

УДК 66.011:519.876

БУГАСНКО І. І., КИРИЛЕНКО М. М., МИЛЕНЬКИЙ В. В.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АМІДУВАННЯ

Досі немає точної математичної моделі чи системи контролю виробництва сульфацилу натрію, через що всі наявні системи контролю не є точними та не виявлені всі можливі збурення системи під час роботи. Актуальною проблемою є створення оптимальної математичної моделі та на її основі синтез системи керування амідатором за допомогою регулятора.

При створенні математичної моделі для синтезу системи керування процесом амідування, потрібно розуміти складову його механізму. Реакція амідування проходить зі значним викидом тепла, а також через наявний каталізатор в амідаторі, відбуваються й побічні реакції. Використовуючи статичні і динамічні характеристики було створюється математичну модель, з якої використовуючи ПД-регулятор створено систему керування.

Сформувавши математичну модель, стає зрозуміло, що для коректної роботи амідатора, його необхідно охолоджувати в постійному режимі, оскільки чим нижча температура аміду на виході, тим продукт буде якіснішим. Температуру потрібно підтримувати на рівні від 324К до 327К з подачею води для охолодження в 19-20 кг/с. Реалізоване автоматичне керування процесом дає можливість керування потужностями виробництва за мінімальних витрат. В якості основного регулятора був підібраний саме ПД-регулятор, який налаштований по формулі передатної функції амідатору та ланці транспортного запізнення. Використаний регулятор включає в себе дві складові: інтегральну та диференціальну.

Синтез системи керування на основі ПД-регулятора дав можливість повноцінно дослідити процес враховуючи збурення, які були до цього часу невизначені, підвищив швидкість виходу на усталений рівень, а також знизив затрати на виробництво.

Ключові слова: амідатор, сульфацил-натрія, алгоритм керування, регулятор, математичне моделювання.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254159

*Corresponding author: milenkyvv@ukr.net

Received 3 December 2021; Accepted 14 January 2022

Постановка проблеми. З року в рік, людство створює нові технології, розробляє нові продукти абсолютно у різних сферах виробництв, не є виключенням і фармацевтична сфера, яка стрімко розвивається з кожним новим відкриттям. Світові компанії випускають мільйони препаратів для лікування різноманітних хвороб, оскільки потреби людства з кожним роком зростають, в зв'язку з цим зростає попит і на використання ліків, а це тягне за собою підвищення використання ресурсів для їх виробництва. Беручи до уваги процес амідування, то він є самим розповсюдженим для виробництва сульфацилу-натрію, який застосовується для лікування хвороб очей, що й обумовлює увагу людей які досліджують цю речовину.

Серед проблем виробництва сульфацилу-натрію є експлуатація технологічного обладнання, а саме амідатору, який має забезпечувати стабільну роботу та швидким виходом на усталений режим праці, а також має включати в себе певні ступені захисту та блокування, оскільки при неправильній роботі устаткування, можлива велика кількість браку та неякісної продукції, що є недопустимим для продукції.[1]

Аналіз попередніх досліджень. Загальною науковою проблемою є те, що як і у старих довідниках та і у сучасних наукових статтях, інформація, що до розрахунку представлена в дуже скромному форматі, а проектування взагалі відсутнє в будь якому вигляді. Тому орієнтуючись невирішену частину наукової проблеми та на всі наявні теоретичні дані та розрахунки, було прийнято рішення, про реалізацію математичної моделі та системи керування за всіма сучасними стандартами та використовуючи новітнє

устаткування. Так, за допомогою видання Тукавкиної Н.А. [1] були розглянуті всі питання, що до хімічних процесів, а також використовуючи посібник Плате. Н.А. [2] були отримані технічні дані, стосовно амідатора.

Метою статті є представлення математичної моделі та синтез системи керування процесом амідкування на технологічному рівні управління сучасного виробництва.

