

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСТРАКЦІЇ ТА РОЗЧИНЕННЯ В ПОЛІ ГРАВІТАЦІЙНИХ АБО ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ

© Білонога Ю.Л., 2005

Показано зв'язок критеріїв оптимізації гравітаційної та відцентрової екстракції ( $B$ ,  $B_{ц}$ ) з оптимальним критерієм Вебера. Подано експериментальний матеріал з інтенсивності екстракції різних фракцій подрібнених частинок чаю у воді за температури 70 °С в полі гравітаційних та відцентрових сил, що підтверджує розрахунки за допомогою критеріїв оптимізації.

It has been shown the connection of the optimization criteria of gravitational and centrifugal extraction ( $B$ ,  $B_{ц}$ ) with the optimal Weber criterion. The experimental material of studying of the extraction intensity of different fractions of shattered corpuscles of the tea in water in temperature of 70 °C in the field of gravitational and centrifugal forces has been adduced, which confirmed the calculation with the help of the optimization criteria.

**Вступ.** Під час виробництва лікарських препаратів важливе місце займає процес екстракції з подрібненої сировини рослинного або тваринного походження [1]. Екстракція в промислових умовах може відбуватися із застосуванням різноманітної апаратури, яка інтенсифікує процес, уможливорює провести його з максимальною продуктивністю [1].

**Постановка проблеми.** Важливе місце в підготовчих процесах перед екстракцією в системі тверде тіло-рідина займає подрібнення сировини. Це дає змогу істотно збільшити фактичну площу контакту тверде тіло-екстрагент та інтенсифікувати процес.

**Постановка задачі.** З метою вибору оптимальних параметрів подрібнення сировини перед процесом екстракції та використовуючи загальновідоме критеріальне рівняння при екстракції (1) [1, с. 436; 2, с. 136]

$$Nu_{\theta} = 0,8 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_{\theta}^{0,33}, \quad (1)$$

нами методом комп'ютерного розрахунку [3], а також методом розмірностей [4] виведено критерій оптимізації гравітаційної (а) та відцентрової (б) екстракції ( $B$ ,  $B_{ц}$ ) відповідно (2):

$$B = 3,076 \sqrt[3]{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \cdot \rho_c^2}{\mu^4 g (\rho_q - \rho_c)}}; \quad (2a)$$

$$B_{ц} = 3,076 \sqrt[3]{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \cdot \rho_c^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_q - \rho_c)}}. \quad (2б)$$

При цьому виведено також рівність для розрахунку оптимальної товщини ламінарного ( $\delta$ ) шару, що виникає під час турбулентного осадження твердої або диспергованої рідкої частинки в рідкому середовищі (3)

$$\delta_{опт.} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{g (\rho_q - \rho_c) \rho_c}}; \quad (3a)$$

$$\delta_{ц опт.} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\omega^2 r (\rho_q - \rho_c) \rho_c}}; \quad (3б)$$

де  $\delta_{\text{опт}}$ ,  $\delta_{\text{чопт}}$  – оптимальна товщина  $\text{Л}$ -шару навколо частинки для умов гравітаційної або відцентрової екстракції відповідно, м;  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$  – густина подрібненої та суцільної фаз відповідно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$ ,  $\omega^2 r$  – прискорення гравітаційне та доцентрове відповідно,  $\text{м/с}^2$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість розчинника, Па·с;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідкого середовища, Н/м;  $\text{os}\theta$  – гідрофільність матеріалу частинки;  $Nu_{\text{д}}$  – дифузійний критерій Нуссельта;  $Re$  – критерій Рейнольдса;  $Pr_{\text{д}}$  – критерій Прандтля (дифузійний).

