

**С. І. БУХКАЛО, С. П. ІГЛІН, О. І. ОЛЬХОВСЬКА, В. О. ОЛЬХОВСЬКА**

### **ПРИКЛАД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ ДІЇ РЕАКТОРІВ ЯК СИСТЕМИ**

У матеріалах статті розглянуті можливості для визначення загальної технології експериментальних прикладів дії реакторів ідеального змішування з метою підвищення ефективності їх роботи у хімічній та харчовій промисловості, а також у біотехнологічних системах. Дослідження проведені на сучасному рівні науково-обґрунтованого математичного викладення та програм розрахунків 1) різновидів технології та їх закономірностей з урахуванням специфічних особливостей стадій теплообміну; 2) на різних стадіях проектування і обґрунтування моделей устаткування. Представлені приклади і деякі особливості можливих рішень, які засновані на експериментальних даних розробки хімічних процесів і їх наукового обґрунтування у вигляді об'єктів технології.

**Ключові слова:** реактор ідеального змішування; ефективність роботи; науково-обґрунтовані методи.

**С. И. БУХКАЛО, С. П. ИГЛИН, О. И. ОЛЬХОВСКАЯ, В. О. ОЛЬХОВСКАЯ**

### **ПРИМЕР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ В КАЧЕСТВЕ СИСТЕМЫ**

В материалах статьи рассмотрены возможности для определения общей технологии экспериментальных примеров работы реакторов идеального смешения с целью повышения эффективности их функционирования в химической и пищевой промышленности, а также в биотехнологических системах. Исследования проведены на современном уровне научно-обоснованного математического изложения и программ расчетов 1) разновидностей технологии и их закономерностей с учетом специфических особенностей стадий теплообмена; 2) на различных стадиях проектирования и обоснования моделей оборудования. Представлены примеры и некоторые особенности возможных решений, основанных на экспериментальных данных разработки химических процессов и их научного обоснования в виде объектов технологии.

**Ключевые слова:** реактор идеального смешения; эффективность работы; научно-обоснованные методы.

**S. I. BUKHALO, S. P. IGLIN, O. I. OLKHOVSKA, V. O. OLKHOVSKA**

### **EXAMPLE OF EXPERIMENTAL CALCULATIONS OF CHEMICAL REACTOR ACTION AS A SYSTEM**

The materials presented of innovative development opportunities determining the general experimental examples of the operation of ideal mixing chemical reactors in order to increase the efficiency of their functioning in the chemical and food industries, as well as in biotechnological systems. The developments have been carried out with the aim of selecting modern highly efficient science-based technologies: 1) types of technology and their regularities, taking into account specific heat exchange stages; 2) at different stages of design and justification of equipment models. Examples and some features of possible solutions are presented, which are based on experimental data of the development of process mechanisms and their scientific substantiation in the form of objects of technology. A review of the literature and the necessary articles written on the subject: as technologies develop and become more complex, energy needs increase greatly; identified possible areas of work in obtaining the necessary information and results. The materials are devoted to the results of researches of properties of technical and technological innovations of modern systems as object studies the possibility of complex properties in the development system increasing the economic efficiency of new sources.

**Keywords:** a perfect chemical reactor; efficiency of work; scientifically sound methods.

#### **Вступ.**

Вирішення задач підвищення ефективності виробництва хімічної, харчової промисловості та біотехнології може бути успішно здійснено спираючись на теорію аналізу та синтезу особливостей технологічних систем:

- фізичних – взаємодія визначається фізичними закономірностями;
- хімічних – сукупність елементів, які взаємозв'язані технологічними потоками і функціонують як одне ціле для забезпечення економічно доцільної переробки сировини на корисний продукт;
- біологічних – сукупність молекул для взаємодії у клітині на клітинно-молекулярному рівні; клітин у організмі; організмів у популяції та різних популяцій у навколишньому середовищі;
- біохімічних – взаємодія тіл визначається біохімічними перетвореннями, а також фізико-хімічних і інших.

Технологічна система у таких прикладах може визначати: підприємство, цех, ділянку, апарат і має чітко сформульовану мету у вигляді кількісних і якісних характеристик. При цьому технологічний процес для таких випадків – це сукупність послідовних змін у системі, які приводять до виникнення у ній нових властивостей. Більшість процесів харчової технології на відміну від хімічної є незворотні, тобто вони протікають у одному напрямку – ректифікація, сушіння, адсорбція, подрібнення і ін., на відміну від зворотних – кристалізація, абсорбція і деякі інші. Складність технологічної системи визначається її структурою, числом елементів, зв'язків, рівнів, обсягом інформації, закладеної в систему [1–3].

Поняття елементу системи неоднозначне, але це самостійна умовно неподільна частина. Елементи системи класифікують за характеристиками:

© Бухкало С.І., Іглін С.П., Ольховська О.І., Ольховська О.І., 2020

фізичні – змінюється фізичний стан сировини; хімічні – змінюється хімічний склад сировини; біологічні – змінюється біологічний склад сировини; енергетичні – перетворюється енергія; комбіновані або комплексні і інші.

