

Оптимізація раціональних витрат кремнієвмісних реагентів та визначення найбільш ефективного способу їх застосування для додаткового очищення дифузійного соку та сиропу

Л.П. Рева, доктор технічних наук, професор кафедри технології цукру і підготовки води, Національний університет харчових технологій

С.А. Шульга, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології цукру і підготовки води, Національний університет харчових технологій

Проведено оптимізацію раціональних витрат кремнієвмісних реагентів для додаткового очищення дифузійного соку та сиропу. Для цього з використанням методу Харрінгтона були обрані узагальнені критерії оптимізації, в які було закладено умову мінімізації витрат цих реагентів. Також визначено найбільш ефективні способи використання активованої кремнієвої кислоти та фільтроперліту у бурякоцукровому виробництві.

Ключові слова: очищення дифузійного соку, оптимізація раціональних витрат реагенту, математичне оброблення даних, критерій оптимальності, активована кремнієва кислота, фільтроперліт.

Проведена оптимизация рациональных расходов кремнийсодержащих реагентов для дополнительной очистки диффузионного сока и сиропа. Для этого с использованием метода Харрингтона были выбраны обобщенные критерии оптимизации, в которые были заложены условие минимизации расходов этих реагентов. Также определены наиболее эффективные способы использования активированной кремниевой кислоты и фильтроперлита в свеклосахарном производстве.

Ключевые слова: очистка диффузионного сока, оптимизация рациональных расходов реагента, математическая обработка данных, критерий оптимальности, активированная кремниевая кислота, фильтроперлит.

Optimization of rational cost silicon reagents for further purification juice and syrup. To do this, using the method of generalized Harrington were selected optimization criteria, which was a condition laid minimizing the cost of reagents. Also the most effective ways to use activated silica acid and filterperlite in sugar beet production.

Keywords: juice purification, optimization of rational cost reagent, mathematical data processing, optimality criterion, activated silicic acid, filterperlite.

Зниження якості цукрових буряків, яке спостерігається останні роки, спонукає шукати способи для підвищення ефективності очищення одержаних із цієї сировини дифузійних соків, збільшення виходу цукру і при цьому мати можливість знизити витрати вапна. Дослідженню технології очищення дифузійного соку велику увагу присвятили багато вчених, але теоретичні основи технології очищення дифузійного соку все ж таки вивчені не достатньо [1].

В результаті узагальнення науково-практичного досвіду інтенсифікації процесів очищення дифузійного соку та сиропу з використанням нетрадиційних реагентів були проведені експериментальні дослідження впливу кремнієвмісних реагентів (активованої кремнієвої кислоти (АК) та фільтроперліту (ФП)) на видалення нецукрів дифузійно-

го соку, а також тих, які утворились під час його вапняно-вуглекислотного очищення. На основі цих досліджень розроблені та запатентовані наступні способи очищення дифузійного соку:

1. Спосіб попереднього очищення дифузійного соку активованою кремнієвою кислотою [4], який передбачає безпосереднє оброблення дифузійного соку активованою кремнієвою кислотою у кількості $3,5 \cdot 10^{-3}\%$ Si до маси соку тривалістю 10...15 хв. та наступне його вапняно-вуглекислотне оброблення з відокремленням переддефекаційного осаду до основної дефекації.

2. При реалізації способу очищення дифузійного соку при комбінованому введенні фільтроперліту (основною складовою якого є SiO_2 – 75%) у дифузійний сік (0,2%) та у метастабільну зону прогресивної переддефекації (0,1% до маси соку) [3]

Результати експериментальних досліджень по визначенню раціональних витрат кремнієвмісних реагентів для додаткового очищення дифузійного соку та сиропу