**Отримані результати.** Незважаючи на те, що критерії  $B, B_{\text{ч}}$  (2) і рівності (3) виведені на основі критеріального рівняння (1), що несе у собі великий масив експериментальних даних, нами проведено серію експериментів для підтвердження виведених співвідношень. Експерименти проводилися на подрібнених частинках листочків чаю, які віддають екстракт у воду. Сировина рослинного походження була вибрана в такий спосіб, щоб екстракт, який виділявся в процесі осадження твердих частинок, був поляризаційно оптично активим розчином, тобто зміна концентрації екстракту чаю у воді фіксувалася за допомогою поляриметра кругового СМ-3. Листки чаю подрібнювалися, а потім піддавалися ситовому аналізу. Використовували такі сита: № 1 з отвором сита  $\Delta_1 = 0,5$  мм; № 2 з отвором сита  $\Delta_2 = 1$  мм; № 3 з отвором сита  $\Delta_3 = 1,5$  мм; № 4 з отвором сита  $\Delta_4 = 2$  мм; № 5 з отвором сита  $\Delta_5 = 2,5$  мм; № 6 з отвором сита  $\Delta_6 = 3$  мм. Після просіювання частинок чаю отримали фракції з таким середнім діаметром: 1. –  $d_i < 0,5$  мм; 2. –  $d_i = (0,5-1)$  мм; 3. –  $d_i = (1-1,5)$  мм; 4. –  $d_i = (1,5-2)$  мм; 5. –  $d_i = (2-2,5)$  мм; 6. –  $d_i = (2,5-3)$  мм.

#### Осадження в полі гравітаційних сил

Осадження частинок проводили в дослідній колбі. Для досліду брали  $m = 240$  мгм кожної фракції. Частинки чаю осаджували у воді за температури  $t = 70$  °С, причому дослід повторювали двічі. Для підвищення коректності експерименту частинки чаю продували сухим конвективним повітрям за допомогою установки (рис. 1).

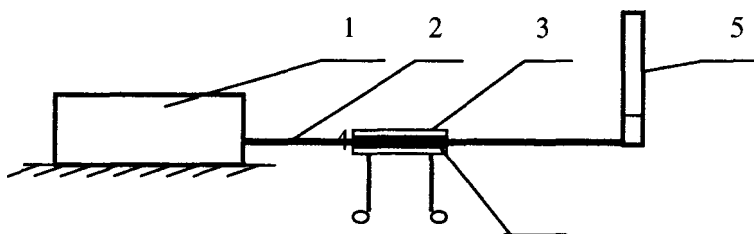


Рис. 1. Схема установки для обдування конвективним повітрям

Установка складається з таких елементів: 1) компресора; 2) повітропроводів; 3) печі; 4) мідної трубки-повітропроводу; 5) колби з подрібненим продуктом.

При цьому компресором 1 повітря нагніталось через систему повітропроводів 2 в мідну трубку-повітропровід 4, де воно нагрівалось. Мідна трубка-повітропровід вставлялася в індуктивну піч 3, яка вмикалася в джерело електричного струму. Гаряче повітря подавалося в колбу 5, де на металевій сітці знаходився подрібнений матеріал. Кожну фракцію клали на металеву сітку і знизу продували гарячим конвективним повітрям до того моменту, коли сипка маса частинок нагрівалася до температури  $t = 70$  °С. Ця операція проводилася для того, щоб мінімізувати можливість виходу екстракту чаю у воду під впливом градієнта температур, який виникав би внаслідок контактування холодних частинок чаю з водою, що має температуру  $t = 70$  °С. Температура сипкої фракції вимірювалася за допомогою градусника. Вода нагрівалася до температури  $t = 70$  °С, щоб забезпечити достатньо інтенсивний вихід екстракту у воду в процесі осадження частинок для порівняння концентрації чаю у воді при осадженні різних фракцій. Далі кожну фракцію масою  $m = 240$  мгм поміщали у колбу з водою і осаджували протягом часу  $\tau = 30$  с. Потім воду з екстрактом чаю перемішували і відбирали пробу в дослідну кювету оптичного поляриметра СМ-3. У цій системі екстракт чаю виходив у воду з кожної частинки і був поляризаційно оптично активною речовиною. За величиною кута обертання площини поляризації робили висновок про концентрацію екстракту

чаю у воді. Для більшості оптично активних речовин кут обертання в оптичному поляриметрі прямо пропорційний до концентрації і може бути знайдений з емпіричного співвідношення 4:

$$\varphi = [\varphi] \cdot L \cdot C, \quad (4)$$

де  $\varphi$  – кут обертання площини поляризації в градусах;  $[\varphi]$  – питоме обертання оптично активної речовини для довжини хвилі 589 нм і за температури +20 °С%;  $L$  – довжина кювети в дм;  $C$  – концентрація розчину екстракту тощо в г/см<sup>3</sup>.

В зв'язку з тим, що кут поляризації  $\varphi$  прямо пропорційно до концентрації  $C$ , визначення  $[\varphi]$  не проводили, оскільки нас цікавила відносна величина, тобто інтенсивність виходу екстракту під час осадження різних фракцій подрібненого продукту. Отримано такі результати (рис. 2).

