

К расчёту эффективности процесса кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате

В.А. ГРИБКОВА, канд. техн. наук, доцент (e-mail: vera_gribkova@list.ru)

Е.В. СЕМЁНОВ, д-р техн. наук, профессор

А.А. СЛАВЯНСКИЙ, д-р техн. наук, профессор (e-mail: anatoliy4455@yandex.ru)

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

Введение

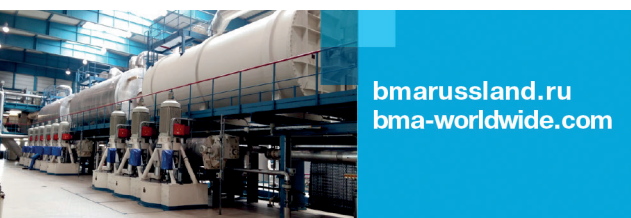
Известно, что скорость роста кристалла является важнейшим показателем процесса уваривания утфеля, поскольку от неё зависит производительность кристаллизатора, качество утфеля, его цветность, потери сахара от разложения и оказывающие решающее влияние на работу центрифуг его фильтрационные показатели. В свою очередь, скорость роста кристаллов при уваривании утфеля зависит от доброкачественности раствора, его пересыщения, вязкости, температуры, а также от конструктивных особенностей, предопределяющих циркуляцию аппарата, и др. Влияние перечисленных факторов проявляется, если поток молекул, двигаясь под действием градиента химического потенциала к поверхности кристалла, внедряется в дальнейшем в его кристаллическую решётку.

В сахарном производстве в качестве кристаллизатора используется вакуум-аппарат, рабочим телом которого служит жидкостный раствор сахарозы (СХ) и несахаров (НСХ). Вода в данном случае присутствует как в связанном (гидратированном), так и в свободном виде. В метастабильной зоне пересыщения свободная водная фаза раствора из гомогенной жидкостной системы начинает переходить в гетерогенную систему в тот момент, когда введённая в рабочее тело вакуум-аппарата затравка в виде сахарной пудры начинает выполнять роль центров кристаллизации сахарозы. В результате развивается процесс образования кристаллов белого сахара, выпадающего в осадок в рабочем объёме вакуум-аппарата. Наблюдениями установлено, что собственно интродуцирование частиц в кристаллическую решётку распадается на несколько этапов: адсорбцию частиц поверхностью кристалла, миграцию по его поверхности и непосредственное встраивание частиц в кристаллическую решётку.

Проблема количественного анализа процесса кристаллизации в растворах в целом как явления инициации фазового перехода гомогенной жидкости (раствора) в двухфазную жидкостную систему в силу важности этой задачи в самых разных областях социума была и остаётся предметом исследования многих специалистов и научных коллективов. Применительно

к сахарной отрасли деятельность исследователей отражена в многочисленных публикациях, в частности в работах [1–19].

При том, что известно не менее пяти описывающих явление кристаллизации научных концепций (таких как ортокинематическая, коагуляционная и др.), в настоящее время большинство специалистов склонно считать процесс кристаллизации сахарозы обусловленным диффузионной кинетикой [1, 2, 6–9] и проч. Однако согласно данным Ван-Гока и других исследователей, при температуре сахаросодержащего раствора ниже 50 °С рост кристаллов зависит уже от скорости внедрения молекул сахарозы в кристаллическую решётку, что обусловлено величиной энергетического барьера, преодолеть который в состоянии лишь соответствующим образом возбуждённые и ориентированные молекулы [4]. Связь между формой кристалла и поверхностной энергией была сформулирована Гиббсом [3]. Предложенная им научная концепция базировалась на термодинамическом представлении об ориентации процесса кристаллизации в направлении уменьшения свободной энергии (роста энтропии), и эта концепция позволяет в идеализированных условиях (при отсутствии примесей, колебаний пересыщенности раствора и т. д.) предсказывать форму кристалла. В то же время, когда процесс кристаллизации сахарозы развивается в производственных условиях, на базе научных положений этой теории невозможно учесть влияние на скорость роста кристалла сахарозы пересыщения, температуры, вязкости раствора и ряда других факторов. Для условий роста кристалла сахарозы представляет интерес изученная И.И. Андреевым кинетическая закономерность между скоростью роста кристаллов и диффузией, справедливость которой была подтверждена опытным путём. Дальнейшее усовершенствование диффузионной теории было выполнено Бертаудом и Валентоном, предложившими разбить процесс кристаллизации на две стадии с помощью двух уравнений для молекулярного переноса сахарозы вдали от растущей поверхности кристалла и в её окрестности [6]. Таким же образом при разработке теории кристаллизации сахарозы поступил и П.М. Силин, предложивший разбить процесс кристаллизации сахарозы на две стадии [1].



