

УДК 681.586.773

Й. І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В. Даля,
Сєверодонецьк;
О. І. ПРОКАЗА, канд. техн. наук, доцент СНУ ім. В. Даля,
Сєверодонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІАГНОСТИКИ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ ЗА СТАНОМ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Досліджуються біохімічні процеси (БХП) в шлунку людини на основі теорії реологічних незворотних фазових перетворень. Показано, що в шлунку проходять масо- тепло- та енергообмінні процеси, котрі супроводжуються біохімічними реакціями. Запропонована фізична модель реологічного переходу, при котрому шлунок являє собою зону реологічного перетворення (ЗРП) зі стоком маси та енергії. У ЗРП проходять БХП з відповідною швидкістю та їх розподіленням за координатами й часом. Співвідношення сталих часу динамічних процесів в ЗРП та швидкості стоку маси та енергії є одним з основних показників для діагностування стану здоров'я людини.

Ключові слова: людина, процес, метод, масообмін, енергообмін, реологія, перетворення, рівняння, теплота, концентрація.

Вступ. Дослідження процесів перенесення маси в біологічному організмі привело до подальшого, більш чіткого розуміння багатьох аспектів явищ, котрі виникають при різноманітних процесах їх захво-

рювання. Але причини зміни біохімічних процесів (БХП), пов'язаних з рухом матеріальних, теплових та енергетичних потоків у таких організмах, котрі викликають відхилення від нормованого стану здоров'я людини, а фактично появу захворювання до цього часу ще залишаються не вивченими як теоретично, так й експериментально. Явища перенесення кількості маси й теплової енергії в людському організмі відносяться до складних і взаємопов'язаних, що можуть проявлятися в різних аспектах, наприклад, зміні температури, кольорового забарвлення продуктів переробки матеріальних потоків, надмірного відкладання високомолекулярних жирів, появи побічних біохімічних процесів, котрі викликають такі негативні явища, як зараження окремих елементів та організму в цілому, відхилення складу крові тощо.

Як відомо [1-5], з метою функціональної діяльності людина періодично споживає харчові продукти, воду та повітря, котрі складають відповідні матеріальні потоки.

Для приймання та первинної переробки твердих і рідинних матеріальних потоків використовується шлунок, котрий фактично являє собою біохімічний реактор, а для повітря – легені, котрі являють собою абсорбер. Шлунок біологічного організму відноситься до складної біохімічної системи, яка містить в собі змішувач речовин, екстрактор, теплообмінник, дозатори, хімічний реактор, елементи попередньої ректифікації речовин тощо. У шлунку проходить деяка відгонка й абсорбція цінних продуктів екстракторного та біохімічного процесу, а створений залишок періодично відводиться в кишкову систему, яка призначена для вилучення потрібних організму речовин. Кубовий залишок з кишкової системи періодично виводиться з організму. Окрім того, шлунок являє собою універсальну електролітичну комірку, в якій проходить розділення солей, кислот і лугів на йони металів або гідрогену та молекулярний залишок. Наприклад, харчова сіль $NaCl$ розділяється на йон натрію Na (катіон) та йон хлору Cl_2 (аніон), вуглекислоти H_2CO_3 – на йон гідрогену H_2 та кисню O_2 (з CO_2) [6]. У свою чергу Cl_2 і H_2 створюють в шлунку соляну кислоту HCl , а кисень O_2 використовується для біохімічного окислення речовин органічного та неорганічного походження продуктів живлення [7, 8].

Легенева система виконує роль нагнітальної помпи, абсорбера кисню з повітря та концентратора кисню в потоці крові, який використовується для роботи синусового вузла серцево-судинної системи, живлення мозкової системи, створення різноманітних ферментів в життєбезпечуючих елементах організму (наприклад, підшлунковій системі, печінці та інших елементах), а також для БХП шлунку. Таким чином,

існує певний зв'язок між основними матеріальними потоками людського організму – матеріальним потоком у формі суспензії, котрий поступає в шлунок, і потоком газу, який видихається з легенів [9]. Задача полягає в тому, щоби показати, яке співвідношенні цих потоків є найбільш оптимальним для людського організму. У статті досліджуються БХП, котрі протікають у шлунку людського організму.