Спосіб очищення дифузійного соку з використанням АК [4]								
Витрати АК, % Si до маси соку	0	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042	0,0049
Чистота дифузійного соку, %	83,0	83,46	83,95	84,27	84,56	84,65	84,48	83,98
Вміст білкових речовин, % до маси соку	0,895	0,818	0,738	0,668	0,610	0,584	0,590	0,634
Вміст пектинових речовин, % до маси соку	0,252	0,229	0,204	0,182	0,164	0,156	0,158	0,170
Спосіб очищення дифузійного соку з використанням ФП [3]								
Витрати ФП, % до маси соку	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
Чистота дифузійного соку, %	86,77	87,11	87,32	87,45	87,5	87,53	87,54	
Вміст білкових речовин, % до маси соку	0,831	0,772	0,74	0,728	0,721	0,719	0,718	
Вміст пектинових речовин, % до маси соку	0,140	0,123	0,112	0,108	0,107	0,107	0,106	
Спосіб очищення сиропу з використанням ФП [2]								
Витрати ФП, % до маси сиропу	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Чистота сиропу, %	90,6	90,8	91,1	91,18	91,23	91,25	91,28	
Вміст ВМС, % до маси СР	0,610	0,52	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	
Вміст аніонів кислот, % СаО до м.СР	0,217	0,170	0,146	0,140	0,137	0,135	0,134	
Забарвленість, од. ICUMSA	667,4	614,2	580,7	570,0	567,0	565,0	563,0	

отриманий переддефекаційний осад є достатньо стійким до умов високої лужності та температури основної дефекації, що дозволяє ефективно працювати за звичайною типовою схемою очищення без відокремлення переддефекаційного осаду.

3. Спосіб додаткового очищення сиропу фільтроперлітом (із раціональними витратами 1,5% до маси сиропу або 2,5% до маси його сухих речовин і тривалістю контакту 30 хвилин) [2].

За мету була поставлена задача провести оптимізацію раціональних витрат кремнієвмісних реагентів, а також визначити найбільш ефективні способи їх використання у бурякоцукровому виробництві, які були б раціональними з технологічної та економічної точки зору.

Для оптимізації раціональних витрат АК та ФП для очищення дифузійного соку та сиропу за допомогою пакету прикладних програм Mathcad Professional 2000 було здійснене математичне оброблення експериментальних даних, які наведені в табл. 1 [5, 6, 8].

Для оцінки ефективності застосування кремнієвмісних реагентів в процесі додаткового очищення дифузійного соку та сиропу було обрано наступні локальні критерії оптимізації (в натуральній формі) (де: x – витрати АК, % до маси соку, y – витрати ФП, % до маси соку, z – витрати ФП, % до маси сиропу):

Спосіб очищення дифузійного соку з використанням АК [4]:

- $f_1(x)$ – чистота дифузійного соку, %;
- $f_2(x)$ – вміст білкових речовин, % до м. с;
- $f_3(x)$ – вміст пектинових речовин, % до м. с.

Спосіб очищення дифузійного соку з використанням ФП [3]:

- $f_4(y)$ – чистота дифузійного соку, %;
- $f_5(y)$ – вміст білкових речовин, % до м. с.;

$f_6(y)$ – вміст пектинових речовин, % до м.с.

Спосіб очищення сиропу з використанням ФП [2]:

- $f_7(y)$ – чистота сиропу, %;
- $f_8(y)$ – вміст ВМС, % до м. СР;
- $f_9(y)$ – вміст аніонів кислот, % СаО до м. СР;
- $f_{10}(y)$ – забарвленість, од. ICUMSA.

Розв’язання задачі оптимізації передбачає розроблення математичної моделі для вираження залежності вихідних параметрів процесу від вхідних факторів. Для розроблення математичної моделі було вирішено підібрати математичні рівняння для кожного критерію оптимальності, які б з найменшою похибкою описували його зміну з часом технологічного процесу.

За даними експерименту, залежність кожного з обраних локальних критеріїв оптимізації може бути представлена у вигляді рівнянь (1), (2), (3):

Спосіб очищення дифузійного соку за використанням АК [4]:

$$y_1' = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \tag{1}$$

Спосіб очищення дифузійного соку за використанням ФП [3]:

$$y_2' = \frac{a_0 \cdot y}{1 + a_1 \cdot \sqrt{y} + a_2 \cdot y} \tag{2}$$

Спосіб очищення сиропу за використанням ФП [2]:

$$y_3' = \frac{a_0 \cdot z}{1 + a_1 \cdot \sqrt{z} + a_2 \cdot z} \tag{3}$$

Розрахунок та уточнення коефіцієнтів цих рівнянь здійснювали за допомогою пакету прикладних програм Mathcad Professional 2000, які, крім цього, включали розрахунок середньоквадратичної похибки, шляхом порівняння розрахункових

