ЦУКОР УКРАЇНИ 11 (83) / 2012



УДК 664.126.4. 054

# Послідовний процес в технології виробництва дифузійного соку

***А.Ф. Кравчук**, незалежний експерт*

*У статті за ознаками і закономірностями розглядається процес виробництва дифузійного соку як послідовний, в якому першою фазою процесу є термоплазмоліз клітин бурякової стружки, а другою фазою є екстракція сахарози з бурякової стружки при температурі процесу. Автор вважає, що макрокінетична модель процесу П.М. Сіліна включає одночасну дію термоплазмолізу і екстракції сахарози, відображає фізичну суть процесу і відповідає ознакам і закономірностям послідовного процесу. Модель відкрита для вдосконалення на мікрокінетичному рівні.*

*Ключові слова: дифузійний сік, термоплазмоліз , екстракція сахарози, послідовний процес, макрокінетична модель, ітераційні моделі.*

Виділення послідовних процесів в технології виробництва цукру дозволяє класифікувати процеси і визначати математичні принципи досліджень.

Прикладом послідовного процесу в хімії є реакції в результаті яких утворюється продукт, який є речовиною для наступної реакції.

Значна частина технологічних процесів в виробництві цукру відповідає принципу послідовних реакцій в хімії.

Можливо надати послідовним процесам таке загальне визначення: *послідовний процес – це явище в якому має місце взаємодія, співіснування і чергування як мінімум двох фаз чи станів процесу, при чому, кожна фаза чи стан процесу є природним продовженням і розвитком наступної фази чи стану процесу.*

Щоб віднести той чи інший процес до послідовного процесу необхідно визначити ознаки такого процесу. Процеси, що характеризуються значною кількістю параметрів, можуть мати і значну кількість ознак. Для досліджень таких процесів раніше був розроблений критеріальний принцип визначення ознак.

Самим простим і наглядним послідовним процесом є процес в паровому котлі, де фази процесу чергуються. Криві ентропії кипіння води і ентропії сухої пари утворюють єдину криву. Такі ознаки як співіснування, взаємодія і чергування фаз, природний перехід від однієї фази до наступної фази і перехід температури, як домінуючого параметра, від однієї фази до наступної фази являються критеріями послідовного процесу. Крім того цей перехід є монотонним і інверсійним. Ці положення ми можемо віднести до закономірностей послідовного процесу.

Виходячи з цього, розглянемо процес отримання дифузійного соку як послідовний процес плазмолізу бурякової стружки і подальшої екстракції соку з бурякової стружки.

***Процес плазмолізу бурякової стружки***

На протязі розвитку цукрової промисловості було запропоновано значну кількість різних способів технічного плазмолізу бурякової стружки: електроплазмоліз, селективний електроплазмоліз, імпульсний електроплазмоліз, електронний плазмоліз, кріоплазмоліз, гама-плазмоліз, послідовний електротермоплазмоліз і термоплазмоліз [1].

Не дивлячись на те, що термоплазмоліз має ряд недоліків: зниження доброякісності дифузійного соку за рахунок переходу в сік колоїдів і пектинових речовин і значні витрати пари на нагрівання сокостружкової суміші, цей спосіб плазмолізу залишається основним в технології виробництва дифузійного соку. Перераховані способи в більшості відносяться до інтенсифікації плазмолізу.

Враховуючи структуру бурякової тканини, яка має плазматичні оболонки і клітинні стінки, в яких знаходиться вакуольний сік, при термоплазмолізі такий параметр як температура, є домінуючим параметром процесу. Термоплазмоліз теоретично починається з температури 25-30 °С і в цільовому змісті закінчується при температурі 80°С. При цьому цитоплазма відслоюється і відходить від стінок клітин з соком без розпаду. Практично визначений час цього процесу – 10-15 хвилин. **На рис.1** показана зміна ступеня термоплазмолізу від часу дії температури на клітини бурякової стружки [2].

Реалізація цього процесу в технічному плані виконується в ошпарувачах різного типу і має різний технологічний регламент. Результат термоплазмолізу залежить також від довжини бурякової стружки, яка оцінюється на виробництві довжиною 100 грамів стружки.

