

УДК 664.1.048

В.Г.Мирончук, д.т.н., Ещенко О.А., к.т.н., Картава М.М.
Национальный университет пищевых технологий

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЕМ САХАРНОГО УТФЕЛЯ ПОСЛЕДНЕГО ПРОДУКТА

В статье приведены результаты лабораторных, промышленных и вычислительных экспериментов режимов работы станций кристаллизации сахарного утфеля последнего продукта. Даны рекомендации промышленности по рациональному ведению процесса кристаллизации.

Ключевые слова: кристаллизация, сахарный утфель, межкристальный раствор, раскачка, мешалка-кристаллизатор, промежуточный нагрев.

Постановка проблемы. В свеклосахарном производстве существует ряд методов направленных на интенсификацию непрерывной кристаллизации сахарных утфелей последнего продукта в мешалках-кристаллизаторах. Они сводятся, в основном, к совершенствованию технологии и аппаратного оформления процесса кристаллизации в условиях охлаждения кристаллизующегося продукта.

На сегодня технология процесса дополнительной кристаллизации утфеля последнего продукта совершенствовалась различными вариантами тепловой обработки, разбавления утфелей раскачками и промежуточным центрифугированием. Эти меры применяются с целью исключения вторичного кристаллообразования, уменьшения вязкости, поддержания необходимого пересыщения межкристального раствора и т.п. Вместе с тем в промышленности сегодня нет четкого ответа, какой способ обработки утфеля в мешалках-кристаллизаторах наиболее приемлем. Поэтому исследования в этом направлении весьма актуальны.

Анализ последних исследований в данном направлении. Сахарниками Украины накоплен значительный опыт рационального ведения процесса кристаллизации в мешалках-кристаллизаторах. В зависимости от условий предприятия в эксплуатации используют различные схемы оснащения станций кристаллизации охлаждением: с вертикальными кристаллизаторами, горизонтальными кристаллизаторами, комбинацией вертикальных и горизонтальных кристаллизаторов [1, 2, 4].

Типовой технологический режим охлаждения утфеля в станциях кристаллизации со скоростью 1,0–1,1 °С/час в течение 32 часов в горизонтальных мешалках-кристаллизаторах и 1,2–1,4 °С/час в вертикальных кристаллизаторах [1], как правило, требует дополнительной раскочки утфеля водой. Неравномерность температурных полей утфеля в кристаллизаторах и нарушение режима охлаждения создает благоприятные условия для вторичного кристаллообразования, что уменьшает конечный эффект кристаллизации,

увеличивает содержание сахарозы в мелассе и энергетические затраты в продуктовом отделении.

Цель исследования. Опыт работы сахарных предприятий показывает, что станции кристаллизации, которые оснащены комбинацией вертикальных и горизонтальных кристаллизаторов имеют определенные особенности и требуют дополнительных условий технологического регламента ведения процесса кристаллизации.

Целью исследований этой работы был поиск рационального температурного режима кристаллизации утфеля последнего продукта в мешалках-кристаллизаторах для обеспечения максимального эффекта кристаллизации сахарозы.

Результаты исследования. Наши промышленные исследования станции кристаллизации утфеля последнего продукта оснащенной согласно схеме, рис. 1, обнаружили ряд весомых факторов, совершенствование которых обеспечивает существенную интенсификацию процесса и улучшения технологических и качественных характеристик конечного продукта. Особенность работы такой схемы, согласно заводских данных, заключается в том, что время пребывания утфеля в вертикальном кристаллизаторе составляет 18 часов, после чего утфель поступает в батарею горизонтальных кристаллизаторов (где раскачивается водой или сахарным раствором в первом кристаллизаторе) и продолжает кристаллизоваться в течение 20 часов.

