

Контроль та покращення гранулометричного складу білого цукру

К.Д. Скорик, кандидат технічних наук, професор кафедри виробництва цукру та сахаридів, Інститут післядипломної освіти Національного університету харчових технологій

К.О. Штангесєв, кандидат технічних наук, завідувач кафедри виробництва цукру та сахаридів, Інститут післядипломної освіти Національного університету харчових технологій

У статті розглянуті питання контролю і поліпшення кристалоструктури білого цукру. Описані методи визначення показників та математичної обробки результатів лабораторних аналізів. Розглянуто вплив різних факторів на рівномірність кристалів цукру. Результати виробничих досліджень показали, що навіть при отриманні у вакуум-апаратах досить рівномірного за розміром кристалів цукру, можливе значне подрібнення продукту в процесі сушіння.

В статье рассмотрены вопросы контроля и улучшения кристаллоструктуры белого сахара. Описаны методы определения показателей и математической обработки результатов лабораторных анализов. Рассмотрено влияние различных факторов на равномерность кристаллов сахара. Результаты производственных исследований показали, что, даже при получении в вакуум-аппаратах достаточно равномерного по размерам кристаллов сахара, возможно значительное измельчение продукта в процессе сушки.

Questions of control and improvement of white sugar crystals structure are considered in the article. Methods of indices analysis and mathematical processing of results of laboratory analysis are described. Influence of various factors was examined on uniformity of sugar crystals. Results of industrial researches have shown, that even when a fairly uniform sugar crystals were obtained in vacuum pans, it is possible considerable product disintegration during drying process.

Значення визначення гранулометричного складу цукру. Важливим показником якості цукру є рівномірність гранулометричного складу. Наявність, перш за все, дрібних фракцій ускладнює обробку білого цукру та погіршує умови його зберігання. Особливо негативно дрібні фракції позначаються при безтарному зберіганні в силосах, де дрібні фракції можуть слугувати основою для «цементації» значних об'ємів цукру. Щоб цьому запобігти застосовують відсів дрібної фракції. Певна частина цукрового пилу взагалі втрачається, а частина пилу, дрібної фракції, що уловлюються, піддаються клеруванню, що також призводить до втрат цукру та перевитрат ПЕР.

Причинами утворення дрібної фракції можуть бути як недоліки варки утфелю, так і подрібнення цукру під час сушки та транспортування. Кристали цукру відносяться до досить крихких

матеріалів і легко піддаються подрібненню при висушуванні та транспортуванні. Ще в роботах Шевцова Д.С. та Мілютенка Б.Ф. [1, 2] було визначено, що в барабанних сушарках величина подрібнення кристалів цукру може досягати 38%. Причому подрібнюються в основному кристали розміром 0,5-1,5 мм. За даними Сапронова О.Р. та ін. [3] через багатократне пересипання в сушильному та охолоджувальному барабанах подрібнюється до 15-20% кристалів білого цукру, грані їх стираються і втрачають блиск.

Одним із важливих завдань уварювання утфелю I кристалізації, серед інших, є також одержання однорідних якісних кристалів цукру в заданому діапазоні розмірів. У виробничих лабораторіях хіміко-технічного контролю зарубіжних цукрових заводів систематично проводиться розсівання проб цукру після сушарки. Результати обробляються й наводяться в журналі змін-

них технологів у вигляді значень середнього розміру кристалів (МА, мм) і коефіцієнта нерівномірності кристалів (С.V. або коефіцієнта варіації, %). На вітчизняних цукрових заводах за останні роки також все більше уваги звертають на ці важливі показники і практично використовують їх для оптимізації роботи кристалізаційних та сушильних відділень. Чим менше значення С.V., тим більша рівномірність кристалів та їх розміри ближчі до середньої величини. Існують певні орієнтовні величини для коефіцієнтів нерівномірності кристалів. Наприклад, С.V.= 25 і менше вважається відмінним; понад 25 до 28-29 – добрим; вище 34-35% – незадовільним. Занадто великі коливання розмірів кристалів в результаті призводять до ускладнень під час сушіння й упаковки готової продукції; крім того, є ознакою високого вмісту конгломератів кристалів.

