

Рост осциллирующих кристаллов сахара в растворах НИЗКОЙ ЧИСТОТЫ

С.М. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, профессор (e-mail: petrovsm@mail.ru)

Н.М. ПОДГОРНОВА, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)»

Введение

При имеющемся значительном количестве сахарной свёклы и наличии необходимой производственной базы наблюдаются сверхнормативные потери сахарозы по технологическому верстату. Особенно велики потери при кристаллизации и последующем центрифугировании сахара, составляющие в свеклосахарном производстве 25–30 % от общих потерь. Согласно прогнозам, прогресс в области основного кристаллизационного оборудования будет осуществляться посредством модернизации оборудования, которым располагает предприятие, и интенсификации его работы.

Одним из эффективных и одновременно малоизученных направлений интенсификации процессов теплообмена при кристаллизации структурированных дисперсных систем является изменение гидродинамической обстановки на межфазной границе «кристаллы – раствор» вынужденной конвекцией под воздействием внешней знакопеременной силы, например низкочастотных колебаний.

Во многих случаях вибрация не меняет сущности технологических процессов, но значительно повышает их производительность, интенсивность или выход продукта. Эти процессы осуществляются за счёт других воздействий безвибрационной природы: температурных градиентов, гравитационных и молекулярных взаимодействий, химических реакций и др. Наложение вибрационного поля на такие процессы позволяет усиливать или ослаблять безвибрационные силы и тем самым управлять их эффективностью. В подобных случаях направленность действия вибрационного поля открывает перспективы для новых высокоэффективных технологий и процессов [3].

Несмотря на то что сегодня акустические методы воздействия на пищевые дисперсные системы полу-

чают всё более широкое распространение в различных отраслях промышленности, выбор условий их влияния на процессы часто основывается на эмпирическом подходе. Данный подход отличается значительной сложностью, не способствует правильному выбору технологических режимов и не даёт возможности для их оптимизации.

Рост кристаллов при вибрационном перемешивании суспензий

В настоящее время продолжает возрастать интерес к исследованиям, посвящённым вибрационным методам интенсификации теплообменных процессов в свеклосахарном производстве. Также обосновывается положительное влияние низкочастотного вибрационного воздействия на кристаллизующиеся сахарные утфели [1, 4]. Имеющиеся представления о механизме влияния колебаний на массоперенос основаны на гипотезах о воздействии на пограничный слой и не содержат количественных соотношений. В то же время вопрос об оценке существующего пограничного слоя «сахар – кристаллы» является принципиальным, поскольку позволяет определить эффективность межфазных взаимодействий. При этом чаще оперируют общим понятием пограничного слоя без учёта взаимосвязи гидродинамического и диффузионного слоёв. Однако такой подход недостаточно корректен.

Разработана модель [2], описывающая эффект дополнительного перемешивания, вызванного распространением последовательности механических импульсов в вязком сиропе в присутствии кристаллов сахара, и показано его влияние на рабочие параметры и движущую силу кристаллизации. Экспериментально подтверждено, что в результате распространения низкочастотных механических импульсов при наращивании кристаллов сахара путём охлаждения

суспензий в технических растворах происходит заметное снижение маточных включений в кристаллах, уменьшение образования конгломератов и их инкрустирования на поверхности теплообмена. Также наблюдается улучшение текучести системы и интенсификация теплопередачи, большее истощение растворов и, следовательно, увеличение скорости роста кристаллов. Этот эффект коррелируется с относительным движением в системе «раствор – кристалл».

Таким образом, повышение скорости массовой кристаллизации сахарозы из пересыщенных растворов, лимитируемой диффузионным механизмом, можно достигать не только путём увеличения суммарной поверхности кристаллов, но и посредством интенсивного осциллирующего движения кристаллов в utfелях.