Виклад основного матеріалу. Сульфацил-натрію – це протимікробний бактеріостійкий засіб, основною сферою його застосування та використання є фармацевтика, а саме виготовлення ліків для очей. Амідкування є першим етапом в виготовленні сульфацилу-натрія, але є одним із найголовніших, оскільки найменш відхилення від встановлених норм та параметрів, може призвести до поганих наслідків які негативно відображаються на якості вихідного продукту. Сам процес амідкування є аналогічним до певної стадії виготовлення білого стрептоциду. Амідатор – головний апарат, облаштований мішалкою, в і якому відбувається процес амідкування. До апарату подають хлористий амоній та розчин сульфату натрію. [2] На рисунку позначено розрахункову схему амідатора.

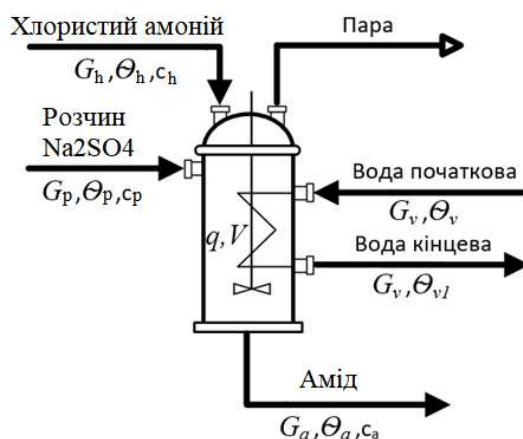


Рис. 1 - Розрахункова схема амідатора,

де G_h – витрата хлористого амонію який подається в амідатор, θ_h – температура розчину Na_2SO_4 який подається в амідатор, θ_h – температура хлористого амонію який подається в амідатор, c_h – питома теплоємність хлористого амонію який подається в амідатор, G_p – витрата розчину Na_2SO_4 який подається в амідатор, c_p – питома теплоємність розчину Na_2SO_4 який подається в амідатор, θ_p – температура охолоджувальної води, що подається у апарат, θ_{vl} – температура охолоджувальної води, що виходить з апарата, G_a – витрата аміда, який виходить з амідатора, G_v – витрата охолоджувальної води, що подається у апарат, θ_a – температура аміда, який виходить з амідатора.

Були прийняті загальні припущення для моделювання:

1. Амідатор має постійний об'єм
2. Температура продукту на виході, така ж як і температура в середині амідатора
3. Не враховуємо втрати тепла в навколишнє середовище
4. В середині амідатора тиск є постійним

Розглянемо значення технологічних параметрів, за допомогою яких реалізуємо статичне моделювання амідатора.

Таблиця 1 – Технологічні параметри

Назва	Позначення	Числове значення	Розмірність
Об'єм суміші в апараті	V	м ³	20
Витрата хлористого амонію на вході	G_h	кг/с	0.62
Витрата розчину Na ₂ SO ₄ на вході	G_p	кг/с	0.24
Витрата води що подається на ох. на вході	G_v	кг/с	20
Температура розчину Na ₂ SO ₄ на вході	Θ_p	К	310
Температура хлористого амонію на вході	Θ_h	К	278
Питома теплоємність розчину Na ₂ SO ₄ на вході	c_p	кДж/кг	1.72
Питома теплоємність хлористого амонію на вході	c_h	кДж/кг	1.250
Витрата аміда на виході	G_a	кг/с	0.86
Температура аміда на виході;	Θ_a	К	323
Питома теплоємність аміда на виході	c_a	кДж/кг	0.871
Питома теплота реакції	q	кДж/кг	62
Температура кінцевої води	Θ_{vI}	К	285
Температура води на вході, що діє в якості збурення	Θ_v	К	276

Збуренням в апараті є значення температури води, яка подається на вхід в апарат Θ_v . Витрата охолоджувальної води є **керувальним впливом** G_v , а **регульованою величиною** є температура аміду Θ_a .