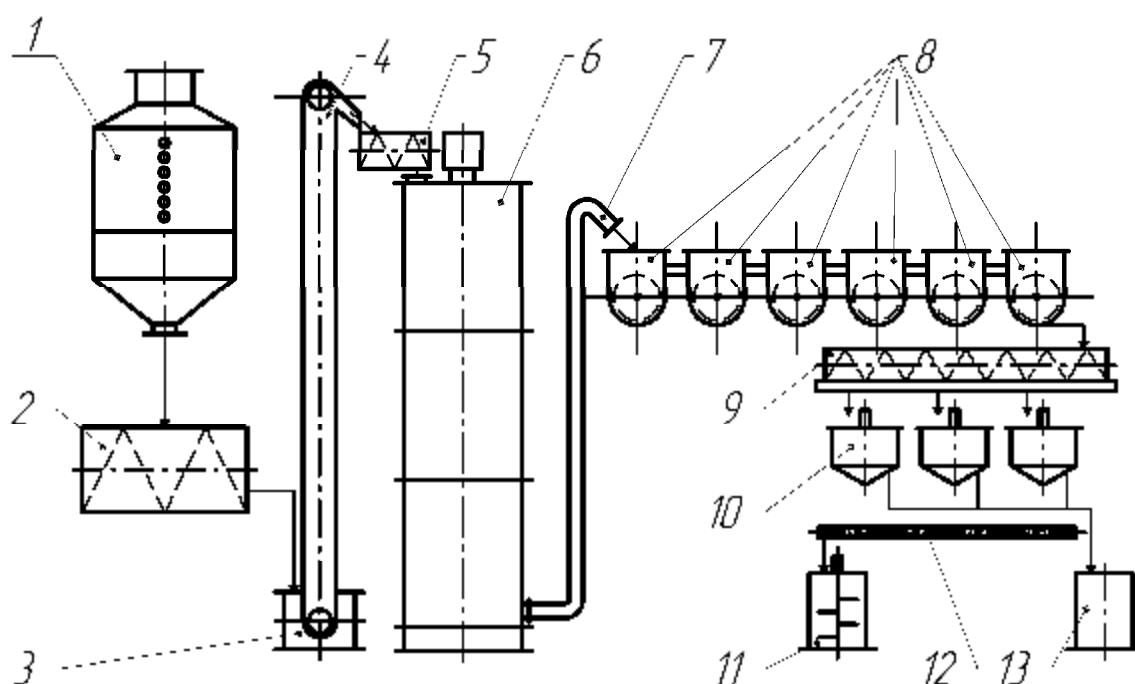


Рис. 1. Комбинированная аппаратурная схема кристаллизации охлаждением утфеля последнего продукта при двопродуктовой схеме без аффинации 1 – вакуум-аппарат последнего продукта, 2 – приемная утфелемешалка 3 – сборник утфеля, 4 – нория, 5 – сборник-смеситель, 6 – вертикальный кристаллизатор, 7 – трубопровод утфеля, 8 – горизонтальные кристаллизаторы, 9 – утфелераспределитель перед центрифугами, 10 – центрифуги, 11 – клеровальная мешалка, 12 – шнек, 13 – сборник мелассы.

С целью нахождения оптимального режима ведения процесса для выше упомянутой схемы нами построена имитационная модель [2] промышленной кристаллизации сахарозы охлаждением в мешалках-кристаллизаторах. Разработанная нами модель базируется на потоковом графе процесса кристаллизации охлаждением утфеля (рис. 2) и балансовых уравнениях материальных потоков [3, 4], которые связаны с дугами графа.

Уравнение материального баланса:

$$G_y = G_{кр_n} + G_{м_n} = G_{кр_k} + G_{м_k} \quad (1)$$

по сахарозе: $G_y CX_y = G_{м_n} CX_{м_n} + G_{кр_n} = G_{м_k} CX_{м_k} + G_{кр_k}, \quad (2)$

по несхарам: $G_y HC_y = G_{м_n} HC_{м_n} = G_{м_k} HC_{м_k}, \quad (3)$

по сухим веществам: $G_y CB_y = G_{м_n} CB_{м_n} + G_{кр_k} = G_{м_k} CB_{м_k} + G_{кр_k}, \quad (4)$

по воде: $G_y W_y = G_{м_n} W_{м_n} = G_{м_k} W_{м_k}, \quad (5)$

где $G_y, G_{кр_n}, G_{кр_k}, G_{м_n}, G_{м_k}$ – масса утфеля, массы кристаллов в утфеле и межкристального раствора соответственно в начале и в конце процесса кристаллизации охлаждением, кг; $CX_y, CX_{м_n}, CX_{м_k}, HC_y, HC_{м_n}, HC_{м_k}, CP_y, CB_{м_n}, CB_{м_k}, W_y, W_{м_n}, W_{м_k}$ – массовые части сахарозы, несхаров, сухих веществ и воды в утфеле и в межкристальном растворе соответственно в начале и в конце процесса, %.