Локальні критерії оптимізації

Залежність якісних показників напівпродуктів від витрат кремнієвісних реагентів	Спосіб очищення дифузійного соку з використанням АК [4]		
	Чистота дифузійного соку	$F_q(x) = 82.898 + 1.027 \cdot 10^3 \cdot x - 1.597 \cdot 10^5 \cdot x^2$	(4)
	Вміст білкових речовин	$F_{BP}(x) = 0.911 - 163.767 \cdot x + 2.132 \cdot 10^4 \cdot x^2$	(5)
	Вміст пектинових речовин	$F_{PP}(x) = 0.257 - 50.162 \cdot x + 6.45 \cdot 10^3 \cdot x^2$	(6)
	Спосіб очищення дифузійного соку з використанням ФП [3]		
	Чистота дифузійного соку	$F_q'(y) = \frac{9.712 \cdot 10^{-6} y}{1 + 1.462 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{y} + 0.011 \cdot y}$	(7)
	Вміст білкових речовин	$F_{BP}'(y) = \frac{-0.029 \cdot y}{1 + 0.021 \cdot \sqrt{y} + 1.411 \cdot y}$	(8)
	Вміст пектинових речовин	$F_{PP}'(y) = \frac{-0.424 \cdot y}{1 + 0.534 \cdot \sqrt{y} + 9.381 \cdot y}$	(9)
	Спосіб очищення сиропу з використанням ФП [2]		
	Чистота сиропу	$F_q''(z) = \frac{1.017 \cdot 10^{-5} z}{1 + 3.823 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{z} + 0.011 \cdot z}$	(10)
	Вміст ВМС	$F_{BP}''(z) = \frac{0.121 \cdot z}{1 - 0.109 \cdot \sqrt{z} + 3.285 \cdot z}$	(11)
	Вміст аніонів кислот	$F_{An}''(z) = \frac{-0.606 \cdot z}{1 - 0.547 \cdot \sqrt{z} + 7.987 \cdot z}$	(12)
	Забарвленість сиропу	$F_{36}''(z) = \frac{-8,372 \cdot 10^{-5} \cdot z}{1 + 7,572 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{z} + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot z}$	(13)

значень з експериментальними.

В результаті були одержані рівняння локальних критеріїв оптимізації (в натуральних значеннях факторів) (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) (табл. 2).

Для того, щоб в процесі визначення оптимальних витрат АК та ФП для додаткового очищення дифузійного соку та сиропу узагальнити обрані критерії оптимізації єдиним кількісним показником, нами були обрані узагальнені критерії оптимізації. Слід зазначити, що в узагальнений критерій оптимальності було закладено умову мінімізації витрат реагенту.

Перетворення локальних критеріїв оптимальності з натуральної в безрозмірну форму було здійснено за допомогою методу Харрінгтона [10] через визначення проміжних параметрів за допомогою функції бажаності. Нові, безрозмірні значення локальних критеріїв, що отримані за допомогою функції бажаності, змінюються від 0,01 до 0,99, тому, що в узагальненому критерії оптимізації вони будуть не чутливими при наближенні до 0 або 1. Діапазон 0,01...0,99 ділиться на п'ять ін-

тервалів бажаності. Від 0,01 до 0,2 він відповідає поняттю «дуже погано», від 0,2 до 0,37 – «погано», від 0,37 до 0,63 – «задовільно», від 0,63 до 0,8 – «добре» і від 0,8 до 0,99 – «дуже добре». Інтервали бажаностей вибирались з урахуванням розрахованих значень локальних критеріїв оптимальності.

Узагальнені критерії оптимізації для досліджуваних процесів мають вигляд:

Спосіб очищення дифузійного соку з використанням АК [4]:

$$FF11_k = (YB1_k)^{0.4} \cdot (YB2_k)^{0.15} \cdot (YB3_k)^{0.15} \cdot (YB4_k)^{0.3} \quad (14)$$

Спосіб очищення дифузійного соку з використанням ФП [3]:

$$FF11'_k = (YB1'_k)^{0.4} \cdot (YB2'_k)^{0.15} \cdot (YB3'_k)^{0.15} \cdot (YB4'_k)^{0.3} \quad (15)$$

Спосіб очищення сиропу з використанням ФП [2]:

$$FF11''_k = (YB1''_k)^{0.35} \cdot (YB2''_k)^{0.10} \cdot (YB3''_k)^{0.10} \cdot (YB4''_k)^{0.2} \cdot (YB5''_k)^{0.25} \quad (16)$$

Отримані залежності узагальнених критеріїв оптимальності представлені на рис. 1 (а, б, в).