Слід зауважити, що інтенсивність виходу екстракту оцінювалася також візуально. Максимально насичений розчин екстракту відповідав фракції 3 для  $d_i = (1-1,5)$  мм. Паралельно, при осадженні частинок у воді вимірювалася густина частинок чаю. Вона становила  $\rho_{\text{ч}} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>.

Також вимірювалися густина, в'язкість та коефіцієнт поверхневого натягу води за температури  $t = 70$  °С, а також гідрофільність поверхні листків чаю. Вони становили відповідно: густина води за  $t = 70$  °С –  $\rho_{\text{с}} = 978$  кг/м<sup>3</sup>; динамічна в'язкість води за  $t = 70$  °С –  $\mu_{70} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  Па·с; коефіцієнт поверхневого натягу води за  $t = 70$  °С –

$\sigma_{70} = 0,064$  Н/м; гідрофільність поверхні листків чаю –  $\cos \theta = 0,5$ ; коефіцієнт форми частинки приймали  $\Psi = 0,77$ . Наступним етапом було аналітичне визначення оптимального середнього діаметра подрібненої сировини, яке проводили за нашою методикою [3, 4]:

1. Оптимальна товщина Л-плівки за гравітаційної екстракції з рівності (3а):

$$\delta_{\text{опт.}} = \sqrt[3]{\frac{\mu_{70}^2}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})\rho_{\text{с}}} = \sqrt[3]{\frac{(0,4 \cdot 10^{-3})^2}{9,8(1500 - 978)978}} = 0,0317 \text{ мм.}$$

2. Критерій оптимізації з рівності (2а):

$$B = 3,076 \sqrt[6]{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \cdot \rho_{\text{с}}^2}{\mu^4 g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}} = 3,076 \sqrt[6]{\frac{(0,064 \cdot 0,5)^3 \cdot 978^2}{(0,4 \cdot 10^{-3})^4 9,8(1500 - 978)}} = 242.$$

3. Оптимальне значення критерію Рейнольдса:

$$Re_{\text{опт.}} = 2B = 2 \cdot 242 = 484 \rightarrow \text{П режим осадження.}$$

4. Оптимальне значення критерію Архімеда:

$$Ar_{\text{опт.}} = (Re_{\text{опт.}}/0,152)^{1,4}/\psi = (484/0,152)^{1,4}/0,77 = 104162,6.$$

5. Оптимальний середній діаметр подрібненої сировини зі співвідношення [3, 4]:

$$\frac{d_{\text{опт.}}}{\delta_{\text{опт.}}} \approx \sqrt[3]{Ar_{\text{опт.}}} = \frac{d_{\text{опт.}}}{0,0317} \approx \sqrt[3]{104162,6}; d_{\text{опт.}} = 0,0317 \cdot \sqrt[3]{104162,6} = 1,49 \text{ мм.}$$

З наведеного розрахунку зрозуміло, що розрахункове значення оптимального середнього діаметра подрібненої сировини повністю збігається з максимумами інтенсивності екстракції з

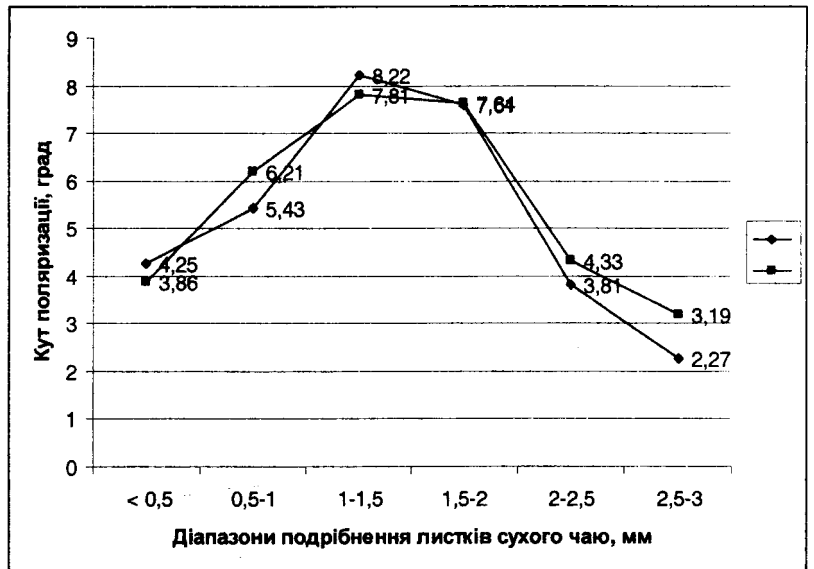


Рис. 2. Залежність кута поляризації розчину екстракту чаю у воді ( $t=70$  °С) від ступеня подрібнення фракції під час осадження в полі гравітаційних сил

твердих частинок чаю, що показано на рис. 2. Максимальний кут поляризації відповідає діапазону подрібнення  $d_i = (1-1,5)$  мм, що говорить про максимальну інтенсивність екстракції у цих умовах.