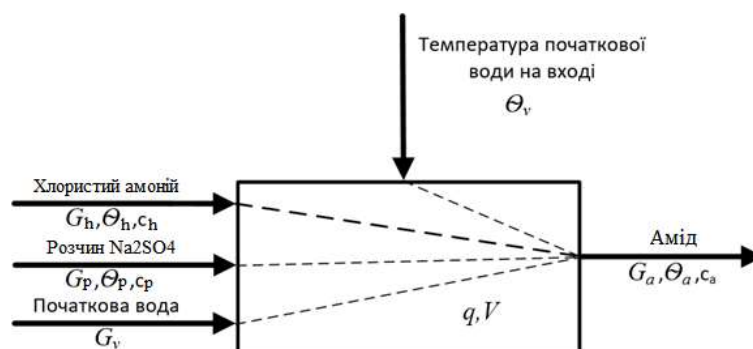


Рис. 2 – Структурно-параметрична схема амідатора

Знайдемо рівняння теплового балансу:

$$G_a = G_p + G_b \quad (1.1)$$

$$G_p \times c_p \times \theta_p + G_h \times c_h \times \theta_h + \theta_v + q = G_v \times G_a \times c_a \times \left(\theta_a - \frac{\theta_v + \theta_{v1}}{2} \right) \quad (1.2)$$

Розрахуємо θ_a :

$$\theta_a = \frac{2 \times G_p \times c_p \times \theta_p + 2 \times G_h \times c_h \times \theta_h + 2 \times \theta_v + 2 \times q + \theta_v \times G_v \times G_a \times c_a + \theta_{v1} \times G_v \times G_a \times c_a}{2 \times G_v \times G_a \times c_a} \quad (1.3)$$

Провівши необхідні розрахунки, ми можемо побудувати статичну характеристику каналу “Витрата води – температура аміда” амідатора:

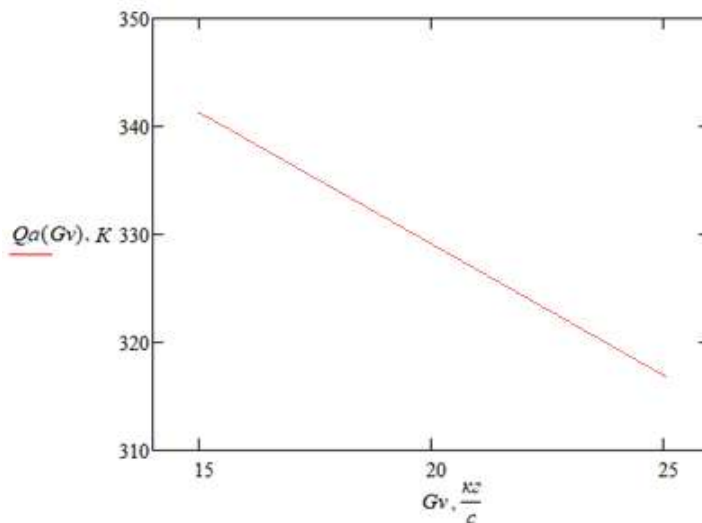


Рис. 3 – Статична характеристика каналу “витрата води – вихідна температура аміда” амідатора

Отже судячи по отриманим даним, ми дійшли висновку, що чим більше ми будемо витратити води для охолодження, тим менша температура аміду на виході і для підтримування температури в зазначеному діапазоні (324..327K) витрата охолоджувальної води повинна бути не менше 19-20 кг/с.

Моделювання динамічного режиму амідатора

Виведемо рівняння динамічної характеристики для амідатору:

$$G_p \times c_p \times \theta_p + G_h \times c_h \times \theta_h + \theta_v + q - G_v \times G_a \times c_a \times \left(\theta_a - \frac{\theta_v + \theta_{v1}}{2} \right) = \frac{q \times V \times p \times d\theta_a}{dt} \quad (1.4)$$

В приростах рівняння динаміки має такий вигляд:

$$G_p \times c_p \times \theta_p + G_h \times c_h \times \theta_h + \theta_v + q - \Delta G_v \times G_a \times c_a \times \left(\Delta \theta_a - \frac{\theta_v + \theta_{v1}}{2} \right) = \frac{q \times V \times p \times d\Delta \theta_a}{dt} \quad (1.5)$$