Методика эксперимента

В настоящей работе проводились экспериментальные исследования низкочастотных воздействий гармонической вынуждающей силы на скорость роста кристаллов сахарозы из нечистых растворов. Для этой цели была создана экспериментальная установка, состоящая из ультратермостата UTU-4/84, который обеспечивает термостатирование жидкости с точностью не менее ±0,05 °С. Установка включала в себя две цилиндрические ёмкости объёмом 2 дм³, в одной из которых было смонтировано вибрационное перемешивающее устройство, соединённое с системой генератора вибрации. В ёмкости 1 диаметром 110 мм соосно с ней размещён полый цилиндр 2 (ячейка), имеющий верхнюю 3 и нижнюю 4 сетчатые крышки диаметром 99 мм, так, чтобы между ним и поверхностью ёмкости оставался по всему поперечному сечению небольшой зазор (рис. 1). Он закреплялся на вертикальном стержне 5, осуществляющем с помощью эксцентрикового вибрационного механизма колебательные движения амплитудой 6,5 мм и частотой колебаний 0–5 с⁻¹.

Сетчатые верхняя и нижняя крышки цилиндра имели размер отверстий 0,5 мм. В цилиндре размещалось необходимое количество белого сахара с размером кристаллов 0,6–0,75 мм, которые создают вибрирующий слой при движении цилиндра.

Ячейка с кристаллами осуществляла возвратно-поступательные движения в термостатируемой ёмкости, где содержится ~1250 г модельного раствора сахара чистотой 80 % с коэффициентом пересыщения α = 1,1.

Когда ячейка площадью сечения F₀ с кристаллами двигалась вниз, межкристалльный раствор поступал в неё снизу через свободное сечение сетки F_{св} со скоростью v_{св}. На первом полупериоде колебательного движения ячейки раствор противотоком перемещался в режиме практически полного вытеснения через

слой кристаллов площадью F_к со скоростью v_к. В результате толщина гидродинамического пограничного слоя уменьшалась и, как следствие, увеличивалась скорость перехода молекул сахарозы из маточного раствора к поверхности кристаллов. Часть маточного раствора, которая циркулирует со скоростью v₃ по кольцевому зазору площадью F₃, смешивалась с раствором, выходящим раствором через верхнюю сетку ячейки. На втором полупериоде движения ячейки вверх маточный раствор перемещался через слой кристаллов сахара, движущийся вниз под действием внешней побуждающей силы.

Результаты и их обсуждение

Процесс роста осциллирующих кристаллов изучался при температуре 60 °С и частотах вибраций 0–5 Гц в течение 15–20 мин. По завершении опыта кристаллы сахара отделялись от маточного раствора в лабораторной центрифуге с фактором разделения K_r = 3920.

Прирост массы чистых кристаллов сахара определялся по формуле

$$\Delta m = \Delta m_1 - \left(\frac{\Delta m_1 \cdot c_{\text{МК}}}{100} \right), \tag{1}$$

где Δm – прирост массы чистых кристаллов сахара; Δm₁ – прирост массы кристаллов сахара с плёнкой межкристалльного раствора (маточного); c_{МК} – массовая доля межкристалльного раствора на поверхности кристаллов, %.

Скорость кристаллизации сахарозы ($\frac{\text{МГ}}{\text{М}^2 \cdot \text{МИН}}$) рассчитывалась по формуле

