

УДК 664.12, 664.1.038, 664.1.05, 664.1.054

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ КРИСТАЛОУТВОРЮВАЧІВ З СУЦІЛЬНИМИ КРИСТАЛАМИ РІЗНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЦУКРОВОГО УТФЕЛЮ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

Ткаченко С. В.¹, к.т.н, ст. дослідник,
с.н.с відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Анісімова О. М.^{1,3}, аспірантка, пров. інженерка
<https://orcid.org/0000-0002-8459-1631>

Шейко Т. В.¹, к.т.н., старша дослідниця, п.н.с.
відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Хомічак Л. М.¹, д.т.н., проф.,
член-кореспондент НААН, директор Інституту продовольчих ресурсів НААН
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Скорик К. Д.¹, к.т.н., доц., п.н.с.
відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

Волощук Г. І.², к.т.н., доц. кафедри харчових та аграрних технологій,
<https://orcid.org/0000-0003-1535-8817>

¹Інститут продовольчих ресурсів НААН України, м. Київ, Україна

²Інститут післядипломної освіти НУХТ, м. Київ, Україна

³ТОВ «НВП «Електрогазохім», м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-21>

Предмет. Своєчасне заведення кристалів і припинення їх утворення мають велике значення для процесу уварювання утфелю та отримання якісного готового цукру у цукровій промисловості. Для забезпечення рівномірного гранулометричного складу цукру, зменшення вмісту конгломератів і зведення до мінімуму утворення вторинних центрів кристалізації протягом усього циклу уварювання утфелів, необхідний якісний кристалоутворювач. **Мета.** Метою роботи є дослідження ефективності впливу нового типу затравок із суцільних мікрокристалів з різною дисперсністю на процес кристалізації цукрози і якість цукру у виробничих умовах цукрових заводів. **Методи.** Всі дослідження якісних і кількісних показників напівпродуктів та продуктів цукрового виробництва виконували згідно загальноприйнятих методик (Збірник методик ICUMSA 2007). Для визначення розмірів часточок (дисперсності) кристалоутворювачів застосовували метод лазерної дифрактометрії. Мікроскопіювання досліджуваних зразків цукру здійснювали за допомогою мікроскопу GENETIC PRO MONO (A) (Delta Optical, Польща). Фіксували мікрознімки цифровою камерою MCMOS 5100 5.1MP USB2.0 (SIGETA, Україна). Оброблення мікрознімків виконували у середовищі програмного забезпечення TourView V3.7 (Hangzhou TourTek Photonics Co., Ltd., Китай). **Результати.** Представлені результати випробувань затравок із суцільних кристалів «Естер К 01» (18,2 мкм) і «Естер К 01» (10,2 мкм), «Естер К 01» (46,4 мкм) в умовах цукрових заводів за способом роботи на маточному утфелі та за способом шоквої кристалізації (повної затравки), відповідно. Наведено порівняння гранулометричного складу кристалів цукру отриманого на кристалоутворювачах з різною дисперсністю. Досліджено морфологію кристалів отриманих зразків цукру. **Сфера застосування результатів.** Цукрові підприємства одержать дані щодо застосування кристалоутворювачів із суцільних кристалів різної дисперсності в технологічному процесі уварювання утфелю цукрового виробництва.

Ключові слова: центри кристалізації, Естер К 01, кристалізація, утфель, цукор суспензія, дисперсність, часточки, сироп, затравні матеріали, кристалоутворювачі, кристали, якість, цукрове виробництво, розділення

EXPERIENCE IN THE USE OF CRYSTAL FORMING AGENTS WITH WHOLE CRYSTALS OF DIFFERENT DISPERSION FOR THE PRODUCTION OF SUGAR MASSECUTE IN PRODUCTION CONDITIONS

Serhii Tkachenko¹, PhD, Senior Researcher, Senior Research
of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients,
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Olena Anisimova^{1,3}, Postgraduate, Leading process engineer,
<https://orcid.org/0000-0002-8459-1631>

Tamila Sheiko¹, PhD, Senior Researcher,

Leading Researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients.
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Liubomyr Khomichak¹, D-r of Sc., Engineering, Professor,
 Corresponding Member of the NAAS, Director of the Institute,
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Kostiantyn Skoryk¹, PhD, Associate Professor,
 Leading researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients.
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

Halyna Voloshchuk², PhD, Associate Professor
 of the Department of Food and Agricultural Technologies
<https://orcid.org/0000-0003-1535-8817>

¹Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

²Institutes of Postgraduate Education of NUFT, Kyiv, Ukraine

³LLC «Research and Production Enterprise «Electrogasochem», Kyiv, Ukraine

Subject. The timely seed of crystals and the cessation of their formation are of great importance for the process of massecuite boiling and obtaining high-quality finished massecuite in the sugar industry. High-quality crystal-forming agents are required to ensure a uniform crystals size distribution of sugar, to reduce the content of conglomerates and minimize the formation of secondary crystallization centers throughout the entire massecuite boiling cycle. **Purpose.** The aim of the work is to study effectiveness of the influence of a new type of crystal seed with different microcrystals dispersion on the process of sucrose crystallization and sugar quality in the production conditions of sugar factories. **Methods.** All studies of qualitative and quantitative characteristics of products and intermediate products were performed using standard methods (ICUMSA methods book 2007). The laser diffractometry was used to determine the particle size (dispersion) of the crystal-forming agents. Microscopy of samples was carried out using microscope GENETIC PRO MONO (A) (Delta Optical, Poland). Micrographs were recorded with a digital camera MCMOS 5100 5.1MP USB2.0 (SIGETA, Ukraine). Microphotographies handling was done using the software ToupView V3.7. (Hangzhou ToupTek Photonics Co., Ltd., China). **Results.** The results of tests are presented for whole crystal seed “Ester K 01” (18.2 μm) and “Ester K 01” (10.2 μm), “Ester K 01” (46.4 μm) at sugar factories using the method of operation on the seed magma and the method of shock crystallization respectively. A comparison is given of sugar crystals size distribution for crystals obtained with crystal-forming agents with different dispersion. The morphology of sugar crystals was studied. **Scope of results.** Sugar enterprises will obtain data on the use of crystal-forming agents from whole crystals of different dispersion in the technological process of massecuite boiling in sugar production.

Key words: crystallization centers, Ester K 01, crystallization, massecuite, sugar suspension, dispersion, particles, thick juice, seed materials, crystal-forming agents, crystals, quality, sugar production, separation

Постановка проблеми. Отримання рівномірного гранулометричного складу цукру є основною метою уварювання утфелю на штучних кристалоутворювачах, але цього важко досягти за звичайних умов уварювання утфелю на затравках з подрібненими, нерівномірними за розмірами кристалами (цукрова пудра, тощо). Заведені дрібнодисперсні центри кристалізації розміром менше 10 мкм проходять через критичну фазу росту. Через це вони можуть розчинитися або спричинити спонтанний ріст і утворення нових центрів кристалізації [1–5]. Розміри кристалів затравочного матеріалу, починаючи від 20 мкм, дозволяють повністю уникнути спонтанного розчинення кристалів, оскільки центри кристалізації, заведені до підвареного сиропу, вже мають достатньо велику площу поверхні, що значно інтенсифікує процес нарощування кристалів [1–7]. Утворенню конгломератів і додаткових центрів кристалізації на цій стадії можна запобігти лише за допомогою введення кристалоутворювача з рівномірним розміром кристалів і точного дозування підкачок сиропу в метастабільну зону варки [2].

