - 20)} + \frac{M_2}{\rho_2^{tb2} + \alpha_2(t_{b2} - 20)} + \frac{M_{\text{зд}} - M_1 - M_2 - M_{\text{зм}}}{\rho_3^{tb3} + \alpha_3(t_{b3} - 20)} + \frac{M_{\text{зм}}}{\rho_{\text{зм}}^{20}}} \right]^{-2} - 629,76 \geq \text{ІК}_{\text{зад}}.$$

де $M_{\text{зд}}$ – завдання на кінцеву масу суміші; $M_{\text{зм}}$ – маса суміші, що вже наявна у змішувачі.

Скориставшись програмою подібною до застосованої вище можна знайти оптимум.

У третьому випадку необхідно забезпечити економічно доцільний і найбільш швидкий перехідний процес. Пропонується керування в три етапи:

Перший етап. Знаходження таких керувань на цей момент квантування, що забезпечували б максимізацію відношення приросту ІК до фінансових витрат на це керування. При цьому має виконуватись

перевірка чи не буде ІК, що може бути отримано внаслідок такого керування, більший за завдання. Якщо ні, то повторюється цей етап. Якщо так, то виконується перехід до наступного етапу.

Другий етап. Знаходження таких керувань, щоб за один крок керування отримати заданий ІК.

Третій етап. Підтримання заданого рівня ІК за допомогою алгоритму статичної оптимізації.

Алгоритм першого етапу. Після зміни завдання на ІК в більшу сторону на кожному кроці необхідно шукати таке керування, при котрому відношення приросту ІК до економічних витрат буде максимальним. Приведемо критерій до задачі мінімізації і отримаємо:

$$F(M_1(k), M_2(k), M_3(k)) = (IK(k) - IK(k-1)) / (M_1(k)g_1 + M_2(k)g_2 + M_3(k)g_3) \rightarrow \min,$$

$$M_{\Sigma}(k) \geq M_{\min} - M(k) + M_c(k), M_{\Sigma}(k) \leq M_{\max} - M(k) + M_c(k), x_1(k) M_{\Sigma}(k) \leq M_{1\max}, x_2(k) M_{\Sigma}(k) \leq M_{2\max},$$

$$(1 - x_1(k) - x_2(k)) M_{\Sigma}(k) \leq M_{3\max}, x_1(k) + x_2(k) \leq 1, x_1(k) \geq 0, x_2(k) \geq 0,$$

де M_{\min} та M_{\max} – мінімальна та максимальна допустимі маси сировини у змішувачі; $M_{1\max}$, $M_{2\max}$, $M_{3\max}$, – пропускні здатності транспортних систем для кожного з компонентів; $M_{\Sigma}(k) = M_1(k) + M_2(k) + M_3(k)$;

Отримали задачу статичної оптимізації. Розв'яжемо її за допомогою метода що використано у розділі статичної оптимізації.

Підставляючи отримані оптимальні керування у математичну модель об'єкта отримаємо прогнозований на наступний момент квантування ІК. При перевищенні ним завдання переходимо до наступного етапу. При досягненні завдання переходимо до третього етапу. В інших випадках повторюємо цей етап.

Алгоритм другого етапу полягає у мінімізації фінансових витрат при обмеженні на керування, заданий ІК та модель:

$$F(x_1(k), x_2(k), M_{\Sigma}(k)) = M_{\Sigma}(k)(x_1(g_1 - g_3) + x_2(g_2 - g_3) + g_3) \rightarrow \min,$$

$$M_{\Sigma}(k) \geq M_{\min} - M(k) + M_c(k), M_{\Sigma}(k) \leq M_{\max} - M(k) + M_c(k), x_1(k)M_{\Sigma}(k) \leq M_{1\max}, x_2(k)M_{\Sigma}(k) \leq M_{2\max},$$

$$(1 - x_1(k) - x_2(k))M_{\Sigma}(k) \leq M_{3\max}, x_1(k) + x_2(k) \leq 1, x_1(k) \geq 0, x_2(k) \geq 0, IK \geq IK_{\text{зад}}.$$

Використаємо програмну подібну до наведеної вище.

Алгоритм третього етапу розглянуто у розділі статичної оптимізації.

Для імітації перебігу процесу у часі написано програму в середовищі MATLAB. В ній зібрані розроблені в цій роботі алгоритми оптимального керування. Приклад виконання на рисунках 1 та 2.