Між елементами системи завжди існує функціональний взаємозв'язок у вигляді технологічних потоків – переміщення у просторі маси та енергії. Сукупність елементів і зв'язків утворює структуру системи, а сукупність елементів, яка є певною мірою самостійно функціонуючою частиною системи, розглядають як підсистему. Зміна станів системи у деякому інтервалі часу – це процес функціонування системи. Стан системи визначають і контролюють за певним набором вихідних її змінних, які залежать від величини вхідних змінних технологічної системи.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Процес функціонування системи обумовлюється параметрами системи (конструкційні та технологічні) і технологічними режимами елементів – сукупність факторів всередині елементу, які впливають на швидкість технологічного процесу, вихід і якість продукту. До показників ефективності функціонування технологічної системи відносять: технологічні критерії ефективності, експлуатаційні, економічні, соціальні та інші. Вибір показника ефективності залежить від цілей функціонування системи, яка визначається рівнем структури системи [1–7]. Кожний рівень структури технологічної системи, у свою чергу, має свою ціль функціонування і характеризується певними показниками ефективності функціонування.

На першому рівні підприємства ціллю функціонування елементів технологічної системи є біохімічний і фізико-хімічний вплив на технологічні потоки. Показниками ефективності функціонування елементів технологічної системи у цьому випадку можуть бути коефіцієнти корисної дії апаратів або величин, що характеризують селективність процесу, вихід продукту, експлуатаційні показники і ін.

Другий рівень структури утворюють технологічні системи, що відповідні технологічним цехам, ціль на даному етапі полягає в отриманні для даного цеху встановленої кількості цільового продукту, а показниками ефективності функціонування будуть витратні норми на сировину і енергію, а також показники економічної ефективності.

Третій рівень структури – це взаємозв'язана сукупність, яка утворює це підприємство. Ціль функціонування такого підприємства – виконання виробничого плану з випуску заданого асортименту продукції згідно з вимогами стандартів і технічної документації, ефективність у даному випадку оцінюють узагальненими економічними показниками з урахуванням економічного ефекту за рахунок переробки або використання відходів виробництва, а також регенерації енергетичних ресурсів.

**1. Загальні положення проведеного експерименту.** Відповідно з метою проведеного дослідження є визначення показників функціонування РІЗ-П (табл. 1): ступеня перетворення  $X_A$  і зміни температури реакційного середовища  $T$  у часі  $t$  що дозволяє визначити час досягнення заданої величини  $X_{AK}$  і максимальну  $T_{\max}$ .

Таблиця 1. Вихідні дані експерименту для реактору ідеального змішування

Кінетика хімічної реакції	Стехіометричне рівняння $A + B \rightarrow R$ ; кінетичне рівняння псевдопершого порядку $r(C, T) = K'(T)C_A$ , $K'(T) = 0,1K(T)$ ; температурна залежність за рівнянням Ареніуса $K(T) = K_0 \exp(-E/RT)$ ; $K_0 = 27,03 \cdot 10^{-9} \text{ хв}^{-1}$ ; $E = 61290 \text{ кДж/кмоль}$ ; $Q_p = 69554 \text{ кДж/кмоль}$
Характеристики РС	Щільність реакційної суміші (РС) для реактору ідеального змішування періодичної дії (РІЗ-П) $\rho = 818 \text{ кг/м}^3$ ; питома теплоємність $c_p = 1,76 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$
ГХ реактору	Геометричні характеристики (ГХ): об'єм реакційного середовища $V_p = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ; для змішувача – $V = V_p + V_{zm}$ , для всіх інших випадків $V = V_p$ .
Кінетика теплопередачі	Коефіцієнт теплопередачі: сорочка $K_T = 8,52 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{хв} \cdot \text{К}$ ; змішувача – $K_T = 34,08 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{хв} \cdot \text{К}$
ХТ	Вода: питома теплоємність $c_{pT} = 4,19 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ; маса у сорочці $M_T = 0,10 \text{ кг}$ .
ГХ т/о пристрою	Сорочка теплообмінного (т/о) пристрою: поверхня теплопередачі $F = 0,0325 \text{ м}^2$ ; змішувач: діаметр трубки $D = 0,005 \text{ м}$ , довжина – $L = 0,84 \text{ м}$ .
Начальні і граничні умови	Реакційна суміш: початкова концентрація реагенту А – $C_{A0} = 2,00 \text{ кмоль/м}^3$ ; початкова ступінь перетворення $X_{A0} = 0$ ; початкова температура сорочки-термостату $T_0 = 293$ ; характеристика теплоносія (ХТ): температура на вході в сорочку та змішувач $T_0 = 283 \text{ К}$ .
Обмеження	Кінцевий ступінь перетворення $X_{AK} = 0,9$ .
Прийняті допущення	Реакційна суміш знаходиться у стані ідеального перемішування; режим руху теплоносія у сорочці відповідає ідеальному перемішуванню; зовнішня поверхня системи цілком теплоізолювана; коефіцієнт теплопередачі змінюється: 7,5; 8,5; 9,5.

$$\begin{bmatrix} \text{Зміна} \\ \text{кількості} \\ \text{теплого} \\ \text{потоків} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Прихід} \\ \text{теплоти} \\ \text{з вхідним} \\ \text{потоків} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Витрата} \\ \text{теплоти} \\ \text{з вихідним} \\ \text{потоків} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Прихід} \\ \text{теплоти} \\ \text{з вхідним} \\ \text{потоків} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Витрата} \\ \text{теплоти} \\ \text{з вихідним} \\ \text{потоків} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Рис. 1 – Рівняння теплового балансу реактору при нестационарному (1) та стаціонарному (2) режимах

Обираємо значення експерименту від  $\tau = 0$  з кроком  $\Delta\tau$  – необхідно розрахувати відповідні значення ступеня перетворення  $X_A$  і температури  $T$  до досягнення необхідної величини  $X_{AK}$ .