Аналіз досліджень та публікацій. Біохімічні процеси, котрі протікають в людському організмі проходять в рідинно-твердій фазі, котра являє собою суспензію відповідної густини. Остання постійно переміщується, що сприяє практично рівномірному її перетравлюванні. При підвищенні густини цієї суспензії у людини виникає потреба у вживанні води. Так як вода практично не дисоціюється в шлунку, то можна прийняти, що вона використовується в організмі людини як розчинник і для перенесення теплової енергії та розчинених в ній речовин від шлунку до інших частин організму. З метою ефективного перетравлювання органічних речовин у шлунок уводяться різноманітні ферменти, котрі створюють відповідний потік активних реагентів і каталізаторів. Таким чином, у шлунку проходять БХП, котрі пов'язані з теорією дифузії [10-11], теплопередачі, гідродинамікою [12-18]. Таке представлення біохімічної кінетики в шлунку людини дозволило отримати низку теоретично важливих результатів, розробити нові методи діагностики стану здоров'я людини та підвести науковий фундамент під теорією важливих біохімічних технологій при діагностуванні та лікуванні захворювань. Класична біохімічна кінетика [1, 3, 5] вивчає протікання БХП в ідеалізованих умовах: за сталою (як в часі, так і в просторі) температурою тіла та сталих концентраціях речовин. Найважливішими з фізичних процесів є дифузія початкових речовин, котрі уводяться в організм людини, і продуктів біохімічних реакцій, а також виділення та розповсюдження їх результату за рахунок перенесення теплових потоків та кількості маси від шлунку до інших біоструктурних елементів організму. На такі процеси сильно впливає характер руху потоків, що приводить до конвекційного перенесення кількості маси й теплової енергії. У науковій літературі процеси масо- та теплоперенесення описуються спрощеними нелінійними диференціальними рівняннями, в основу котрих покладені основні закони масо- та теплоперенесення Фіка, теплоперенесення Фур'є та кількості руху Ньютона. Загальними рівняннями перенесення для потоків, викликаних виштовхуючою силою, служать звичайні рівняння гідромеханіки. Рухомим механізмом у вимушених потоках є градієнт тиску або початкова швидкість. У такому разі рівняння руху, викликаного перенесенням маси, мають вигляд [10, 11, 13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\rho \nabla v + v \cdot \nabla \rho); \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla v); \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T, \quad (3)$$

де ρ - густина (або щільність) потоку перенесення; t - час перенесення; $v = v(x, y, z)$ - швидкість за координатами x, y, z ; ∇v - градієнт зміни швидкості; $\nabla \rho$ - градієнт зміни густини; ∇p - градієнт статичного тиску; μ - динамічна в'язкість речовини; c_p - питома теплоємність; ∇T - градієнт зміни температури; k - коефіцієнт теплопровідності.

Аналізуючи рівняння (1) – (3), не трудно бачити, що вони описують швидкість зміни того чи іншого інформативного параметра: густини ρ , швидкості руху маси речовини v і температури БХП T в деякому замкненому об'ємі, яким є шлунок людини. Такий об'єм, в якому проходить тільки перенесення маси, тепла та кількості руху у подальшому називатимемо зоною реологічного переходу (ЗРП). Такі процеси супроводжуються відповідними перетвореннями, у результаті котрих утворюється нова маса, виділяється тепла енергія, змінюються швидкості матеріальних і теплових потоків [19, 20]. Створені в результаті фазових перетворень нові масові й теплові потоки виводяться з ЗРП (у даному разі зі шлунку) з відповідною швидкістю і накопичуються (стікають) в інших об'ємах чи середовищах людського організму. Задача полягає у математичному описанні БХП на основі теорії реологічних фазових незворотних перетворень, котрі мають місце в шлунку, з метою діагностування різного роду захворювань і розробки неінвазивних методів їх визначення.

Математичні моделі БХП у шлунку біологічного організму.

Аналіз процесів, котрі протікають в шлунку людини формально можна описати системою нелінійних диференціальних рівнянь (1) – (3), якщо рахувати, що ЗРП являє собою безмежно малий одиничний імпульс, який створює безмежно малий стік маси, теплової енергії та кількості руху з нульовою швидкістю перенесення. Так як шлунок характеризується об'ємом V , який є функцією кількості маси M , котра поступила в нього за час ξ , то його можна формалізувати деякою інтегральною імпульсною дельта-функцією Дірака, ядром котрої є рівняння перенесення маси, тепла та кількості руху [21-22]. Таку імпульсну функцію у загальному випадку можна описати наступним рівнянням:

$$\delta_i(\theta) = \frac{d}{dt} f_i(\theta), \quad (4)$$

де $\delta_i(\theta)$ - дельта-функція Дірака i -го реологічного переходу; $f_i(\theta)$ - деяка довільна функція.