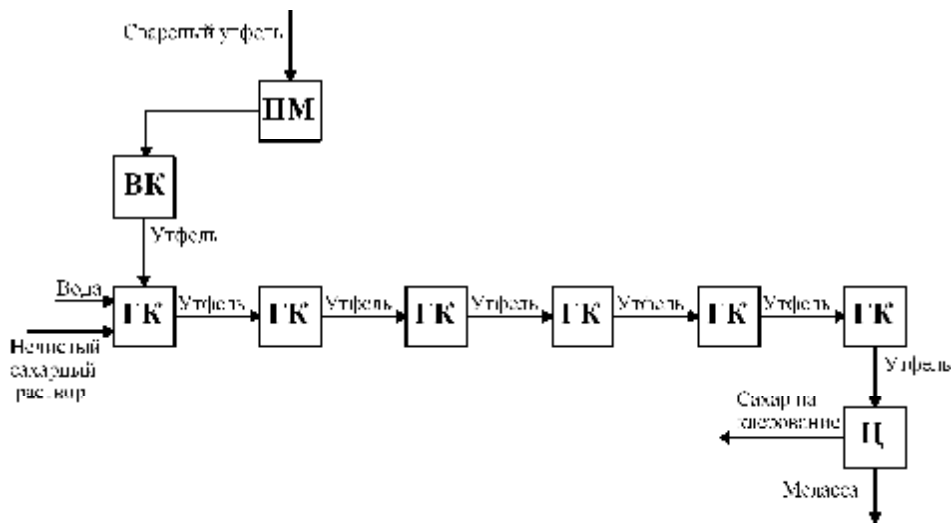


Рис. 2. Поточный граф процесса кристаллизации утфеля охлаждением:
ПМ приемная мешалка; ВК вертикальный кристаллизатор; ГК горизонтальный кристаллизатор; Ц центрифуга

Количество сахарозы в межкристальном растворе определяют по формуле:

$$\frac{G_m CX_m}{100\%} = W_y H_0(t, \varphi_m) K_{пер}, \quad (6)$$

тогда:

$$CX_{\text{м}} = \frac{W_y H_0(t, \text{ч}) K_{\text{пер}}}{G_{\text{м}}} 100\%, \quad (7)$$

где $G_{\text{м}}$ – масса межкристального раствора, кг; $CX_{\text{м}}$ – массовая часть сахарозы в межкристальном растворе, %; W_y – масса воды в утфеле; $H_0(t, \text{ч})$ – коэффициент растворимости сахарозы, как функция температуры и чистоты, $K_{\text{пер}}$ – коэффициент пересыщения утфеля.

Зависимость коэффициента растворимости сахарозы от температуры и чистоты раствора определяем по уравнению регрессии третьего порядка, полученным нами методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} H_0(t, \text{ч}) = & 1,0502 + 0,1903t - 0,01827\text{ч} + \\ & + 6,084 \cdot 10^{-5} t^2 + 6,926 \cdot 10^{-3} \text{ч}^2 - 4,1505 \cdot 10^{-3} t\text{ч} + \\ & + 6,429 \cdot 10^{-6} t^3 - 5,244 \cdot 10^{-6} \text{ч}^3 - \\ & - 8,317 \cdot 10^{-6} t^2\text{ч} + 2,821 \cdot 10^{-5} t\text{ч}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

где t – температура продукта, °C; ч – чистота сахарного раствора.

