УДК 664.061.4:084

ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ ІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

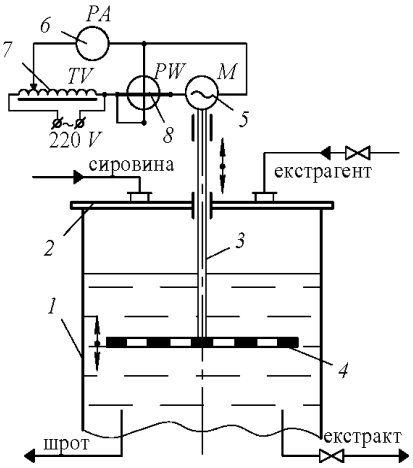
Зав'ялов В. Л., д-р техн. наук, професор, Мисюра Т. Г., Бодров В. С., Попова Н. В., Запорожець Ю. В., канд-ти техн. наук, доценти, Деканський В. Є., асистент
Національний університет харчових технологій, м. Київ

Представлено результати досліджень енерговитрат на процес вилучення цільових компонентів із рослинної сировини віброекстрагуванням в апаратах періодичної та безперервної дії. Обґрунтовано вплив низькочастотних механічних коливань на витрати енергії та встановлено закономірності їх зміни від режимних параметрів процесу. Встановлено, що потужність, необхідна для здійснення роботи при віброперемішуванні, визначається силою інерції при коливальному русі і силою опору, створеною в'язким тертям перемішу вального пристрою у в'язкому робочому середовищі.

The results of studies of energy consumption for the process of extracting the desired components from plant material in the apparatus vibroextraction batch and continuous. Justified by the impact of low-frequency mechanical vibrations on the energy consumption and the regularities of their changes on the operating parameters of the process. It was established that the power required for the work at vibrostirring determined by the inertial force when the vibrational motion and the force of resistance created by the viscous friction of the mixing device in a viscous working environment.

Ключові слова: віброекстрагування, витрати енергії, гідродинаміка, структура потоків, пульсуючий потік, масоперенесення, розділення фаз, режимні параметри, проектування.

Вступ. Створення та впровадження в народне господарство нової високоефективної, енергоощадної техніки для комплексного перероблення сировини рослинного походження та утилізації вторинних ресурсів, зокрема способом екстрагування, орієнтує на пошук нових методів інтенсифікації технологічних процесів, що ґрунтуються на особливостях гідродинаміки та перенесення маси на різних масштабних рівнях.



1 — корпус апарата; 2 — кришка; 3 — шток; 4 — робочий вібрувальний елемент; 5 — вібропривод; 6 — амперметр; 7 — автотрансформатор; 8 — ватметр.

Рис. 1 – Схема вимірювань енерговитрат при періодичному віброекстрагуванні

Так, у найбільш матеріалоємних галузях харчової промисловості, таких як цукрова, оліє-жирова, консервна, виноробна, пивоварна, лікеро-горілчана, крохмале-патокова, фармацевтична, де щорічно переробляються мільйони тон рослинної сировини та її відходів овочевого, кореневого, трав'яного, листового та плодово-ягідного походження, ці задачі особливо актуальні. Серед відомих апаратів найбільш перспективними для цих цілей виявилися віброекстрактори [1]. Їх відрізняє відносна швидкість взаємодії фаз, технологічність виготовлення, простота експлуатації. Апарати такого типу здатні працювати в режимі інтенсивної знакозмінної турбулізації потоку — суміші взаємодіючих фаз, що забезпечує активізацію поверхні їх контакту і веде до різкого зростання рушійної сили масообміну та зменшенню дифузійного опору. Такі явища забезпечуються генеруванням турбулізуючих струменів суміші вібраційними перемішувальними пристроями, що розміщені в робочому об'ємі апарата та раціонально розподіляють підведену до них зовнішню енергію. Конструкції таких віброперемішувальних пристроїв різноманітні в залежності від процесно-технологічних задач.

Разом з тим, що до сьогоднішнього часу залишається нез'ясованою низка важливих питань, пов'язаних з енерговитратами на віброперемішування, а також цілеспрямованого конструювання апаратів періодичної та безперервної дії [2, 3].