Лінеаризоване рівняння перетворимо за Лапласом:

$$q \times V \times p \times \theta_a(p) + G_v(p) \times G_a \times c_a \times \left(\theta_a(p) - \frac{\theta_v + \theta_{v1}}{2} \right) = G_p \times c_p \times \theta_p + G_h \times c_h \times \theta_h + \theta_v + q \quad (1.6)$$

$$\theta_a(p) \cdot (Tp + 1) = G_v(p)k + \frac{a}{p} \quad (1.7)$$

$$T = \frac{V \times p}{G_v + G_p + G_h} = \frac{3,84 \times 997}{16 + 0,25 + 0,67} = 0,219 \quad (1.8)$$

$$k = \frac{\theta_a}{G_v + G_p + G_h} = \frac{335}{16 + 0,24 + 0,78} = 18,6 \quad (1.9)$$

Передатна функція за каналом «завдання-вихід» (витрата води – вихідна температура амідю) має вигляд:

$$W_{Gv-\theta a} = \frac{k}{T \times p + 1} \quad (1.10)$$

Підставляючи числові значення отримаємо рівняння:

$$W_{Gv-\theta a} = \frac{18,6}{0,219 \times p + 1} \quad (1.11)$$

Побудована динамічна характеристика амідатора засобами MathCad матиме вигляд:

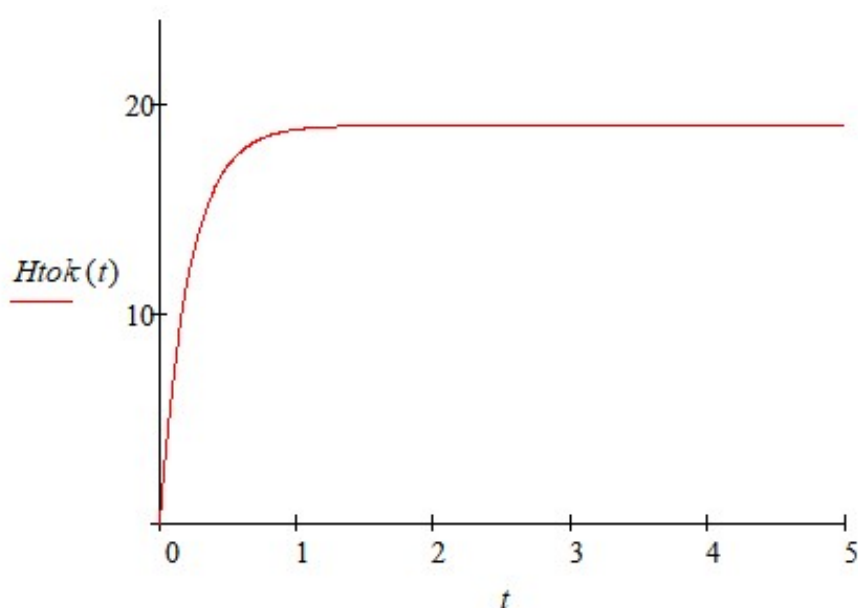


Рис. 4 – Динамічна характеристика амідатора за каналом “витрата води – вихідна температура амідю”

Автоматичне управління процесами має на увазі вимір системою значень певних параметрів і зміна показників в необхідну сторону. Так, наприклад, контроль температури в деяких нагрівальних пристроях дозволяє в автоматичному режимі регулювати потужність роботи приладів: якщо температура при нагріванні досягає встановленого максимального значення, потужність приладу знижується, щоб запобігти перегріву. Подібна взаємодія елементів системи знаходить застосування в багатьох областях техніки.

