

УДК 664.1.048

В.Г. Мирончук, О.А. Ещенко, М.М. Картава

Национальный университет пищевых технологий

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЕМ САХАРНОГО УТФЕЛЯ ПОСЛЕДНЕГО ПРОДУКТА

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, міжкристальний розчин, розкачка, мішалка-кристалізатор, проміжний нагрів.

Постановка проблеми. 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 аппаратурного 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 и публикаций. 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 технологической режимом 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 раскачки 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 на 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.

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 про-

цесса кристаллизации охлаждением утфеля (рис. 2) и балансовых уравнений материальных потоков [3, 4], которые связаны с дугами графа.

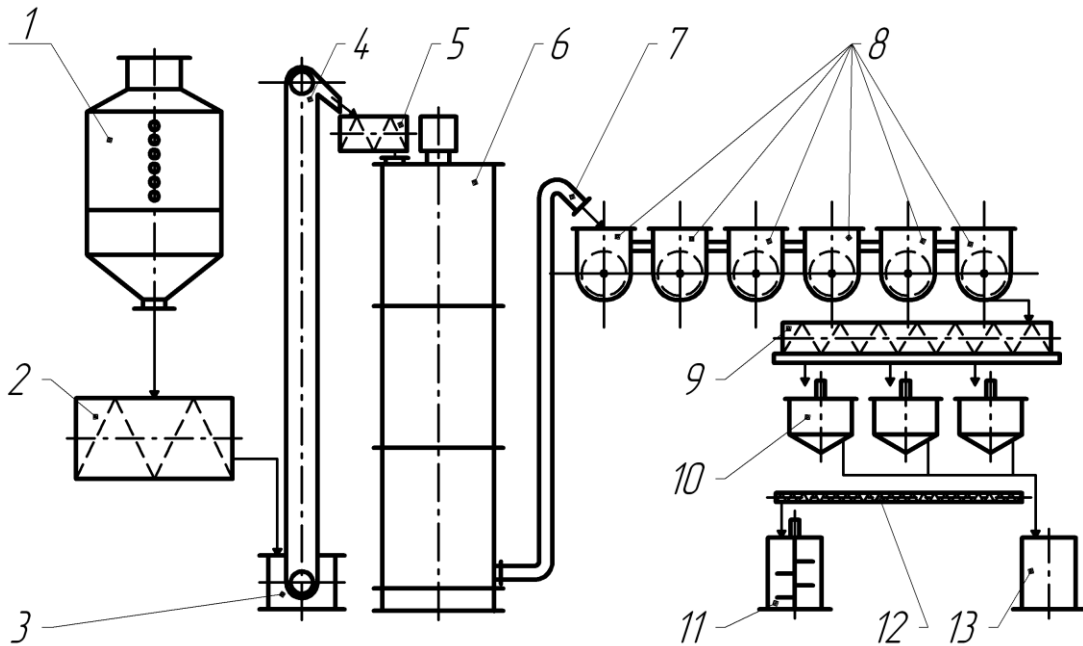


Рис. 1. Комбинированная аппаратная схема кристаллизации охлаждением утфеля последнего продукта при двопродуктовой схеме: 1 – вакуум-аппарат последнего продукта; 2 – приемная утфелемешалка; 3 – сборник утфеля; 4 – нория; 5 – сборник-смеситель; 6 – вертикальный кристаллизатор; 7 – трубопровод утфеля; 8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

Уравнение материального баланса:

$$G_y = G_{кр_n} + G_{м_n} = G_{кр_к} + G_{м_к}, \quad (1)$$

$$\text{– по сахарозе: } G_y CX_y = G_{м_n} CX_{м_n} + G_{кр_n} = G_{м_к} CX_{м_к} + G_{кр_к}, \quad (2)$$

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

$$\text{– по сухим веществам: } G_y CB_y = G_{м_n} CB_{м_n} + G_{кр_к} = G_{м_к} CB_{м_к} + G_{кр_к}, \quad (4)$$

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

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

Количество сахарозы в межкристалльном растворе определяют по формуле:

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

тогда:

$$CX_m = \frac{W_y H_0(t, \mathcal{C}_m) K_{пер}}{G_m} 100\%, \quad (7)$$

где G_m – масса межкристалльного раствора, кг; CX_m – массовая часть сахарозы в межкристалльном растворе, %; W_y – масса воды в утфеле; $H_0(t, \mathcal{C})$ – коэффициент растворимости сахарозы, как функция температуры и чистоты; $K_{пер}$ – коэффициент пересыщения утфеля.