Таким чином, не зважаючи на переваги та зацікавленість промисловості до процесу віброекстрагування цінних компонентів при значному подрібненні рослинної сировини, включаючи переробку її відходів, цілеспрямоване конструювання та оптимізація режимних параметрів віброекстракторів неможливі без наукового поглиблення фундаментальних уявлень про їх енерговитратні характери-

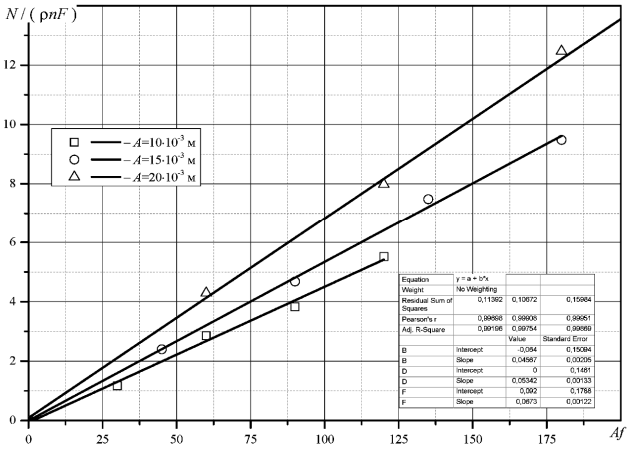


Рис. 2 – Залежність питомої потужності на періодичний процес віброекстрагування від інтенсивності коливань віброперемішувальної системи для різних амплітуд її коливань

стики.

З огляду на викладене, ставилась задача обґрунтувати вплив, зокрема, низькочастотних механічних коливань на витрати енергії в умовах віброекстрагування з рослинної сировини та встановити закономірності їх зміни в залежності від режимних параметрів процесу.

Матеріали та методи досліджень. Досліди виконувались на лабораторних моделях віброекстракторів періодичної та безперервної дії за схемами з'єднань їх елементів [4, 5]. Електричні вимірювання енерговитрат виконувались із застосуванням приладів електровимірювань, а саме: ватметра, амперметра, регулятора напруги типу ЛАТР. Опрацювання експериментальних даних та розрахунки виконувались із застосуванням інтегрованої системи OriginPro 8.6 та ін.

Результати та обговорення. При зворотно-поступальному русі тарілок на робочу суспензію діє два основні фактори: коливальні імпульси тарілок та турбулентні пульсуючі струмені, генеровані сопловими каналами. Являючись компактними, простими за своїм складом, віброекстрактори періодичної та безперервної дії надають можливість при відносно невеликих витратах підведеної енергії отримати високі швидкості перебігу процесу екстрагування в системі тверде тіло-рідина з малою різницею густин взаємодіючих фаз. В таких апаратах, як правило, перемішування здійснюється за рахунок кінетичної енергії потоків, а вібраційна система являє собою набір перфорованих дисків спеціальної конструкції, зібраних на рухомій штанзі (рухомих штангах) у так звані пакети.

Процес віброекстрагування досліджувався на розроблених моделях віброекстракторів періодичної та безперервної дії за схемами, наведеними на рис.1 та рис.3.

Визначення витрат енергії на періодичний процес. Установка періодичної дії (рис.1) складається з циліндричного корпусу 1 з кришкою 2, діаметром 0,3 м і висотою 0,4 м, та з розміщеною у ньому віброперемішувальною системою – перфорованого диска 4, закріпленого на штоці 3, з'єднаного з віброприводом 5.

В робочому режимі вібрувальний елемент (перфорований диск) генерує турбулентні пульсуючі знакозмінні потоки, напрямлені як до периферії робочого об'єму апарата, так і до його центральної частини. Гідродинамічні властивості цих потоків визначають їх дію як турбулізуючого фактора на мікрорівні та макромасштабного фактора, що усуває застійні зони. Частота коливань вібросистеми f змінювалась у межах 3 — 9 Гц при фіксованих амплітудах A=10; 15; 20 мм.