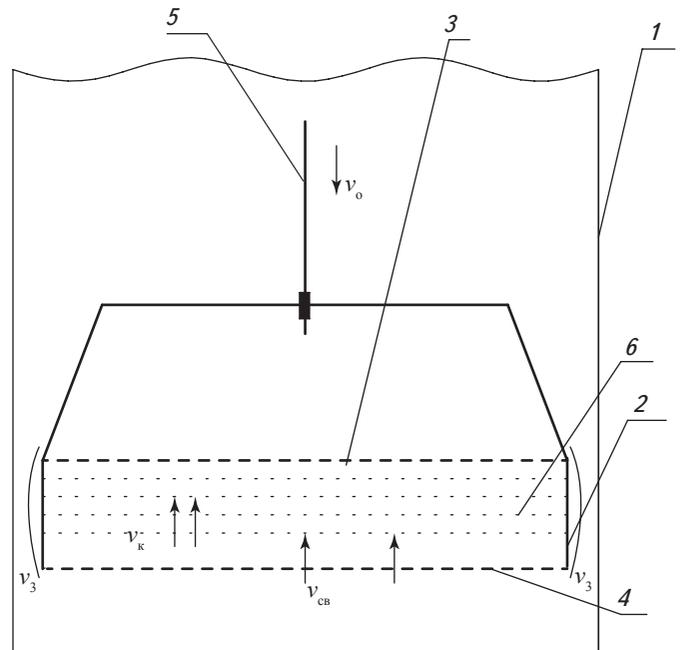


Рис. 1. Схема создания осциллирующего слоя кристаллов

$$V = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (2)$$

где τ – продолжительность процесса кристаллизации, мин; S – общая площадь поверхности кристаллов сахара, помещённых в ячейку, м².

Общую площадь поверхности кристаллов S (см²) вычисляли по формуле

$$S = 4,12 m_{\text{мр}}^{2/3} Q, \quad (3)$$

где $m_{\text{мр}}^{2/3}$ – масса единичного кристалла, г; Q – суммарное количество кристаллов, находящихся в ячейке, шт.

Для сравнения одновременно проводился процесс кристаллизации во второй ёмкости термостата с роторным перемешиванием.

В настоящей работе в отличие от известных исследований [1, 5, 6] проводилось непосредственное моделирование гидродинамического режима движения пересыщенного раствора сквозь вибрирующий слой кристаллов сахара. При этом обеспечивались наиболее корректные гидродинамические условия фильтрации и интенсивного относительного движения в системе «кристалл – раствор».

В соответствии с условием несжимаемости среды сумма потерь давления при движении маточного раствора через свободное сечение сетки $\Delta p_{\text{св}}$ и потерь давления при движении через слой кристаллов $\Delta p_{\text{к}}$ равна потере давления при движении раствора через поперечное сечение зазора Δp_3 :

$$\Delta p_{\text{св}} + \Delta p_{\text{к}} = \Delta p_3. \quad (4)$$

При условии равенства суммарного расхода маточного раствора через свободное сечение сетки $q_{\text{св}} = v_{\text{св}} \cdot F_{\text{св}}$ и расхода через слой кристаллов $q_{\text{к}} = v_{\text{к}} \cdot F_{\text{к}}$ расходу, вытесняемому сечением ячейки $q_0 = v_0 \cdot F_0$ в единицу времени

$$q_{\text{св}} + q_{\text{к}} = q_0,$$

после преобразования получим следующее выражение:

$$v_{\text{св}} \cdot f_{\text{св}} + v_{\text{к}} \cdot f_{\text{к}} = v_0, \quad (5)$$

где $v_0, v_{\text{св}}, v_{\text{к}}, v_3$ – скорости движений ячейки, течения межкристалльного раствора через свободные отверстия сетки, фильтрации раствора через слой кристаллов и скорость течения межкристалльного раствора через зазор соответственно; $v_0 = 4Af$ – средняя скорость колебательного движения ячейки и слоя кристаллов сахара, м/с; A – амплитуда колебаний, м; f – частота колебаний, Гц; $f_{\text{к}}, f_{\text{св}}, f_3$ – отношение площадей по-

верхности кристаллов $F_{\text{к}}$, свободных отверстий $F_{\text{св}}$ и площади сечения зазора F_3 к площади поперечного сечения кассеты F_0 .