Формально в шлунку мають місце основні три реологічні перетворення: перетворення поступаючого в шлунок потоку речовин (первинні матеріальні потоки - ПМП) за рахунок БХП у вторинні матеріальні потоки (ВМП); перетворення ПМП за рахунок БХП у теплову енергію; перетворення ВМП за рахунок електролітичного розкладання (електролізу) в концентрацію іонів (аніони та катіони). Для першого реологічного перетворення, позначивши $f_i(\theta) = f_1(\theta_1)$, де θ_1 - час першого реологічного перетворення, а також прийнявши, що процес перенесення кількості маси є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{11}+0}^{\theta_{12}} f_1(\xi) \delta_1(\xi - \theta_{10}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{10} < \theta_{11}, \quad \theta_{10} \geq \theta_{12}; \\ f_1(\theta_{10} + 0) & \theta_{11} < \theta_{10} < \theta_{12}, \end{cases} \quad (5)$$

де ξ - деяка змінна; $\delta_1(\xi - \theta_{10})$ - ядро лінійного інтегрального перетворення; θ_{10} - середнє значення часу першого реологічного переходу.

Такий фазовий реологічний перехід описується рівнянням у вигляді:

$$f_1(\xi) = \frac{\partial \rho}{\partial \theta_1} = \operatorname{div} \left(D \nabla \rho \right) + \bar{v}_\rho \left(\mathbf{x}, \theta \right), \quad (6)$$

де D_ρ - коефіцієнт перетворення реакційної маси в шлунку за рахунок БХП; \bar{v}_ρ - середня швидкість БХП; \bar{v}_T - вектор напрямку зміни БХП, ∇ - лінійний оператор Лапласа.

Для другого реологічного перетворення, позначивши $f_i(\theta) = f_2(\theta_2)$, де θ_2 - час другого реологічного перетворення а також прийнявши, що процес перенесення кількості тепла є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{21}+0}^{\theta_{22}} f_2(\xi) \delta_2(\xi - \theta_{20}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{20} < \theta_{21}, \quad \theta_{20} \geq \theta_{22}; \\ f_2(\theta_{20} + 0) & \theta_{21} < \theta_{20} < \theta_{22}, \end{cases} \quad (7)$$

де ξ - деяка змінна; $\delta_2(\xi - \theta_0)$ - ядро лінійного інтегрального перетворення; θ_{20} - середнє значення часу другого фазового переходу.

Такий фазовий реологічний перехід можна описати наступним рівнянням:

$$f_2(\xi) = \frac{\partial T}{\partial \theta_2} = \text{div}_T(D \nabla T) + v_k(\bar{r}_k, \theta_1), \quad (8)$$

де D_T - коефіцієнт перенесення кількості тепла; \bar{v}_k - середня швидкість конвекційної складової теплового потоку; \bar{r}_k - вектор напрямку зміни температури шлунку.

Для третього реологічного перетворення, позначивши $f_i(\theta) = f_3(\theta_3)$, де θ_3 - час третього реологічного перетворення а також прийнявши, що процес перенесення кількості маси є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{31} + 0}^{\theta_{32}} f_3(\xi) \delta_3(\xi - \theta_{30}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{30} < \theta_{31}, \quad \theta_{30} \geq \theta_{32}; \\ f_3(\theta_{30} + 0) & \theta_{31} < \theta_{30} < \theta_{32}, \end{cases} \quad (9)$$

де ξ - деяка змінна; $\delta_3(\xi - \theta_{30})$ - ядро лінійного інтегрального перетворення; θ_{30} - середнє значення часу першого фазового переходу.

Такий фазовий реологічний перехід описується рівнянням у вигляді:

$$f_3(\xi) = \frac{\partial Q}{\partial \theta_3} = \text{div}_Q(D \nabla Q) + v_Q(r_Q, \theta_3), \quad (10)$$

де D_Q - коефіцієнт перенесення йонів в електроліті; \bar{v}_Q - середня швидкість конвекційного перенесення концентрації йонів; \bar{r}_Q - вектор напрямку зміни концентрації йонів електроліту.