Раніше колективом авторів [8–11] вже було доведено ефективність використання кристалоутворювача із суцільними кристалами «Естер К 01» (НВП «Електрогазохім», Україна) з метою отримання рівномірних, однорідних кристалів цукру за способом шокової кристалізації і уварювання маточного утфелю в лабораторних умовах.

Спеціалістами НВП «Електрогазохім» передбачена можливість виготовлення кристалоутворювачів із суцільними мікрокристалами з різним розміром. Тому являє інтерес дослідження їх впливу на процес кристалоутворення і якість готової продукції за різних способів уварювання утфелю безпосередньо в умовах цукрових заводів.

Матеріали та методи. Об'єктами дослідження були кристалоутворювачі, призначені для використання у виробництві цукру, напівпродукти та продукти цукрового виробництва, такі як утфель, сироп, міжкристальний розчин та готовий цукор, що були отримані у виробничих умовах.

Розмірів часточок кристалоутворювачів визначали з використанням дифракційного лазерного аналізатора SALD-201V (SHIMADZU, Японія) [12, 13]. В готовому цукрі здійснювали аналіз гранулометричного складу за методом Батлера [14] та проводили мікроскопіювання отриманих зразків цукру за допомогою мікроскопу Genetic pro mono (A) (Delta Optical, Польща), фіксували мікрознімки цифровою камерою MCMOS 5100 5.1MP USB2.0 (SIGETA, Україна). Оброблення мікрознімків виконували у середовищі програмного забезпечення ToupView V3.7 (Hangzhou ToupTek Photonics Co., Ltd., Китай).

Для проведення досліджень використовували кристалоутворювачі марки «Естер К 01» з різним середнім розміром мікрокристалів: 10,2 мкм; 18,2 мкм і 46,4 мкм, що були виготовлені в умовах виробничих потужностей НВП «Електрогазохім» за спеціальною технологією осаджування мікрокристалів з перенасиченого розчину. Кристалоутворювачі на основі розмеленого цукру (заводська суспензія) брали безпосередньо на цукрових заводах.

Виробничі випробування були виконані в умовах трьох цукрових заводів України. На одному з цукрових заводів центрального регіону України (Завод №1) були проведені виробничі випробування з метою перевірки ефективності дії кристалоутворювача «Естер К 01» (10,20 мкм). Процес заведення кристалоутворювача на заводі №1 повністю автоматизований і виконується за способом повної затравки. Для визначення кількості кристалоутворювача для процесу використовували формулу (1) [2, 15, 16]:

$$m = \frac{V}{\rho} \cdot \left(\frac{d_n}{d_k} \right)^3 \cdot \frac{k_1}{k_2} \cdot 10^6 = \frac{60}{1,4} \cdot \left(\frac{0,01}{0,7} \right)^3 \cdot \frac{55}{30} \cdot 10^6 = 229 \approx 230 \text{ г} \quad (1)$$

де середній розмір частинок кристалоутворювача $d_n = 0,01$ мм; середній розмір кристалів у готовому утфелі $d_k = 0,7$ мм; – вміст кристалів в готовому утфелі $k_1 = 55\%$; вміст кристалів в кристалоутворювачі $k_2 = 30\%$; об'єм готового утфелю $V = 60$ м³; густина готового утфелю $\rho = 1,4$ т/м³.

Також на заводі №1 були проведені виробничі випробування кристалоутворювача «Естер К 01» (46,4 мкм) за способом повної затравки. Для того, щоб обрати найбільш раціональну кількість кристалоутворювача для процесу, ми використовували різні його концентрації: 10 см³, 20 см³ і 30 см³ на апарат місткістю 60 м³. Ці концентрації становили 0,2 см³, 0,3 см³ і 0,5 см³ на 1 м³ готового утфелю.

Для перевірки ефективності дії кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) були проведені виробничі випробування на цукрових заводах західного (Завод №2) і східного (Завод №3) регіонів України.

На заводі №2 використовують метод уварювання маточного утфелю, що повністю автоматизований. Для уварювання маточного утфелю на вакуум-апарат місткістю 50 м³ використовують 1,7 дм³ заводської суспензії, а кількість кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) взято на 10% менше від кількості заводської суспензії, що склало 1,5 дм³. Менша витрата кристалоутворювача обумовлена тим, що середній розмір його часточок складає більше 10 мкм і таким чином можна виключити розчинення і втрату активних центрів кристалізації [1-5].

В якості контрольного зразка використовували заводську суспензію, часточки якої мали середній розмір 4,1 мкм, та були отримані шляхом подрібнення цукру в ізопропанолі, з додаванням суміш гліцерину, що насичена цукрозою, для стабілізації.

Уварювання утфелю проводили в однакових умовах для досліджуваних затравок відповідно до налаштувань керуючої програми. Для отримання маточного утфелю сироп з

клеровкою ($CP=72-75\%$, $Ч=94-95\%$) набирають у вакуум-апарат місткістю 50 м^3 і згущують. За досягнення коефіцієнту перенасичення – $K_p=1,1$ у сироп додають кристалоутворювач, внаслідок чого утворюються кристали маточного утфелю. Наступним етапом уварювання є зростання кристалів і досягнення заданої величини сухих речовин ($CP=90,0\%$) та заданого рівня утфелю в апараті. Уварювання маточного утфелю займає в середньому 3,0 години. Для отримання основного утфелю маточний утфель в кількості $4,5\text{ м}^3$ надходить у вакуум-апарат місткістю 60 м^3 через труби замкнутого трубопроводу. Уварювання утфелю в основному вакуум-апараті займає 2,5 години.

На цукровому заводі №3 східного регіону України були проведені схожі виробничі випробування для підтвердження ефективності дії кристалоутворювача «Естер К 01» ($18,2\text{ мкм}$). В якості контролю також використовували заводську суспензію з середнім розміром часточок $6,2\text{ мкм}$, що отримували в умовах заводу №3 шляхом подрібнення цукру в ізопропанолі, із додаванням для стабілізації насиченої цукрозою суміші гліцерину.

Для процесу кристалоутворення на заводі №3 застосовують повністю автоматизований метод уварювання маточного утфелю. У процесі уварювання утфелю використовують фільтрований сироп з клеровкою ($CP=72-74\%$, $Ч=94-95\%$). На вакуум-апарат для уварювання маточного утфелю об'ємом 60 м^3 витрата заводської суспензії складає $3,5\text{ дм}^3$.