В роботі розглянуті питання подовження розробки комплексних проектів зі студентами за обраними напрямками підвищення ефективності роботи різновидів технологічних систем [3–7] з метою визначення алгоритму деяких закономірностей процесів використання, наприклад, реактору ідеального змішування періодичної дії (РІЗ-П), у якості теплообмінного пристрою в якому використовують тип «сорочка-термостат».

Реактори періодичної дії одночасно завантажують всіма видами початкових речовин або їхньою сумішшю (початковою реакційною сумішшю) і через певний час, необхідний для досягнення заданого ступеня завершення процесу, вивантажують цю суміш, що містить уже й продукти реакції (продукційна суміш). Процес їхнього функціонування являє собою періодично повторювані цикли. Кожний цикл складається із трьох стадій: завантаження в реактор початкових речовин, проведення хімічного процесу, вивантаження продукційної суміші:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_3 + \tau + \tau_{\text{в}} = \tau + \tau_{\text{в}},$$

де  $\tau$  – тривалість хімічного процесу;  $\tau_{\text{в}}$  – час, затрачений на проведення допоміжних операцій – завантаження й вивантаження. Реактори періодичної дії використовуються переважно в малотоннажному й багатоасортиментному промисловому виробництві, а також при переробці дорогих початкових речовин.

За тепловим режимом розрізняють ізотермічні, адіабатичні й політропічні (політермічні) реактори.

Ізотермічні реактори мають однакову й постійну температуру у всіх точках реакційного простору. За винятком процесів, що протікають із незначним тепловим ефектом, це досягається інтенсивним теплообміном через теплообмінну поверхню. У результаті вся теплота, що виділяється чи поглинається у ході процесу, відповідно відводиться від реакційної суміші або підводиться до неї.

В адіабатичних реакторах єдиними шляхами підведення й відведення теплоти є вхідні й вихідні потоки реакційної суміші. Інші види теплообміну через гарну теплоізоляцію апарата відсутні.

Температура в таких реакторах зростає або падає залежно від теплового ефекту здійснюваної реакції.

У політропічних реакторах існує частковий теплообмін; тепловий режим цих найпоширеніших апаратів проміжний між ізотермічним і адіабатичним. За способом організації теплообміну розрізняють реактори із внутрішнім, зовнішнім і комбінованим теплообміном. Рівняння теплового балансу для реактора довільного типу, складене для розглянутого об'єму, при нестационарному (1) та стаціонарному (2) режимах визначається рівністю (рис. 1).

Однією з найбільш важливих задач є експериментальне визначення показників функціонування обладнання за представленими властивостями алгоритму дії: масовість – розв'язок однотипних задач із різними вихідними даними можна здійснювати за тим самим алгоритмом, що дає можливість створювати типові програми для розв'язку задач при різних варіантах значень вихідних даних – у цій властивості укладена основна практична цінність алгоритмів; результативність – реалізація обчислювального процесу, передбаченого алгоритмом, повинна через певне число кроків привести до одержання результатів з визначеною точністю або повідомленню про неможливість розв'язку задачі; визначеність (детермінованість) – алгоритм повинен бути однозначним, що виключає довільність тлумачення кожного із приписів, а також відхилень від заданого порядку виконання.

**2. Моделювання здійснюється шляхом побудови математичної моделі.** Теорія подоби дозволяє поширити результати одного дослідження на групу подібних процесів у границях даного класу шляхом особливого способу завдання умов однозначності. Це, в свою чергу, дозволяє перенести експериментальні дані, що отримані на моделі, на промисловий об'єкт, тобто змоделювати процес.

Ускладнення технологічних процесів, машин і апаратів, обмежені строки проектування об'єктів приводять до того, що фізичні й аналогові моделі стають непридатними для дослідження або дають більші погрешності, чого в значній мірі позбавлені математичні моделі. Подоба умов однозначності включає і геометричну подоби апаратів, фізичних величин, граничних і початкових умов і ін.

Введення масштабного коефіцієнту для процесів однієї групи дозволяє розглядати їх як один процес, що протікає зі змінними параметрами, які відрізняються тільки масштабом.

У кожному подібному процесі комплекси змінних величин можуть змінюватися у просторі і часі, але у кожних точках робочого об'єму у конкретний момент часу вони мають однакові значення і їх називають критеріями або числами подоби.

Об'єктами вивчення – процеси й апарати харчової технології, приклади їхнього розрахунку, а також виробництво у взаємодії з комп'ютерною технікою.

Об'єкт моделювання – будь-який технологічний процес або апарат, у якому він протікає. Формулювання завдання апроксимації даних для опису експериментальних залежностей роботи обладнання і отримання емпіричних моделей процесів нерозривно пов'язане з рішенням завдання апроксимації для нелінійних і лінійних за параметрами моделей. У моделюванні прийнятий розподіл процесів на два класи: детерміновані й стохастичні. Для технологічних процесів, що є складними системами, характерна двоїста детерміновано-стохастична природа.