Ефективним засобом регулювання параметрів системи є ПІД-регулятор. Він приймає дані від різних елементів і утворює відповідний керуючий сигнал. У випадку з контролем нагріву, схема роботи ПІД-регулятора наступна: регулятор від датчика температури отримує інформацію про нагрівання пристрою, відповідно до неї формує і посилає сигнал елементу, відповідального за регулювання потужності нагрівального елемента. [3]

Налаштування ПІД-регулятора. Пошук потрібних коефіцієнтів складових в регуляторі може проводитися різними способами. Одним з простих є наступний:

- 1) Виставити значення всіх регуляторів на 0.
- 2) Встановити максимальну потужність роботи регульованого приладу. Збільшити значення пропорційного регулятора, спостерігати за поведінкою системи. Збільшувати значення до тих пір, поки не з'являться коливання, викликані перерегулюванням.

3) Зменшити значення пропорційного регулятора, домогтися стабілізації системи (загасання коливань).

4) Знизити значення пропорційного регулятора на 15% нижче рівня стабілізації системи. Знизити потужність роботи регульованого приладу.

5) Ступінчасто підвищувати максимальну потужність роботи регульованого приладу. Збільшувати значення інтегрального регулятора до моменту виникнення згасаючих коливань. Зменшити значення інтегрального регулятора до рівня, коли система буде досягати потрібного значення без коливань.

6) Якщо є необхідність встановити значення диференціального регулятора, то при ступінчастому підвищенні швидкості необхідно збільшувати значення цього регулятора до моменту отримання системою стабільного стану з найменшим часом обробки сигналу. Значення можна вважати відповідним при виникненні в системі одного перерегулювання.

Перевірити точність настройки системи шляхом виставлення різних потужностей роботи регульованого приладу [4].

Система керування з ПІД-регулятором включає в себе передатну функцію амідатора, ланку транспортного запізнення (пов'язану з тим, що вода для охолодження поступає в апарат не миттєво, а через трубопровід, певної довжини), вбудований блок ПІД-регулятора, задавач.

Систему зображено на рисунку нижче.

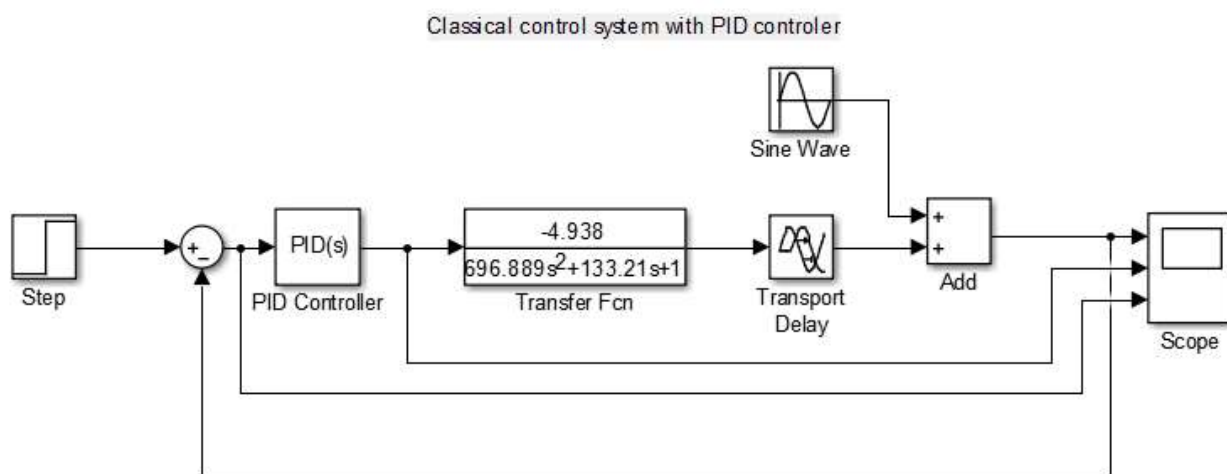


Рис. 5 – Схема АСР з ПІД-регулятором в *Simulink*

У ПІД-регуляторах використовується кілька різних коефіцієнтів. Інтегральна складова в ПІД-регуляторі забезпечує нульову похибку в сталому режимі, диференціальна – покращує форму перехідної характеристики і збільшує запас стійкості.