Таким чином, в результаті математичної об-

Інтервали бажаностей локальних критеріїв оптимальності

Локальні критерії оптимальності		Значення бажаностей	
		0,01	0,99
Спосіб очищення дифузійного соку з використанням АК [4]			
$f_1(x)$	чистота дифузійного соку, %	83,0	84,65
$f_2(x)$	вміст білкових речовин в дифузійному соку, % до маси соку	0,895	0,584
$f_3(x)$	вміст пектинових речовин в дифузійному соку, % до маси соку	0,252	0,156
x	витрати АК, % Si до маси соку	0,0049	0
Спосіб очищення дифузійного соку з використанням ФП [3]			
$f_4(y)$	чистота дифузійного соку, %	83,0	84,65
$f_5(y)$	вміст білкових речовин в дифузійному соку, % до маси соку	0,895	0,584
$f_6(y)$	вміст пектинових речовин в дифузійному соку, % до маси соку	0,252	0,156
y	витрати ФП, % до маси соку	0,7	0,1
Спосіб очищення сиропу з використанням ФП [2]			
$f_7(z)$	чистота сиропу, %	90,1	91,28
$f_8(z)$	вміст ВМС в сиропі, % до маси СР	0,610	0,370
$f_9(z)$	вміст аніонів кислот в сиропі, % CaO до м. СР	0,217	0,134
$f_{10}(z)$	забарвленість, од. ICUMSA	667,4	563,0
z	витрати ФП, % до маси сиропу	3,0	0,25

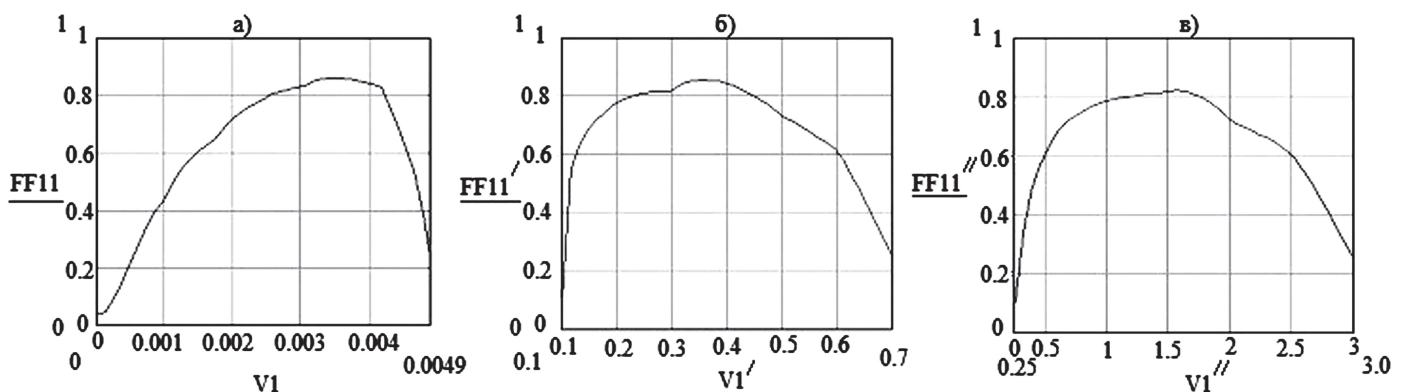


Рис. 1. Залежності узагальнених критеріїв оптимальності від витрат кремнієвмісних реагентів: а) спосіб очищення дифузійного соку з використанням активованої кремнієвої кислоти [4]; б) спосіб очищення дифузійного соку з використанням фільтроперліту [3]; в) спосіб очищення сиропу з використанням фільтроперліту [2].

робки експериментальних даних, враховуючи умову мінімізації витрат реагентів, визначено

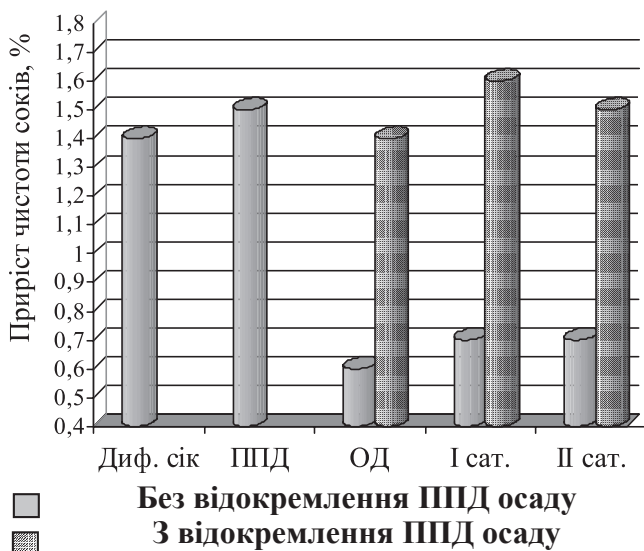


Рис. 2. Вплив активованої кремнієвої кислоти на ефективність очищення дифузійного соку