Потужність, яка необхідна для виконання роботи по віброперемішуванню, визначалась електричним методом за різницею потужностей в умовах робочого (з робочим середовищем) і холостого (без робочого середовища) рухів вібрувальної системи та із урахуванням втрат на активний опір двигуна за рівнянням

$$N = N_{\text{роб}} - N_{\text{х}} - \left(I_{\text{роб}}^2 - I_{\text{х}}^2\right)R\,, \qquad (1)$$

де N — загальна потужність, що необхідна для виконання роботи по віброперемішуванню, Вт; $I_{\text{роб}}$, $N_{\text{роб}}$ — відповідно сила струму і потужність, що необхідна для виконання роботи під час робочих рухів, А, Вт; $I_{\text{х}}$, $N_{\text{х}}$ — відповідно сила струму і потужність, що необхідна для виконання роботи холостих рухів, А, Вт; R = 20 Ом — активний опір електродвигуна привода установки.

Так, змінюючи параметри коливань віброперемішувальної системи, встановлювалась залежність (рис.2) питомої потужності при вібпроекстрагуванні від інтенсивності коливань у координатах $N/(nF\rho)=\varphi(A{\cdot}f)$, де n — кількість вібрувальних елементів (дисків); F — площа поперечного перерізу апарата, м^2; ρ — густина робочого середовища, кг/м^3; $A{\cdot}f$ — інтенсивність коливань віброперемішувальної системи, м/с.

Як видно з графіка, потужність, що необхідна для здійснення роботи віброперемішувальної системи, суттєво залежить від параметрів її коливань. Причому, амплітуда коливань більше впливає на енерговитрати, ніж частота. Очевидним є висновок, що витрати енергії зростають із збільшенням інтенсивності ($A{\cdot}f$) коливань віброперемішувальної системи.

На цьому ж графіку нанесено відповідні розрахункові дані для амплітуди коливань A = 15·10^{-3} м за наведеною методикою, що пропонується для визначення енерговитрат при перемішуванні в умовах періодичного віброекстрагування.

Визначення витрат енергії на безперервний процес. Встановлення енергоефективності роботи віброекстрактора безперервної дії здійснювалось за схемою рис.3.

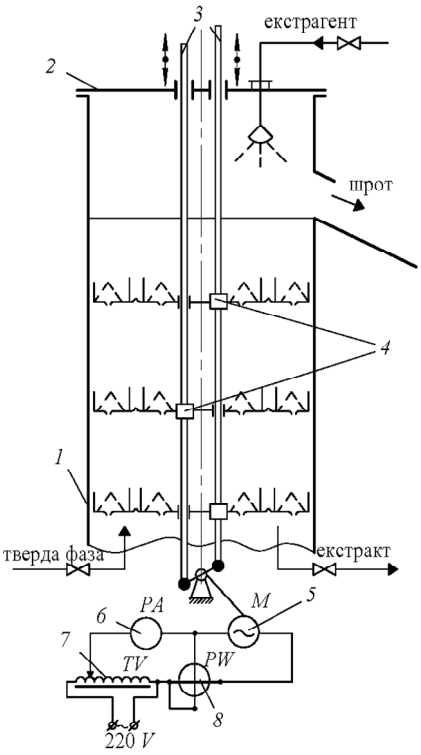
За такою схемою подача подрібненої рослинної сировини в апарат здійснювалась під останню нижню тарілку (вібротранспортувальний пристрій) та у вигляді шроту вивантажувалась з апарата на рівні верхньої. Відповідно, екстрагент подавався на першу верхню тарілку та у вигляді екстракту (після розділення фаз у гідродинамічний спосіб) відводився з нижньої частини апарата. Вібротранспортувальний пристрій механічно врівноважений та складається із системи вертикальних штоків із горизонтально закріпленими на них транспортувальними тарілками спеціальної конструкції [5]. Під час роботи апарата низькочастотні механічні коливання передаються вібротранспортувальній системі через штоки від вібропривода. Частота обертання вала електродвигуна і одночасно коливань вібротранспортувальної системи в межах до 10 Гц здійснювалась автотрансформатором, амплітуда — встановлювалась фіксованою (5; 10; 15)·10^{-3} м.

Слід вважати, що при віброекстрагуванні енергія витрачається на подолання сил інерції, що виникають при зворотно-поступальному переміщенні рухомих частин апарата, на переміщення уверх та униз вібротранспортувальної системи і на подолання опору сил її тертя об робоче середовище.