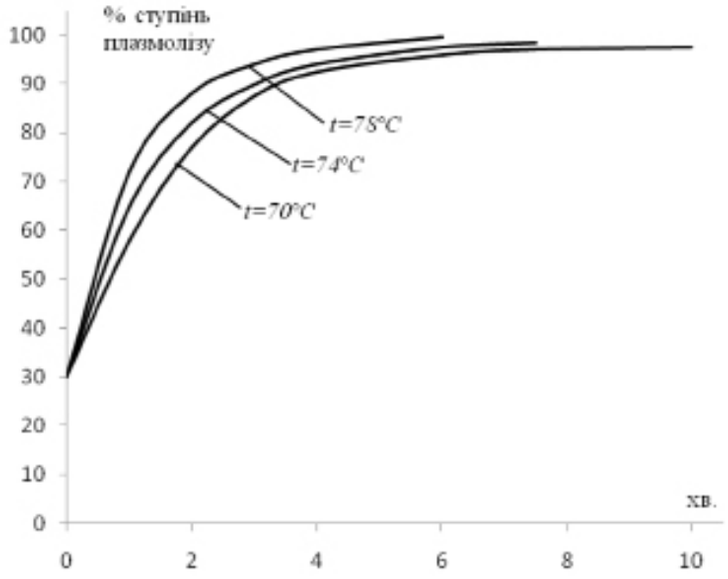


***Рис.1.*** *Залежність ступеня плазмолізу бурякових клітин від температури при довжині стружки 15 м.*

**На рис.2** приведена залежність термоплазмолізу від довжини бурякової стружки. Ефективна дія температури на плазмоліз клітин стружки – 3-5 хвилин. Це обумовлює проблеми реалізації цього процесу.

Крім того, процес ошпарювання стружки залежить також від того, чим ми ошпарюємо стружку: водою, соком, парою.

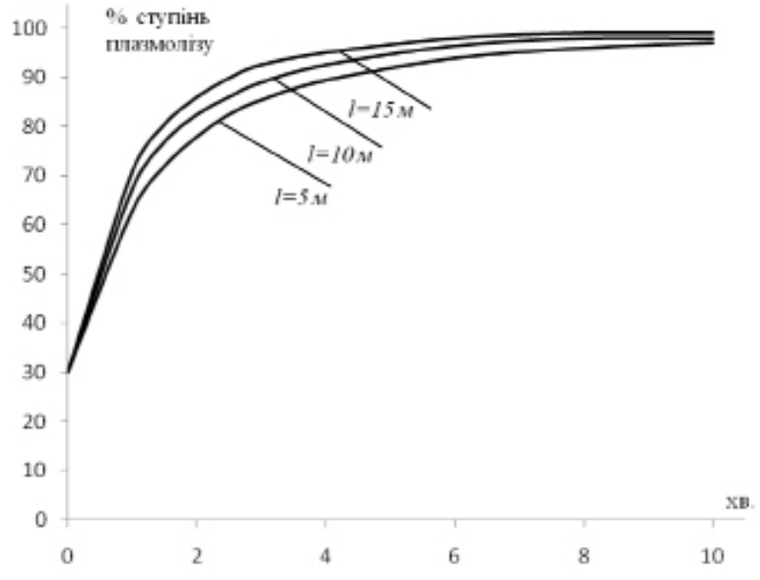


***Рис.2.*** *Залежність ступеня плазмолізу бурякових клітин від часу ошпарювання при температурі 74°C.*

***Процес екстракції соку з бурякової стружки***

В даному випадку ми розглядаємо процес термоплазмолізу, як послідовний, тобто з подальшою дією температури і води на екстракцію соку з бурякової стружки. Друга фаза процесу, в якому температура залишається домінуючим параметром-аргументом кінетики процесу, на процес екстракції сахарози з бурякової стружки має значний вплив і різниця концентрацій цукру в буряковій стружці і в дифузійному соку при даній температурі. Температура і різниця концентрацій цукру не знаходяться в протиріччі; вони знаходяться у взаємодії.

В процесі екстракції на денатурованих плазматичних оболонках утворюються великі каверни, які при температурі 75°C розпадаються на маленькі частинки, що веде до росту коефіцієнта дифузії сахарози через клітинну мембрану. Наряду з розпавшимися плазматичними оболонками мають місце і тканини з нерозпавшимися, але з денатурованими плазматичними мішками. Процес розпаду плазматичних оболонок, наприклад, при 75°C можливий не менше чим через 200-250 хвилин. Цей час залежить також від довжини бурякової стружки. В промисловій реалізації процесу час екстракції сахарози в тричі менший і закінчується з вмістом сахарози 0,3-0,6% до маси стружки.