Считаем, что в процессе кристаллизации охлаждением содержание несахаров и воды в межкристальном растворе остается неизменным. Тогда для любой температуры утфеля в процессе охлаждения $t_i = t_n \text{ К } t_k$:

$$\text{масса межкристального раствора} \quad G_{\text{м}_i} = W_y H_0(t_i, \text{ч}_{\text{м}_i}) K_{\text{пер}} + \frac{G_y HC_y}{100\%} + \frac{G_y W_y}{100\%}, \quad (9)$$

$$\text{масса кристаллов} \quad G_{\text{кп}_i} = G_y - G_{\text{м}_i}, \quad (10)$$

$$\text{содержание кристаллов} \quad Kp_i = \frac{G_{\text{кп}_i}}{G_y} 100\%, \quad (11)$$

а массовые части сахарозы, несахаров, сухих веществ и воды в межкристальном растворе, а также его чистоту определяем по уравнениям:

$$CX_{\text{м}_i} = \frac{W_y H_0(t_i, \text{ч}_{\text{м}_i}) K_{\text{пер}}}{G_{\text{м}_i}} 100\% \quad (12)$$

$$HC_{\text{м}_i} = \frac{G_y HC_y}{G_{\text{м}_i}} 100\% \quad (13)$$

$$CB_{\text{м}_i} = \frac{W_y H_0(t_i, \text{ч}_{\text{м}_i}) K_{\text{пер}} + G_y HC_y}{G_{\text{м}_i}} 100\% \quad (14)$$

$$W_{\text{м}_i} = \frac{G_y W_y}{G_{\text{м}_i}} 100\% \quad (15)$$

$$\text{ч}_{\text{м}_i} = \frac{CX_{\text{м}_i}}{CP_{\text{м}_i}} 100\% \quad (16)$$

Количество воды или межкристального раствора для раскочки определяем по формуле:

$$G_p = \frac{G_y(CP - CP_y)}{CP_p - CP}, \quad (17)$$

где G_p , G_y – масса воды или сахарного раствора на раскачку; CP_p , CP_y , CP – сухие вещества сахарного раствора на раскачку, утфеля в начале кристаллизации и в конце соответственно; $CP_p = 0$ при раскачке водой.

Зависимости (9)–(17) представляют собой математическое описание модели процесса кристаллизации сахарозы охлаждением.

Для установления адекватности построенной модели реальному процессу нами проведен ряд лабораторных исследований на разработанной нами лабораторной установке (рис. 3). Методикой проведения исследований предусмотрено темп охлаждения утфеля от 73 °С до 50 °С, после чего осуществляли его нагрев до 55 °С и продолжали охлаждать до 40 °С. Полезная разность температуры в процессе охлаждения составляла 10–12 °С, что соответствует установленной нами [3] и принятой величине по типовому режимом [1]. Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Данные промышленных и лабораторных экспериментов

Показатель	Единица измерения	Начало кристаллизации	Перед раскачкой, или промежуточным нагревом	Конец кристаллизации
Данные промышленности при раскачивании водой				
Утфель:				
СВ	%	90,2	–	89,6
СХ	%	72,2	–	72
Чистота	%	80,04	–	80,36
Межкристальный раствор:				
СВ	%	80,4	–	80,00
СХ	%	58,8	–	54,20
Чистота	%	73,1	–	67,75
Данные лабораторных экспериментов				
Утфель:				
СВ	%	91,10	–	–
СХ	%	72,79	–	–
Чистота	%	79,90	–	–
Межкристальный раствор:				
		С раскачиванием водой		
СВ	%	80,40	79,80	79,80
СХ	%	58,00	55,05	54,41
Чистота	%	72,14	68,98	68,18
		С раскачиванием мелассой		
СВ	%	80,40	80,40	80,40
СХ	%	58,00	53,96	53,80
Чистота	%	72,14	67,12	66,90
		С промежуточным подогревом		
СВ	%	80,40	79,60	79,20
СХ	%	58,00	51,82	50,60
Чистота	%	72,14	65,10	63,89



Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования процесса кристаллизации сахарозы охлаждением

По построенной модели (9)–(17) также проведен ряд вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в виде таблицы 2 и графиков на рис. 4.

Очевидно, что при применении раскачек водой, не только уменьшается содержание кристаллов в утфеле в конце кристаллизации, но и увеличивается чистота межкристального раствора.