Якщо припустити, що вібротранспортувальна система являє собою нерухому сукупність гідравлічних опорів, через яку почергово в одному та іншому напрямах (уверх-униз) рухається потік робочого середовища, то загальні витрати енергії на процес можуть бути визначені за виразом:

$$N = \frac{n}{2}\left(N' + N''\right) + nN_з + N_I, \tag{2}$$

де n — кількість вібротранспортувальних тарілок; N', N'', $N_з$, N_I — відповідно витрати енергії на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища уверх-униз через транспортувальні та фільтрувальні елементи тарілок, через боковий зазор між тарілкою та корпусом апарата і на компенсацію дії сил інерції рухомих конструктивних елементів апарата. Зазначимо, що вібротранспортувальна система (система двох штоків з почерговим закріпленням на них тарілок) призводить до руху у протифазі рівні за масою підсистеми, а відтак — забезпечує мінімальні енергетичні витрати на переміщення цих мас.



1 — корпус апарата; 2 — кришка; 3 — штоки; 4 — робочі елементи; 5 — віброприпід з електродвигуном; 6 — амперметр; 7 — автотрансформатор; 8 — ватметр.

Рис. 3 – Схема вимірювань енерговитрат при безперервному віброекстрагуванні

Для розрахунку певної складової витрат енергії з урахуванням конструктивних і режимних параметрів роботи апарата можуть бути використані відповідні рівняння. Так, наприклад, для визначення витрат енергії на подолання гідравлічних опорів однієї тарілки при її рухах уверх $\left(N'\right)$ — униз $\left(N''\right)$:

$$N' = n_1 N_1' + n_2 N_2', \tag{3}$$

$$N'' = n_1 N_1'' + n_2 N_2'', \tag{4}$$

де n_1, n_2 — відповідно кількість транспортувальних і фільтрувальних елементів на одній тарілці; N_1', N_2', N_1'', N_2'' — відповідно витрати енергії на подолання гідравлічного опору одного транспортувального та одного фільтрувального елемента при русі тарілки уверх і униз.

Тобто, узагальнений вигляд рівняння для розрахунку цих складових матиме вигляд:

$$N_i^{(\prime\prime)} = Q_i^{(\prime\prime)} \cdot \Delta p_i^{(\prime\prime)} = w_0 \frac{\pi d_{e_i}^2}{4} \cdot \Delta p_i^{(\prime\prime)}, \tag{5}$$

де $\Delta p_i'^{(\prime\prime)} = \rho \frac{w_0^2}{2}\left(\lambda_i \frac{H_i}{d_{e_i}} + \xi_{вх_i} + \xi_{р_i} + \xi_{вих_i}\right)$ – перепад тиску по обидві сторони тарілки; $\xi_{вх_i}, \xi_{р_i}, \xi_{вих_i}$ – коефіцієнти місцевих гідравлічних опорів відповідно на вході потоку суміші в елементи тарілки, при миттєвому його розширенні і на виході з елементів тарілки; $w_0 = 2A \cdot f\left(1-\varepsilon\right)/\varepsilon$ — початкова середньоінтегральна за

період коливань швидкість пульсуючих потоків, генерованих елементами тарілки, які забезпечують транспортування робочого середовища через певний елемент тарілки; A, f — відповідно амплітуда та частота коливань; ε — відносний загальний вільний переріз тарілки; $Q_i'^{(n)}$ — об'ємні витрати робочого середовища через елемент тарілки; H, d_e — відповідно довжина поверхні тертя елемента, через який рухається робоча суміш і еквівалентний діаметр елемента тарілки; λ — коефіцієнт опору тертя між середовищем і поверхнею елемента тарілки.