Представим уравнение неразрывности потока маточного раствора через свободное сечение сетки $F_{\text{св}}$:

$$v_{\text{к}} \cdot f_{\text{к}} = v_{\text{св}} \cdot 4f_{\text{св}}. \quad (6)$$

Выражая $\Delta p_{\text{св}}$ и Δp_3 в уравнении (4) как гидравлические сопротивления движению маточного раствора, имеем:

$$\xi_{\text{св}} \frac{\rho_{\text{к}} v_{\text{св}}^2}{2} + \frac{\xi_{\text{к}} v_{\text{к}}^2}{4f} = \xi_3 \frac{\rho_{\text{м}} v_3}{4}, \quad (7)$$

где $\xi_{\text{св}}, \xi_3$ – коэффициенты местных сопротивлений при движении межкристалльного раствора через свободные отверстия сетки и через зазор; $\rho_{\text{м}}$ – плотность межкристалльного раствора, кг/м³; $\rho_{\text{к}}$ – плотность кристаллов сахара, кг/м³.

Обозначим через $c_{\text{св}} = \frac{\xi_{\text{св}}}{f_{\text{св}}^2}, c_3 = \frac{\xi_3}{f_3^2}$ константы,

характеризующие гидродинамические сопротивления сетки и зазора соответственно.

Решая систему уравнений (5), (6), (7), получим следующее выражение для расчёта скорости движения маточного раствора через вибрирующий слой кристаллов сахара за полупериод колебаний:

$$v_{\text{к}} = \frac{v_0}{f_{\text{к}}} \frac{\sqrt{c_{\text{св}}}}{\sqrt{c_{\text{св}} + \sqrt{(c_{\text{к}} + c_3)k}}}, \quad (8)$$

где $k = \frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{к}}}$ – коэффициент, учитывающий соотношение

плотностей межкристалльного раствора и кристаллов сахара; $c_{\text{к}}$ – гидравлическая характеристика слоя кристаллов сахара в ячейке, определяемая по формуле

$$c_{\text{к}} = \frac{\xi_{\text{к}} \cdot x}{2f \cdot \rho_{\text{м}} \cdot f_{\text{к}}^2}, \quad (9)$$

где x – объёмная доля кристаллов сахара; $\xi_{\text{к}}$ – удельное сопротивление кристаллов, Н · с/м⁴.

Значение $\xi_{\text{св}}$ – справочная величина, которая находится в зависимости от коэффициента живого сечения

сетки $k_{\text{ж}} = \frac{F_{\text{св}}}{F_0}$. Коэффициент сопротивления ξ_3

находится по формуле

$$\xi_3 = \xi_{\text{к}} \left(\frac{F_3}{F_{\text{к}}} \right)^2. \quad (10)$$

Величина $\xi_{\text{к}}$ экспериментально определяется в термостатируемых условиях при фильтрации с определённой скоростью v под воздействием разности дав-

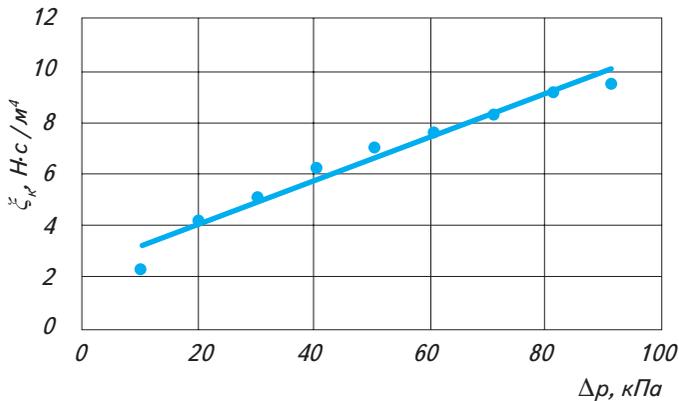


Рис. 2. Изменение удельного сопротивления осциллирующего слоя кристаллов

лений Δp , создаваемых по обе стороны сетки, межкристалльного раствора с определёнными значениями сухих веществ, чистоты и вязкости через слой высотой h кристаллов сахара, находящегося на сетке.

Расчёт ξ_k осуществляется по формуле

$$\xi_k = \frac{\Delta p}{v \cdot \mu \cdot h}, \quad (11)$$

где Δp – разность давлений по обе стороны сетки, Па; v – скорость фильтрации маточного раствора через неподвижный слой кристаллов, находящихся на сетке, м/с; μ – динамическая вязкость маточного раствора, Па·с; h – высота слоя кристаллов в ячейке, м.

