

В.О. Бойко
М.О. Масліков, канд. техн. наук
М.О. Прядко, д-р техн. наук

ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ І ТЕМПЕРАТУРИ ДИФУЗІЙНОГО СОКУ

Виділено чинники впливу на процес тепло-масообміну між буряковою стружкою та екстракційною речовиною, запропоновано методику визначення концентрації і температури бурякової стружки та дифузійного соку для похилого дифузійного апарату.

Ключові слова: теплообмін і масообмінні процеси, екстракція, дифузія, бурякова стружка, температура, екстрагент.

Одним із напрямів зменшення енергоємності бурякоцукрового виробництва є визначення і підтримання оптимальних умов роботи теплотехнологічного обладнання, од яких залежить ритмічність виробництва, якість та собівартість продукції, а також продуктивність всього підприємства. Цьому сприяє розроблення й використання математичних моделей для вивчення та моделювання тепломасообмінних процесів, конфігурації теплового обладнання на стадії його розробки, а також для оптимального автоматичного керування обладнанням під час експлуатації.

Дифузійна установка є одним із найважливіших елементів теплотехнологічного комплексу бурякоцукрового виробництва. Її модель розглядається як складова математичної моделі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу і базується на моделюванні екстракції цукру із буряку.

Механізм екстракції полягає у перенесенні екстрагованої речовини із центра твердої частини до поверхні поділу фаз за допомогою молекулярної дифузії, а при ускладненні цього механізму іншими явищами (розчиненням, набуханням та ін.) — за допомогою масопровідності, та перенесенні речовини від поверхні поділу фаз до екстрагента за допомогою конвективної дифузії. З літератури відомі математичні залежності, що описують ці процеси.

Процес вільної (молекулярної) дифузії цукру описано законом А. Фіка:

$$dS = -DF(dC/dx)dt, \quad (1)$$

де dS — маса речовини, що продифундувала за час dt через площу поверхні F ; dC/dx — градієнт концентрації, що є рушійною силою процесу дифузії, D — коефіцієнт дифузії (кількість речовини, що продифундувала за одиницю часу через одиницю поверхні при різниці концентрацій 1 % в напрямку нормалі до поверхні F).

Згідно з теорією протитокової екстракції цукру з бурякової стружки П. Силін отримав рівняння:

$$AVlt = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \lg \frac{\alpha - 1 + \frac{C_1}{C_2}}{\alpha \frac{C_1}{C_2}}, \quad (2)$$

The factors of influence are selected on the process of heat exchange and mass-transfer between the beet shaving and extraction matter, the method of determination of concentration and temperature of the beet shaving and diffusive juice is offered for a sloping diffusive vehicle.

Key words: heat exchange and mass-transfer processes, extraction, diffusion, beet shaving, temperature, extract.

де A — експериментальний коефіцієнт, що враховує неоднорідність розмірів стружки, вплив термодифузії, конструкцію дифузійної установки і режим її роботи; V — температурний фактор, $V = T/1000\mu$; T — абсолютна температура середовища; μ — в'язкість води при температурі T , МПа · с; l — довжина 100 г стружки, м; τ — тривалість активної дифузії, хв; α — коефіцієнт відбору дифузійного соку — відношення маси відбору дифузійного соку до маси переробленого буряка, кг/кг.

С. Дроновим розроблено динамічну теорію дифузії. За аналогією з теплопровідністю основні робочі рівняння для дифузії виведено зі спільного розв'язання диференціального рівняння закону Фіка і рівняння, аналогічного закону охолодження Ньютона. У цій теорії матеріалом, з якого вилучається речовина є бурякова стружка, а точніше її "нормальний" сік. Дифундованою речовиною є цукор, а екстракційна (робоча) речовина — чиста вода, конденсат, жомопресова вода. У разі постійної різниці концентрацій, температури й інших умов рівняння закону Фіка набуває вигляду

$$S = - \frac{D_m(C - C_x)Afz}{\delta/4}. \quad (3)$$

Рівняння дифузії цукру конвекцією для тих самих умов:

$$S = \beta(C_x - c)Afz, \quad (4)$$

де S — кількість цукру, що продифундувало за час z ; C — концентрація цукру в нормальному соку на відстані одної четвертої товщини бурякової стружки ($\delta/4$), %; C_x — процент концентрації цукру на поверхні бурякової стружки, %; c — концентрації цукру в рухомій екстракційній рідині (воді), %; f — питома поверхня стружки, m^2/kg ; z — час дифундування, с; D_m — молекулярний коефіцієнт дифузії, $kg/m \cdot s$; β — константа швидкості дифузії або конвективний коефіцієнт дифузії, $kg/m^2 \cdot s$; δ — товщина бурякової стружки, м; A — кількість нормального соку, кг.