### Осадження в полі відцентрових сил

Аналогічний дослід нами був проведений в полі відцентрових сил з цим самим твердим матеріалом. Листки чаю подрібнювалися протягом тривалого часу. Ступінь подрібнення сировини був високим. Далі сипкий матеріал піддавали ситовому аналізу. Використовували такі сита: сито № 1 мало середній діаметр отворів  $d_{01} = 0,2$  мм, сито № 2 –  $d_{02} = 0,16$  мм, сито № 3 –  $d_{03} = 0,1$  мм, сито № 4 –  $d_{04} = 0,05$  мм, тобто після ситового аналізу отримували п'ять фракцій з таким діапазоном середнього діаметра подрібненої сировини: перша –  $d_c > 0,2$  мм, друга –  $d_c = (0,16-0,2)$  мм, третя  $d_c = (0,1-0,16)$  мм, четверта –  $d_c = (0,05-0,1)$ , п'ята –  $d_c < 0,05$  мм. Кожної подрібненої фракції в сухому вигляді брали масою  $m = 140 \cdot 10^{-6}$  кг і нагрівали до температури  $t = 70$  °С, як у попередньому досліді. Кожен розчин з відповідною подрібненою фракцією одночасно центрифугували в пробірках з частотою обертання ротора центрифуги  $n = 1000$  об/хв ( $\omega = 104,66$  с<sup>-1</sup>) протягом часу

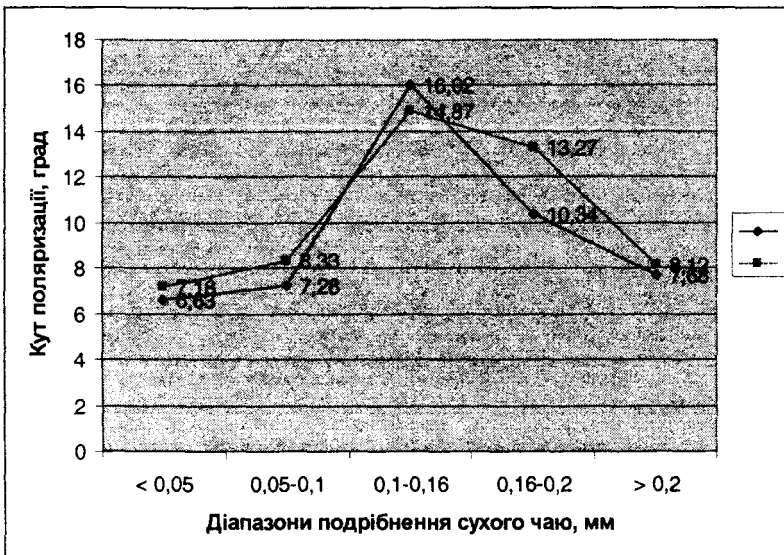


Рис. 3. Залежність кута поляризації розчину екстракту чаю у воді ( $t=70$  °С) від ступеня подрібнення фракції під час осадження в полі відцентрових сил

$\tau = 30$  с, враховуючи розгін і зупинку ротора. Дослід проводили двічі. Середня відстань від осі обертання ротора до центра пробірки становила  $r = 0,06$  м. Далі розчини екстракту чаю зливали в пробірки і маркували їх. Так отримували розчини екстракту чаю для п'яти фракцій подрібнених частинок. Потім розчини екстракту для п'яти фракцій досліджували на поляриметрі круговому СМ-3. Отримані результати показано на рис. 3.

Слід зауважити, що інтенсивність виходу екстракту оцінювалася також візуально. Максимально насичений розчин екстракту відповідав фракції 3 для  $d_i = (0,1-0,16)$  мм. Фізичні характе-

ристики для води та твердих частинок подрібнених листків чаю брали аналогічними, як для попереднього розрахунку.