На рис. 2 представлена зависимость сопротивления осциллирующего слоя кристаллов сахара от разности давлений Δp .

Полученные значения ξ_k позволяют расчётным путём установить, что значительное перекрытие сечения кристаллизатора слоем осциллирующих кристаллов сахара приводит к двукратному росту относительной скорости их обтекания.

Влияние скорости вибрационного движения межкристалльного раствора на скорость кристаллизации сахарозы приведено на рис. 3. Из графика следует,

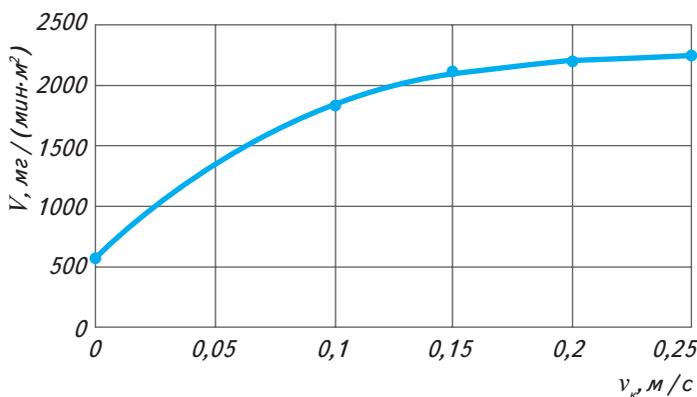


Рис. 3. Зависимость скорости кристаллизации сахарозы от скорости движения межкристалльного раствора

что при увеличении интенсивности фильтрационного режима движения межкристалльного раствора возрастает эффективность влияния вибрирующих в стеснённых условиях кристаллов сахара на гидродинамический пограничный слой. При этом максимальное значение скорости кристаллизации сахара достигается при невысокой величине интенсивности вибрационного воздействия на сетчатую ячейку.

Установлено, что слой кристаллов сахара с порозностью слоя 0,75, перемещающийся под влиянием вибрационных воздействий, способствует увеличению относительной скорости циркуляции раствора приблизительно в 2 раза по сравнению со скоростью самой вибрирующей ячейки.

Таким образом, создание осциллирующего слоя кристаллов амплитудой 6,5 мм и частотой колебаний 4–5 с⁻¹ приводит к возрастанию скорости кристаллизации сахарозы в 3–4 раза из раствора низкой чистоты 80 % с коэффициентом пересыщения 1,1 при температуре 60 °С. Максимальное значение скорости кристаллизации отмечено при вибрационной скорости течения маточного раствора, составляющей 0,15 м/с, что соответствовало частоте колебаний 3 Гц.

На основании проведённых опытов предложена конструкция утфелемешалки-кристаллизатора с вибрационными воздействиями на утфель [7], в которой реализован фильтрационный режим обтекания кристаллов. Эффективность кристаллизатора заключается в более полном истощении межкристалльного раствора за счёт обеспечения относительного движения в системе «кристалл – раствор» и увеличении тем самым выхода кристаллического сахара.

Список литературы

1. López León, K. et al. Caracterización morfológica de cristales de azúcar obtenidos a partir del proceso de cristalización por enfriamiento de paso con agitación de paso variable : дис. – 2014.
2. Pérez, P.V. Application of Mechanical Pulses to Improve the Growth of Crystals in Suspensions / P.V. Pérez, A.C. Rodríguez, J. Sarría // Revista Cubana de Física. – 2011. – Т. 28. – № 1E. – С. 1-52-1E55.
3. Petrov, S.M. Estimates of the thickness of hydrodynamic and diffusive boundary layers on sucrose crystals under low-frequency mechanical vibrations / S.M. Petrov, N.M. Podgornova // International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2016. – № 3. – URL: www.science-sd.com/465-25008 (дата обращения: 10.01.2023).
4. Regensburg, S.I. Cooling Crystallization in an Oscillatory Flow Baffled Crystallizer (OFBC): Influence of Fluid Dynamics on Crystal Product / S.I. Regensburg. – Delft, Netherlands, 2015.
5. Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals / D.V. Arapov, V.A. Kuritsyn, S.M. Petrov,