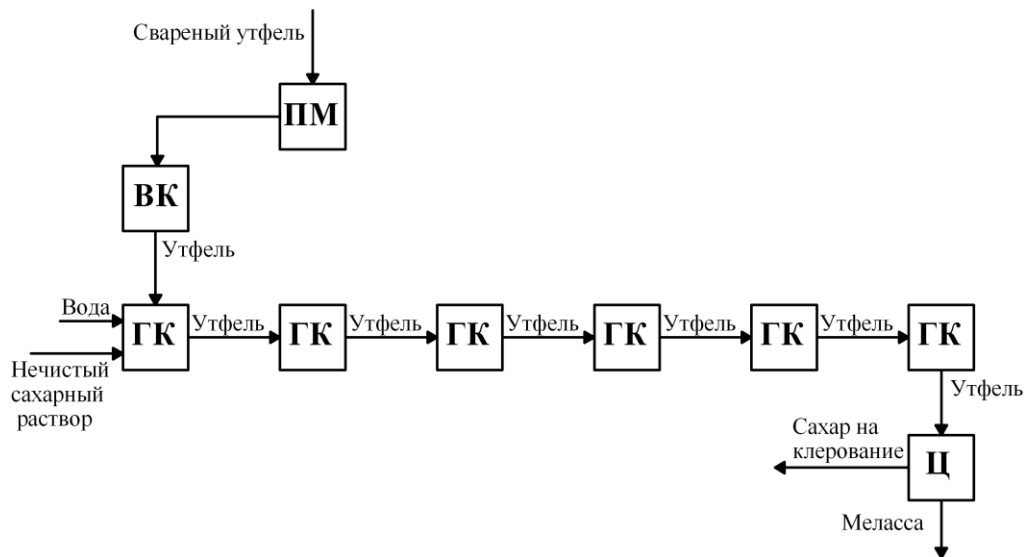


Рис. 2. Поточковый граф процесса кристаллизации утфеля охлаждением: ПМ – приемная мешалка; ВК – вертикальный кристаллизатор; ГК – горизонтальный кристаллизатор; Ц – центрифуга.

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

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

где t – температура продукта, °С; \mathcal{C} – 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 $t_i = t_n \dots t_k$:

– масса межкристального раствора:

$$G_{M_i} = W_y H_0(t_i, \mathcal{C}_{M_i}) K_{nep} + \frac{G_y H C_y}{100\%} + \frac{G_y W_y}{100\%},
 \tag{9}$$

– масса кристаллов:

$$G_{kp_i} = G_y - G_{M_i},
 \tag{10}$$

– содержание кристаллов:

$$Kp_i = \frac{G_{kp_i}}{G_y} 100\%,
 \tag{11}$$

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

$$CX_{M_i} = \frac{W_y H_0(t_i, \mathcal{C}_{M_i}) K_{nep}}{G_{M_i}} 100\%,
 \tag{12}$$

$$HC_{M_i} = \frac{G_y H C_y}{G_{M_i}} 100\%,
 \tag{13}$$

$$CB_{M_i} = \frac{W_y H_0(t_i, \mathcal{C}_{M_i}) K_{nep} + G_y H C_y}{G_{M_i}} 100\%,
 \tag{14}$$

$$W_{M_i} = \frac{G_y W_y}{G_{M_i}} 100 \% , \quad (15)$$

$$\chi_{M_i} = \frac{CX_{M_i}}{CP_{M_i}} 100 \% . \quad (16)$$

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 раскочку; CP_p, CP_y, CP – сухие вещества сахарного раствора на раскочку, утфеля в начале кристаллизации и в конце соответственно; $CP_p = 0$ при раскочке 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°C до 50°C, после чего осуществляли его нагрев до 55°C и продолжали охлаждать до 40°C. Полезная разность температуры в процессе охлаждения составляла 10–12°C, 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 раскочкой, или промежуточным нагревом	Конец кристаллизации
Данные промышленности при раскочивании 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 раскочиванием водой				
СВ	%	80,40	79,80	79,80
СХ	%	58,00	55,05	54,41
Чистота	%	72,14	68,98	68,18
С раскочиванием 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