оптимальні витрати АК та ФП: в процесі додаткового очищення дифузійного соку витрати АК становлять $3,31 \cdot 10^{-3}\%$ Si до маси соку, витрати ФП - 0,34% до маси соку, в процесі додаткового очищення сиропу витрати ФП складають 1,488% до маси сиропу.

Для визначення найбільш раціонального способу використання Si-вмісних реагентів у бурякоцукровому виробництві було проведено порівняння технологічних ефектів від кожного із запропонованих способів.

З рис. 2 видно, що спосіб попереднього очищення дифузійного соку активованою кремнієвою кислотою [4, 5] дає можливість підвищити сумарну величину чистоти очищеного соку за рахунок як очисної дії активованої кремнієвої кислоти, так і ефекту відокремлення переддефекаційного осаду в середньому склала 1,5%, а за рахунок лише власного очисного ефекту активованої кремнієвої кислоти (тобто без відокремлення перед де-

фекаційного осаду) – лише 0,7%.

При реалізації ж способу очищення дифузійного соку з використанням фільтроперліту [3, 8] отриманий переддефекаційний осад є достатньо стійким до умов високої лужності та температури основної дефекації, що дозволяє ефективно працювати за звичайною типовою схемою очищення без відокремлення переддефекаційного осаду. Приріст чистоти очищеного соку складає 1% (рис. 3). Загальний ефект очищення при цьому дорівнює 8,5% (що відповідає збільшенню виходу цукру на 0,35% до маси буряків) і обумовлений комплексною дією фільтроперліту як адсорбенту (75%), так і очисного реагенту в результаті його часткового розчинення (25%).

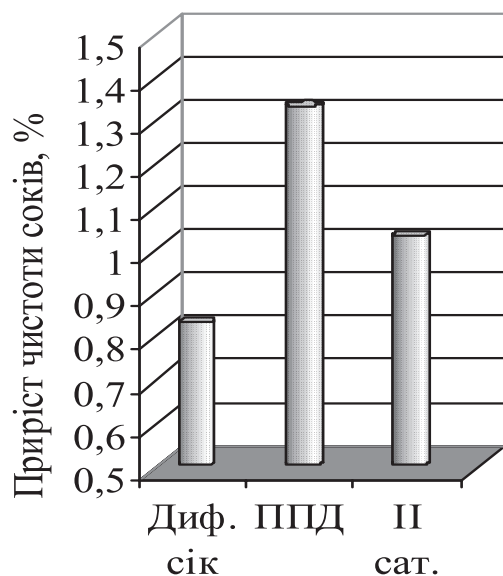


Рис. 3. Вплив фільтроперліту на ефективність очищення дифузійного соку

При цьому ці способи [4, 3] надають можливість зменшити загальні витрати вапна відповідно на 0,5% та 0,7% CaO до маси буряків при зберіганні високих якісних показників очищеного соку [1, 7].

Спосіб же додаткового очищення сиропу фільтроперлітом [2, 6] дозволяє досягти максимального приросту чистоти сиропу на рівні 1,4%, що відповідає збільшенню виходу цукру приблизно на 0,5% до маси буряків (рис. 4). Цей спосіб очищення сиропу має найкращі технологічні результати у порівнянні зі способами очищення дифузійного соку ФП і АК.

При погіршеній якості буряків і, відповідно, соків та сиропу ефективним також виявився спосіб оброблення очищеного соку фільтроперлітом з наступним згущенням суміші до сиропу, в результаті чого приріст чистоти одержаного сиропу склав 1,2% (рис. 4). Це підвищення чистоти виявилось трохи нижчим за аналогічний показник при реалізації способу безпосереднього оброблення сиропу фільтроперлітом. Незважаючи на це, додатковим позитивним ефектом при цьому

є те, що частинки ФП завдяки своїм абразивним властивостям мають здатність очищувати поверхню нагріву випарної установки від утвореного накипу.