З метою формалізації БХП, які проходять в шлунку людського організму, прийmemo, що всі три процеси проходять одночасно, тобто $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$, а швидкість конвекційного перенесення речовин є рівномірною у всіх напрямках. Тоді, позначивши, що $\bar{r}_\rho = \bar{r}_k = \bar{r}_Q = x$, з (6)–(10) отримуємо систему наступних взаємопов'язаних диференціальних рівнянь для реологічних фазових переходів:

Для першого реологічного перетворення:

$$\frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_\rho \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - v_\rho \frac{V_\Pi}{S_\Pi} \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x}, \quad (11)$$

де V_{Π} - об'єм шлунку; S_{Π} - його внутрішня поверхня; $v_p = k_{p0} \exp(-E_p / RT_p)$ - швидкість біохімічної реакції (БХР) [1/c]; k_{p0} - множник, який характеризує деяку нормовану швидкість БХР; E_a - енергія активації БХР; R - універсальна газова стала; T_p - температура БХР.

Так як температура БХР є розподілена за координатою x і часом θ , то, враховуючи сказане, рівняння (11) приймає такий вигляд:

$$\frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_p \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - v_p \exp\left[-\frac{E_p}{RT_p(\theta, x)}\right] \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x}, \quad (12)$$

де $v_p = k_{p0} V_{\Pi} / S_{\Pi}$ - деяка нормована лінійна швидкість конвекційного БХП.

Для другого реологічного переходу рівняння фазового незворотного перетворення приймає таку форму:

$$\frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_T \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} - v_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x}, \quad (13)$$

де $v_{kT} = V_{\Pi} / S_{\Pi} \tau_k$ - деяка нормована лінійна швидкість конвекційного перенесення тепла; τ_k - стала часу конвекційного перенесення тепла.

За аналогією попередніх фазових незворотних перетворень для третього реологічного переходу маємо:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial^2 Q(\theta, x)}{\partial x^2} - \frac{1}{\tau_Q} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}, \quad (14)$$

де τ_Q - стала часу електролітичного перетворення, яка є функцією як нових створюваних речовин в об'ємі шлунка, так і температури.

Для електролітичного процесу необхідна наявність початкових потенціалів між біореакційною масою U_M та стінкою шлунка U_C . Якщо рахувати, що потенціал стінки шлунка є сталим, тобто $U_C = const$, а початковий потенціал U_M маси зростає від нуля до U_C , то з достатньою точністю можна прийняти що процес зміни в часі потенціалу маси є аперіодичним і описується таким рівнянням:

$$\tau_Q \frac{dU_M}{d\theta} + U_M = U_C, \quad (15)$$

де $\tau_Q = D_U / \Delta U_C j$ - стала часу; D_U - жорсткість стінки шлунка; ΔU_C - максимальна різниця потенціалів; j - щільність струму, яку створюють йони при переході через стінку шлунка.

Враховуючи, що шлунок являє собою своєрідну електролітичну систему, то різницю потенціалів можна розрахувати за формулою Нернста [23]:

$$\Delta U_C = \frac{RT}{nF} f \ln Q_M / Q_C, \quad (16)$$

де R - універсальна газова стала; T - абсолютна температура; n - валентність йонів; F - стала Фарадея; f - коефіцієнт активності біомаси в шлунку.

У більшості випадків відношення Q_M / Q_C змінюється в невеликих межах, тому з достатньою точністю можна прийняти, що $\ln Q_M / Q_C = k_Q$.

З врахуванням сказаного (16) рівняння для сталої часу приводиться до такого вигляду:

$$\tau_Q = D_U n F / j R T f k_Q. \quad (17)$$

Підставивши (17) у рівняння (14), отримуємо:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x} - \frac{j R T f k_Q}{D_U n F} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}. \quad (18)$$

З [23] відомо, що електрохімічний еквівалент $k_{ex} = M / n F = m / q$, де M - молярна маса (кг/кмоль); n - валентність; q - перенесений заряд; m - маса виділених речовин. Визначивши множник $n F = q M / m$, а також приймаючи до уваги, що $q = C \Delta U_C = C E \bar{r}_{\Pi}$ - де C - електрична ємність тіла; E - напруженість електричного поля людини; \bar{r}_{Π} - приведений до кулі радіус шлунку. З врахуванням цього рівняння (18) приймає нас тупну форму:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} - f k_Q \frac{j m R T}{D_U C E \bar{r}_{\Pi}} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}. \quad (19)$$

Як показано в [20-22], в зоні фазових незворотних перетворень створюються нові речовини, енергія (наприклад, тепла), змінюється кількість руху, котрі являють собою відповідний стік, який виводиться з цієї зони з певною швидкістю v_c . Таким чином, якщо шлунок є склад-

ною зоною реологічних фазових незворотних перетворень, то структурно його можна показати, як показано на рис. 1.