Так як перед нами було поставлене завдання отримати цукор з середнім розміром кристалів (МА) $0,65...0,72\text{ мм}$, кристалоутворювач «Естер К 01» ($18,2\text{ мкм}$) для випробування брали у таких кількостях: $2,5$; $3,0$; $3,5\text{ дм}^3$.

Отримання утфелю здійснювали в однакових умовах для досліджуваних кристалоутворювачів відповідно заводських налаштувань автоматичної програми.

У вакуум-апарат об'ємом 60 м^3 для отримання маточного утфелю набирають фільтрований сироп з клеровкою, який згущують до коефіцієнта перенасичення $K_{пр} = 1,25$, за температури $72...74^\circ\text{C}$ та тиску $P = -88,0\text{ кПа}$. Після цього вводять кристалоутворювач. Процес кристалоутворення триває до $K_{пр} = 1,58$, після чого відбувається перше «підкачування» сиропу до $K_{пр} = 1,45$ і згущення до $K_{пр} = 1,55$. Потім відбувається друге «підкачування» сиропу до $K_{пр} = 1,42$.

Наступний етап уварювання включає зростання кристалів з систематичним «підкачуванням» сиропу ($CP = 90\%$) і досягнення заданого рівня утфелю в апараті. Уварювання маточного утфелю займає приблизно дві години.

У приймальну мішалку, що з'єднана з іншою мішалкою циркуляційним контуром, надходить готовий маточний утфель. Далі він подається в другу мішалку циркуляційним насосом через трубопровід, що підігрівається до температури 72°C . Для отримання утфелю першої кристалізації, маточний утфель набирають із трубопроводу циркуляційного контуру в кількості $4,7\text{ м}^3$ у вакуум-апарат місткістю 60 м^3 . У вакуум-апараті першої кристалізації утфель уварюється протягом двох годин.

Наведені в дослідних таблицях отримані показники, є середніми значеннями з п'яти паралельних вимірювань. Похибка від середнього значення не перевищує 10% .

Результати та обговорення. В таблиці 1 наведені результати гранулометричного складу цукру, отриманого у лабораторних [123–125] і виробничих умовах цукрового заводу №1 на кристалоутворювачі «Естер К 01» ($10,20\text{ мкм}$).

Згідно з аналізу даних таблиці 1, середній лінійний розмір зразка цукру, отриманого на кристалоутворювачі «Естер К 01» ($10,20\text{ мкм}$) у виробничих умовах, на $2,3\%$ нижчий, ніж у зразку отриманого в лабораторних умовах. Крім того, коефіцієнт нерівномірності становить $30,64\%$, що на $9,86\%$ більше, ніж у лабораторних умовах, але все ще є хорошим показником відповідно до рекомендацій [17]. На цукровому заводі кристали цукру частково руйнуються під час розділення утфелю (центрифугування) та висушування. Це може призвести до незначного зменшення середнього лінійного розміру та збільшення

коефіцієнта нерівномірності.

Таблиця 1

**Гранулометричний склад цукру отриманого на кристалоутворювачі
«Естер К 01» (10,20 мкм)**

Розмір отворів сита, мм	Середній розмір частинок, d, мм	Маса цукру на ситі, м, г/Кількість, %	
		Кристалоутворювач «Естер К 01»	
		Лабораторні умови	Виробничі умови
2,50	2,70	0	0
1,25	1,35	3,27±0,03	5,14±0,03
1,00	1,10	13,57±0,02	10,41±0,02
0,80	0,90	29,28±0,02	26,28±0,02
0,50	0,65	48,04±0,02	49,16±0,02
0,20	0,35	5,84±0,03	8,93±0,03
Піддон	0,10	0,56±0,05	0,08±0,06
Середній лінійний розмір МА, мм	-	0,790±0,005	0,772±0,005
Коефіцієнт нерівномірності CV, %	-	27,62±0,02	30,64±0,01

Подальший аналіз даних (табл. 1) показав, що кількість кристалів з середнім розміром 0,65 мм складає 49,16%, що на 2,3% вище в порівнянні з цукром отриманим у лабораторних умовах, а кількість кристалів з розміром фракції 0,10 мм складає всього 0,08%, що на 85,7% менше у порівнянні з цукром отриманим у лабораторних умовах. Отже, використання кристалоутворювача «Естер К 01» (10,20 мкм) в умовах виробництва забезпечує отримання рівномірних кристалів цукру.

У виробничих умовах також були зроблені мікрофотознімки зразків готового цукру, отриманого на кристалоутворювачі «Естер К 01» (10,20 мкм), щоб оцінити структуру кристалів (рис. 1).

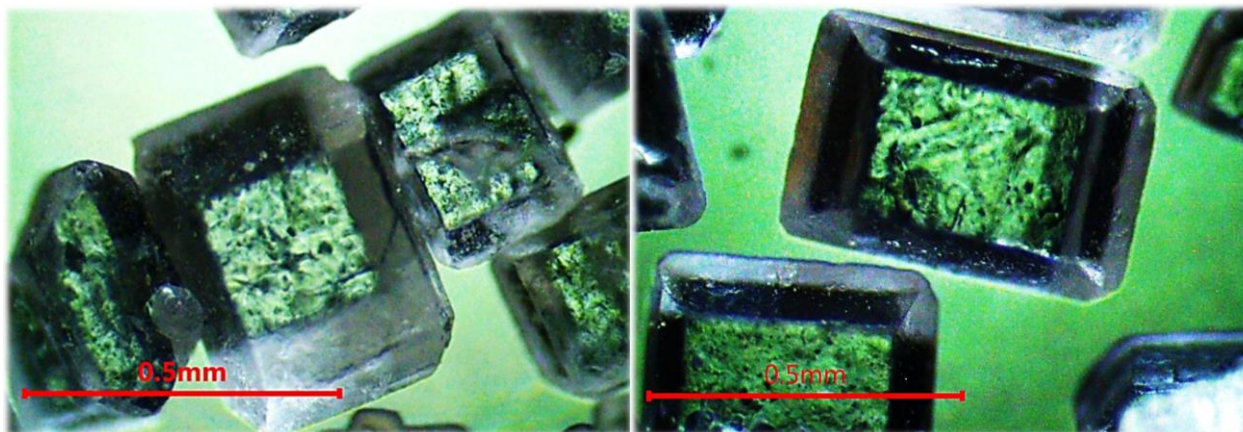


Рис. 1. Мікрофотознімки кристалів цукру, отриманих у виробничих умовах заводу №1 на кристалоутворювачі «Естер К 01» (10,20 мкм) (збільшення в 4 рази)

Аналіз мікрофотознімків, представлених на рисунку 1, показав, що кристали цукру прозорі та мають відповідний габітус, властивий для цукрози [18, 19]. Чіткі грані без пошкоджень є свідченням високої міцності кристалів. У кристалі немає сторонніх включень, оскільки його внутрішня будова та зовнішня огранка відповідають строгим законам симетрії [2].