Наступним етапом було визначення оптимального середнього діаметра подрібненої сировини, яке проводили за нашою методикою [3, 4]:

1. Оптимальна товщина Л-плівки при відцентровій екстракції з рівності (36):

$$\delta_{\text{ч.опт.}} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\omega^2 r (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{с}}}} = \sqrt[3]{\frac{(0,4 \cdot 10^{-3})^2}{104,6 \cdot 0,06 (1500 - 978) 978}} = 0,0078 \text{ мм.}$$

2. Критерій оптимізації з рівності (26) під час осадження в полі відцентрових сил:

$$B_{\text{ц}} = 3,076 \sqrt[6]{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \cdot \rho_{\text{с}}^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}} = 3,076 \sqrt[6]{\frac{(0,064 \cdot 0,5)^3 \cdot 978^2}{(0,4 \cdot 10^{-3})^4 (104,6^2 \cdot 0,06) (1500 - 978)}} = 38,09.$$

3. Оптимальне значення критерію Рейнольдса  $Re_{\text{опт.}} = 2B_{\text{ц}}$ :

$$Re_{\text{опт.}} = 2B_{\text{ц}} = 2 \cdot 38,09 = 76,18 \rightarrow \text{П режим осадження.}$$

4. Оптимальне значення модифікованого критерію Архімеда:

$$Ar^M_{\text{опт.}} = (Re_{\text{опт.}} / 0,152)^{1,4} / \psi = (76,18 / 0,152)^{1,4} / 0,77 = 7825,4.$$

5. Оптимальний середній діаметр подрібненої сировини для умов відцентрового осадження зі співвідношення [3, 4]:

$$\frac{d_{\text{опт.}}}{\delta_{\text{опт.}}} \approx \sqrt[3]{Ar^M}_{\text{опт.}}; \quad \frac{d_{\text{опт.}}}{0,0078} \approx \sqrt[3]{7825,4}; \quad d_{\text{опт.}} = 0,0078 \cdot \sqrt[3]{7825,4} = 0,155 \text{ мм.}$$

З наведеного розрахунку бачимо, що розрахункове значення оптимального середнього діаметра подрібненої сировини також повністю збігається з максимумом інтенсивності екстракції з твердих частинок чаю, що показано на рис. 3. Найбільший кут поляризації відповідає діапазону подрібнення  $d_s = (0,1-0,16)$  мм, що говорить про максимальну інтенсивність екстракції у цих умовах.

Необхідно зауважити, що критерій оптимізації  $B$  можна подати у вигляді (5)

$$B = 3,07[(\sigma \cos \theta)^{1/2}, (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})^{-1/6}, \rho_{\text{с}}^{1/3}, g^{-1/6}, \mu^{-2/3}]. \quad (5)$$

При цьому, аналізуючи рівності (2) і (3), зрозуміло, що в рівності (5) може бути присутній критерій Вебера (6), оскільки вона містить коефіцієнт поверхневого натягу рідини:

$$We_{\text{опт.}} = \frac{\sigma \cos \theta}{\rho_{\text{с}} g \delta_{\text{опт.}}^2}; \quad (6a)$$

$$We_{\text{ч опт.}} = \frac{\sigma \cos \theta}{\rho_{\text{с}} (\varpi^2 r) \delta_{\text{ч опт.}}^2}, \quad (6b)$$

де  $We_{\text{опт.}}$ ,  $We_{\text{ч опт.}}$  – оптимальні критерії Вебера з оптимальною товщиною Л-шару ( $\delta_{\text{опт.}}$ ,  $\delta_{\text{ч опт.}}$ ) для розрахунку під час осадження частинки в полі гравітаційних і відцентрових сил відповідно.

Критерій Вебера показує відношення сил поверхневого натягу в Л-шарі до сил інерції. Фізичний зміст оптимального критерію Вебера в нашому випадку полягає в тому, що відношення цих сил має бути таким, яке б забезпечувало формування оптимальної товщини Л-шару навколо частинки під час її гравітаційного чи відцентрового осадження з точки зору максимально інтенсивного проходження багатостадійного дифузійного процесу, зокрема виходу екстракту з капілярно-пористої твердої частинки з оптимальним середнім діаметром  $d_{\text{опт.}}$  і проходження його через приграничний Л-шар. Очевидно, що це залежить від швидкості осадження частинки, яка функціонально пов'язана з чинниками, які входять до критерію Архімеда, передусім від середнього діаметра подрібнення сировини, який має в ньому найвищий ступінь 3.