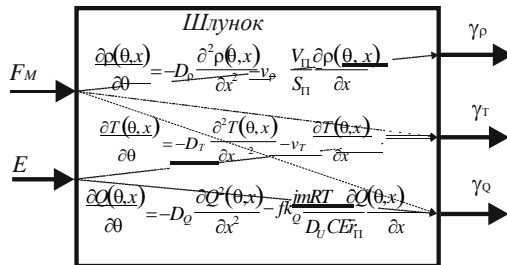


Рис. 1 – Структурна схема реологічних фазових незворотних перетворень в шлунку людини

На вхід шлунку поступає матеріальний потік масовою витратою F_M , який характеризується густиною ρ і температурою T , створюючи в ньому три основні вихідні потоки: матеріальний потік, котрий виводиться з шлунку з швидкістю стоку γ_ρ , тепловий потік, котрий виводиться з швидкістю стоку γ_T і потік іонів, котрий стікає зі швидкістю γ_Q . Напруженість електричного поля E шлунка тісно пов'язана з кількістю електричних зарядів q на його поверхні, котрі приймають участь в дисоціації кислото-лужних елементів. Окрім того, напруженість E разом з електричними зарядами створюють вектор зусилля $N = Eq$, котре, по-перше, діє на заряд q , а відповідним чином, на стінки шлунка, заставляючи його стискуватися чи розширюватися при БХП. Так як шлунок являє собою біохімічний реактор з гнучкою жорсткою стінкою, то стік матеріального потоку зі швидкістю γ_ρ визначатиметься як реакційним процесом, так і механічним переміщенням стінок шлунку, яку обумовлене силою N . Так як рухомою силою вихідного матеріального потоку є зусилля N , то стік цього потоку можна описати таким диференціальним рівнянням:

$$\tau_{2\rho}^2 \frac{d^2 \rho_c(t)}{dt^2} + \tau_{1\rho} \frac{d\rho_c(t)}{dt} + \rho_c(t) = k_1 N(t), \quad (20)$$

де $\tau_{1\rho} = k_D / \sqrt{D_U}$, $\tau_{2\rho} = \sqrt{M / D_U}$ - сталі часу стоку; M - реакційна маса шлунка; $\rho_c(t)$ - зміна густини переробленого продукту в шлунку за напрямком руху стінок шлунку за час t ; k_D - коефіцієнт демпфірування; D_U - жорсткість стінки шлунку; k_1 - коефіцієнт перетворення.

Якщо прийняти, що зусилля $N(t) = const$, то рівняння для швидкості стоку вихідного матеріального потоку матиме вигляд:

$$\gamma = \tau^2 \frac{d^2 \rho_c(t)}{dt^2} + \tau \frac{d \rho_c(t)}{dt} + \rho_c(t) \quad (21)$$

Термодинамічний режим шлунку залежить від багатьох факторів і стабілізується за рахунок відведення тепла кровоносною системою. Усталене значення температури шлунка для нормального стану людини дорівнює $36,6^\circ\text{C}$. Прийmemo, що відведення теплової енергії від біореакційної маси до стінки шлунка здійснюється конвекційним потоком, а далі через стінку до потоку крові, який протікає по його судинах. Таким чином, процес стоку тепла є двостадійними, а швидкість зміни температури стоку T_c можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$\gamma_T = \tau_{2Tc}^2 \frac{d^2 T_c(t)}{dt^2} + \tau_{1Tc} \frac{dT_c(t)}{dt} + T_c(t) \quad (22)$$

$$\text{де } \tau_{1Tc} = k_\tau \frac{m_c c_p}{\alpha_p S_T} \left[\frac{m_c c_p}{\alpha_p S_T} + \frac{\alpha_p S_T}{F_k c'_p + \alpha_p S_T} \right], \quad \tau_{2Tc} = \sqrt{k_\tau \frac{m_p c_p}{m_p c_p} \frac{m_c c_c}{(F_k c'_p + \alpha_p S_T)}}$$

- сталі часу; m_c, m_p - маса стінки шлунка та переробленого продукту в ньому відповідно; c_c, c_p - питома теплоємність стінки шлунка та продукту відповідно; α_p - коефіцієнт тепловіддачі продукту до стінки шлунка; S_T - поверхня тепловіддачі; F_k - масова витрати крові, яка проходить через стінки шлунка; c'_p - питома теплоємність крові.