В таблиці 2 показано порівняльні результати гранулометричного складу цукру, отриманого у виробничих умовах заводу №1 на кристалоутворювачі «Естер К 01» (46,4 мкм). Згідно з аналізом даних, найбільший середній лінійний розмір кристалів цукру (0,766 мм) спостерігаємо за витрати кристалоутворювача 0,5 см³; дещо менший розмір (0,615 мм) становить за витрати 0,3 см³; і найменший розмір (0,565 мм) маємо за витрати 0,2 см³.

Найменший коефіцієнт нерівномірності (30,67%) маємо за витрати 0,5 см³, що на 12,30% і 10,82% нижче, ніж у зразків цукру, отриманих за витрати кристалоутворювача 0,2 см³ і 0,3 см³ відповідно. Це хороший показник відповідно до рекомендацій [17].

Таблиця 2

**Гранулометричний склад цукру отриманого на кристалоутворювачі
«Естер К 01» (46,4 мкм)**

Розмір отворів сита, мм	Середній розмір частинок, d, мм	Маса цукру на ситі, т, г/Кількість, %		
		Кількість кристалоутворювача на 1 м ³ утфелю, см ³		
		0,2	0,3	0,5
2,50	2,70	0	0	0
1,25	1,35	0,41±0,06	0,78±0,06	5,00±0,03
1,00	1,10	2,11±0,03	3,60±0,03	9,50±0,03
0,80	0,90	7,76±0,03	12,93±0,02	26,50±0,02
0,50	0,65	50,68±0,02	52,67±0,02	49,70±0,02
0,20	0,35	39,04±0,02	29,49±0,02	9,30±0,02
Піддон	0,10	1,73±0,04	0,53±0,06	0,10±0,07
Середній лінійний розмір МА, мм	-	0,565±0,005	0,615±0,005	0,766±0,007
Коефіцієнт нерівномірності CV, %	-	34,97±0,01	34,39±0,01	30,67±0,02

Також з аналізу представлених даних (табл. 2), було виявлено, що за використання витрати 0,3 см³ «Естер К 01» (46,4 мкм) було отримано найбільшу кількість кристалів цукру з фракцією 0,65 мм – 52,67%, що на 3,78% і 5,64% більше, ніж за використання 0,2 см³ і 0,5 см³ відповідно. Найбільша кількість кристалів цукру фракції 0,90 мм отримана за витрати 0,5 см³ і складає 26,50%, а це на 70,72% і 51,21% більше у порівнянні із витратою 0,2 см³ і 0,3 см³ відповідно. Крім того, за витрати 0,5 см³ спостерігаємо найбільшу кількість цукру з середнім розміром фракції 1,10 мм (9,5%) і 1,35 мм (5,00%). Натомість кількість кристалів фракції 0,35 мм, за витрати кристалоутворювача «Естер К 01» (46,4 мкм) – 0,5 см³ складає 9,30%, що на 76,18% і 68,46% менше ніж у цукру, отриманому за витрати 0,2 см³ і 0,3 см³ відповідно. За цього кристали дрібної фракції розміром 0,10 мм складають всього 0,10%, що на 94,22% і 81,13% менше, ніж зразок цукру, зварений за витрати 0,2 см³ і 0,3 см³ відповідно.

У таблиці 3 показані порівняльні результати гранулометричного складу цукру отриманого у виробничих умовах заводу № 2 на заводській суспензії та кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм).

Таблиця 3

**Гранулометричний склад цукру отриманого на заводській суспензії і кристалоутворювачі
«Естер К 01» (18,2 мкм) у виробничих умовах заводу №2**

Розмір отворів сита, мм	Середній розмір частинок, d, мм	Маса цукру на ситі, т, г/Кількість, %	
		Кристалоутворювач	
		Заводська суспензія	«Естер К 01» (18,2 мкм)
2,50	2,70	1,86±0,03	2,41±0,03
1,25	1,35	5,40±0,03	6,44±0,03
1,00	1,10	9,32±0,03	10,51±0,03
0,80	0,90	6,92±0,03	15,38±0,02
0,50	0,65	59,26±0,02	50,83±0,02
0,20	0,35	16,25±0,02	14,32±0,02
Піддон	0,10	0,99±0,05	0,11±0,05
Середній лінійний розмір МА, мм	-	0,710±0,005	0,750±0,005
Коефіцієнт нерівномірності CV, %	-	37,24±0,01	36,58±0,01

Аналіз даних таблиці 3 показав, що зразок цукру отриманий на кристалоутворювачі

«Естер К 01» (18,2 мкм) має середній лінійний розмір кристалів на 5,3% вище, ніж зразок цукру, що отриманий на заводській суспензії. Коефіцієнт нерівномірності складає 36,58%, що на 1,77% нижче, ніж у звареного на заводської суспензії цукру. Використання кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) в умовах виробництва дає змогу отримати більше крупних кристалів цукру (табл. 3). Кількість кристалів цукру з фракцією 0,90 мм становить 15,38%, що у порівнянні з використанням заводської суспензії на 55,0% більше. Однак фракція кристалів з середнім розміром 0,65 мм і 0,35 мм складає 50,83% і 14,32%, що на 14,23% і 11,88% відповідно менше у порівнянні з цукром отриманим на заводській суспензії. Утворення цукру з більшим середнім лінійним розміром кристалів на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) в порівнянні з заводською суспензією, пов'язано з більшим середнім розміром мікрокристалів затравки, що буде сприяти швидшому вирощуванню кристалів цукру [11]. Оскільки кристалоутворювач уже має сформований кристал у своєму складі, тривалість стадії формування кристалів у маточному утфелі на «Естер К 01» (18,2 мкм) варто скоротити, шляхом внесення змін в автоматичну програму уварювання утфелю. У цукрі звареному на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) менший коефіцієнт нерівномірності очевидно пов'язаний з більш рівномірним дисперсним складом часточок кристалоутворювача.

Зразки готового цукру, отримані на заводській суспензії та кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм), також були досліджені на мікроскопі для оцінки структури кристалів (рис. 2).