Виникла така традиція, що процес екстракції соку з бурякової стружки вважається основним і при моделюванні розглядається окремо від процесу плазмолізу стружки. Перш за все це тому, що ці процеси реалізуються часто в окремих апаратах, наприклад, в установках колонного типу. В ротаційних апаратах ці процеси суміщені в одному апараті, а в похилих апаратах ошпарювач зовсім відсутній.

Таку ситуацію ми відносимо до конструктивних методів реалізації процесу вилучення соку з бурякової стружки, а не до самого процесу.

Виходячи з реалізації процесу, термоплазмоліз клітин стружки продовжується в усіх конструкціях апаратів до нормативних втрат цукру в жомі.

Ми маємо значну кількість теоретичних математичних моделей процесу екстракції соку з бурякової стружки [3,4,5]. В дисертації [3] приведено розрахунок процесу екстракції сахарози з бурякової стружки шляхом оцінки в часі середньої об'ємної концентрації сахарози в стружці.

Середня об'ємна концентрація сахарози в стружці змінюється в часі експоненціально і має такий вигляд:

$$(\bar{c} - c_{сік}) / (c_o - c_{сік}) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} B_n B_m \exp [(- \mu_n^2 / (\delta /2)^2 - (\mu_m^2/ (1/2)^2) D_c \tau] \quad (1)$$

c – концентрація сахарози в стружці в часі;
$c_o$ – початкова концентрація сахарози в стружці;
$c_{сік}$ – концентрація сахарози в соку;
δ – товщина стружки;
μ – корінь характеристичного рівняння
ctg μ = μ / $B_i$;
$D_c$ - середнє по довжині (висоті) апарата значення коефіцієнта дифузії;
$B = 2B_i^2 / \mu^2(B_i^2 + B_i + \mu^2)$;
$B_i$ – число Біо.

В даному випадку кінетика процесу віднесена до зміни в часі концентрації сахарози в стружці. Дана модель має деякі спрощення. Вони полягають у тому, що при ітеративному принципі процес розділявся на ділянки, в яких концентрацію соку приймали постійною і рівною значенню на початку ділянки. Тому в рівнянні (1) середня об'ємна концентрація сахарози в стружці розглядається як сума середніх об'ємних концентрацій.

Друге спрощення полягає в тому, що рівняння віднесене до пластинчатої стружки, в якій довжина значно перевищує ширину стружки і товщину стружки. На наш погляд в формулі також ускладнене використання критерія Біо.

Дослідження процесу виробництва дифузійного соку з бурякової стружки В.М. Лисянський виконав на основі диференційного рівняння дифузії з граничними умовами процесу і ітераційного принципу при лінійній зміні концентрації екстракційної рідини на кожній ділянці процесу [4, 5, 6]. Від цієї умови залежить довжина ітераційної ділянки процесу. Крім того, в кінці *j-тої* ітераційної ділянки концентрація екстракційної рідини приймає значення

$$c_j = c'_{j1} + k_j \tau_j \qquad (2)$$

де: $c'_{j1}$ – концентрація екстракційної рідини в кінці *(j-1)* ітераційної ділянки;

$k_j$ - коефіцієнт нахилу екстракційної лінії на ділянці, $с^{-1}$;

$\tau_j$ – час екстрагування на ділянці.

Таким чином в теорії дифузійного процесу перевагу здобув новий математичний принцип досліджень в якому використані методи теорії подібностей і операційного обчислення.

В цьому випадку також не обійшлось без спрощень. Так концентрація сахарози в «тілі» стружки вираховується відносно концентрації рідини, що навколо неї, як від нуля,

тобто: $\Delta C_j = c_j - c'_j \qquad (3)$

де: $\Delta C_j$ – відносна концентрація сахарози в тілі стружки;

$c_j$ – концентрація сахарози в тілі стружки *j-тої* ділянки;

$c'_j$ – концентрація сахарози в екстракційній рідині *j-тої* ділянки.

Апробація цього методу виконувалась на одностадійному протитечійному процесі екстракції сахарози, який характерний для дифузійних апаратів коритного типу, наприклад, для апаратів типу ДС-12. Окрема стадія процесу плазмолізу (ошпарювання) стружки тут відсутня. Плазмоліз проходить тут на протязі всього процесу екстракції стружки.