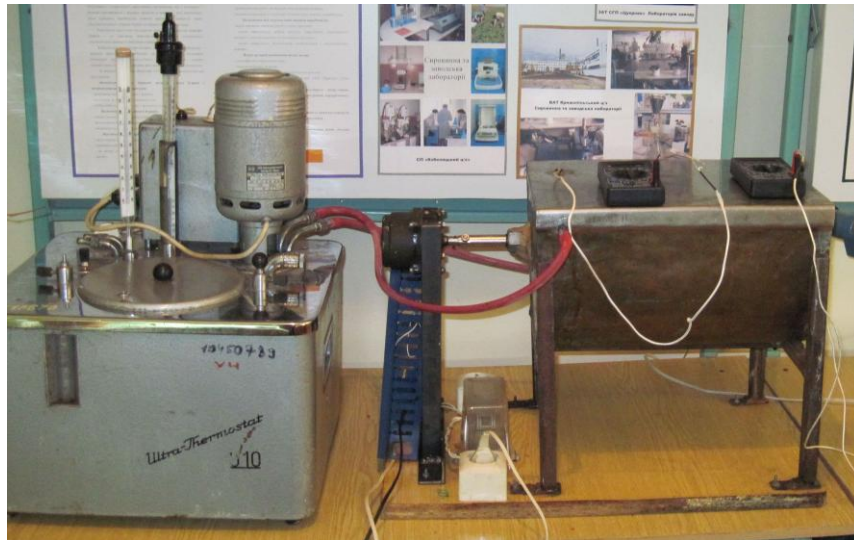


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования процесса кристаллизации сахарозы охлаждением

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

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 сахара 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 (таблица 3, рис. 6) 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 3

Гранулометрический состав кристаллов

Размер фракций кристаллов сахара	Единица измерения	Начало кристаллизации	Перед промежуточным нагревом	Конец кристаллизации
>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	–	0,40	0,77

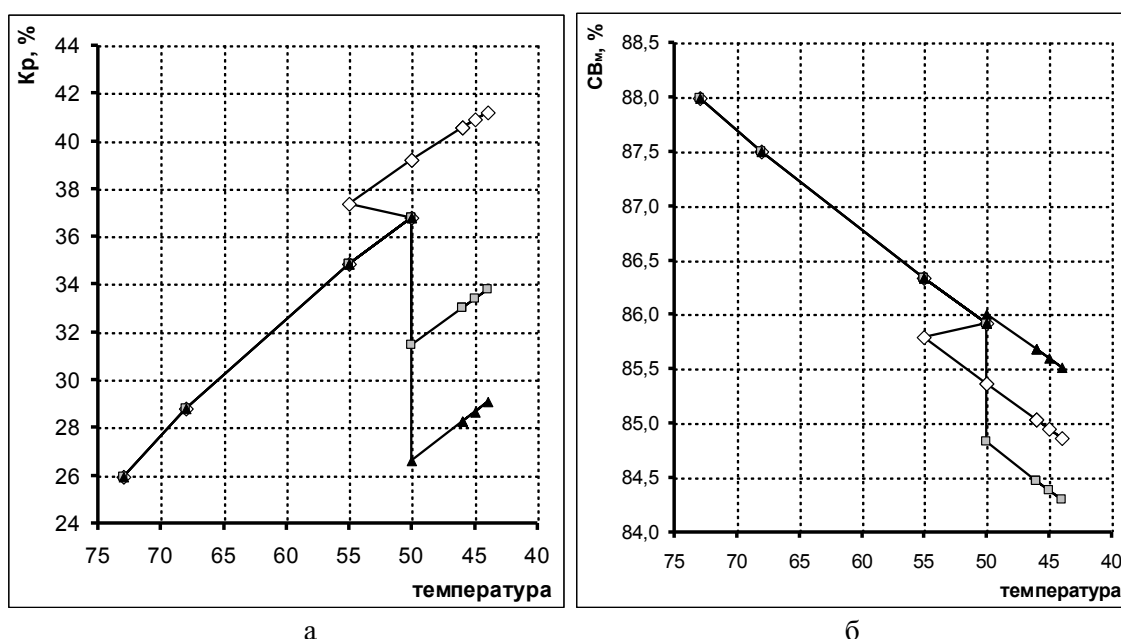


Рис. 4. Изменение технологических характеристик утфеля в процессе кристаллизации охлаждением (—□— с раскачиванием водой; —▲— с раскачиванием мелассой; —◇— с промежуточным подогревом): а – содержание кристаллов в утфеле; б – массовая часть сухих веществ межкристального раствора.