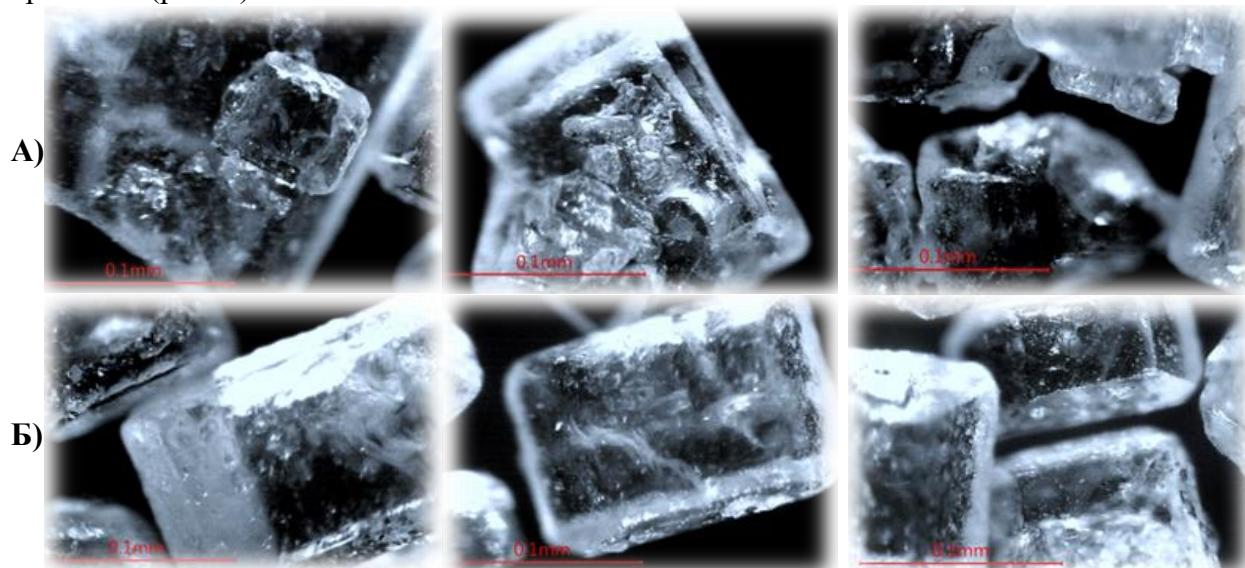


Рис. 2. Мікрофотознімки кристалів цукру отриманого у виробничих умовах заводу №2 на різних кристалоутворювачах (збільшення в 40 раз):

А) Заводська суспензія; Б) Кристалоутворювач «Естер К 01» (18,2 мкм)

На рис. 2, А показано, що цукор, отриманий із заводської суспензії, переважно складається з конгломератів, які є сукупністю двох і більше кристалів та фальшивих кристалів. Наявність значних пошкоджень цих кристалів свідчить про їхню низьку міцність і присутність сторонніх включень у їхній структурі [2, 4]. З іншого боку, дослідження мікрофотознімків цукру, отриманого на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) (рис. 2, Б) показало, що кристали прозорі та мають правильну форму, властиву для цукрози [18, 19], а чіткі грані без пошкоджень є свідченням високої міцності кристалів. Правильність граней кристалів і їх внутрішня будова, що відповідає строгим законам симетрії, що також свідчить про відсутність сторонніх включень [2].

Результати порівняння гранулометричного складу цукру, отриманого у виробничих умовах заводу №3 на заводській суспензії і кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

Гранулометричний склад цукру отриманого на заводській суспензії і кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) у виробничих умовах заводу №3

Розмір отворів сита, мм	Середній розмір частинок, d, мм	Маса цукру на ситі, т, г/Кількість, %			
		Витрата кристалоутворювача на 60 м ³ утфелю			
		Заводська суспензія в кількості 3,5 дм ³	«Естер К 01» (18,2 мкм) в кількості:		
			2,5 дм ³	3,0 дм ³	3,5 дм ³
1,40	1,45	3,34±0,03	10,11±0,03	7,46±0,03	1,68±0,06
1,00	1,10	31,03±0,02	43,23±0,02	35,72±0,02	12,01±0,03
0,80	0,90	10,16±0,03	20,01±0,02	22,83±0,02	22,65±0,02
0,63	0,67	10,85±0,03	9,01±0,03	11,82±0,03	23,38±0,02
0,50	0,57	6,86±0,02	8,34±0,03	12,30±0,02	23,97±0,02
0,30	0,35	25,09±0,02	5,35±0,02	7,36±0,03	12,99±0,03
0,20	0,25	7,72±0,03	7,28±0,03	2,38±0,04	3,07±0,03
Піддон	0,10	4,95±0,03	0,81±0,04	0,13±0,05	0,25±0,05
Середній лінійний розмір МА, мм	-	0,70±0,005	0,91±0,007	0,89±0,007	0,70±0,005
Коефіцієнт нерівномірності і CV, %	-	52,76±0,01	36,42±0,01	33,87±0,02	36,29±0,01

З аналізу даних таблиці 4 видно, що бажаний середній лінійний розмір (0,70 мм) мають зразки цукру, отримані на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) за витрати 3,5 дм³ і на заводській суспензії. Однак за цього коефіцієнт нерівномірності цукру отриманого на «Естер К 01» (18,2 мкм) складає – 36,29%, а це на 31,22% нижче порівняно із зразком цукру звареним на заводській суспензії. На кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) за витрати 3,0 дм³ і 2,5 дм³ отримано найбільші середні лінійні розміри кристалів цукру 0,89 мм і 0,91 мм відповідно. В усіх випадках на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) отримані менші коефіцієнти нерівномірності цукру (CV), що очевидно пов'язано з рівномірним дисперсним складом часточок затравки.

Із аналізу цукру по фракціях (табл. 4) видно, що найбільш необхідні за технічним завданням і рівномірні кристали цукру отримали за витрати кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) – 3,5 дм³. Кристали з фракцією 0,57 мм, 0,67 мм і 0,9 мм складають 23,97%, 23,38% і 22,65% від загальної кількості відповідно, а це на 71,38%, 53,59% і 55,14% відповідно вище, порівняно із зразком цукру, отриманим на заводській суспензії. У цьому випадку кількість кристалів з розміром фракції 0,35 мм складає 12,99%, що на 48,23% менше, ніж у цукрі, отриманому з заводської суспензії.

Більші значення середнього лінійного розміру кристалів цукру за витрати кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) 3,0 дм³ і 2,5 дм³ пов'язані з використанням меншої концентрації затравки, а отже і меншої кількості центрів кристалізації, що вносяться. Оскільки, як вже зазначалось раніше [1, 2, 20-26], більші кристали цукру утворюються за меншої кількості доданих центрів кристалізації. Більший середній лінійний розмір кристалів цукру на «Естер К 01» (18,2 мкм) також можна пояснити більшим середнім розміром мікрокристалів затравки, які сприятимуть швидшому нарощуванню кристалічної маси [11]. Отже, для кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) тривалість стадії формування кристалів у маточному утфелі повинна бути скорочена, оскільки він уже має сформований кристал в своєму складі. Це дозволить зменшити витрату гріючої пари і тим самим заощадити паливо на її отримання для процесу уварювання утфелю.

У всіх випадках кристалізація маточного утфелю на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) відбувалася без використання водяних «підкачок», які під час уварювання на заводській суспензії склали 4,0 м³ води на добу (1 м³ на апарат за дві «підкачки»). Це

додатково сприятиме скороченню загального часу уварювання утфелю та зменшенню паливно-енергетичних витрат для процесу кристалотворення. Цукор, отриманий з використанням «Естер К 01» (18,2 мкм) має кристали білого кольору, що мають чіткі грані з відповідним блиском, що відповідає якісним вимогам до готової продукції.