Таким чином ми маємо варіант реалізації процесу екстракції сахарози з бурякової стружки як такий, що не є послідовним. Ефективно реалізувати фазу термоплазмолізу в конструкції таких апаратів практично неможливо. За рахунок використання пари підвищеного потенціалу на Крижопільському цукровому заводі реалізується режим «головного нагріву» в апараті типу ДС-12 [7]. Термоплазмолізатор відкритою парою працював також на Уладівському цукровому заводі перед подачею стружки в апарат типу А2- ПДС-20. Ефективність процесу при цьому підвищувалась. Безумовно, виходячи з режиму ошпарювання, отримати «холодний сік» при такій реалізації процесу неможливо. Процес плазмолізу, як і процес екстракції, при реалізації повинні мати можливість для оптимізації. Дана реалізація процесу екстракції сахарози з бурякової стружки немає перспективи при потужності подібних апаратів більше 4000 тонн буряків на добу.

Невідомо, чому дослідники не звертають уваги на класичну кінетику процесу видалення сахарози з бурякової стружки, яку розробив П.М. Сілін на основі закону Фіка [8].

Правда, М.С. Карпович [5] категорично вважає неприйнятним використання закону Фіка для дослідження процесу екстракції сахарози з бурякової стружки: «Применение закона Фика, описывающего стационарный режим, к элементарному нестационарному диффузионному процессу и распространение идеализированного процесса на экстракцию во всем аппарате является основным допущением рассмотренных теорий диффузионного процесса». Крім того, М.С. Карпович стверджує що в усіх випадках, коли має місце дифузія в деякому об'ємі, дослідження властивостей поля концентрацій є обов'язковим. Ці дослідження можливі тільки при наявності диференційного рівняння дифузії [5].

Тоді виникає питання: «Що є первинним: теорія процесу взагалі чи теоретичні основи конкретної реалізації процесу в конкретному апараті?»

З нашої точки зору при розгляді теорії масової дифузії і екстракції сахарози з бурякової стружки незалежно від конструктивної реалізації процесу ми повинні починати дослідження з кінетики масової дифузії сахарози з бурякової стружки. Відповідно до умов макрокінетики процесу виділяються основні параметри чи комплекс параметрів, що найбільше впливають на процес. При цьому допускаються певні спрощення. В подальшому можливий розвиток досліджень на *мікрокінетичному рівні*, тобто на границі «стружка – екстракційна рідина». До цього потрібно додати, що в усіх відомих конструкціях дифузійних апара-

тів процес плазмолізу стружки і процес екстракції сахарози із стружки проходить одночасно. Тому потрібно розглядати теорію цих процесів послідовно і одночасно. Результат процесу залежить і від поля температур стружки і соку і від поля різниці концентрацій сахарози в стружці і екстракційній рідині.

Виходячи з цього ми вважаємо, що математична модель макрокінетики дифузії сахарози з бурякової стружки П. М. Сіліна має практичні підтвердження і відображує реальний процес з достатньою для практики точністю. Процес є природно послідовним.

Математична модель кінетики видалення сахарози з бурякової стружки П. М. Сіліна відповідає ознакам і закономірностям послідовного процесу, а також фізичній суті процесу і включає основні стадії (фази) процесу: термоплазмоліз і протитечійну екстракцію сахарози [8].

$$S = [k_o T_m / \mu] \cdot [F_{стр} (C_{стр} - C_{сік}) / d/4] \cdot \tau \qquad (4)$$

де: S – кількість сахарози, що ми отримали із стружки, в якій було 100 кг нормального соку, кг/хв;

$k_o$ – параметр, залежний від розмірів молекул (частинок) в розчині;

$T_m$ – середня абсолютна температура маси стружки, К;

μ – динамічна в'язкість розчинника (води, соку), Н/м$^2$ с;

$F_{стр}$ – поверхня дифузії із стружки, в якій є 100 кг нормального соку, м$^2$;

$C_{стр}$ – середня концентрація сахарози в буряковій стружці, %;

$C_{сік}$ – середня концентрація сахарози в соку, що навколо стружки, %;

d – товщина стружки, в якій є 100 кг нормального соку, м;

d/4 – середній шлях дифузії сахарози із стружки, м;

τ – час, хв.

Перша фаза послідовного процесу плазмолізу бурякової стружки залежить від таких основних параметрів як температура, в'язкість розчинника і розмірів частинок розчиненої речовини. Домінуючим параметром є температура плазмолізу, пасивним параметром є динамічна в'язкість розчинника. З підвищенням концентрації сахарози в соку в'язкість зростає, тому процес є затухаючим.