У рівнянні (3) в знаменнику стоїть значення товщини стружки, поділене на 4. Це пояснюється тим, що цукор в нормальному соку за сталого процесу концентрується на 1/4 товщини стружки (рис.1). У зв'язку з малою товщиною прийнято, що падіння концентрації цукру від її середини йде за прямо пропорційним законом.

Прирівнюючи рівняння (3) та (4), знайдемо вираз для загального коефіцієнта дифузії:

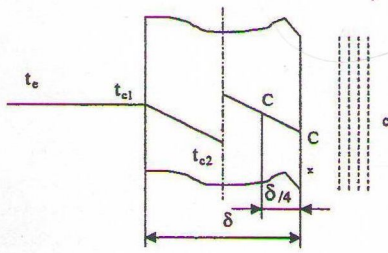


Рис. 1. Зміна температури і концентрації цукру у буряковій стружці

$$D_{\text{аар}} = \frac{1}{\frac{\delta}{4D_m} + \frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

Згідно з дослідними даними [2] молекулярний коефіцієнт дифузії:

$$D_m = \frac{2,3\delta}{4 \cdot (\alpha + 1) f z} \lg \frac{C_1 - C_2}{C_1 - C_2}, \quad (6)$$

де C_1, C_1'' — відповідно початкова та кінцева концентрація цукру в нормальному соку; C_2, C_2'' — відповідно початкова та кінцева концентрація цукру в екстракційній речовині (вода, дифузійний сік).

При експериментальному визначенні конвективного коефіцієнта дифузії були отримані такі узагальнювальні залежності:

$$\text{критерій Нуссельта } Nu = \frac{\beta d_{\text{ек}}}{D_m} \text{ і } Nu = 0,049 \left(\frac{\omega d_{\text{ек}}}{\nu} \right)^{1,8}; \quad (7)$$

$$\text{критерій Маргуліса } M = \frac{\beta}{\omega} \text{ і } M = 0,79 \omega \left(\frac{\omega d_{\text{ек}}}{\nu} \right)^{0,83} 10^{-4}; \quad (8)$$

де $d_{\text{ек}}$ — лінійний розмір міжстружкового простору, м; ω — лінійна швидкість руху екстракційної речовини, м/с; ν — кінематична в'язкість.

На конвективний коефіцієнт дифузії впливають: швидкість і режим руху екстракційної речовини, її фізичні й дифузійні властивості, форма і розмір стружки та конструктивні особливості дифузійного апарату.

За динамічною теорією С. Дронова, визначальним параметром процесу екстракції є загальний коефіцієнт дифузії, складовими якого є молекулярний та конвективний коефіцієнти. Значніший вплив має перший: від його збільшення у 2 рази загальний коефіцієнт дифузії збільшується у 1,45 рази. Від збільшення у 2 рази конвективного коефіцієнта останній зростає лише у 1,23 рази.

За існуючої нормативної методики теплотехнологічного розрахунку дифузійної установки цукрового заводу температура дифузійного соку, вміст цукру в ньому та у жомі приймають нормативними. Адекватна математична модель дає змогу з достатньою точністю розраховувати їх значення, маючи вихідні дані, залежні від якості сировини, яка надходить на переробку (вміст цукру в буряку D_r , вміст сухих речовин в нормальному соку $CP_{\text{н}}'$, чистота нормального соку $Ч_{\text{н}}'$, температура цукрового буряку $t_{\text{бур}}$), а також параметри, що залежать від конструктивних особливостей дифузійного апарату та регламенту ведення сокодобування (якість стружки l , чистота дифузійного соку $Ч_{\text{д}}'$, температура стружки $t_{\text{стр}}$).

Розроблена нами методика розрахунку складається з трьох етапів.

І етап — визначення реального часу перебування стружки в дифузійному апараті. За даними А. Бурими час перебування бурякової стружки у дифузійній установці визначається як час контакту стружки з екстракційною речовиною:

$$\tau = \frac{11,3(D_{\text{ш}}^2 - d^2)LK\psi\eta q\varphi_{\text{зап}} m \varepsilon}{A}, \quad (9)$$

де $D_{\text{ш}}$ — діаметр шнека, м; d — діаметр вала, м; L — довжина шнека, м; K — конструктивний коефіцієнт; ψ — коефіцієнт, що враховує перекриття шнеків; η — коефіцієнт, що враховує збільшення перетину, який займає стружка, по діаметру жолоба; q — питома навантаження стружки, кг/м³; $\varphi_{\text{зап}}$ — коефіцієнт наповнення апарата; m — кількість шнеків; ε — експлуатаційний коефіцієнт; A — продуктивність апарату по буряку, т/добу.