З урахуванням інерційної складової N_I віброперемішувальної системи (маса тарілки, штока, відповідних кріплень тарілки та виштовхуюча із середовища сила, що діє на систему, занурену в робоче середовище) отримано рівняння повних витрат енергії на процес безперервного віброекстрагування:

$$N = \frac{w_0 \pi d^2 n}{8} \cdot \sum P_I'^{(n)} + N_з + \frac{m_т + m_в}{g \cdot \rho_т}\left(\rho_т - \rho_с\right) \cdot 2\pi^2 f^2 A \sin\beta, \tag{6}$$

де

$$P_I = \frac{m_т + m_в}{g \cdot \rho_т}\left(\rho_т - \rho_с\right) \cdot 2\pi^2 f^2 A \sin\beta \tag{7}$$

$\rho_т$ — густина конструкційних матеріалів, кг/м^3; $\rho_с$ — густина робочого середовища, кг/м^3; $2\pi^2 f^2 A \sin\beta$ — прискорення рухомої системи кривошипно-шатунного механізму, що рухається з кутовою швидкістю $\pi A \cos\beta$; $m_т$, $m_в$ — відповідно маси конструкційних матеріалів і робочого середовища, що переміщується тарілкою, кг; β — кут повороту кривошипно-шатунного механізму, °; g — прискорення вільного падіння, м/с^2.

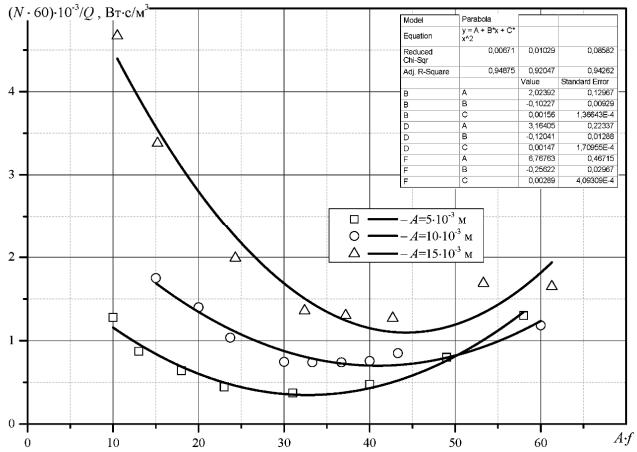


Рис. 4 – Залежність питомої споживаної електроенергії від інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи при безперервному процесі віброекстрагування

Зазначимо, що для віброекстрактора безперервної дії вимогою конструктивного виконання вібротранспортувальної тарілки є виготовлення та встановлення її у корпусі апарата з мінімальним зазором по її периферії. Тому, для таких апаратів при розрахунку витрати енергії є можливим не враховувати складову витрат енергії N_3 на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища уверх — униз через зазор по периферії тарілки.

Як приклад, витрати енергії на безперервний процес в системі вода — капронова дрібка при масовому співвідношенні рідкої та твердої фаз 5:1 (при температурі 293 К) змінювались від 0,25 до 0,85 кВт. При цьому частота коливань вібротранспортувальної системи змінювалась у межах 1—10 Гц; амплітуда коливань фіксувалась на значеннях (5, 10, 15)·10^{-3} м.

Результати дослідів узагальнювались у вигляді залежностей питомої витрати споживаної електроенергії на процес (для різних режимних параметрів роботи апарата) від інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи (рис.4). Встановлено, що найбільш суттєвий вплив на витрати енергії при транспортуванні та розділенні фаз має амплітуда коливань вібросистеми. Крім того, характер кривих дає підстави до висновку про можливість оптимізувати процес.

Тобто, із трьох наведених амплітуд коливань найбільш вигідною залишається амплітуда 10·10^{-3} м. Крім того, мінімальні енерговитрати за всіма трьома графіками визначають також оптимальні частоти коливань.

Так, для амплітуди 5·10^{-3} м оптимальна інтенсивність коливань складає 40 м/с, що відповідає частоті 8 Гц; для амплітуди 10·10^{-3} м оптимальна інтенсивність коливань — 30 м/с при частоті 3 Гц; для амплітуди 15·10^{-3} м інтенсивність — 43 м/с при частоті 2,7 Гц.

Отже, результати дослідів підтверджують, що безперервне протитечійне вібраційне розділення фаз забезпечує збільшення кількості енергії, що ефективно вкладається в одиницю робочого об’єму, — за рахунок рівномірного її розподілення у поперечному перерізі апарата.