Методики проведення гранулометричного аналізу. В Україні для визначення гранулометричного складу кристалічного цукру в 2003 р. вперше введено Державний стандарт ДСТУ 4242:2003 Цукор. *Метод визначення гранулометричного складу.* Періодично проводиться його актуалізація [4].

Згідно з цим документом зважують 100 г цукру і поміщають у верхнє сито з найбільшими розмірами вічок набору сит. Набір сит закривають і проводять розсіювання на струшувачі або вручну. Час просіювання дорівнює 10 хв. (цукор не повинен накопичуватися по краях сит). Потім окремо зважують цукор кожної фракції, а також залишок у піддоні. Результати зважування записують з точністю до першого десяткового знака. Кристали, що застрягли у вічках сит, вибирають за допомогою щітки і додають до надситової фракції. Якщо сума мас проб на ситах відрізняється від маси проби, взятої для аналізу (100 г), то цю різницю додають до найбільшого значення маси кристалів однієї з фракцій. Сума всіх фракцій не повинна бути меншою ніж 99,0 г. У разі великих втрат цукру повторюють випробовування. Передбачено просте опрацювання результатів: масову частку кожної фракції обчислюють у процентах.

За кордоном гранулометричний аналіз проводять згідно з вимогами ICUMSA: *Метод GS2/9-37 (2007) Визначення розподілу часток за розмірами білого цукру та плантаційних білих цукрів шляхом розсіву.* Метод не придатний для дрібнокристалічної цукрової пудри [5]. Розсів цукру проводять вручну або за допомогою механічного струшувача. В останньому випадку необхідний такий механічний вплив, при якому проба постійно переміщується по усій поверхні кожного сита. При цьому має відбуватися і другий тип руху: з підйомом і опусканням набору сит з амплітудою біля 5

мм і частотою 120 хв⁻¹. Такий режим подібний до ручного розсіву проби. Механічні струшувачі лише із швидким вібраційним впливом не придатні й можуть призводити до одержання різних результатів.

Важливим показником для проведення коректного гранулометричного аналізу є також вологість проби. Проби із втратою маси при висушуванні понад 0,025% необхідно висушити перед проведенням розсіювання.

Комплект сит бажано підбирати таким чином, щоб на верхньому ситі залишалося від 10 до 20% проби, стільки ж проходило через останнє сито і не більше 30% затримувалося на будь-якому проміжному ситі. В практиці роботи в лабораторії інколи доводиться ігнорувати вказані рекомендації, особливо при аналізах цукру з відносно високою рівномірністю кристалів. Сита повинні бути чистими і сухими. У випадку необхідності їх миють в теплій воді та висушують при температурі не вище 75°C.

Методика аналізу відрізняється від запропонованої у ДСТУ 4242. Зважують кожне сито і нижній піддон з точністю до 0,1 г на вагах з верхньою платформою, переносять порцію цукру у верхнє сито, закривають набір сит кришкою, проводять струшування протягом 10 хв. Після цього зважують з цукром кожне сито і піддон з точністю до 0,1 г. Визначають і записують масу цукру на кожному ситі та в піддоні за різницею. Підраховують сумарну масу цукру після просіювання. Ця сума не повинна відрізнятися від маси первинної проби більше, ніж на ±0,6 г.

Обробка результатів. Для математичної обробки результатів можна застосовувати чотири різних методи, які дозволяють представити результати ситового аналізу двома параметрами (середній розмір $M.A.$, мм та коефіцієнт нерівномірності $C.V.$, %). Право вибору метода обробки результатів залишається за

користувачем. Вказані чотири методи такі:

1. метод Пауерса (графічний, з побудовою графіка на напівлогарифмічному папері);

2. метод Ренса;

3. метод Розіна, Раммлера, Шперлінга і Беннета (скорочено - метод RRSB);

4. метод Батлера (прямого розрахунку середнього розміру і коефіцієнта нерівномірності кристалів).

Для обробки результатів розсіювання проб цукру з двох цукрових заводів використовували зручний метод Батлера, який полягає у наступному.