На рис. 2 наведено залежність часу перебування бурякової стружки в дифузійному апараті Dds від числа обертів шнеків за 1 хв [3]. Оскільки у формулі (9) час перебування стружки в апараті не залежить від числа обертів шнеків, за даними рис. 2 нами знайдено інтерполяційну функцію

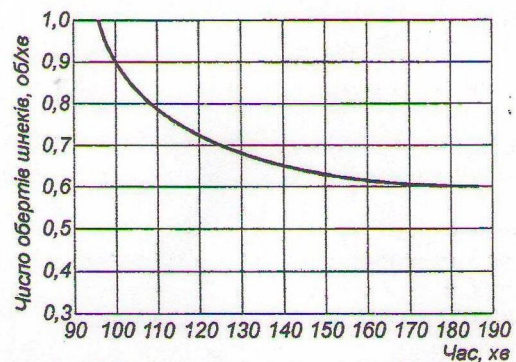


Рис. 2. Графік залежності часу перебування бурякової стружки в дифузійному апараті Dds від числа обертів шнеків за 1 хв

$$K_{\text{об}}(n_{\text{ш}}) = f(n_{\text{ш}}), \quad (10)$$

з урахуванням якої рівняння (9) набуває вигляду

$$\tau(n_{\text{ш}}, \varphi, A) = \frac{K_{\text{об}}(n_{\text{ш}})(D_{\text{ш}}^2 - d^2)LK\psi\eta q\varphi_{\text{зап}} m \varepsilon}{A}. \quad (11)$$

Отже, рівняння (11) враховує частоту обертання шнеків, коефіцієнт наповнення і продуктивність апарату.

II етап — розрахунок теплообміну в дифузійному апараті з визначенням зміни температури стружки та екстракційної речовини вздовж апарату.

Під час взаємодії фаз в екстракторі ускладнено підведення теплоти до частинок твердої фази. Для нагрівання твердих частинок як теплоносії використовують екстрагент. Коли співвідношення витрати фаз (коефіцієнт відкачки) в процесі екстрагування набагато більше одиниці, нагрівання твердих часток до потрібної температури в кожній зоні не викликає великих труднощів. А коли співвідношення витрати фаз близьке до одиниці, нагрівання твердих частинок ускладнюється. Тому під час розрахунку двошнекового дифузійного апарату слід застосовувати метод, який дає змогу з достатнім ступенем точності визначати розподіл температури в зонах.

Для розрахунку тепломасообміну під час екстракції в дифузійному апараті нами взято метод, розроблений Г. Аксельрудом, що дає можливість з необхідною точністю враховувати масопередачу в процесі екстракції.

Розрахунок процесу теплообміну виконано інтервальним методом, який полягає в тому, що в часі (у процесі переміщення стружки вздовж апарата) весь процес поділяється на m інтервалів такої величини, щоб на кожному з них значення α , λ , γ можна було вважати сталими [1].

Рівняння безрозмірної температури на інтервалі θ має такий вигляд:

$$\theta = v_i / v_{i-1} = f(Bi_r, Fo_r, r), \quad (12)$$

де v_i — надлишкова температура екстрагента на i -у інтервалі, відрахована від середньої температури частинок; Bi_r — тепловий критерій Біо, $Bi_r = \alpha R / \lambda$ (α — коефіцієнт тепловіддачі від екстрагента до твердих частинок, Вт/(м²К); R — еквівалентний радіус частинок, м; λ — коефіцієнт теплопровідності частинок, Вт/(мК); Fo_r — тепловий критерій Фур'є, $Fo_r = \alpha \tau / R^2$ (α — коефіцієнт температуропроводності твердих частинок, м²/с; τ — час процесу, с); r — співвідношення витрат екстрагента та твердих частинок (коефіцієнт відкачки).

Форму стружки розглядаємо як циліндричну, тому для нескінченного циліндра:

$$\theta_i = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4Bi_r^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi_r^2)} e^{-\frac{r-1}{r} \mu_n^2 Fo_r}, \quad (13)$$

де μ_n — корні характеристичного рівняння.

За величиною безрозмірної надлишкової температури можна знайти величину приросту температури екстрагента на розраховуваній ділянці:

$$\Delta t_i = v_{i-1} \frac{1 - \theta_i}{r - 1}. \quad (14)$$

Значення в кінці i -го інтервалу температури екстрагента та твердих частинок

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i. \quad (15)$$

Визначивши із формули (12) $v_i = v_{i-1} \cdot \theta_i$, знаходимо значення температури твердої частинки в кінці i -го розрахункового інтервалу:

$$\bar{t}_i = t_i - v_i. \quad (16)$$

Маючи температуру бурякової стружки \bar{t}_n і розчинника (барометричної води, конденсату) t'_n , розрахунок проводимо за такою методикою. Попередньо задаємося значенням надлишкової температури екстрагента v_n і розраховуємо всі m інтервали, після чого отримуємо попереднє (розрахункове) значення температури розчинника, що надходить у апарат t''_n .