В рівності (5) величина  $(\sigma \cos \theta)$  має степінь 1/2. Подаємо критерій Вебера в степені 1/2, підставляючи оптимальне значення Л-шару з рівності (3a). Отримаємо співвідношення 7:

$$We_{\text{опт.}}^{1/2} = \frac{(\sigma \cos \theta)^{1/2}}{\rho_{\text{с}}^{1/2} g^{1/2} \delta_{\text{опт.}}} = \frac{(\sigma \cos \theta)^{1/2} \rho_{\text{с}}^{1/3} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})^{1/3} g^{1/3}}{\rho_{\text{с}}^{1/2} g^{1/2} \mu^{2/3}} = \frac{(\sigma \cos \theta)^{1/2} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})^{1/3}}{\rho_{\text{с}}^{1/6} g^{1/6} \mu^{2/3}}. \quad (7)$$

Показники степенів у рівності (7) за параметрів  $g$ ,  $(\sigma \cos \theta)$ ,  $\mu$  збігаються з рівністю (5). Легко зрозуміти що, щоб отримати значення критерію оптимізації, рівність (7) необхідно домножити на

критерій  $\left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}\right)^{0,5}$ . Тобто критерії оптимізації  $B$ ,  $B_{\text{ч}}$  можна подати у вигляді критеріальних рівнянь (8):

$$B = 3,07 \cdot We_{\text{опт.}}^{0,5} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}\right)^{0,5}; \quad (8a)$$

$$B_{\text{ч}} = 3,07 \cdot We_{\text{ч опт.}}^{0,5} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}}\right)^{0,5}. \quad (8b)$$

**Висновки.** 1. На прикладі екстракції подрібнених листків чаю у воді за  $t = 70$  °C в полі гравітаційних та відцентрових сил експериментально перевірені співвідношення для розрахунку критеріїв оптимізації  $B$  і  $B_{\text{ч}}$ .

2. Показано зв'язок критеріїв оптимізації з оптимальними критеріями Вебера в полі гравітаційних та відцентрових сил.

1. *Промышленная технология лекарств. Т1 / Под ред. В.И. Чуешова. – Харьков: Изд-во НФАУ МТК, 2002. – 557 с.* 2. *Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость. – Львів: Изд-во Львов. ун-та, 1970. – 187 с.* 3. *Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення твердої сировини під час розчинення та екстракції в полі гравітаційних або відцентрових сил // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 515. – С. 104–116.* 4. *Білонога Ю.Л., Білонога Д.М. Критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 480. – С. 3–6.*

УДК 621.791.763

М.В. Большаков, Г.М. Лукіна

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТАКТНОГО ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

© Большаков М.В., Лукіна Г.М., 2005

Описано математичні моделі контактного точкового зварювання і наближений метод розрахунку параметрів режиму зварювання сталі 20 за критерієм мінімізації розкиду розмірів ядра.

The mathematical models of resistance spot welding and a crude method of welding technique calculating are described. The welding parameters by minimization of nugget dimensions scatter have been optimized.

Під час розробки технологій контактного точкового зварювання параметри режиму підбирають: з літературних джерел [1, 2], розрахунковими методами на основі математичних моделей або користуючись рівнянням теплового балансу. У першому випадку використовують сумісний розв'язок диференціальних рівнянь електричного потенціалу і теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\gamma} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}. \quad (2)$$

У зв'язку зі складною температурною залежністю питомого опору ( $\rho$ ), теплопровідності ( $\lambda$ ) і теплоємності ( $c$ ) рівняння (1) і (2) аналітично не розв'язуються, а вимагають числових методів, наприклад, застосування методу кінцевих різниць [2], коли зварний простір розбивають на кінцеві об'єми розміром  $\Delta h^3$ , а час нагрівання (охолодження) розбивають на малі інтервали  $\Delta t$  і вважають, що в межах  $\Delta t$  температура комірки не змінюється. Отже, процес на короткий час зупиняється. У цей час уточнюються значення густини струму і теплофізичних величин. Для побудови температурного і електричного полів послідовно розв'язують низку алгебраїчних рівнянь відповідно до кількості комірок та інтервалів часу. Математична точність числового розв'язку ітераційних задач за допомогою комп'ютера залежить від кількості точок простору та інтервалів часу.

Для наближеної оцінки параметрів режиму контактного точкового зварювання можна використовувати рівняння теплового балансу

$$Q = Q_{кор} + Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (3)$$