Спочатку визначається середній розмір кристалів $M.A.$ за формулою:

$$M.A. = \frac{\sum m_i \cdot l_i}{\sum m_i}$$

Потім обчислюється дисперсія (середнє відхилення від середнього розміру кристалів, l_i) за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum m_i l_i^2}{\sum m_i} - \left(\frac{\sum m_i l_i}{\sum m_i} \right)^2}$$

та визначається коефіцієнт нерівномірності кристалів за формулою:

$$C.V. = \frac{\sigma \cdot 100}{M.A.}$$

Таким чином, за результатами гранулометричного аналізу можна одержати два важливих показники, які дозволяють оцінити рівномірність кристалів цукру.

При транспортуванні, висушуванні та охолодженні білого цукру руйнуються конгломерати та більш крупні кристали. В результаті зменшується маса кристалів крупних і середніх фракцій (залишки на ситах 1,000 мм та 0,650 мм) і збільшується маса кристалів дрібних фракцій – на ситах 0,500; 0,315; 0,200 мм та цукрового пилу (залишок у піддоні лабораторного набору сит, див. табл.1,2). Зменшення сумарних залишків цукру на ситах 1,000 та 0,630 мм дорівнювало від 7 до 28%, що, природ-

но, призводило до підвищення на такі ж величини вмісту дрібних фракцій в товарному продукті. Крім того, внаслідок перетирання погіршується природний блиск кристалів.

В усіх пробах цукру спостерігалось зменшення середнього розміру кристалів після сушильної установки від 0,04 до 0,16 мм або від 5 до 18% відносно лінійних розмірів кристалів після центрифуг.

Погіршення гранулометрії білого цукру підтверджується також зростанням коефіцієнтів нерівномірності від 15-17% до 32% (абсолютних) у гірших випадках. Тобто відмінний після центрифуг за гранулометричним складом продукт після сушильної установки з недостатньою продуктивністю, яка працює з перевантаженням, стає задовільної якості, що ілюструється

даними для цукрового заводу №1, **табл. 1.**

За нормальних умов роботи сушильного відділення також має місце підвищення коефіцієнтів нерівномірності, але в суттєво менших межах – на 4-5% (абсолютних). Така ситуація спостерігається на цукровому заводі №2, див. **табл. 2.**

Результати подрібнення та перетирання кристалів видно також і при порівнянні фотографій цукру після центрифуг та після сушильної установки (див. **рисунки 3, 4).**

Практика показує, що подрібненню в сушарках найбільш піддаються кристали вже висушеного цукру, вологий цукор подрібнюється значно менше. Очевидно причиною є те, що волога розташована на поверхні кристалів цукру у вигляді плівки насиченого цукрового розчину. Тому,

коли вологий цукор пересипається в сушильному барабані плівка цукрового розчину частково гасить силу удару між кристалами та стінкою барабана і через це подрібнення стає суттєво меншим. Кристали висушеного цукру вже не мають такої захисної плівки і удари кристалів будуть вже більш жорсткими і подрібнення кристалів значно зростає.

В сушарках до чисто механічного подрібнення додається також і термічний вплив, який може збільшити подрібнення. В зоні висушування, коли на поверхні кристалів мається рідина, температура кристалів практично не змінюється. Теплота, яка підводиться гарячим повітрям, витрачається на випаровування вологи з поверхні кристалів і не доходить до твердої поверхні.

Після осушення вологи хоча б на частині поверхні криста-

Таблиця 1

Визначення гранулометричного складу білого цукру цукрового заводу 1

№ пп.	Вічко сита d_p , мм	Середній розмір фракції l_p , мм	Проба №1		Проба №2	
			Маса цукру на ситі m_p , г		Маса цукру на ситі m_p , г	
	(1,250)	-	Цукор після центрифуг	Цукор після сушки	Цукор після центрифуг	Цукор після сушки
1	1,000	1,125	22,88	8,86	21,26	9,07
2	0,630	0,815	73,45	59,95	76,65	60,78
3	0,500	0,565	2,76	13,67	1,62	13,11
4	0,315	0,408	0,87	10,46	0,40	10,34
5	0,200	0,258	0,03	5,18	0,06	4,80
6	Піддон (<0,200)		0,01	1,88	0,01	1,90
		Сума =	100,00	100,00	100,00	100,00
Середній розмір кристалів М.А., мм			0,88	0,72	0,87	0,73
Коефіцієнт нерівномірності С.В., %			16,8	32,3	15,7	31,9