Для більш детальної оцінки структури кристалів зразків готового цукру, що отримані на заводській суспензії і кристалотворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм), було виконано морфологічні дослідження, результати яких представлено на рисунку 3.

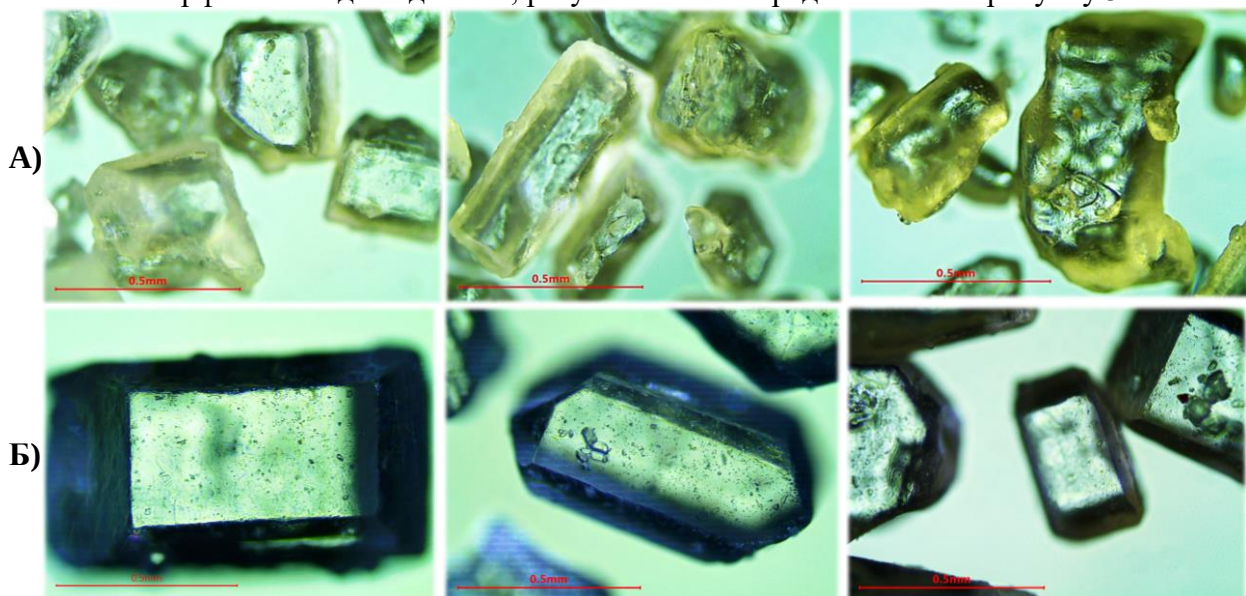


Рис. 3. Мікрофотознімки кристалів цукру отриманого у виробничих умовах заводу №3 на різних кристалотворювачах (збільшення в 40 раз):

А) Заводська суспензія; Б) Кристалотворювач «Естер К 01» (18,2 мкм)

Як видно з рисунку 3, А зразок цукру, отриманий на заводській суспензії в своєму складі має в основному кристали неправильної форми. Також більшість цих кристалів мають пошкодження граней, або представляють собою уламки. Це вказує на їх низьку міцність і наявність сторонніх включень у їхній структурі [2, 4].

Дослідження мікрофотознімків зразку цукру, отриманого на кристалотворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм) за витрати 3,5 дм³ (рис. 3, Б) показало, що кристали прозорі та мають правильну форму, властиву для цукрози [18, 19], а чіткі грані без пошкоджень є свідченням високої міцності кристалів. В отриманих кристалах відсутні сторонні включення, так як їх внутрішня будова та зовнішня огранка відповідають строгим законам симетрії [2].

Отримані дані підтверджують попередні результати досліджень, проведених у виробничих умовах заводу №2 західного регіону України, а саме використання кристалотворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) забезпечує високі якісні показники цукру порівняно з заводською суспензією.

Висновки. Таким чином кристалотворювач «Естер К 01» (10,2 мкм) забезпечує хороші якісні показники цукру за способом повної затравки. Кристалотворювач має рівномірний розподіл за розмірами мікрочастин. Вміст кристалів розміром 10...12 мкм перевищує 70%, за його використання тривалість уварювання утфелю зменшується на 15–20 хвилин, а кількість кристалів у утфелі збільшується [8-10], що призводить до отримання цукру з високим відсотком рівномірних, однорідних кристалів при мінімальному вмісті дріб'язку та пудри.

Встановлено, що витрата кристалотворювача «Естер К 01» (46,4 мкм) 0,5 см³ на 1 м³ утфелю дає змогу отримати більшу кількість крупних кристалів цукру, що очевидно пов'язано з середнім розміром кристалів затравки – 46,4 мкм. За цього розміру можна

уникнути спонтанного розчинення та втрати активних центрів кристалізації та хаотичного утворення множинних дрібнодисперсних центрів кристалізації, також відомих під заводською назвою «мука». Це пов'язано з тим, що центри кристалізації, заведені до підвареного сиропу, вже мають достатньо велику площу поверхні, що значно спрощує процес нарощування отриманих кристалів [2-6, 11]. Застосування кристалоутворювача «Естер К 01» (46,4 мкм) з витратою 0,3 см³ на 1 м³ утфелю, дозволяє отримати дещо меншу кількості крупних кристалів у порівнянні з витратою 0,5 см³, але дає змогу отримати найбільшу кількість цукру з фракцією 0,65 мм і значну кількість кристалів з фракцією 0,35 мм. За рахунок використання витрати затравки 0,2 см³ на 1 м³ утфелю, отримали найбільшу кількість цукру дрібної фракції в розмірі 0,35 мм, а також значний вміст фракції в розмірі 0,65 мм. Отже, шляхом використання різної кількості «Естер К 01» (46,4 мкм) для способу повної затравки, можна регулювати середній розмір фракції кристалів товарного цукру відповідно до потреб споживчого ринку.

Використання кристалоутворювача «Естер К 01» (18,2 мкм) за способом уварювання маточного утфелю у порівнянні із заводською суспензією дає кращі якісні показники цукру. Оскільки кристалоутворювач уже містить сформований кристал у своєму складі, для отримання більшої кількості якісних кристалів цукру з меншим розміром на кристалоутворювачі «Естер К 01» (18,2 мкм), необхідно скоротити тривалість стадії формування кристалів в маточному утфелі за допомогою корегування програми автоматичного керування процесом уварювання. Це вимагає невід'ємної співпраці з налагоджувальниками контрольно-вимірювальних приладів і програмістами під час випробувань і впровадженнь нових кристалоутворювачів у технологічний процес уварювання утфелю. В цілому такий підхід дозволить проводити процес уварювання утфелю без водяних підкачок і зменшити витрати гріючої пари та заощадити паливно-енергетичні ресурси на її отримання.