Оформить подписку на журнал «Сахар» в бумажной версии на 2023 г. можно по ссылке: <https://podpiska.pochta.ru>.
Подписная цена с учётом доставки зависит от региона.
Минимальный срок подписки – 1 месяц



ВАРИАНТЫ ПОДПИСКИ НА 1 ПГ 2023 г.

Бумажная версия:

- ✓ через электронный каталог «Почта России» по адресу: <https://podpiska.pochta.ru> (наш индекс П6305).
Подписная цена зависит от региона доставки;
- ✓ через редакцию (заявка на sahar@saharmag.com) с доставкой по России «Почтой России», цена 1001 р. за 1 месяц, 6006 р. за 6 месяцев.

PDF-версия журнала (подписка через редакцию): для России, стран ближнего и дальнего зарубежья – 3024 р. за 6 месяцев; минимальный срок подписки – 1 месяц, цена 504 р.

Адрес редакции: 121069, Россия, г. Москва, Скатертный пер., д. 8/1, стр. 1.
Тел/факс: +7(495) 690-15-68; +7(985) 769-74-01; e-mail: sahar@saharmag.com
Бухгалтерия: +7 (495) 695-45-67; e-mail: buh@saharmag.com

Официальный сайт: www.saharmag.com; страница в «ВКонтакте»: www.vk.com/saharmag

N.M. Podgornova // Journal of Food Engineering. – 2022. – Vol. 318. – P. 110887. – DOI 10.1016/j.jfood-eng.2021.110887. – EDN KAVVQD.

6. Vekilov, P.G. What determines the rate of growth of crystals from solution? / P.G. Vekilov // Crystal Growth and Design. – 2007. – V. 7. – № 12. – P. 2796–2810.

7. Патент № 2182177 С1 Российская Федерация, МПК С13F 1/02. Утфелемешалка-кристаллизатор : № 2001109760/13 : заявл. 13.04.2001 : опубл. 10.05.2002 / С.М. Петров, А.А. Ясир ; заявитель ВГТА. 8 с. : ил. – EDN PUSBOC.

Аннотация. Проблемой кристаллизации сахарозы в утфелях низкой чистоты является низкая интенсивность и большая длительность процесса. Объектом эксперимента являлось изучение роста осциллирующих с амплитудой 6,5 мм и частотой 4–5 с⁻¹ кристаллов сахара в растворах низкой чистоты с целью установить эффект интенсификации процесса кристаллизации. Показано увеличение в 3–4 раза скорости кристаллизации сахарозы из раствора чистотой

80 % и пересыщением 1,1 при создании фильтрационного режима обтекания кристаллов. Предложена конструкция кристаллизатора для более полного истощения межкристалльного раствора и увеличения выхода кристаллического сахара за счёт достижения относительного движения в системе «кристалл – раствор».

Ключевые слова: осциллирующие кристаллы сахара, фильтрационный режим обтекания, увеличение скорости кристаллизации, раствор низкой чистоты.

Summary. The problem of sucrose crystallization in massecuites of low purity is the low intensity and long duration of the process. The object of the experiment was to study the growth of sugar crystals oscillating with an amplitude of 6.5 mm and a frequency of 4–5 s⁻¹ in solutions of low purity in order to establish the effect of intensification of the crystallization process. A 3–4 times increase in the rate of crystallization of sucrose from a solution with a purity of 80% and a supersaturation of 1.1 is shown when creating a filtration regime of flow around crystals. A crystallizer design is proposed for more complete depletion of the intercrystalline solution and an increase in the yield of crystalline sugar by achieving relative motion in the «crystal – solution» system.
Keywords: oscillating sugar crystals, filtration flow around, increase in crystallization rate, low purity solution.