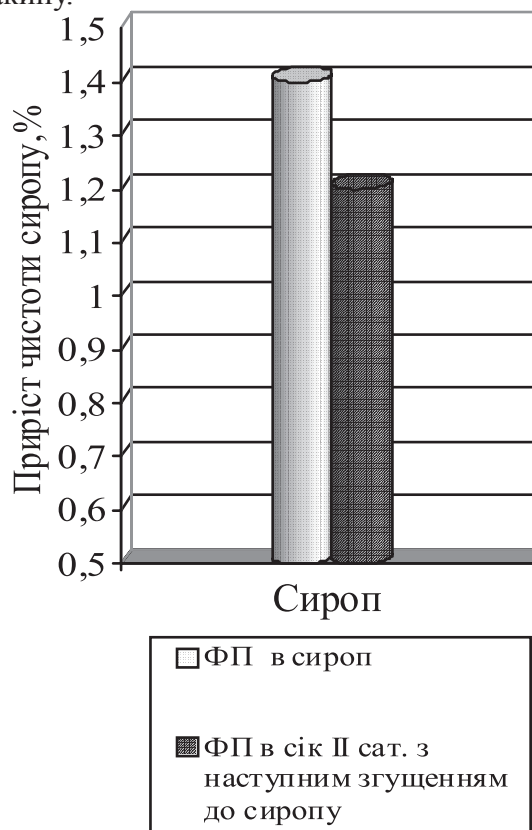


Рис. 4. Вплив фільтроперліту на ефективність очищення сиропу

Дослідження по визначенню небезпеки осаження сполук кремнію на поверхні нагріву випарної установки в процесі згущення очищеного соку до сиропу при очищенні дифузійного соку активованою кремнієвою кислотою та фільтроперлітом [1, 9] показали, що використання цих реагентів є безпечним і не створює загрози для суттєвого відкладення кремнієвого накипу на поверхні нагріву. При цьому залишковий вміст кремнію у сиропі в результаті безпосереднього оброблення ФП готового сиропу ($6 \cdot 10^{-4}\%$) та очищеного соку з наступним його згущенням ($7 \cdot 10^{-4}\%$ маси СР сиропу) є ще нижчим, ніж при обробленні ФП дифузійного соку [9].

Отже, проаналізувавши кожен із приведених способів, можна зробити висновок, що всі вони підтвердили свою ефективність. При цьому для заводів, в яких планується модернізація типової схеми з переходом на удосконалений варіант із відокремленням переддефекаційного осаду нецукрів до основної дефекації, достатньо ефективним способом підвищення загального ефекту видалення нецукрів буде спосіб оброблення дифузійного соку раціональною кількістю АК. Спосіб же комбінованого введення фільтроперліту для додаткового очищення дифузійного соку що дозволяє ефективно працювати за звичайною типовою

схемою очищення без відокремлення переддефекційного осаду. Також найбільш просто в сучасній типовій схемі можна практично реалізувати з найкращими технологічними показниками розроблені способи безпосереднього оброблення готового сиропу фільтроперлітом (ефективність якого забезпечується подвійною дією ФП як фільтранта, так і очисного засобу) та спосіб оброблення соку II сатурації з наступним його згущенням до сиропу (в якому ФП виконує роль адсорбенту та абразиву для очищення від накипу поверхні нагріву випарних апаратів). ■

Список використаних джерел

1. *Замура, С. А.* Підвищення ефективності очищення соків та сиропу з використанням кремнієвмісних реагентів : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.05 / Замура Світлана Анатоліївна ; НУХТ. - К., 2002. - 269 с.

2. *Патент 33595 UA, МПК C13D3/00 (2006).* Спосіб очищення сиропу / Л. П. Рева, Н. М. Пушанко, С. А. Замура ; заявник Національний університет харчових технологій. - заявл. 27.03.2008 ; опубл. 25.06.2008, Бюл. №12, 2018 р.

3. *Патент 90500 UA, МПК C13D3/00 (2009).* Спосіб очищення дифузійного соку / Л. П. Рева, Н. М. Пушанко, С. А. Замура ; заявник Національний університет харчових технологій. - заявл. 07.09.2007 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. №9, 2010 р.