Проводимо коригування температурних кривих: розтягуємо (стягуємо) їх відносно осі $t'_n - t''_n$ таким

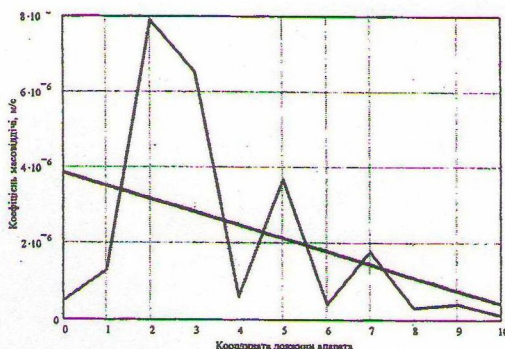


Рис.3. Графік розподілу коефіцієнта масовіддачі вздовж дифузійного апарата

чином, щоб лінія температури рідини проходила через задану початкову температуру t'_n . Коефіцієнт розтягування (стягування)

$$\varphi = (t'_n - \bar{t}_n) / (t''_n - \bar{t}_n). \quad (17)$$

Відкориговані температури відповідно екстрагента та стружки такі:

$$t'_i = \bar{t}_n + \varphi \cdot (t''_i - \bar{t}_n); \quad (18)$$

$$\bar{t}_i = \bar{t}_n + \varphi \cdot (t_i - \bar{t}_n). \quad (19)$$

III етап — визначення за даними розподілу температури залежних від неї параметрів та зміни концентрації цукру в стружці й екстракційній речовині.

Визначаємо середню (між екстрагентом і стружкою) температуру для визначення за допомогою рівняння (5) молекулярного коефіцієнта дифузії D_m (внутрішня задача).

На рис.3 зображено графік розподілу коефіцієнта масовіддачі (зовнішня задача) вздовж дифузійного апарата (ламана лінія — експериментальні дані, похила лінія — апроксимована функція). У розрахунку використано апроксимовану функцію залежності коефіцієнта масовіддачі від координати довжини апарата:

$$\beta(x) = (-3.4545 \cdot x + 38,636)10^{-7} \quad (20)$$

де x — координата довжини апарата ($0 \leq x \leq 1$).

Розрахунок кінцевих концентрацій цукру в екстракційній речовині та стружці (жомі) проводимо за аналогічною методикою.

Таблиця 1

Розрахункові величини кінцевої температури екстракційної речовини

Відбір дифузійного соку, % до маси буряка	Початкова температура стружки, °С			
	0	10	15	20
115	16,61	27,54	32,36	36,75
120	20,14	30,07	34,42	38,36
125	23,25	32,26	36,18	39,70
130	25,95	34,13	37,64	40,79
135	28,30	35,70	38,86	41,65
140	30,37	37,05	39,87	42,34
145	32,20	38,21	40,71	42,87
150	33,73	39,12	41,33	43,22

Розрахункові величини кінцевої температури екстракційної речовини, кінцевої концентрації цукру в екстракційній речовині та стружці подано відповідно у таблицях 1, 2, 3. Розрахунки виконані для підприємства потужністю 2400 т буряка за добу, дигестії буряка 16 %, початкової температури екстракційної речовини 65°С, температури нагрівної пари 105°С.

Таблиця 2

Розрахункові величини кінцевої концентрації цукру в екстракційній речовині

Відбір дифузійного соку, % до маси буряка	Початкова температура стружки, °С			
	0	10	15	20
1	2	3	4	5
115	14,621	14,637	14,645	14,652
120	14,079	14,091	14,096	14,101
125	13,557	13,565	13,569	13,573
130	13,062	13,068	13,07	13,073
135	12,597	12,601	12,603	12,605

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5
140	12,162	12,165	12,166	12,167
145	11,755	11,757	11,758	11,758
150	11,375	11,376	11,377	11,377

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5
140	0,178	0,174	0,172	0,171
145	0,159	0,157	0,156	0,155
150	0,142	0,14	0,139	0,139

Таблиця 3

Розрахункові величини кінцевої
концентрації цукру в стружці (жомі)

Відбір дифузійного соку, % до маси буряка	Початкова температура стружки, °С			
	0	10	15	20
115	0,39	0,371	0,363	0,354
120	0,309	0,296	0,289	0,283
125	0,258	0,248	0,243	0,238
130	0,223	0,216	0,213	0,209
135	0,198	0,193	0,191	0,188

Висновки. Розроблена нами методика може бути використана для вивчення та моделювання тепломасообмінних процесів, конфігурації теплового обладнання на стадії його розроблення, а також для оптимального автоматичного керування обладнанням під час експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лысянский В.М., Гребенюк С.М. Экстрагирование в пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1987. — 188 с.

Надійшла до редколегії 17.03.06 р.