До детермінованих процесів відносять процеси, визначальні параметри яких змінюються безперервно, при цьому кожному значенню вхідної величини відповідає певне й тільки одне значення вихідної величини. Між визначальними параметрами детермінованих процесів існує функціональний взаємозв'язок, механізм цих процесів вважається визначеним за допомогою основних законів зміни маси й енергії.

Стохастичні процеси – це процеси, визначальні параметри яких змінюються дискретно (перервано, випадковим образом) і при цьому значення вихідних величин перебувають в імовірнісній відповідності із вхідними й не визначаються ними однозначно. При цьому кожному значенню вхідної величини  $x_i$  відповідає кілька значень вихідної величини  $y_i$ . Процедура складання детермінованих моделей залежить від складності процесу й від наявності відомостей про нього. Основні етапи побудови детермінованих моделей можна представити в наступному вигляді: постановка завдання; вивчення теоретичних закономірностей; математичний опис вивчених законів; вибір методу рішення; розробка алгоритму й програми; реалізація програми на ЕОМ; перевірка адекватності й коректування моделі; проведення обчислювального експерименту; аналіз отриманих даних. Відповідно до розподілу процесів на два класи існує й два принципи одержання математичних моделей. Перший, аналітичний для детермінованих процесів, ґрунтується на аналізі механізму процесу або на теоретичних поданнях про механізм (теоретичний підхід). У зв'язку із цим часто для складання математичного опису детермінованих процесів використовують рівняння матеріальних і теплових балансів. Аналітичні або детерміновані

моделі мають вигляд алгебраїчних (диференціальних, інтегральних) рівнянь.

**3. Експериментальна та розрахункова частина.** Загальна маса в РІЗ–П постійна (рис. 2), інші характеристики – склад, температура, тиск – змінюються лише в часі. Звідси витікає, що процес у реакторі періодичної дії може протікати лише нестационарно. Оскільки значення фізичних величин однакові у всьому реакційному об'ємі, рівняння балансів можна записати для реактора в цілому.

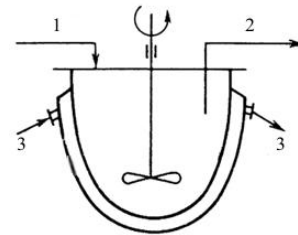


Рис. 2 – Схема реактору ідеального змішування періодичної дії: 1 – вхідний потік сировини; 2 – вихідний потік, 3 – теплоносій

Для визначеності викладу теплового балансу розглянемо протікання екзотермічної реакції при  $V = \text{const}$ . Будемо виходити з балансової рівності (рис. 2). При відсутності в РІЗ–П вхідних і вихідних потоків теплоприход може мати місце лише внаслідок виділення теплоти в ході реакції, а тепловитрата – внаслідок відводу теплоти холодоагентом. Швидкість теплоприходу дорівнює  $Q_p r(C, T) V_p$  (3), де  $r(C, T)$  – швидкість реакції при концентрації  $C$  і температурі  $T$  у даний момент часу;  $Q_p$  – тепловий ефект реакції.

Швидкість тепловитрати становить  $K_T F (T - T_{\text{хл}})$  (4), де  $K_T$  – коефіцієнт теплопередачі;  $F$  – поверхня теплопередачі;  $T_{\text{хл}}$  – температура холодоагенту.

Зміна теплоємності реакційної суміші внаслідок нагрівання за рахунок теплоти реакції можна виразити залежністю  $V c_p \frac{dT}{dt}$  (5), де  $c_p$  – об'ємна теплоємність реакційної суміші. З вираження (3) – (5) одержимо рівняння теплового балансу при політропічному тепловому режимі (6):

$$V c_p \frac{dT}{dt} = Q_p r(C, T) V_p - K_T F (T - T_{\text{хл}})$$

звідки з обліком  $V = V_p$  зміна температури реакційної суміші в ході процесу складе (7):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_p}{c_p} r(C, T) - \frac{K_T F_{\text{уд}}}{c_p} (T - T_{\text{хл}}), (7)$$

де  $F_{\text{уд}} = F/V_p$  – питома поверхня теплопередачі.

В адиабатичному тепловому режимі теплообмін відсутній, і рівняння (6) і (7) приймають вигляд:

$$Vc_p \frac{dT}{d\tau} = Q_p r(C, T) V_p, \quad \frac{dT}{d\tau} = \frac{Q_p}{c_p} r(C, T)$$

Умовою реалізації ізотермічного режиму, згідно (7), є виконання рівності (8):