Частина йонів, яка створюється в шлунку за рахунок електролізу, використовується для проведення вторинних БЗР, а частина – переходить через стінку і поглинається потоком крові. Для спрощення прийmemo, що стік йонів є одностадійним, а швидкість їх стоку описується наступним рівнянням:

$$\gamma_Q = \tau_{Qc} \frac{d^2 Q_c(t)}{dt^2} + \frac{dQ_c(t)}{dt}, \quad (23)$$

де $\tau_{Qc} = 1/k_{E0} \exp(-E_E / RT_p)$ - стала часу стоку; k_{E0} - стехіометрична швидкість стоку йонів; E_E - енергія активації реакції стоку йонів; R - універсальна стала; T_p - температура реакції йонів.

Рівняння (12), (13) і (18) з врахуванням стоку створених нових потоків приведемо до такої форми:

$$\tau \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = - \frac{D_\rho}{v_\rho} \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - L_\Pi \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x} + \rho, \quad (24)$$

де $\tau_\rho = \tau_{\rho0} \exp(E_p / RT_p)$ - стала часу біохімічного незворотного перетворення; $L_\Pi = V_\Pi / S_\Pi = const$ - характерний лінійний розмір шлунку; $\tau_{\rho0} = 1/k_{\rho0}$ - стехіометрична стала часу БХП;

$$\tau_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} = - \frac{D_T L_\Pi}{v_T} \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} - L_\Pi \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x} + T, \quad (25)$$

де $\tau_T = L_\Pi / v_T$ - стала часу конвекційного перенесення тепла;

$$\tau_Q \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = - \frac{D_Q L_\Pi \cdot D_U C E r_\Pi}{f k_Q j m R T} \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} - L_\Pi \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x} + Q, \quad (26)$$

де $\tau_Q = \frac{L_\Pi D_U C E r_\Pi}{f k_Q j m R T}$ - стала часу.

Підставивши в (24)-(26) рівняння (21)-(23), отримуємо наступну систему взаємопов'язаних нелінійних диференціальних рівнянь незворотних реологічних перетворень:

$$\begin{aligned} & \tau_\rho \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D_\rho}{v_\rho} \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} + L_\Pi \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x} = \\ & = \tau_{2\rho}^2 \frac{d^3 \rho(t)}{dt^3} + \tau_{1\rho} \frac{d^2 \rho(t)}{dt^2} + \frac{d\rho(t)}{dt}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \tau_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D L_{\Pi}}{v_T} \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} + L_{\Pi} \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x} = \\ & = \tau_{2c}^2 \frac{d^3 T(t)}{dt^3} + \tau_{17c} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \frac{dT(t)}{dt}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} & \tau_Q \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D_Q L_{\Pi} \cdot D_U C E_{\Pi}}{f k_Q j m R T} \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} + L_{\Pi} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x} = \\ & = \tau_{Qc} \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{dQ(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (29)$$

Як видно з рівнянь (27)-(29), реологічні перетворення (ліва частина рівнянь) містять сталі часу τ_{ρ} , τ_T і τ_Q . Останні характеризують швидкість зміни відповідно густини, температури та концентрації йонів при біохімічному перетворюванні речовин у шлунок. Так як між лівою та правою частинами диференціальних рівнянь існує рівність, то для здорового стану людини повинно зберігатися сталим співвідношення між сталими часу, котрі визначають швидкість реологічного перетворення та стоку, тобто відношення: $\tau_{\rho}/\tau_{\rho c} = k_{\rho 0} = const$, $\tau_T/\tau_{Tc} = k_{T0} = const$ і $\tau_Q/\tau_{Qc} = k_{Q0} = const$, де $k_{\rho 0}, k_{T0}, k_{Q0}$ - номінальні коефіцієнти співвідношення густини, температури та концентрації йонів відповідно. Відхилення цих коефіцієнтів від їх номінальних значень свідчить про стан здоров'я людини, тобто про наявність того чи іншого захворювання.

Висновок. Показано, що шлунок людини являє собою зону реологічного переходу, в котрій відбуваються незворотні фазові перетворення вхідного матеріального потоку у вигляді суспензії відповідної густини в основні три види вихідних потоків, до яких відноситься матеріальний потік біохімічного процесу, потік електролітичного процесу і потік теплової енергії. Ці потоки є взаємопов'язаними та описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Кожний реологічний перехід характеризується швидкістю фазового перетворення, розподіленням основних визначальних параметрів (густина $\rho(\theta, x)$ маси біохімічного процесу, його температура $T(\theta, x)$ і концентрація йонів $Q(\theta, x)$ електролітичного процесу) та швидкістю стоку продуктів перетворення. Вказується, що для нормального стану здоров'я людини повинна зберігатися рівність між швидкістю фазового реологічного перетворення та швидкістю стоку, котрі визначаються відповідними сталими