Висновки. 1. Вібраційне перемішування надає можливість ефективно використати енергію, що вкладається в одиницю робочого об’єму апарата, рівномірно розподіляючи її у поперечному перерізі апарата. 2. Потужність, що необхідна для здійснення роботи при віброперемішуванні, визначається си-

лою інерції при коливальному русі і силою опору, створеною в'язким тертям перемішувального пристрою у в'язкому робочому середовищі.3. Оптимальними режимними параметрами для безперервного процесу, що забезпечують належне розділення фаз з низькими енерговитратами, є амплітуда коливань від $10 \cdot 10^{-3}$ до $15 \cdot 10^{-3}$ м при частоті до 4 Гц, в залежності від виду рослинної сировини. Разом з тим, для періодичного процесу (без проміжного віджиму) при роботі в режимі повного змішування, враховуючи результати вивчення кінетики процесу [1], достатньо витримувати частоти коливань віброперемішувальної системи до 9 Гц при амплітудах до $20 \cdot 10^{-3}$ м.

Література

1. Zavialov V. Scientific justification of the vibroextraction process and its use in the Agroindustrial complex / V. Zavialov, I. Malejic, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). — Kiev: NUFT, 2013. — P. 166.
2. Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов, под ред. В. М. Олевского. — М.: Химия, 1980. — 192 с.
3. Белоглазов И. Н. Твердофазные экстракторы / И. Н. Белоглазов. — Л.: «Химия». Ленинградское отделение, 1985. — 239 с.
4. Патент 99991 UA на винахід, МПК B01D 11/02 (2006.01) Віброекстрактор / Зав'ялов В. Л., Бодров В. С., Попова Н. В., Мисюра Т. Г., Варганова І. В., Мілютін О. І. ; заявник Національний університет харчових технологій. — № u201112896 ; заявл. 02.11.2011 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20, 2012 р.
5. Пат. 86485 Україна, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В., Бодров В.С. - № а 2007 07563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.

УДК 663.1:637.13.8

ОЧИЩЕННЯ ТОПІНАМБУРОВОГО ЕКСТРАКТУ ВАПНЯНИМ МОЛОКОМ

Жеплінська М.М., канд. техн. наук, доцент, Бессараб О.С., канд. техн. наук, професор,
Бендерська О.В., магістрант, Лазарів І.Р., студент
Національний університет харчових технологій, Київ

В статті наведено результати з очищення екстракту з топінамбуру за допомогою вапняного молока, визначено оптимальну кількість цього реагенту та температурний діапазон, при якому найефективніше працювати з метою очищення екстракту від високомолекулярних сполук та органічних кислот задля отримання в ньому максимально можливої кількості інуліну. Використані методи і методики для визначення певних показників є загальноприйнятими, а отримані результати достовірними.

The article presents the results of purification of the extract of artichoke using lime, defined the optimal amount of reagent and temperature range in which the most effective work to extract purification of high molecular compounds and organic acids to obtain it the maximum quantity of inulin. Methods and techniques for determining certain indicators are generally accepted and reliable results.

Ключові слова: очищення, топінамбуровий екстракт, вапняне молоко, високомолекулярні сполуки.

Вступ. Економічне становище в Україні характеризується значною нестабільністю. Зростає рівень невизначеності та ризику, що ускладнює діяльність підприємств як на зовнішньому, так і на внутрішньому ринках. Ці труднощі зумовили появу негативних тенденцій та змін у консервній галузі харчування [1].

Харчування, будучи обов'язковою умовою існування організму людини, визначає його тривалість і якість життєдіяльності при постійній зміні умов навколишнього та виробничого середовища. Тому питання розроблення продуктів оздоровчо-профілактичного призначення є актуальним. До таких продуктів можна віднести екстракти, сиропи та порошки, які отримують з рослинної сировини. Особливо слід виділити таку сировину, як топінамбур. У зв'язку зі зростаючим попитом на екологічно чисті продукти харчування, топінамбур може виявитися однією з небагатьох культур, що відповідає багатьом вимогам [2]. Адже його хімічний склад різноманітний завдяки наявності інуліну, фруктози, вітамінів групи В та аскорбінової кислоти тощо.

Для очищення екстракту з топінамбуру застосовують різного роду ферментні препарати, проводять бланшування, електроплазмоліз тощо. Відомо, що при очищенні дифузійного соку в бурякоцукровому виробництві застосовують вапняне молоко для осадження високомолекулярних сполук (ВМС) – білків і