Для доведения утфеля до заданной массовой доли сухих веществ на раскачку необходимо намного больше мелассы, чем воды. Именно этим можно объяснить наименьшее содержание кристаллов в утфеле после раскачки и в конце кристаллизации по схеме с раскачкой мелассой. Кроме того, снижение чистоты межкристального раствора в этом случае достигается не за счет его обессахаривания, а за счет повышенного содержания несахаров, внесенных с раскачкой.

Исключение раскачивания утфеля водой, мелассой или мелассой разбавленной водой и замена их промежуточным подогревом уменьшает выход мелассы и содержание растворенного сахарозы в результате того, что мелассообразующий коэффициент воды составляет 2,3–2,7, а также увеличивает содержание кристаллов в утфеле. При применении промежуточного подогрева эффект кристаллизации составлял 8,13–8,25% по сравнению с раскачкой водой, где он составлял 3,74–3,96% и раскачкой патокой – 5,24–6,7%.

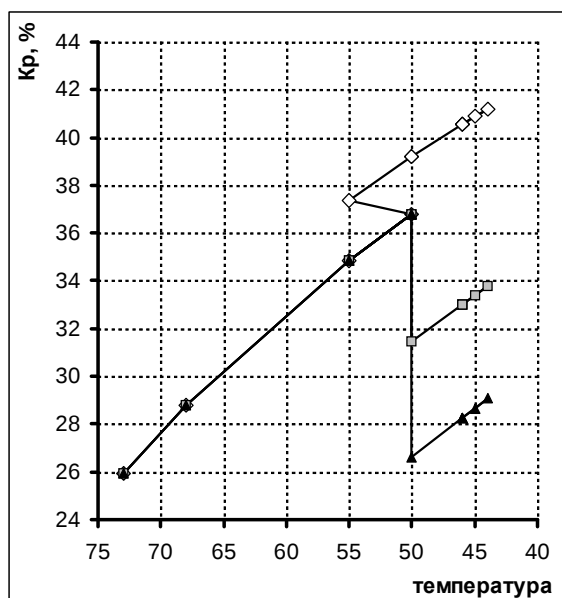
Кроме того, наблюдается существенное улучшение гранулометрического состава кристаллов (табл. 3, рис. 5) при применении промежуточного нагрева утфеля в сторону значительного роста доли кристаллов фракции 0,63–1,0 мм и > 1,0 мм. При этом важную роль в улучшении гранулометрического состава сахара играет рекристаллизация [5], т.е. растворение мелких кристаллов сахара и переноса соответствующего количества сахарозы из раствора на поверхность существующих кристаллов. Механизм такого переноса был раскрыт И.Г.Бажалом [5].

Таблица 2. Данные вычислительных экспериментов

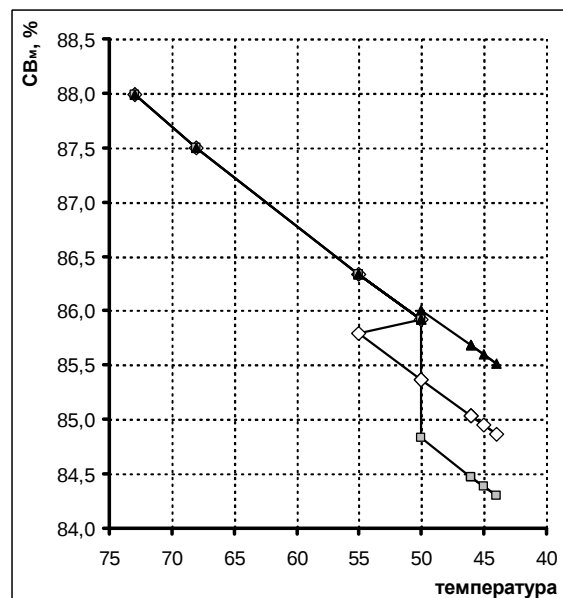
Показатель	Единица измерения	Начало кристаллизации	Перед раскочкой, или промежуточным нагревом	Конец кристаллизации
С раскочиванием водой				
Утфель				
СВ	%	91,10	91,10	89,6
СХ	%	72,79	72,79	71,59
Чистота	%	79,90	79,90	79,90
Межкристальный раствор				
СВ	%	87,98	86,34	84,29
СХ	%	63,26	58,24	57,10
Чистота	%	71,90	67,45	67,73
С раскочиванием мелассой				
Утфель				
СВ	%	91,10	91,10	89,6
СХ	%	72,79	72,79	68,20
Чистота	%	79,90	79,90	76,12
Межкристальный раствор				
СВ	%	87,98	86,34	85,34
СХ	%	63,26	58,24	55,70
Чистота	%	71,90	67,45	64,65
С промежуточным подогревом				
Утфель				
СВ	%	91,10	91,10	91,10
СХ	%	72,79	72,79	72,79
Чистота	%	79,90	79,90	79,90
Межкристальный раствор				
СВ	%	87,98	86,34	85,03
СХ	%	63,26	58,24	54,23
Чистота	%	71,90	67,45	63,78