Після першої фази послідовно наступає друга фаза: протитечійна екстракція сахарози із бурякової стружки водою. Цей процес залежить від поверхні стружки, віднесеної до 100 кг нормального соку, товщини (довжини) стружки, градієнта концентрацій ($C_{стр} - C_{сік}$) / d/4, температури і часу процесу екстракції. В цій фазі процесу термоплазмоліз стружки продовжується і домінуючим параметром-аргументом залишається температура процесу. На **рис. 3** приведений графік зміни температури сокостружкової суміші при реалізації процесу з ошпарюванням. Він характеризується монотонністю і має інверсійний характер. На стадії екстракції сахарози комплекс параметрів: градієнт концентрації і температура мають домінуючу роль в процесі. При цьому, температура і градієнт концентрацій не знаходяться в протиріччі; з ростом температури і градієнта концентрацій процес підсилюється і навпаки.

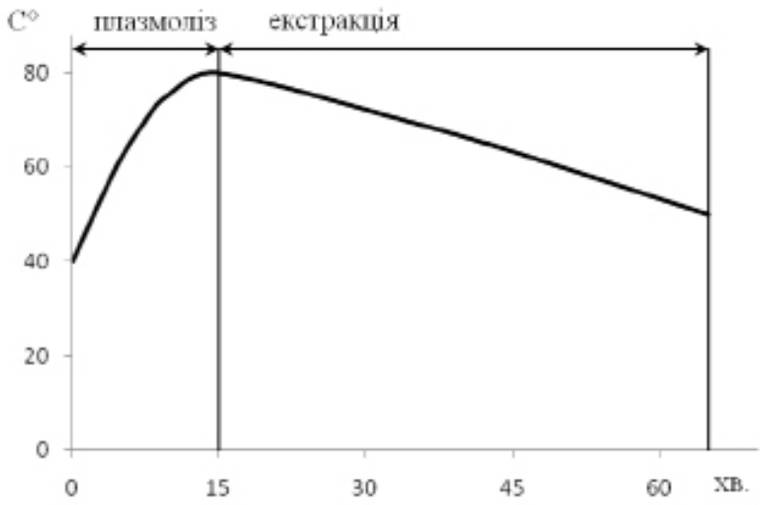


***Рис.3**. Зміна температури сокостружкової суміші в послідовному процесі виробництва дифузійного соку*

Дана модель кінетики видалення сахарози з бурякової стружки має фізичну суть і відповідає ознакам і закономірностям послідовного процесу.

Кінетична модель процесу приведена до 100 кг нормального соку з метою спрощення для практичного використання [8, 9].

Модель може бути використана і для елементарної комірки отримання дифузійного соку, але *мікрокінетична модель і в диференційній формі повинна відповідати також послідовному процесу*. Розробка такої математичної моделі необхідна для розрахунку конструкції дифузійних апаратів і є наступною задачею.

Кінетична математична модель П.М.Сіліна має два спрощення. Перше спрощення відноситься до того, що сік має переміщуватись, в результаті цього поверхня стружки контактує з соком середньої концентрації. Але насправді поверхня стружки має мікропрошарок «нерухомого» соку, який взаємодіє з екстракційною рідиною. При конструктивній реалізації процесу в апаратах вплив цього мікропрошарку нівелюється.

Друге спрощення полягає в тому, що концентрація сахарози в стружці пропорційно підвищується від поверхні стружки до центру стружки, тобто на віддалі d/4 від поверхні ми маємо середню концентрацію. Для макропроцесів такі спрощення відносяться до допустимих.

При цьому неможливо констатувати стаціонарність процесу, бо коефіцієнт дифузії віднесений до часу, тобто $D = f(\tau)$.

Слід зауважити, що в складовій плазмолізу формули (4) в'язкість екстракційного соку також залежить від температури. Тому П.М. Сілін ввів поняття фактора температури і в'язкості. Цей температурний фактор має вид: $\theta = T / \mu \cdot 1000$. Практично активний процес плазмолізу бурякової стружки починається при температурі 60ºС.