Таблиця 2

Визначення гранулометричного складу білого цукру цукрового заводу 2

№ пп.	Вічко сита d_p , мм	Середній розмір фракції l_p , мм	Проба №3		Проба №4	
			Маса цукру на ситі m_p , г		Маса цукру на ситі m_p , г	
	(1,250)	-	Цукор після центрифуг	Цукор після сушки	Цукор після центрифуг	Цукор після сушки
1	1,000	1,125	12,47	5,65	10,90	4,12
2	0,630	0,815	75,87	69,94	77,42	77,00
3	0,500	0,565	8,50	14,32	8,20	10,93
4	0,315	0,408	2,92	8,36	3,33	6,96
5	0,200	0,258	0,23	1,46	0,15	0,89
6	Піддон (<0,200)		0,01	0,27	0,00	0,10
		Сума =	100,00	100,00	100,00	100,00
Середній розмір кристалів М.А., мм			0,82	0,75	0,81	0,77
Коефіцієнт нерівномірності С.В., %			18,5	23,3	18,1	20,0

На рисунках 1 і 2 показані стовпчикові діаграми змін розподілу кристалів цукру за розмірами для цукрового заводу №1, проба №1.



Рис. 1. Результати гранулометричного аналізу проби №1 (цукор після центрифуг)



Рис. 2. Результати гранулометричного аналізу проби №1 (цукор після сушильної установки)

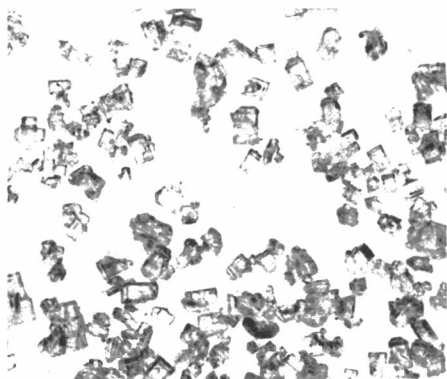


Рис. 3. Проба цукру після центрифуг

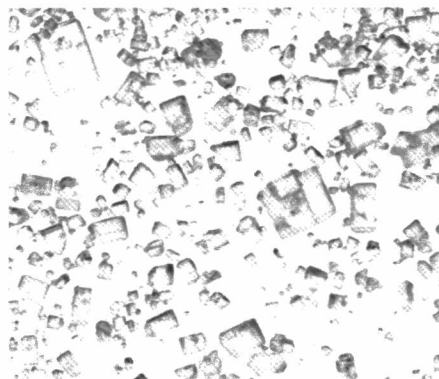


Рис. 4. Проба цукру після сушильної установки

лу, поверхневий шар починає інтенсивно прогріватися. Теплопровідність кристалічного цукру досить невисока (0,58 Вт/(м·°C) при температурі 80°C) і при високій температурі повітря різниця температур між поверхнею кристалу та його серединою може перевищувати 20°C. Зовнішні шари кристалу будуть

зазнавати більших термічних розширень і це викличе механічні напруження в самому кристалі цукру. При цьому може відбуватися розтріскування кристалів та більш інтенсивне їх подрібнення при пересипанні в сушильному барабані.

Для зменшення подрібнення при сушінні закордонні фірми

намагаються зменшити діаметри сушильних барабанів (багато-трубна сушарка фірми Fives Cail), або ж, як фірма ВМА, створюють сушильно-охолоджувальні комплекси із барабанною сушаркою та горизонтальним охолоджувачем в режимі псевдокиплячого шару (рис. 5).

Найбільш сучасною розробкою фірми ВМА для цукрової промисловості є компактна вертикальна установка з псевдозрідженим шаром для кондиціонування цукру (рис. 6), як прийнятна альтернатива вище згаданої горизонтальної установки [6]. Вона забезпечує зниження витрати повітря та енергії при одночасному збереженні переваг псевдозрідженого шару. На рис. 7 показана конструкція апарата для кондиціонування цукру. Завдяки великій вільній поверхні розподільчої пластини перепад тиску дуже низький. Кількість цукру всередині апарата регулюється за перепадом тиску у псевдозрідженому шарі. Завдяки створенню псевдозрідженого шару вертикальні кондиціонери з шаром, що кипить, мають в три-чотири рази вищу швидкість теплопередачі порівняно з колонними системами, в яких цукор переміщується без використання повітря, хоча обидві конструкції мають однаково компактні розміри.