4. *Патент 93206 UA, МПК C13D3/00 (2011.01).* Спосіб очищення дифузійного соку / Л. П. Рева,

Н. М. Пушанко, С. А. Замура ; заявник Національний університет харчових технологій. - заявл. 26.02.2008 ; опубл. 25.01.2011, Бюл. №2, 2011 р.

5. *Рева, Л.П.* Використання активованої кремнієвої кислоти для додаткового очищення дифузійного соку / Л. П. Рева, Н. М. Пушанко, С. А. Замура // Цукор України. - 2008. - №3. - С.11 - 15.

6. *Рева, Л.П.* Ефективність додаткового очищення соку II сатурації (в процесі його згущення) та сиропу з використанням фільтроперліту / Л. П. Рева, С. А. Замура, Н. М. Пушанко, Н. Г. Діглашок, Ю. А. Шубовська // Цукор України. - 2008. - №2. - С.24 - 27.

7. *Рева, Л.П.* Оптимізація загальних витрат вапна на очищення дифузійного соку при додатковому використанні активованої кремнієвої кислоти та фільтроперліту / Л. П. Рева, С.А.Шульга // Цукор України. - 2015. - №10 (118). - С.23 - 27.

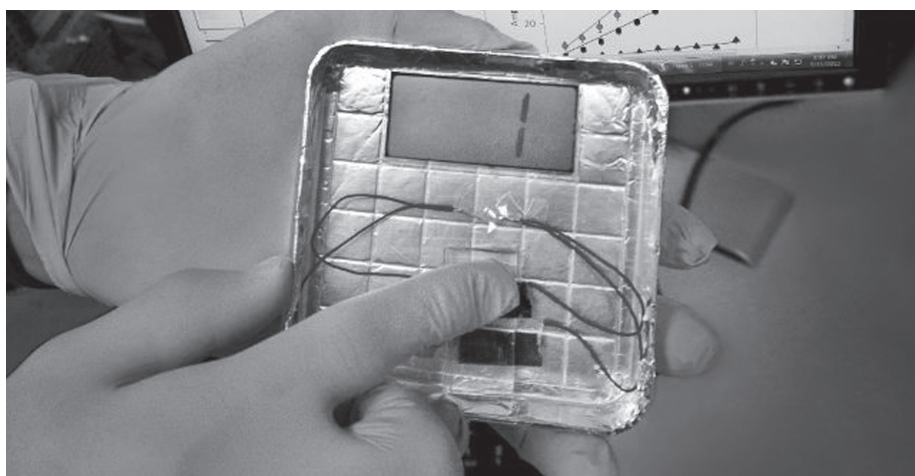
8. *Рева, Л.П.* Підвищення ефективності очищення дифузійного соку обробленням його фільтроперлітом / Л. П. Рева, Н. М. Пушанко, С. А. Замура, Л. В. Алексєєва // Цукор України. - 2007. - №5-6. - С.18 - 21.

9. *Рева, Л.П.* Рух кремнію в напівпродуктах бурякоцукрового виробництва при використанні кремнієвмісних реагентів для додаткового очищення дифузійного соку / Л. П. Рева, С.А.Шульга // Цукор України. - 2015. - №11 (119). - С.44 - 46.

10. *Федоров В. Г.* Планирование и реализация экспериментов в пищевой промышленности. / В. Г. Федоров, А. К. Плесконос - М. : Пищ. пром-ть, 1980. - 240 с.

ЦІКАВІ ФАКТИ

Вірусна електрика



гу Рекордів Гіннеса, розробивши перший в світі акумулятор, де використовувала генетично змінені віруси для створення позитивних і негативних пластин. Така технологія дозволяє створювати набагато більш точну (тому що віруси ідеально точно копіюють себе), «зелену», і ефективну технологію, адже за оцінками фахівців, такі акумулятори будуть в 10 разів більше ємними, і зможуть заряджатися більш ніж у 100 разів більше, до того як вичерпаються.

«Потрібно більше досліджень, але наша робота - перший багатообіцяючий крок до створення персональних генераторів енергії, приводів для нанопристроїв і інших пристроїв, що використовують вірусну електрику», - говорять вчені.

А чи знаєте ви, що акумулятори роблять не тільки використовуючи досягнення фізики та хімії. Замість всім відомих графіту, оксиду літію з кобальтом або марганцем, або навіть перспективного кремнієвого нанопровідника, частини акумуляторів в майбутньому можуть робитися з використанням біомолекулярних технологій.

У 2009 році група вчених з Массачусетського Технологічного Університету потрапила в Книгу