Процес плазмолізу бурякової стружки має значний вплив і на процес екстракції сахарози. Для пластинчатої чи іншої форми стружки визначення поверхні не являється складною задачею. Для практичних задач поверхня стружки може визначатись по формулі [8]:

$$F_{стр} = 1000\, l\, \varphi / 0{,}93 \quad (5)$$

де: $F_{стр}$ – поверхня стружки без врахування торцевої поверхні,м$^2$;

$l$ - довжина стружки, м;

$\varphi$ - периметр перерізу стружки, м.

*0,93* – соковий коефіцієнт.

Існують інші формули для визначення поверхні стружки [3].

Середня різниця концентрацій в середині стружки і зовні може бути визначена по формулі Грасгофа і концентрації дифузійного соку з врахуванням відкачки соку.

$$C_{стр} - C_{сік} = [(\alpha / 93 - 1)(C_2 - C_1)] / 2{,}302\, \alpha / 93 \cdot lg\, [(\alpha / 93 - 1)C_2 + C_1] / (\alpha\, C_1 / 93) \quad (6)$$

$\alpha$ – відкачка соку, %;

$C_2$ - концентрація сахарози в стружці на вході в екстрактор, %;

$C_1$ - концентрація сахарози в жомі на виході екстрактора, %;

$C_{стр} - C_{сік}$ – середня різниця концентрацій сахарози в процесі;

$c_2$ – концентрація сахарози в дифузійному соку, $c_2 = (C_2 - C_1) / (\alpha / 93)$.

Процес має технологічні обмеження, які залежать від властивостей буряків та техніко-економічних показників процесу. До них ми відносимо:

- початок активного процесу плазмолізу стружки – 60 ºС;
- максимальна температура плазмолізу – 80 ºС;
- кінцевий вміст сахарози в жомі - 0,3 % до маси стружки.
- соковий коефіцієнт - 0,93.

Підставивши ці дані в рівняння (4) ми можемо визначати як відкачку соку з заданим вмістом сахарози так і втрати сахарози в жомі.

При цьому ми можемо зробити деякі висновки:

- процес, в якому не виділена стадія (фаза) плазмолізу клітин бурякової стружки не можна вважати ефективним;
- процес отримання дифузійного соку є послідовним; домінуючим параметром в якому при плазмолізі є температура процесу, а при екстракції – комплекс параметрів: різниця концентрацій сахарози на границі «поверхня стружки – екстракційна рідина» і температура сокостружкової суміші;
- інверсивний характер процесу обумовлений затуханням градієнту концентрацій сахарози в стружці і соку при температурі активного плазмолізу стружки в процесі;
- основні параметри математичної моделі можуть вимірюватись приладами;
- *макрокінетична* математична модель процесу масового переходу сахарози із бурякової стружки в екстрагуючу рідину П.М. Сіліна розкриває фізичну суть процесу, включає основні параметри процесу, перспективна для вдосконалення при створені оптимізованої *мікрокінетичної* диференційної моделі послідовного процесу.

### *Список використаних джерел*


1. *Загорулько А.Я.* Получение диффузионного сока с помощью электроплазмолиза. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. // Киев -1958.- 19 с.
2. *Прилуцкий И.И.* Исследование факторов, влияющих на процессы плазмолиза и выщелачивания стружки в колонных диффузионных аппаратах./ Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н.// Киев.- 1963.- 22 с.
3. *Корниенко Т.С.* Исследование закономерностей внешней диффузии в системах твердое тело – жидкость при турбулентном режиме движения с приложениями к некоторым процессам пищевой технологии. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н.// Киев – 1975 – 53 с.
4. *Лысянский В.М.* Процесс экстракции сахара из свеклы, теория и расчет./ «Пищевая промышленность». - М. : -1973. – 224 с.
5. *Карпович Н.С.* Локальные кинетические коэффициенты экстракции сахара из свеклы и нормализация процесса в диффузионных аппаратах свеклосахарного производства./ Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. // Киев.- 1973. – 28 с.
6. *Мисин О.М.* Аналитическое моделирование процесса экстракции и минимизация потерь в промышленных экстракторах свеклосахарного производства./ Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. //Киев. – 1982. – 27 с.
7. *Цимбал А.С., Карпович М.С.* Явище «головного гріву» при екстрагувані. /Цукор України. 1995. - № 1 (9). – С – 31-32.
8. *Силин П.М.* Технология свеклосахарного производства./ Пищепромиздат. М : 1945. – 367 с.
9. *Кравчук А.Ф.* Про математичні методи оцінки деяких показників технологічних процесів./ Цукор України. – 2011. - № 9-10 (69-70). – С 47-49.