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора відбувається вбудованими засобами *Matlab*, а саме за допомогою *PID Tuning Toolbox*. Даний інструмент автоматично підбирає коефіцієнти обраного типу регулятора, будує перехідну характеристику та показує критерії якості.

Висновки. Впровадження автоматизованих систем керування у роботу амідатора сучасного підприємства дозволить підвищити якість сульфацилу натрія, що робить ефективний вплив на функціонування основного виробництва і значно скорочує витрати на додаткове оснащення, а також дає можливість зменшити викид забруднень у навколишнє середовище.

Перспективи подальших досліджень. Система керування, алгоритмічне забезпечення якої представлено у даній роботі, може використовуватися як складова у розподіленій системі керування (РСК) процесами амідування сучасного підприємства. В подальшому мають бути розроблені алгоритмічне та програмне забезпечення системи керування іншими типовими процесами при отриманні сульфацилу натрію, що не були розглянуті у проведеному дослідженні.

Список використаної літератури

1. Тюкавкина Н.А., Бауков Ю.И., Зурабян С.Э. Биоорганическая химия [Электронный ресурс]: учебник / М. : ГЭОТАР-Медиа, 2020.– 297 с.

2. А. І. Жученко, М. З. Кваско, Р. А. Осіпа Застосування мікропроцесорної техніки в системах керування очищенням стічних вод // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київ. політех. ін.-т»; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2011. № 2 (8). С. 143–145.
 3. Жученко А. І. Математичні моделі цифрових систем керування [Текст]: Навч. посібник / А. І. Жученко ; Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". - К. : [б.в.], 1997. - 238 с.
 4. Любашкин А. В., Поваров И. Г., Субоч Г. А., Товбис М. С. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Ацилирование и сульфонилирование некоторых азотсодержащих соединений : монография / Красноярск, 2018. – 184 с.
-

Ihor Buhaienko, Maksym Kyrylenko, Volodymyr Mylenkiy

MATHEMATICAL MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS AND SYNTHESIS OF THE AMIDATION CONTROL SYSTEM

There is still no exact mathematical model or control system for sodium sulphacyl production, so not all available control systems are accurate and not all possible disturbances of the system during operation have been identified. An urgent problem is to create an optimal mathematical model and use it as the basis for the synthesis of an amidator control system using a controller.

In creating a mathematical model for the synthesis of the control system for the amidation process, it is necessary to understand the component of its mechanism. The amidation reaction takes place with a significant heat release, as well as through the available catalyst in the amidator, and side reactions occur. Using static and dynamic characteristics, a mathematical model was created, from which a control system was developed using a PID controller.

After a mathematical model has been developed, it becomes clear that the amidator must be cooled constantly for its correct operation, because the lower the temperature of the amide at the outlet, the better the product. The temperature must be maintained at a level of 324K to 327K with water supply for cooling at 19-20 kg/s. The implemented automatic process control allows the production capacity to be managed at minimal cost. The PID controller, which is configured according to the formula of the transfer function of the amidator and the transport delay link, was selected as the main controller. The controller used includes two components: integral and differential. The synthesis of the control system based on the PID controller made it possible to fully investigate the process taking into account the disturbances, which were still uncertain, increased the rate of reaching a steady level, and reduced production costs.

Keywords: amidator, sodium sulphacyl, control algorithm, controller, mathematical modeling.

References

1. Tiukavkyna, N.A., Baukov, Y.Y., Zurabian, S.E. (2020), “Bioorganic chemistry” [Electronic resource], *textbook / M.: GEOTAR-Media*, p. 297.
2. Zhuchenko, A. I., Kvasko, M. Z., Osipa, R. A. (2011), “Application of microprocessor technology in wastewater treatment control systems”, *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*, no 2(8), pp. 143–145.
3. Zhuchenko, A. I (1997), “Mathematical models of digital control systems”, *National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, p. 238.
4. Liubiashkyn A. V., Povarov Y. H., Suboch H. A., Tovbys M. S. (2018), “Acylation and sulfonylation of some nitrogen-containing compounds”, *SybhU ym. M. F. Reshetneva, Krasnoyarsk*, p. 184.