Таблица 3. Гранулометрический состав кристаллов

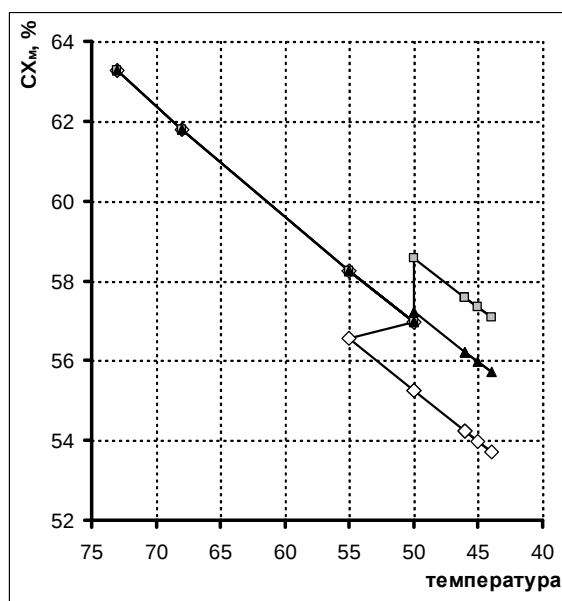
Показатель	Единица измерения	Начало кристаллизации	Перед промежуточным нагревом	Конец кристаллизации
1	2	3	4	5
Размер фракций кристаллов сахара				
>1,0	мм	—	0,77	4,51
0,63–1,0	мм	—	48,61	72,35
0,5–0,63	мм	41,67	31,66	14,62
0,315–0,5	мм	41,67	16,54	6,97
0,2–0,315	мм	16,66	2,78	0,78
0–0,2	мм	—	0,4	0,77



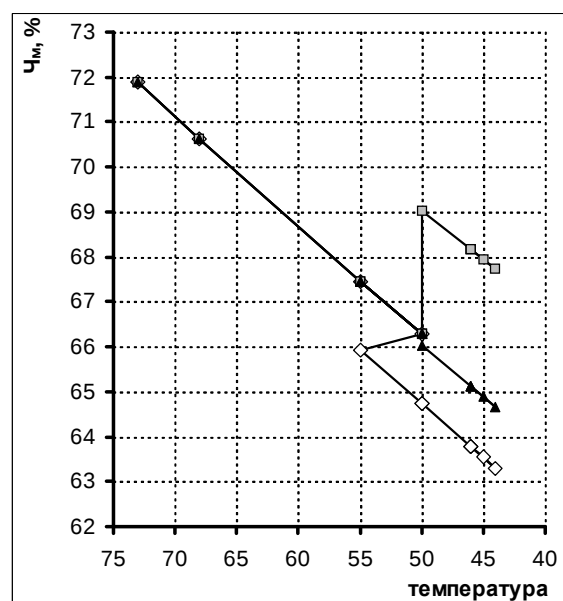
а



б



в



г

Рис. 4. Изменение технологических характеристик утфеля в процессе кристаллизации охлаждением: ■ – с расквашиванием водой; ▲ – с расквашиванием мелассой; ◆ – с промежуточным подогревом; а – содержание кристаллов в утфеле; б – массовая часть сухих веществ межкристалльного раствора; в – массовая часть сахарозы межкристалльного раствора; г – чистота межкристалльного раствора