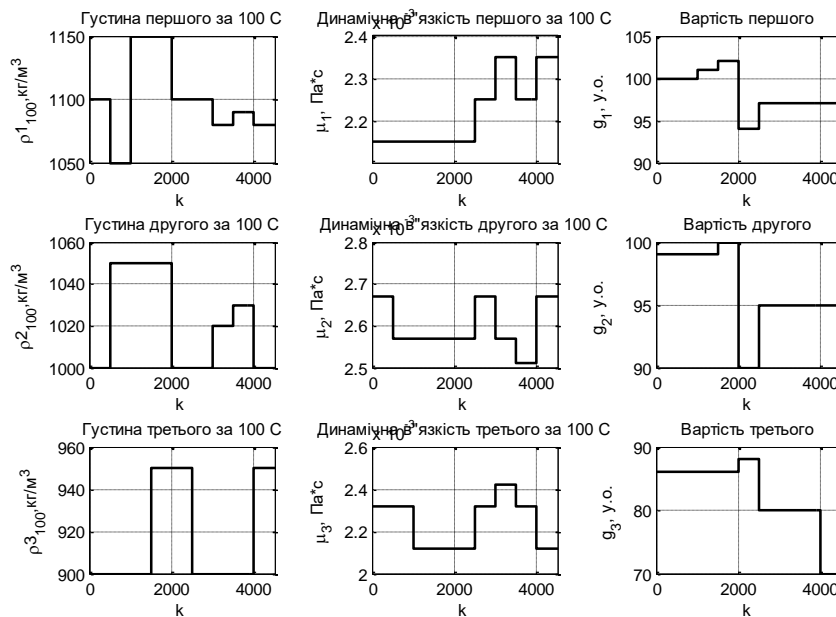


Рис. 1 – Параметри компонентів

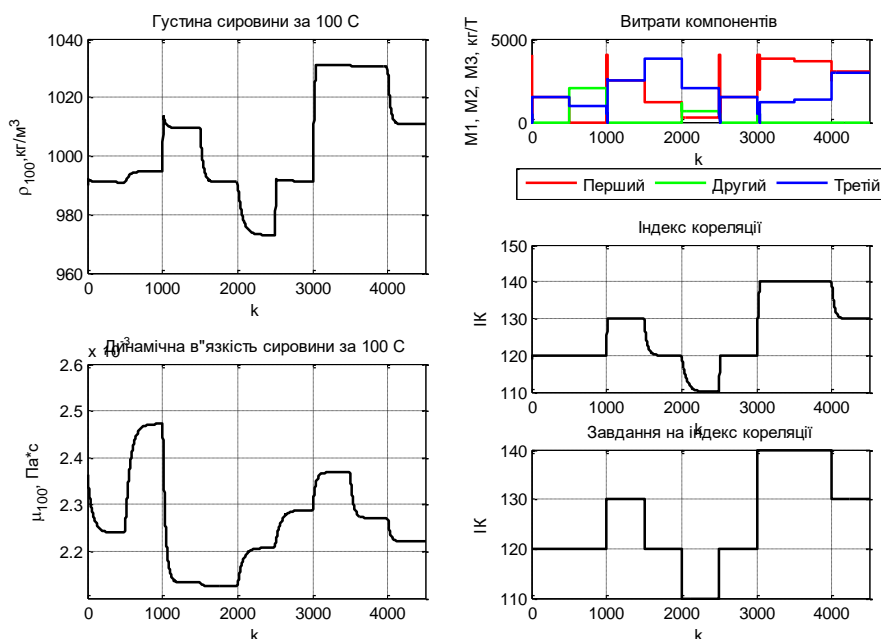


Рис. 2 – Параметри утвореної сировини, завдання та керувальні впливи

Задачу динамічної оптимізації було зведено до послідовності задач статичної оптимізації. Було розроблено алгоритми оптимального керування індексом кореляції сировини і наведено імітацію перехідних процесів системи з контролером що керує процесом за допомогою цих алгоритмів.

Висновки. Було досліджено технологічний процес змішування сировини для виробництва технічного вуглецю. Проаналізовано доцільність розробки нової системи керування. Розроблено алгоритми знаходження оптимальної рецептури. Дана розробка дозволить впровадити автоматизовану систему оптимального керування процесом змішування сировини для виробництва технічного вуглецю що підвищить економіку виробництва і конкурентоспроможність за рахунок збільшення швидкодії, зменшення фінансових витрат і можливості направити звільнені людські ресурси на вирішення інших актуальних проблем.

Список використаної літератури

1. Notch: CarbonBlackGlobal Outlook [Електронний ресурс] // carbonblack2017.com : електронний журнал 7-9.11.17. URL: www.carbonblack2017.com/userfiles/file/Presentation/01 - Mr_Paul Ita .pdf
2. Ивановский В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты [Текст] : учебное пособие / В. И. Ивановский. – Омск: «Техуглерод», 2004. – 228 с.
3. Орлов В. Ю. Производство и использование технического углерода для резин [Текст] / В. Ю. Орлов, А. М. Комаров, Л. А. Ляпина. – Ярославль: Издательство Александр Рутман, 2002. – 512 с.
4. Гавриш Б. А. Аналіз змішувача у виробництві технічного вуглецю [Текст] / Б. А. Гавриш, М. В. Коржик // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Тези доповідей XI-ї науково-практичної конференції студентів; Київ, 06-07 грудня 2017 р. [Електронний ресурс] – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 91 с. – Режим доступу: [http://ahv.kpi.ua/conferences/ASIT2017\(winter\).pdf](http://ahv.kpi.ua/conferences/ASIT2017(winter).pdf).
5. А. с. 1307304 СССР, МКИ G 01 N 11/00. Способ определения индекса корреляции сырья для производства сажи [Текст] / М. С. Цеханович, Л. А. Климанова, С. Д. Фарунцев (СССР). – № 3948688/24-25 ; заявл. 19.06.85 ; опубл. 30.04.87 , Бюл. № 16. – 2 с.
6. Гавриш Б. А. Розробка математичної моделі змішувача у виробництві технічного вуглецю [Текст] / Б. А. Гавриш, М. В. Коржик // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Тези доповідей П'ятої науково-практичної конференції студентів; Київ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 11–12 квітня 2018 р. – Київ.: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018. – 168с. – С. 53–55.
7. ДСТУ 8363:2015 Сировина коксохімічна для виробництва технічного вуглецю. Технічні умови [Текст]. – Надано чинності: наказ ДП «УкрНДНЦ» від 21.08.15 № 101. Чинний від 01.07.17. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 29 с.