За багатьма технологічними аспектами цей варіант схожий на горизонтальний охолоджувач із псевдозрідженим шаром, проте має наступні переваги: швидкість повітря значно нижча; займає незначну виробничу площу; завдяки малій витраті повітря його можна кондиціонувати вельми низькими витратами енергії (біля 20 кВт); рух продукту зверху до низу не викликається потоком повітря, а відбувається під дією сили тяжіння; в аварійних умовах (при відсутності потоку повітря) забезпечується переміщення цукру тощо.

Таким чином, з метою покращення гранулометричного складу, зменшення перетирання та

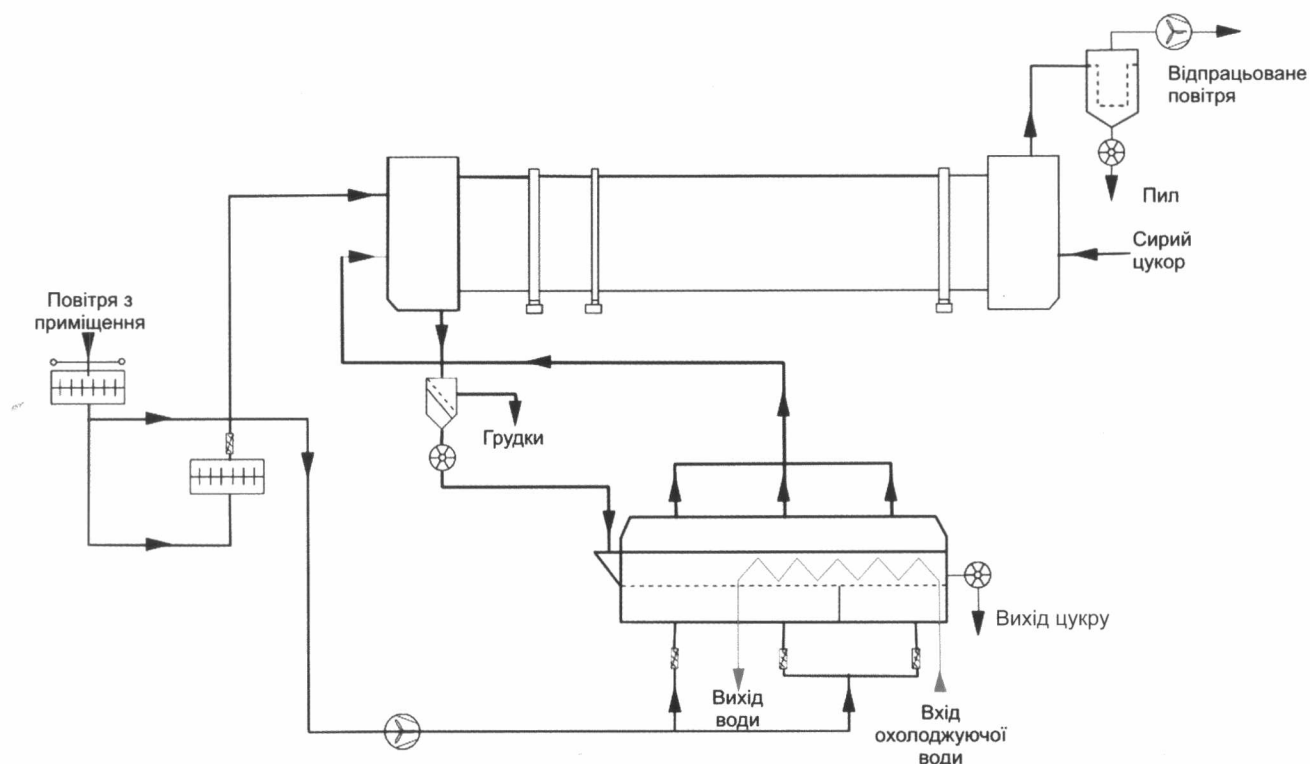


Рис. 5. Схема горизонтального сушильно-охолоджувального комплексу фірми ВМА

подрібнення цукру слід звертати увагу на наступні заходи у відділеннях кристалізації та сушки.