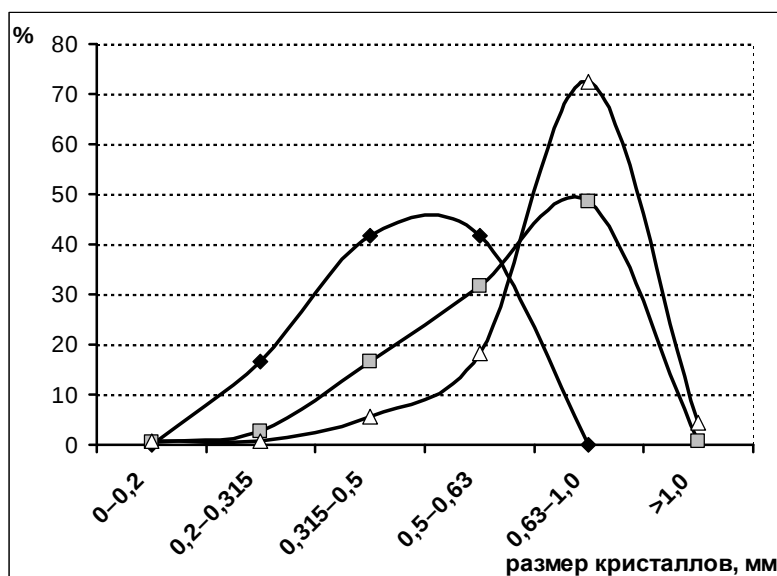


Рис. 5. Гранулометричний состав кристаллов: —◆— — начало кристаллизации; —■— — перед промежуточным нагревом; —▲— — конец кристаллизации.

Выводы. 1. Экспериментально установлено, что использование промежуточного нагрева утфеля последнего продукта взамен раскачек его водой или нечистыми сахарными растворами сводит к минимуму вторичное кристаллообразования, создает благоприятные условия для интенсивной рекристаллизации и повышает эффект кристаллизации в мешалках-кристаллизаторах.

2. Построенная нами имитационная модель процесса кристаллизации сахарозы охлаждением с высокой точностью описывает и отражает характер хода процесса кристаллизации сахарозы охлаждением и может быть использована в практике сахарного производства.

Литература

1. Технологічний процес виробництва цукру з цукрових буряків. Правила усталеної практики 15.83–37–106:2007. // Ярчук М.М., Калінченко М.Ф., Чупахіна В.Н. – К.: Цукор України. 2007,– 420 с.
2. Мирончук В.Г., Єщенко О.А. Методика моделювання процесу промислової кристалізації цукрози. // Харчова промисловість – К.: НУХТ, 2009 – № 8, с. 87-90.
3. Мирончук В.Г. Кристалізація цукру у вертикальних кристалізаторах з подовженим терміном охолодження // Наукові праці НУХТ, №4, 1998.– с.66-67.
4. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. – М.: Пищевая пром-сть, 1973. –320 с.
5. Бажал І.Г., Куриленко О.Д. Переконди́нсація в дисперсних системах. – К.: Наукова думка. 1975.– 216 с.

Анотація

В.Г.Мирончук, О.А.Єщенко, М.М.Картава

***ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ОХОЛОДЖЕННЯМ
ЦУКРОВОГО УТФЕЛЮ ОСТАННЬОГО ПРОДУКТУ***

У статті наведені результати лабораторних, промислових і обчислювальних експериментів режимів роботи станцій кристалізації цукрового утфелю останнього продукту. Дано рекомендації промисловості з раціонального ведення процесу кристалізації.

Ключові слова: кристалізація, цукровий утфель, межкристальний розчин, розкачка, мішалка-кристалізатор, проміжний нагрів.

Summary

V.Myronchuk, O. Yeschenko, M.Kartava

***INTENSIFICATION OF THE LAST PRODUCT SUGAR MASSECUITE
CRYSTALLIZATION PROCESS BY COOLING***

The paper presents the results of laboratory, industrial and computing experiments modes stations crystallization of last product sugar massecuite. Made recommendations for the industry on the rational management of industrial crystallization process.

Keywords: crystallization, sugar massecuite, syrup, dilution, mixer-crystallizer, the intermediate heat.