Надійшла до редакції 19.02.2019

Havrysh B. A., Korzhyk M. V.

SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF OPTIMAL CONTROL OF RAW MATERIAL RECIPROCITY IN THE PROCESS OF PRODUCTION OF CARBON BLACK

The technological process of mixing raw materials for the production of technical carbon was investigated. The expediency of developing a new control system is analyzed. Optimum management algorithms are synthesized. The volume of carbon black production in the world is steadily increasing from 2010. Due to this, the maintenance of the

necessary quality and cheapness of the given product for the sake of healthy competition (and, in general, its opportunities) in the market is becoming increasingly meaningful. The optimal formulation should be the most cost-effective, that is, to provide the highest yield of technical carbon per unit of raw materials. Such a recipe is at present determined in the laboratory, conducting a series of experiments on components. The automated recipe management system currently does not exist. As in the production of Technical Carbon, the raw material is a mixture of many hydrocarbons and they all are by-products of the petrochemical or coke industry, which makes their composition possible to fluctuate even from one supplier, the question arises of determining the optimal formulation of raw materials at each delivery. To do this, you need to develop a mathematical model that will allow you to predict the course of the process and synthesize optimal control algorithms. In this paper, the actual scientific and practical problem of simulation of static and dynamic regimes of the mixing process of raw materials for the production of technical carbon is considered. The urgency of this development, as well as possible ways of using, namely, the synthesis of optimal control of the raw material recipe management on the basis of which it is possible to design a system of optimal management of the recipe of raw materials in the production of technical carbon, was stressed. This development will optimize the use of available resources to increase the production of carbon black and reduce the unit cost of production. This will increase the economy of production and competitiveness by increasing the speed, reducing the financial costs and will give the opportunity to direct qualified human resources to solve other pressing problems. For the convenience of further practical use, it is suggested to find optimal controls for many different values of the initial states of the object, followed by approximation. This will allow the proposed algorithms to be used with fewer technical resources.

Keywords: carbon black, correlation index, optimal control system.

References

1. Notch: CarbonBlackGlobal Outlook 7-9.11.17. URL: [www.carbonblack2017.com/userfiles/file/Presentation/01 - Mr_ Paul Ita .pdf](http://www.carbonblack2017.com/userfiles/file/Presentation/01-Mr_Paul_Ita.pdf) (Accessed January 28, 2018).
2. Ivanovskij V. I. (2004). *Tekhnicheskij uglerod. Processy i apparaty* [Carbon black. Processes and devices], Tekhuglerod, Omsk, Russia.
3. Orlov V. YU. Komarov A. M., Lyapina L. A. (2002). *Proizvodstvo i ispol'zovanie tekhnicheskogo ugleroda dlya rezin* [Production and use of carbon black for rubber], Aleksandr Rutman, Yaroslavl, Russia.
4. Havrysh B. A., Korzhyk M. V. (2017). "Analysis of the mixer in the production of carbon black", *Avtomatyzaciya ta komp'yuterno-integrovani tehnologiyi: Tezy` dopovidej XI-yi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi studentiv* [Automation and Computer-Integrated Technologies: Abstracts of the XIth Students Scientific and Practical Conference], Kyiv, Ukraine, December 06-07, 2017, pp. 5–6.
5. M. S. Cekhanovich, L. A. Klimanova, S. D. Faruncev (1985). Certificate of authorship 1307304 USSR, MKI G 01 N 11/00. "The method for determining the correlation index of raw materials for the production of carbon black"
6. Havrysh B. A., Korzhyk M. V. (2017). "Development of mathematical model of mixer in the production of technical carbon", *Avtomatyzaciya ta komp'yuterno-integrovani tehnologiyi: Tezy` dopovidej P'yatoyi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi studentiv* [Automation and Computer-Integrated Technologies: Abstracts of the Fifth Students' Scientific and Practical Conference], Kyiv, Ukraine, April 11–12, 2018, pp. 53–55.
7. DSTU 8363:2015 Coke raw materials for the production of carbon black. Specifications/ National Standard of Ukraine. – Kyiv: State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality", 2015. – 29 p.