$$Q_p r(C, T) = K_{\tau} F_{\text{уд}} (T - T_{\text{хл}})$$

Для складання, визначення можливостей та оцінки алгоритмів загальної хімічної та харчової технології існує багато критеріїв, наприклад, алгоритм визначення раціональної роботи різновидів обладнання. Найчастіше аналіз алгоритму (або, як кажуть, аналіз складності алгоритму) полягає в оцінці витрат часу на розв'язок задачі в розрахунку на одиницю вхідних даних. Фактично, ця оцінка зводиться до оцінки кількості базових елементарних операцій, на які можна розкласти даний алгоритм, оскільки кожна така операція виконується за конкретний, відомий відрізок часу. Складність алгоритму оцінюється також кількістю апаратних ресурсів, зокрема обсягом пам'яті, задіяної для виконання даного алгоритму. Щоб довести до користувача алгоритми в залежності від їх призначення, вони мають бути формалізовані за певними правилами за допомогою конкретних зображальних засобів. Засоби, що використовуються для запису алгоритмів, значною мірою визначаються тим, для якого виконавця призначається алгоритм. Якщо алгоритм призначений для виконавця-людини, то його запис може бути не повністю формалізований, у цьому разі головне в формі запису – це наочність і зрозумілість. Для запису алгоритмів, призначених для реалізації на ЕОМ, необхідна строга формалізація. До основних зображальних засобів алгоритмів належать такі способи їх запису: словесний, формульно-словесний, схеми алгоритмів, мова операторних схем, НІРО-схеми, псевдокоди, мови програмування. При словесному способі запису алгоритму кожна операція перетворення формулюється природною мовою у вигляді правила. Правила нумеруються, щоб мати можливість на них посилатися, і зазначається порядок їх виконання. Алгоритм у вербальній формі може виявитися дуже об'ємним і важким для сприйняття. Формульно-словесний спосіб запису алгоритму ґрунтується на завданні інструкції про виконання конкретних дій у

Таблиця 2. Вихідні дані розрахунків експерименту символів і виразів зі словесними поясненнями – він більш компактний і наочний в порівнянні зі словесним, але не є строго формалізованим для хімічної технології.

Даний спосіб прийнятий під час опису різного роду математичного викладення, наприклад математичний опис процесу – легко зчитується і буде зрозумілим багатьом фахівцям без спеціальної підготовки. Подальше дослідження зв'язане з визначенням алгоритму пошуку параметрів роботи сорочки-термостату – показників її функціонування – зміни ступеня перетворення  $X_A$  і зміни температури реакційного середовища  $T$  у часі  $t$ .

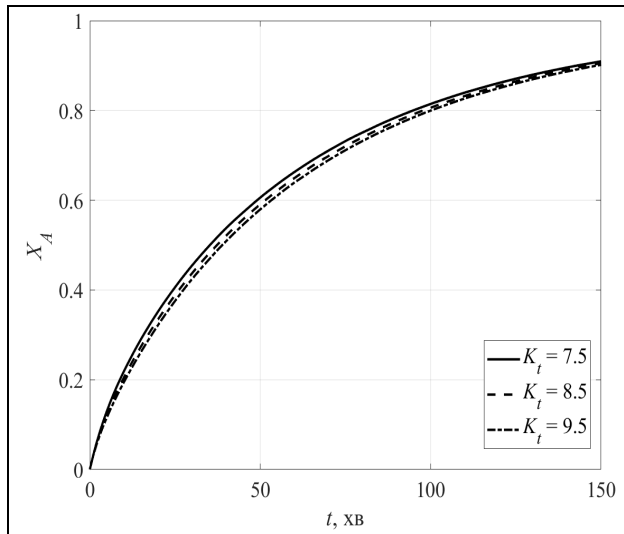
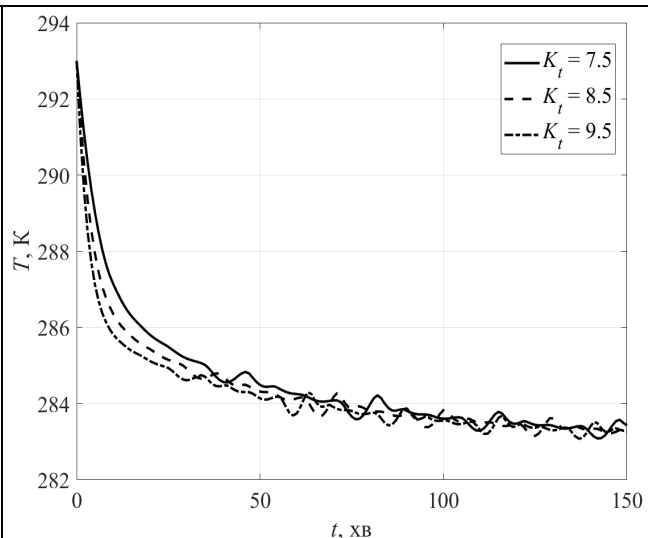
Нижче наведений приклад програми на мові MATLAB для розв'язання системи двох звичайних нормальних диференціальних рівнянь (табл. 2) методом Рунге-Кутти 4–5-го порядку з автоматичним подібненням кроку в разі потреби. Використовується функція ode45. Ставиться задача: при різних значеннях  $K_{\tau} = 7.5$ ; 8.5 та 9.5 вивести результати з кроком 1 хв. доти, доки ступінь перетворення  $X_A$  не досягне значення 0.9. Порядок роботи з програмою є таким.

1. Запустити MATLAB.
2. Перейти в MATLAB' і в теку, де зберігається програма.
3. Завантажити програму в редактор.
4. Перевірити вхідні дані: числові параметри, функції правих частин системи диференціальних рівнянь, початкові умови.
5. Задати  $K_{\tau} = 7.5$ .
6. Задати моменти часу з потрібним кроком 1 хв. Останній момент часу будемо підбирати в інтерактивному режимі з умови, що  $X_A$  повинен досягати значення 0.9. У друкованому варіанті останній момент часу 150 хв.
7. Запустити програму на розрахунок (клавіша F5 або кнопка Run).
8. Подивитися у командному вікні MATLAB на надруковані моменти часу та отримане значення  $X_A$ . Чи досягається значення 0.9? Якщо ні, треба збільшити останній момент часу та знову запустити програму на розрахунок.
9. Задати  $K_{\tau} = 8.5$  та повторити пункти 6-8.
10. Задати  $K_{\tau} = 9.5$  та повторити пункти 6-8.
11. Проаналізувати побудовані графіки та зробити висновки.