Бібліографія

1. Asadi M. Beet-Sugar Handbook: 1 edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2007. 868 p.
2. Cavalcante C. S., Albuquerque F. M. Chapter 14 – The Sugar Production Process, Editor(s): Fernando Santos, Aluizio Borém, Celso Caldas, Sugarcane. Academic Press. 2015. P. 285–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00014-1>
3. Van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T. Sugar Technology (Beet and Cane Sugar Manufacture): 1 edition. Berlin, Germany: Published with support of the Beet Sugar Development Foundation Denver, USA, 1998. 1120 p.
4. Скорик К. Д. Промислова кристалізація цукру: навч. посіб. для післядиплом. освіти. Київ: ТОВ «Сталь», 2004. 202 с.
5. Шлипка Д., Экельхоф Б. Основные направления развития методов кристаллизации сахара. Сахар и свекла. 1993. №1. С. 53–61.
6. Ліпєц А. А., Логвін В. М., Скорик К. Д.; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця, Технологія цукру: підручник : в 3 т. Т. 3: Кристалізація. К.: Експрес-об'ява, 2015. 208 с.
7. Скорик К. Д. Якість цукру: вимоги, контроль, менеджмент : навч. посіб.; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т харч. технологій, Ін-т післядиплом. освіти. Київ: Сталь, 2009. 99 с.
8. Анісімова О. М., Шейко Т. В., Ткаченко С. В., Хомічак Л. М. Дослідження кристалізаційної здатності кристалоутворювача “Естер К 01” для цукрової промисловості. Вісник харчової промисловості. Цукрова галузь. Березень, 2017. №3 (11). С. 3–8.
9. Tkachenko S. V., Sheiko T. V., Petrenko V. V., Anisimova O. M., Kuznietsova I. V., Khomichak L. M., Obodovych O. M. Influence of crystallizing agent on sugar quality. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria. 2020. 19 (4), P. 457–465. pISSN 1644-0730, eISSN 1898-9594 <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2020.0867>.
10. Tkachenko S. V., Sheiko T. V., Anisimova O. M., Kuznietsova I. V., Khomichak L. M. Evaluation of the effectiveness of the influence of crystallizing agent on sugar quality. Strategy for the Development of Sugars and Natural Sweeteners: The book of thesis International conference, 15–16 December 2021, Kiyv, Ukraine. K.: IFR NAAS, 2021. P. 83–97.
11. Serhii Volodymyrovych Tkachenko, Tamila Volodymyrivna Sheiko, Olena Mykhailivna Anisimova, Vasyl Viktorovych Petrenko, Kostiantyn Dmytrovych Skoryk, Olha Illivna Dzhohan, Liubomyr Mykhailovych Khomichak, Inha Vadymyrvna Kuznietsova Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. Journal of Crystal Growth (Elsevier

Publishing). 2024. Volume 648. 127909. P. 1–14 <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127909>

12. Хомічак Л. М., Ткаченко С. В., Шейко Т. В., Кузнєцова І. В., Джоган О. І., Зайчук Л. П. Практичний досвід та перспективи застосування аналізу розмірів частинок суспензій в технології цукробурякового виробництва. *Продовольчі ресурси*. 2020. № 14. С. 196–203. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-20>

13. SALD-201V Laser Diffraction Particle Size Analyzer. Режим доступу: https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com/an/files/pim/pim_document_file/brochures/16881/c060e005.pdf

14. Сборник методик ICUMSA (2007). Международная комиссия по унификации методов сахарных анализов. Dr. Albert Bartens KG. Берлин, Германия, 2009. 438 с.

15. Хомічак Л. М., Анісімова О. М., Ткаченко С. В. Вплив затравочних матеріалів на ефективність кристалізації та якість цукру. *Цукрова Галузь. Науково-інформаційний вісник. Лютий-березень, 2021. №2 (43). С. 9–12.*

16. Анісімова О. М., Ткаченко С. В., Шейко Т. В., Хомічак Л. М., Коротинський О. В. Дослідження дисперсного складу кристалоутворювачів для уварювання утфелів. *Продовольчі ресурси*. 2023. Т. 11, №21. С. 32–43. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-03>.

17. Скорик К. Д., Штангеев К. О. Контроль та покращення гранулометричного складу білого цукру. *Цукор України*. 2013. № 3. С. 20–25.

18. Сінат-Радченко, Д.Є. Анізотропія властивостей кристала сахарози «Розробка та впровадження прогресивних ресурсоощадних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість»: тези доповідей всеукраїнської науково-технічної конференції, 17–20 жовтня 1995р, м. Київ. К.: УДУХТ, 1995. С. 15.

19. Сінат-Радченко Д. Є., Василенко С. М., Українець А. І. Фізико-хімічні властивості сировини і продуктів цукрового виробництва. *Цукор України*. 2006. № 3 (46). С. 24–27.

20. Osman A., Rajab F. Exploring the dynamic growth of sugar crystals: A volume diffusion non-steady state model under variable conditions. *AIP Advances*. 2023. 13 (6), art. № 065102.: <https://doi.org/10.1063/5.0153275>.

21. Faria N., Pons M. N., Feyer de Azevedo S., Rocha F. A., Vivier H. Quantification of the morphology of sucrose crystals by image analysis. *Powder Technology*. 2003; 133 (1–3). P. 54–67.

22. Iswanto N., Hardin M. T., White E. The growth rate spread of sugar seed crystals. *International Sugar Journal*. 2006. 28. P. 474–482.

23. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 1. Crystal growth. *International Sugar Journal*. 2016. 118 (1414). P. 746–755.

24. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 2. Control tactic. *International Sugar Journal*. 2017. 119 (1425). P. 708–714.

25. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 3. Control tactic (continued). *International Sugar Journal*. 2017. 119 (1427). P. 792–800.

26. Campos-Dominguez A., Ceballos-Ceballos Y., Zamora S., Hernandez-Martinez E, Velazquez-Camilo O. Indirect Monitoring Cane Sugar Crystallization via Image Fractal Analysis. *Computación y Sistemas*. 2018. 22 (4). P. 1147–1155. <https://doi.org/10.13053/cys-22-4-3100>.

References

1. Asadi M. (2007) *Beet-Sugar Handbook*: 1 edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA. 868 p.

2. Cavalcante C. S., Albuquerque F. M. (2015). Chapter 14 – The Sugar Production Process, Editor(s): Fernando Santos, Aluizio Borém, Celso Caldas, Sugarcane. Academic Press. P. 285–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00014-1>.

3. Van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T. (1998). *Sugar Technology (Beet and Cane Sugar Manufacture)*: 1 edition. Berlin, Germany: Published with support of the Beet Sugar Development Foundation Denver, USA. 1120 p.

4. Skoryk, K. (2004) *Promyslova krystalizatsiia tsukru [Industrial crystallization of sugar]*. Kiev: Vydavnytstvo «Stal» [Steel Publishing House]. 202 p. [in Ukrainian].