часу. У здоровому людському організмі зберігається відповідний баланс матеріальних, теплових та енергетичних потоків для котрих співвідношення сталих часу є сталими величинами. Відхилення цих коефіцієнтів від їх нормованого значення однозначно свідчить про процес захворювання людини. Так як сталі часу реологічного перетворення є функціями біохімічних параметрів, котрі можна визначати як лабораторними методами, так і технічними засобами, то вони можуть бути покладені в основу побудови нових неінвазивних методів діагностики стану здоров'я людини. Якщо $k_p > k_{p0}$, то це свідчить про збільшення ваги людини, яке може проявлятися за рахунок порушення обміну речовин, що призводить до так званого «ожиріння». При $k_p < k_{p0}$ настає процес зменшення ваги, котре може бути як за рахунок зменшення кількості поступаючої в шлунок поживної речовини, так і її калорійності або захворювання. Відхилення коефіцієнта співвідношення концентрацій йонів від його нормованого значення може призводити до появи захворювання підшлункової залози, печінки, почек та інших важливих внутрішніх органів, робота котрих пов'язана з виробництвом різноманітних гормональних речовин. Дослідження показують, що на роботу електролітичної комірки великий вплив чинить напруженість електричного поля шлунка, котра тісно пов'язана з напруженістю електричного поля тіла людини (аури електромагнітного поля). Тому вимірювальний контроль напруженості цього поля може стати одним з першочерговим процесом при діагностиці стану здоров'я людини. Окрім того, доцільно при діагностуванні стану здоров'я контролювати електричну ємкість людського організму, а також швидкість руху електричних зарядів при вимірювальному контролі ємкості. Подальша робота полягає в розробці методів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь масо- тепло- та енергоперенесення з метою визначення оптимальних параметрів при діагностуванні стану здоров'я людини та розробці методики для його виконання.

Список літератури: 1. Герд Г. Гастроэнтерология / Г. Герд. – Тюмень: Сибирский изд. дом, 1997. – 202 с. 2. Афанасьев Ю. И. Гистология, цитология и эмбриология: Учебник / Ю. И. Афанасьев, С. Л. Кузнецова, Н. А. Юрина. – М.: Медицина, 2004. – 724 с. 3. Адо А. Д. Патологическая физиология: Учебник / А. Д. Адо, М. А. Адо, В. И. Пыцкий – М.: Тринад-Х, 2000. – 686 с. 4. Судаков К. В. Физиология. Основы и функциональные системы / К. В. Судакова. – М.: Медицина, 1995. – 784 с. 5. Рысс Е. С. Заболевания органов пищеварения / Е. С. Рысс, Ц. Г. Малевич, Ю. И. Физзон-Рысс. – СПб.: Мининформагентство, 1995. – 399 с. 6. Кривцов А. Г. Оценка достоверности и эффективности современных методов неинвазивной диагностики / А. Г. Кривцов, Н. К. Ходарева, А. Е. Кудавев. – Ростов на Дону: Артемида, 2010. – 130 с. 7. Сотников В. Н. Значение эндоскопической рН-метрии в определении кислотопродуцируемой функции желудка. Пособие для врачей / В. Н. Сотников, Т. К. Дубинская, А. В. Волова [и др.]. – М.: Российская медицинская академия