Система рівнянь	Розв'язання системи рівнянь методом Рунге-Кутти
$\begin{cases} \frac{dX_A}{d\tau} = 0,1K_0(1-X_A)\exp(-E/RT) \\ \frac{dT}{d\tau} = \frac{Q_p C_{A0}}{\rho c_p} \frac{dX_A}{d\tau} - \frac{K_{\tau} F}{\rho c_p V} (T - T_T) \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f_1(x, y, z) \\ \frac{dz}{dx} = f_2(x, y, z) \end{cases}$
Початкові умови $y _{x=0} = y_0$ ; $z _{x=0} = z_0$ для 1) $K_{\tau} = 9,5$ кВт/м <sup>2</sup> К; 2) $K_{\tau} = 8,5$ кВт/м <sup>2</sup> К; 3) $K_{\tau} = 7,5$ кВт/м <sup>2</sup> К.	

В інтервалі визначених параметрів дії РІЗ (табл. 1) – реакційна суміш знаходиться у стані ідеального перемішування; режим руху теплоносія у сорочці відповідає ідеальному перемішуванню; зовнішня поверхня системи цілком теплоізована;

коефіцієнт теплопередачі змінюється: 7,5; 8,5; 9,5 досліджено залежності досягнення кінцевого ступеня перетворення  $X_{AK} = 0,9$  (рис. 3) та температури  $T$  (рис. 4) відповідно для заданих коефіцієнтів теплопередачі, отримані у MATLAB.

Рис. 3 – Експериментальні залежності  $X_A = f(t)$ Рис. 4 – Експериментальні залежності  $T = f(t)$ 

```
% Розв'язання системи диференціальних рівнянь
clear % очистили пам'ять
close all % закрили всі вікна фігур
clc % очистили командне вікно MATLAB
% вхідні дані
Kt = 9.5;
K0 = 0.2793e11; E = 61230; R = 8.31; Qp = 69554; CA0 = 2; rho = 818; cp = 1.760;
V = 4e-4; Tt = 283; F = 0.0325;
% дескриптор функції правих частин: y(1)=XA; y(2)=T.
KinFun = @(t,y) [0.1*K0*(1-y(1)).*exp(-E./(R*y(2))); ...
    Qp*CA0/(rho*cp)*0.1*K0*(1-y(1)).*exp(-E./(R*y(2)))-...
    Kt*F/(rho*cp*V)*(y(2)-Tt)];
y0 = [0; 293]; % початкові умови
tspan = 0:1:150; % моменти часу
[t,y] = ode45(KinFun,tspan,y0); % розв'язуємо задачу
fprintf('Результати при Kt = %3.1f:\n',Kt)
disp(' t XA T')
fprintf(' %6.2f %8.5f %10.5f\n',[t y]')
% малюємо графіки
figure('Position',[100 100 800 600]) % нове вікно фігури
plot(t,y(:,1),'k-') % графік XA(t)
grid('on') % сітка
box('on') % обмежувальний прямокутник
xlabel('\itt\rm, хв') % мітка осі Ox
ylabel('\itX_A') % мітка осі Oy
title(['Ступінь перетворення при \rm\itK_{t}\rm = ' sprintf('%3.1f',Kt)])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontSize',14,...
    'FontName','Times New Roman') % змінили шрифт
print(['XA' num2str(Kt*10)],'-dpng') % зберегли малюнок
figure('Position',[100 100 800 600]) % нове вікно фігури
plot(t,y(:,2),'k-') % графік T(t)
grid('on') % сітка
box('on') % обмежувальний прямокутник
xlabel('\itt\rm, хв') % мітка осі Ox
ylabel('\itT\rm, K') % мітка осі Oy
title(['Температура при \rm\itK_{t}\rm = ' sprintf('%3.1f',Kt)])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontSize',14,...
    'FontName','Times New Roman') % змінили шрифт
print(['T' num2str(Kt*10)],'-dpng') % зберегли малюнок
```

Поряд з задачами визначення показників функціонування реактору – визначення часу проведення реакції  $t_k$ , необхідного для досягнення заданого ступеня перетворення  $X_{AK}$ , вирішують питання, наприклад, організації ізотермічного режиму (рис. 3 та рис. 4). Тобто необхідним є визначення закономірностей регулювання витрат теплоносія у теплообмінних пристроях, які забезпечують підтримку заданої постійної температури реакційної суміші протягом необхідного часу проведення процесу. Треба визначити деякі умови теплоізоляції зовнішньої поверхні сорочки: теплообмін між теплоносієм та навколишнім середовищем повністю відсутній.

#### Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Завдяки високому рівню дослідження роботи теплообмінних пристроїв можна визначити характеристики утворення сучасного комплексного інноваційного виробництва.

Результати дослідження показали можливості підтримування ізотермічного режиму функціонування реактора ідеального змішування періодичної дії з теплообмінним пристроєм під час проведення екзотермічної реакції. Відповідно до цілей експерименту попередньо були визначені характеристики для РІЗ-П:

- дослідження і визначення математичного опису теплового балансу на підставі допущення про гідродинамічну ситуацію;
- допущення про параметри стану потоку холодного теплоносія такими, що не змінюються і, отже  $V_T, \rho_T, c_{pT} = const$ .