Якість відтоків, що підкачуються до вакуум-апаратів (сухі речовини, чистота, рН, кольоровість) повинна підтримува-

тися постійною, а температура, сухі речовини і чистота повинні бути взаємопов'язані таким чином, щоб у вакуум-апаратах не виникало спонтанного утворення вторинних центрів кристалізації при веденні відтоку та на-

ступному випаровуванню при кипінні. В іншому випадку вторинні центри утворюються постійно, що призводить до одержання утфеля, який погано центрифугується та до виробництва цукру з високим вмістом конгло-

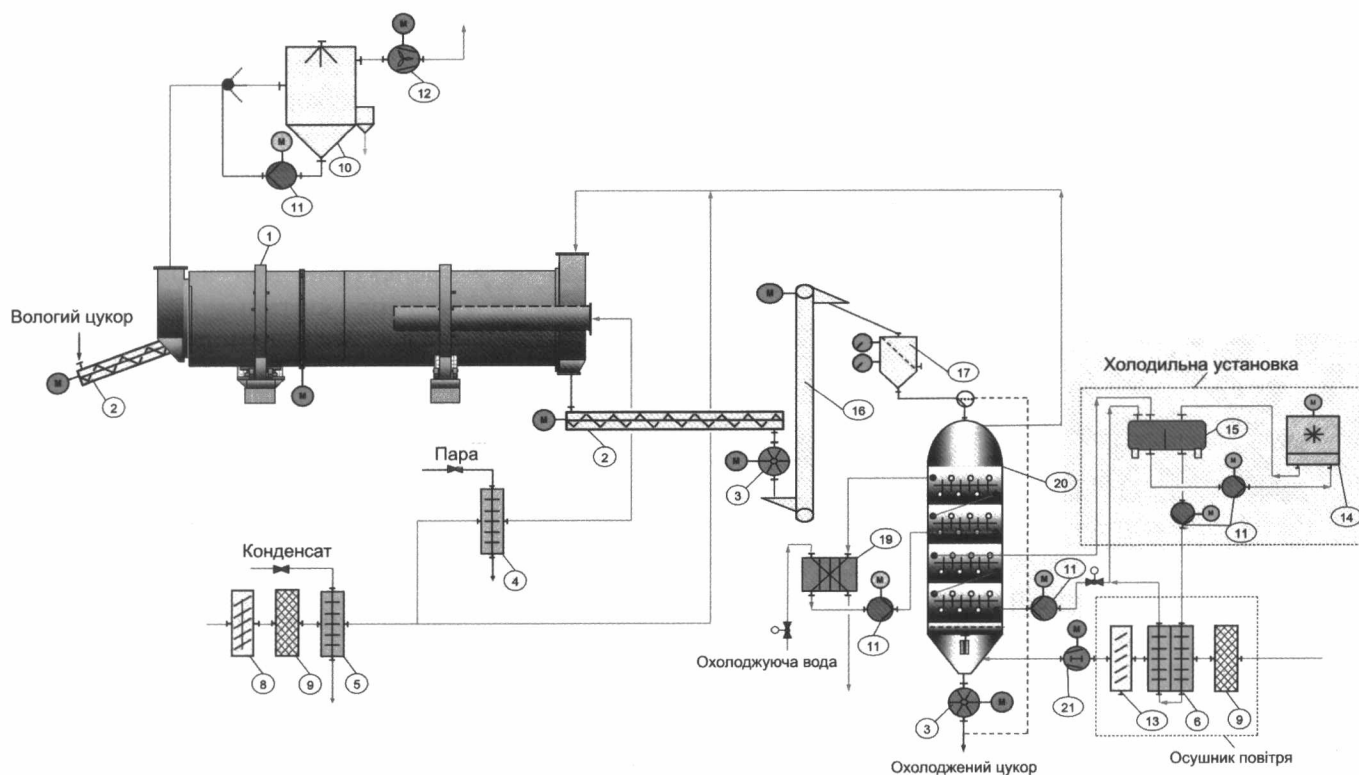


Рис. 6. Барабанна сушарка з вертикальним охолоджувачем з псевдозрідженим шаром і кондиціонуванням повітря