хронического образования, 2005. – 35 с. **8. Григорьев П.Я.** Диагностика и лечение хронических болезней органов пищеварения / П. Я. Григорьев, П. Э. Яковенко. – М.: Медицина, 1990. – 384 с. **9. Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с. **10. Рамм В.М.** Абсорбционные процессы в химической промышленности / В. М. Рамм. – М.: Госхимиздат, 1951. – 386 с. **11. Берд Р.** Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – М.: Химия, 1974. – 688 с. **12. Баррер Р.** Диффузия в твердых телах / Р. Баррер. – М.: Издательство, 1948. – 504 с. **13. Таганов И.Н.** Моделирование процессов массо- и энергопереноса / И. Н. Таганов. – Л.: Химия, 1979. – 203 с. **14. Темпел Б.** Хемосорбция / Б. Темпел. – М.: Наука, 1958. – 382 с. **15. Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Машгиз, 1962. – 368 с. **16. Лыков А.В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с. **17. Лыков А. В.** Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 389 с. **18. Эккерт Э.Р.** Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт., Р. М. Дрейк. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 562 с. **19. Гораздовский Т.Я.** Домены реологических полей / Т. Я. Гораздовский. // ДАН СССР. – 1986. – Т. 287, №5. – С.1118-1122. **20. Стенцель Й.И.** Фотоколориметричні газоаналізатори. Монографія / Й. І. Стенцель. – К.: ІСДО, 1995. – 126 с. **21. Стенцель Й. І.** Принцип реологічних переходів при діагностуванні роботи серцевої системи електрокардіографічним методом / Й. І. Стенцель., А. В. Рябіченко, Л. І. Петросян [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2013. – № 34(1007). – С. 24-31. **22. Стенцель Й. І.** Вимірювання в хімічній технології. Підручник / Й. І. Стенцель, О. Б. Целіцєв, М. Г. Лорія. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 480 с. **23. Кухлинг Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gerd, G. *Gastrojenterologija*. – Tjumen: Sibirskij izd. dom, 1997. 2. Afanas'ev, Ju. I., S. L. Kuznecova and N. A. Jurina. *Gistologija, citologija i jembiriologija: Uchebnik*. Moskow.: Medicina, 2004. 3. Ado, A. D., M. A. Ado and V. I. Puckij. *Patologicheskaja fiziologija: Uchebnik*. Moskow: Triada-H, 2000. 4. Sudakov, K. V. *Fiziologija. Osnovy i funkcional'nye sistemy*. Moskow: Medicina, 1995. 5. Ryss, E. S., C. G. Malevich and Ju. I. Fishzon-Ryss. *Zabolevanija organov pishhevarenija*. SaintPetersburg: Mininformagenstvo, 1995. 6. Krivcov, A. G., N. K. Hodareva and A. E. Kudaev. *Ocenka dostovernosti i jeffektivnosti sovremennyh metodov neinvazivnoj diagnostiki*. Rostov-on-Don: Artemida, 2010. 7. Sotnikov, V. N. etal. *Znachenie jendoskopicheskoj rN-metrii v opredelenii kislotoproduciruemoj funkcii zheludka. Posobie dlja vrachej*. Moskow: Rossijskaja medicinskaja akademija poslediplomnogo obrazovanija, 2005. 8. Grigor'ev, P. Ja., P. Je. Jakovenko. *Diagnostika i lechenie hronicheskikh boleznej organov pishhevarenija*. Moskow: Medicina, 1990. 9. Frank-Kameneckij, D. A. *Diffuzija i teploperedacha v himicheskoj kinetike*. – Moskow: Nauka, 1987. 10. Ramm, V. M. *Absorbcionye processy v himicheskoj promyshlennosti*. Moskow: Goshimizdat, 1951. 11. Berd, R., V. St'juart and E. Lajtfut. *Javlenija perenosa*. Moskow: Himija, 1974. 12. Barrer, R. *Diffuzija v tverdyh telah*. Moskow: Izdatinlit., 1948. 13. Taganov, I. N. *Modelirovanie processov masso- i jenergoperenosa*. Leningrad: Himija, 1979. 14. Tempel, B. *Hemosorbcija*. Moskow: Nauka, 1958. 15. Kutateladze, S. S. *Osnovy teorii teploobmena*. Moskow: Mashgiz, 1962. 16. Lykov, A. V. *Teorija teploprovodnosti*. Moskow: Vyssh. shk., 1967. 17. Lykov, A. V., Ju. A. Mihajlov. *Teorija teplo- i massoperenosa*. Moskow: Gosjenergoizdat, 1963.-389 18. Jekkert, Je. R., R. M. Dreyk. *Teorija teplo- i massoobmena*. Moskow: Gosjenergoizdat, 1962. 19. Gorazdovskij, T. Ja. "Domeny reologicheskikh polej." *DAN SSSR*. No 287. 5. 1986. 1118-1122. 20. Stentsel', Y. I. *Fotokolorymetrychni hazoanalizatory. Monografija*. Kiev: ISDO, 1995.-126 21. Stentsel', Y. I., etal. "Pryntsyep reolohichnykh perekhodiv pry diahnostuvanni roboty sertsevoji systemy elektrokardiografichnym metodom." *Visnyk NTU «KhPI»*. *Zbirnyk naukovykh prats'.* Seriya: *Elektroenerhetyka ta peretvoryuval'na tekhnika*. No. 34 (1007). 2013. 24-31. 22. Stentsel', Y. I.,

O. B. Tselishchev and M. H. Loriya. *Vymiryuvannya v khimichniy tekhnolohiyi. Pidruchnyk.* – Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalya, 2007. **23**. Kuhling, H. *Spravochnik po fizike.* Moscow: Mir, 1982.-520

Надійшла (received) 30.04.2015