Представлені дослідження стимулюють розвинення великотоннажних технологій виробництва з різноманітної сировини та впровадження їх на Україні з метою розробки сучасної інженерії хімічних, біохімічних та харчових напрямків [8–12], а також сприяють розвитку створення інтелектуальної власності студентами та аспірантами [13–17].

#### Список літератури

1. Царьова З.М., Тovaжнiянский Л.Л., Орлова Є.І. Основи теорії хімічних реакторів. Комп'ютерний курс: [текст] підручник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 615 с.
2. Тovaжнiянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухкало С.І. Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 447 с.
3. Тovaжнiянский Л.Л., Бухкало С.І., Капустенко П.О. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. Підручник. – К.: ЦНЛ, 2011. 832 с.
4. Бухкало С.І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи): Підручник. – К.: ЦНЛ, 2014. – 456 с.
5. Бухкало С.І. Визначення загальної технології комплексних курсових проектів. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019 р.: у 4 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». С. 217.
6. Тovaжнiянский Л.Л., Бухкало С.І., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение. НТУ «ХПІ», Харьков, 2005. – 460 с.
7. Бухкало С.І. Особливості розробки об'єктів інтелектуальної власності зі студентами. XXV Межд. н-практ. конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (MicroCAD-2018) 17–19 мая 2018. X.: Ч. II, с. 201.
8. Bukhhalo S.I., Ageicheva A.O., Iglin S.P., Hlavcheva Yu. N., Miroshnichenko N.N., Olkhovska O.I., Zipunnikov M.M., Olkhovska V.O. Innovative complex projects'2018/2019 realization in the examples and tasks/ Вісник НТУ «ХПІ». – X.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 15(1340). – С. 80–88. doi: 10.20998/2220-4784.2019.15.14
9. Бухкало С.І. Структура потоків комплексного підприємства XXV Межд. н-практ. конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (MicroCAD-2017) 17-19 мая 2017. X.: Ч. III, – с. 14.
10. Прищенко О.П., Черногор Т.Т., Бухкало С.І. Деякі особливості проведення кореляційного аналізу. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». С. 320.
11. Сирку М.А., Бухкало С.І., Іглін С.П., Мірошніченко Н.М., Шкредов І.С., Пахнутова М.І., Шевчук Т.Р. Питання комплексного визначення властивостей сировини у межах курсових проектів. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019 р.: у 4 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». С. 342.
12. Ситник В.В., Яценко Б.С., Бухкало С.І., Сирку М.А., Касьян А.С., Оса О.В. Визначення експериментальних властивостей сировини у межах курсових проектів. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». С. 343.
13. Bukhhalo S.I., Bilous O.V., Demidov I.M. Rozrobka kompleksnogo antioksidantu iz ekstraktiv listja gorihu volos'kogo to kalenduly Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij. No.1/6(73), (2015), pp. 22–26. Harkiv: tehnologicheskij cent.
14. Tovazhnyansky L.L., Meshalkin V.P., Kapustenko P.O., Bukhhalo S.I. Energy efficiency of complex technologies of phosphogypsum conversion. Thoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 47, No. 3, (2013), pp. 225–230.
15. Bukhhalo S.I., Klemeš J.J., Tovazhnyansky L.L., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Y. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. Chemical Engineering Transactions, Vol. 70, (2018), pp.2047–2052.
16. Zipunnikov, Mykola; Bukhhalo, Svetlana; Kotenko, Anatolii. Researching The Process Of Hydrogen Generating From Water With The Use Of The Silicon Basis Alloys. French-Ukrainian Journal of Chemistry, [S.I.], v. 7, n. 2, p. 138–144, dec. 2019. doi:http://dx.doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144. <http://kyivtoulouse.univ.kiev.ua/journal/index.php/fruajc/article/view/258>.
17. Bilous, O., Sytnik, N., Bukhhalo, S., Glukhykh, V., Sabadosh, G., Natarov, V., Yarmysh, N., Zakharkiv, S., Kravchenko, T., & Mazaeva, V. (2019). Development of a food antioxidant complex of plant origin. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 6(11 (102)), 66–73.

doi:<http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186442>.  
<http://journals.uran.ua/ejet/article/view/186442>.