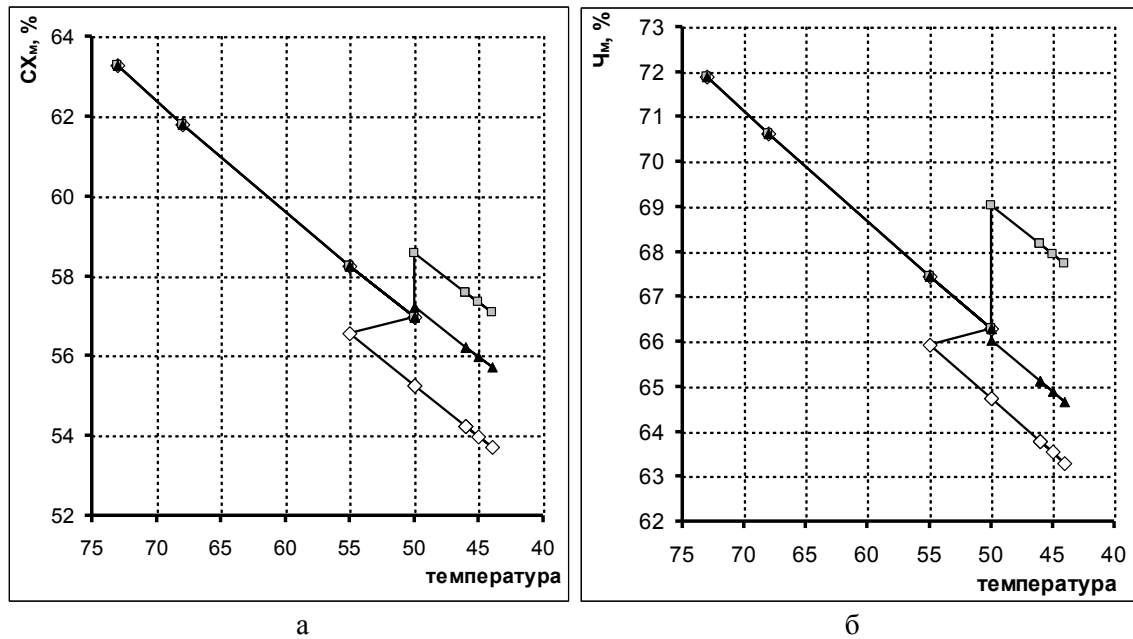


Рис. 5. Изменение технологических характеристик утфеля в процессе кристаллизации охлаждением (□ – с расквашиванием водой; ▲ – с расквашиванием мелассой; ◇ – с промежуточным подогревом): а – массовая часть сахарозы межкристалльного раствора; б – чистота межкристалльного раствора.

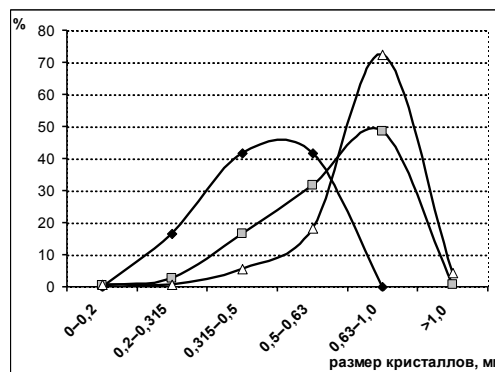


Рис. 6. Гранулометрический состав кристаллов: ● – начало кристаллизации; □ – перед промежуточным нагревом; △ – конец кристаллизации.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что использование промежуточного нагрева утфеля последнего продукта взамен расквасок его водой или нечистыми сахарными растворами сводит к минимуму вторичное кристаллообразование, 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.

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. Перекондинсація в дисперсних системах. – К.: Наукова думка. 1975.– 216 с.