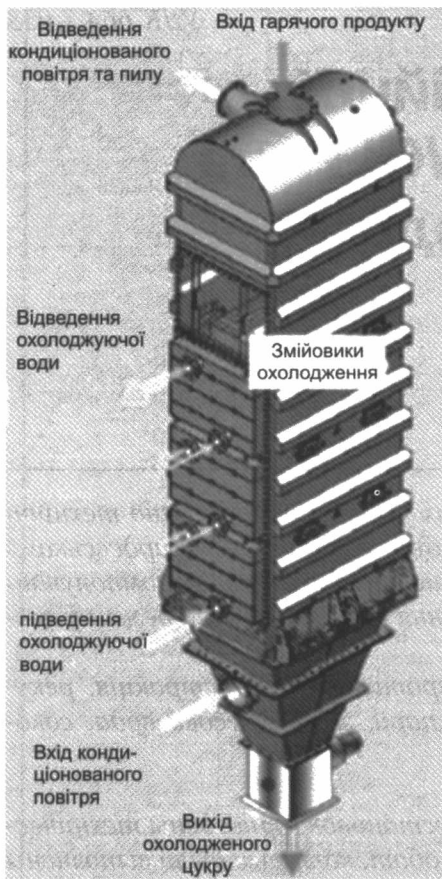


Рис. 7. Вертикальний апарат з псевдодзрідженим шаром для кондиціонування цукру

мератів і пудри.

Ключовими моментами для забезпечення рівномірного гранулометричного складу білого цукру і зменшення вмісту конгломератів є якісний затравний матеріал і зведення до мінімуму утворення вторинних центрів кристалізації протягом усього циклу уварювання утфелів.

У порівнянні з кристалізацією цукру в утфелях низької чи-

стоти, конгломерація відіграє більш суттєву роль при уварюванні утфелів білого цукру і цукру-рафінаду.

Досвід вітчизняних і зарубіжних цукрових заводів показує, що вміст конгломератів у білому цукрі можна зменшити на 40-50% за рахунок застосування якісної затравної пасти з високою рівномірністю кристалів, поверхнево-активних речовин та механічних циркуляторів у вакуум-апаратах. Найбільший ефект дає уварювання на маточному утфелі. Більш детально вказані аспекти розглянуті в [7].

В сушильному відділенні необхідно підтримувати рівномірний потік цукру, встановити обладнання, яке відповідає заводським вимогам, в першу чергу, за продуктивністю. Відповідно до цього потрібно проводити сушку з мінімально необхідною, для конкретних умов роботи, температурою нагрітого повітря. Це бажано також із точки зору досягнення максимального охолодження висушеного цукру. Крім того, висушування гарячим повітрям повинно закінчуватися при ще не повністю висушеному цукрі. Решта вологи може бути висушена вже в процесі охолодження цукру за рахунок його внутрішньої теплоти та теплоти кристалізації цукру із розчину на поверхні кристалів.

Вирішення розглянутих проблем дозволить забезпечити ви-

робництво цукру високої якості та з мінімальними втратами готової продукції.

Список використаних джерел

1. Шевцов Д.С., Милютенко Б.Ф. Экспериментальные исследования сушилок сахара. – Труды ВНИИСП, 1966, вып. XIII, С. 205 - 268.
2. Шевцов Д.С., Милютенко Б.Ф. Экспериментальные исследования сушилок сахара. – Труды ВНИИСП, 1971, вып. XVII, С. 247 - 315.
3. Сапронов А.Р., Жушман А.И., Лосева В.А. Общая технология сахара и сахаристых веществ. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – 464 с.
4. ДСТУ 4242:2003. Цукор. Метод визначання гранулометричного складу. К. : Держспоживстандарт України. – 2004.
5. ICUMSA Method GS2/9-37 (2007).
6. H. Hafemann, H. Griebel. Applications for drying and cooling sugar in respect of specific needs and ambient conditions // Zuckerindustrie.- 137 p. - 2012. - No.8. - pp. 518 - 522.
7. Скорик К.Д. Якість цукру: вимоги, контроль, менеджмент: Навч. посібник. – К. : Сталь, 2009. – 99 с.

Рецензент:

А.Н. Савич, к.т.н.