#### References (transliterated)

1. Tsarova Z.M., Tovazhnianskyi L.L., Orlova Ye.I. Osnovy teorii khimichnykh reaktoriv. Kompiuternyi kurs: [tekst] pidruchnyk. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2002. – 615 p.
2. Tovazhnianskyi L.L., Kosheleva M.K., Bukhhalo S.Y. Obshchaia khymycheskaia tekhnolohyia v prymerakh, zadachakh, laboratornykh rabotakh y testakh: Ucheb. posobyе. – M.: YNFRA-M, 2015. – 447 p.
3. Tovazhnianskyi L.L., Bukhhalo S.I., Kapustenko P.O. ta in. Zagal'na tekhnologija harchovoi promislivosti u prikladah i zadachah. Pidruchnik. – K.: CNL, 2011. – 832 p.
4. Bukhhalo S.I. Zagal'na tekhnologija harchovoi promislivosti u prikladah i zadachah (innovacijni zahodi) [tekst] pidruchnik. – K.: CNL, 2014. – 456 p.
5. Bukhhalo S.I. Vznachennja zagal'noi tekhnologii kompleksnih kursovih proektiv. Informacijni tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej XXVII Mizhn. n-prakt. konferencii (MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019 r.: u 4 ch. Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.І. – Kharkiv: NTU «KhPI», p. 217.
6. Tovazhnianskyi L.L., Bukhhalo S.I., Kapustenko P.A., Havin G.L. Osnovnye tekhnologii pishhevih proizvodstv i jenergosberezenie. NTU «KhPI», Kharkiv, 2005, – 460 p.
7. Bukhhalo S.I. Osoblivosti rozrobki ob'ektiv intelektual'noi vlasnosti zi studentami. XXV Mezhd. n-prakt. konf. «Informacionnye tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologija, obrazovanie, zdorov'e» (MicroCAD-2018) 17–19 maja 2018. Kh.: Ch. II, p. 201.
8. Bukhhalo S.I., Ageicheva A.O., Iglin S.P., Hlavcheva Yu. N., Miroshnichenko N.N., Olkhovska O.I., Zipunnikov M.M., Olkhovska V.O. Innovative complex projects 2018/2019 realization in the examples and tasks / Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – No. 15(1340), pp. 80–88. doi: 10.20998/2220-4784.2019.15.14
9. Bukhhalo S.I. Struktura potokiv kompleksnogo pidpriemstva XXV Mezhd. n-prakt. konf. «Informacionnye tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologija, obrazovanie, zdorov'e» (MicroCAD-2017) 17–19 maja 2017. – Kharkiv: Ch. III, p. 14.
10. Prishhenko O.P., Chernogor T.T., Bukhhalo S.I. Dejaki osoblivosti provedennja koreljacijnogo analizu. Informacijni tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej XXVII Mizhn. n-prakt. konferencii (MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019. Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.І. – Kharkiv: NTU «KhPI», p. 320.
11. Sirku M.A., Bukhhalo S.I., Iglin S.P., Miroshnichenko N.M., Shkredov I.S., Pahnutova M.I., Shevchuk T.R. Pitannja kompleksnogo viznachennja vlastivostej sirovini u mezhah kursovih proektiv. Informacijni tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej XXVII Mizhn. n-prakt. konferencii (MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019 r.: u 4 ch. Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.І. – Kharkiv: NTU «KhPI», p. 342.
12. Sitnik V.V., Jacenko B.S., Bukhhalo S.I., Sirku M.A., Kas'jan A.S., Osa O.V. Vznachennja eksperimental'nih vlastivostej sirovini u mezhah kursovih proektiv. Informacijni tekhnologii: nauka, tehnika, tekhnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej XXVII Mizhn. n-prakt. konferencii (MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019: Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.І. – Kharkiv: NTU «KhPI», p. 343.
13. Bukhhalo S.I., Bilous O.V., Demidov I.M. Rozrobka kompleksnogo antioksidantu iz ekstraktiv listja gorihu volos'kogo to kalenduly Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tekhnologij. No.1/6(73), (2015), pp. 22–26. Harkiv: tekhnologicheskij cent.
14. Tovazhnianskyi L.L., Meshalkin V.P., Kapustenko P.O., Bukhhalo S.I. Energy efficiency of complex technologies of phosphogypsum conversion. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 47, No. 3, (2013), pp. 225–230.
15. Bukhhalo S.I., Klemeš J.J., Tovazhnianskyi L.L., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Y. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. Chemical Engineering Transactions, Vol. 70, (2018), pp.2047–2052.
16. Zipunnikov, Mykola; Bukhhalo, Svetlana; Kotenko, Anatolii. Researching The Process Of Hydrogen Generating From Water With The Use Of The Silicon Basis Alloys. French-Ukrainian Journal of Chemistry, [S.I.], v. 7, n. 2, p. 138–144, dec. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144>. <http://kyivtoulouse.univ.kiev.ua/journal/index.php/fruajc/article/view/258>.
17. Bilous, O., Sytnik, N., Bukhhalo, S., Glukhykh, V., Sabadosh, G., Natarov, V., Yarmysh, N., Zakharkiv, S., Kravchenko, T., & Mazaeva, V. (2019). Development of a food antioxidant complex of plant origin. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 6(11 (102)), 66–73. doi:<http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186442>. <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/186442>.

Надійшла (received) 19.02.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бухкало Світлана Іванівна (Bukhhalo Svetlana Ivanovna, Bukhhalo Svetlana Ivanovna)** – кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1389-6921>; e-mail: [bis.khr@gmail.com](mailto:bis.khr@gmail.com)

**Іглін Сергій Петрович (Iglin Sergii Petrovich, Iglin Sergii Petrovich)** – кандидат технічних наук, професор кафедри прикладної математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9144-7427>; e-mail: [bis.khr@gmail.com](mailto:bis.khr@gmail.com)

**Ольховська Оксана Ігорівна (Olkhovskaya Oksana Igorevna, Olkhovska Oksana Igorivna)** – ст. викладач, кафедра менеджменту і опадаткування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [bis.khr@gmail.com](mailto:bis.khr@gmail.com)

**Ольховська Вікторія Олегівна (Olkhovskaya Viktoriya Olegovna, Olkhovska Victoria Olegovna)** – студентка ХНУРЕ, м. Харків, Україна; e-mail: [bis.khr@gmail.com](mailto:bis.khr@gmail.com)