5. Shlipgake D., Ekelhof B. (1993). *Osnovnie napravleniya razvitiya metodov kristallizatsii sakhara [Main directions of development of sugar crystallization methods]*. Sakhar i svekla [Sugar and beets]. №1. P.53-61.

6. Lipiets A. A., Lohvin V. M., Skoryk K. D. (2015). za red. [ed.] V. M. Lohvina, A. I. Ukrainsia Tekhnolohiia tsukru: pidruchnyk: v 3 t. T. 3: Krystalizatsiia [Sugar technology: textbook: in 3 vols. Vol. 3: Crystallization]. Kyiv. Ekspres-obiava [Експрес-об'ява]. 208 p. [in Ukrainian].

7. Skoryk, K. D. (2009) *Yakist tsukru: vymohy, kontrol, menedzhment [Sugar quality: requirements, control, management]*. Kyiv: «Stal» [Steel Publishing House]. 99 p. [in Ukrainian].

8. Anisimova O. M., Sheiko T. V., Tkachenko S. V. Khomichak L. M. (2017). *Doslidzhennia krystalizatsiinoi zdatnosti krystaloutvoriuvacha "Ester K 01" dlia tsukrovoi promyslovosti [Study of the crystallization ability of crystal forming agent "Ester K 01" for the sugar industry]*. Tsukrova Haluz

[Bulletin of the food industry. Sugar industry]. №3 (11). P. 3–8. [in Ukrainian].

9. Tkachenko S. V., Sheiko T. V., Petrenko V. V., Anisimova O. M., Kuznietsova I. V., Khomichak L. M., Obodovych O. M. (2020). Influence of crystallizing agent on sugar quality. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 19 (4), P. 457–465. pISSN 1644-0730, eISSN 1898-9594. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2020.0867>.

10. Tkachenko S. V., Sheiko T. V., Anisimova O. M., Kuznietsova I. V., Khomichak L. M. (2021). Evaluation of the effectiveness of the influence of crystallizing agent on sugar quality. *Strategy for the Development of Sugars and Natural Sweeteners: The book of thesis International conference*, 15-16 December 2021, Kyiv, Ukraine. K.: IFR NAAS. P. 83–97.

11. Serhii Volodymyrovych Tkachenko, Tamila Volodymyrivna Sheiko, Olena Mykhailivna Anisimova, Vasyl Viktorovych Petrenko, Kostiantyn Dmytrovych Skoryk, Olha Illivna Dzhohan, Liubomyr Mykhailovych Khomichak, Inha Vadymyryvna Kuznietsova (2024) Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth* (Elsevier Publishing). Volume 648. 127909. P. 1–14 ISSN 0022-0248. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127909>.

12. Khomichak L., Tkachenko S., Sheiko T., Kuznietsova I., Dzhohan O., Zaichuk L. (2020). *Praktychnyi dosvid ta perspektyvy zastosuvannya analizu rozmiriv chastynok suspenzii v tekhnologii tsukroburiakovooho vyrobnytstva* [Practical experience and application prospects of analysis of suspension particles sizes in the technology of the beet sugar production]. *Prodovolchi resursy* [Food resources]. 14. P. 196–203. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-20> [in Ukrainian].

13. SALD-201V Laser Diffraction Particle Size Analyzer. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com/an/files/pim/pim_document_file/brochures/16881/c060e005.pdf.

14. ICUMSA methods book 2007 (2009). International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. Berlin, Germany, Bartens. 438 p.

15. Khomichak L.M., Anisimova O.M., Tkachenko S.V. (2021) Vplyv zatravochnykh materialiv na efektyvnist krystalizatsii ta yakist tsukru [Influence of seed materials on crystallization efficiency and sugar quality]. *Tsukrova Haluz/Naukovo-informatsiyni visnyk* [Sugar Industry / Scientific and Information Bulletin]. №2 (43). P. 9–12. [in Ukrainian]

16. Anisimova O. M., Tkachenko C. V., Sheiko T. V., Khomichak L. M., Korotynskyi O. V. (2023). Doslidzhennia dyspersnoho skladu krystaloutvoriuvachiv dlia uvariuvannya utfeliv [Study of the dispersed composition of crystal formers for boiling of utfels]. *Prodovolchi resursy* [Food resources]. 11, №21. P. 32–43. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-03> [in Ukrainian]

17. Skoryk K. D., Shtanheiev K. O. (2013). Kontrol ta pokrashchennia hranulometrychnoho skladu biloho tsukru [Control and improvement of white sugar particle size distribution]. *Tsukor Ukrainy* [Sugar of Ukraine]. № 3. P. 20–25. [in Ukrainian]

18. Sinat-Radchenko, D. Ie. (1995). Anizotropiia vlastyvostei krystala sakharozy «Rozrobka ta vprovadzhennia prohresyvnnykh resursooshchadnykh tekhnolohii ta obladnannia u kharchovu ta pererobnu promyslovist» [Anisotropy of sucrose crystal properties "Development and implementation of advanced resource-saving technologies and equipment in the food and processing industry"]: tezy dopovidei vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii [abstracts of the all-Ukrainian scientific and technical conference], 17–20 October 1995, Kyiv, Ukraine. Kyiv.: USUFT. P. 15. [in Ukrainian].

19. Sinat-Radchenko D. Ie., Vasylenko S. M., Ukrainets A. I. (2006) Fyzyko-khimichni vlastyvosti syrovyny i produktiv tsukrovoho vyrobnytstva [Physical and chemical properties of raw materials and sugar products]. *Tsukor Ukrainy* [Sugar of Ukraine]. № 3 (46). P. 24–27. [in Ukrainian].

20. Osman A., Rajab F. (2023). Exploring the dynamic growth of sugar crystals: A volume diffusion non-steady state model under variable conditions. *AIP Advances*. 13 (6), art. № 065102. <https://doi.org/10.1063/5.0153275>.

21. Faria N., Pons M.N., Feyo de Azevedo S., Rocha F.A., Vivier H. (2003) Quantification of the morphology of sucrose crystals by image analysis. *Powder Technology*. 133 (1–3). P. 54–67.

22. Iswanto N., Hardin M.T., White E. (2006) The growth rate spread of sugar seed crystals. *International Sugar Journal*. 28. P. 474–482.

23. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. (2016). Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 1. Crystal growth. *International Sugar Journal*. 118(1414). P. 746–755.

24. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. (2017). Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 2. Control tactic. *International Sugar Journal*. 119(1425). P. 708–714.

25. Rózsa L. Rozsa J. Kilpinen S. (2017). Crystal growth and crystallization control tactics in industrial sugar crystallizers Part 3. Control tactic (continued). *International Sugar Journal*. 119 (1427). P. 792–800.

26. Campos-Dominguez A., Ceballos-Ceballos Y., Zamora S., Hernandez-Martinez E, Velazquez-Camilo O. (2018). Indirect Monitoring Cane Sugar Crystallization via Image Fractal Analysis. *Computación y Sistemas*. 22(4). P. 1147–1155. <https://doi.org/10.13053/cys-22-4-3100>.