Резюмируя результаты проведённого литературного обзора, при постановке и решении задачи по количественному анализу процесса кристаллизации сахарозы исходили из наиболее, по нашему мнению, теоретически и экспериментально обоснованной трактовки данного явления как обусловленной диффузионным переносом твёрдой фазы (молекул сахарозы) конденсации этой субстанции на поверхности кристалла. При теоретическом анализе основанного на диффузионной концепции процесса молекулярного массопереноса учитывали зависимость данного явления от теплоты фазового перехода в utfеле и насыщенности раствора, причём использовали базирующиеся на статистической обработке экспериментальные процессные данные по предмету исследования, а именно соотношения для сахаросодержащего раствора между коэффициентом диффузии, текучести и содержанием твёрдой фазы.

Постановка задачи

С теоретической точки зрения современных представлений расчёты кинетики кристаллизации сахарозы основывают на процессе диффузии молекул сахарозы, движущей силой которой является разница концентрации сахарозы в различных областях межкристалльного раствора [1]. В соответствии с этим положением на основе закона сохранения массы и кинетического соотношения Фика проблему определения концентрации сахарозы в вакуум-аппарате в конкретный период приравнивают к решению уравнения нестационарной диффузии частицы в определённом объёме раствора, прилегающем к частице, при принятии условий изотермичности протекания процесса и при сохранении постоянства коэффициента диффузии [9, 15–19].

В производственном процессе кристаллизации согласно технологическим документам температура в вакуум-аппарате только приблизительно стационарна, а вот коэффициент диффузии в течение процесса кристаллизации из-за изменения содержания сахарозы в межкристалльном растворе может значительно меняться.

Для подтверждения этого факта рядом исследователей были проведены измерения коэффициента диффузии в широком диапазоне концентраций сухих веществ (от 10 до 65 %) и интервала температур (от 20 до 70 °С), результаты которых позволили выразить зависимость коэффициента диффузии от концентрации в виде линейной функции

$$D(c) = -a_1c + b_1, \quad (1)$$

где c – концентрация сухих веществ в весовых процентах; a_1 и b_1 – константы для определённой температуры.

В данном исследовании авторами была выбрана конечная температура межкристалльного раствора 70 °С [6], диапазон мольной доли $c = СВ$ сахарозы в растворе $0,3 < c < 0,7$; в этом случае уравнение (1) будет иметь вид

$$D(c) = (-17,5c + 15,25) \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2)$$

Согласно [6] вместо зависимости коэффициента диффузии D от концентрации c вида (1), (2) предпочтительно использовать зависимость коэффициента диффузии D от другой имеющей важное значение кинетической характеристики раствора, а именно от текучести ϕ (где $\phi = 1/\eta$, η – коэффициент динамической вязкости, (Па·с)). Данную зависимость также путём статистической обработки экспериментальных данных [6] в линейном виде выбирают в форме

$$D(\phi) = a_2\phi + b_2, \quad (3)$$

где a_2 и b_2 – параметры, постоянные для фиксированной температуры,

$$\phi = kc + \lambda, \quad (4)$$

где $\phi = \text{Па} \cdot \text{с} / (\text{Па} \cdot \text{с})$.

В тех же исходных условиях на основе обработки данных [6] по сахаросодержащему раствору: значении температуры раствора $t = 70$ °С, мольной доли c сахарозы в растворе $0,3 < c < 0,7$ уравнение (4) представляется в форме

$$\phi = 1720 - 2400c, \quad (5)$$

откуда с целью исключить концентрацию c из уравнений (2), (5) выражают c :

$$c = (1720 - \phi) / 2400. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получают искомую зависимость коэффициента диффузии D от текучести ϕ (1 / Па·с):

$$D(\phi) = (6,25 \cdot 10^{-3}\phi + 2,75) \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (7)$$

Решение задачи

Физическая модель процесса кристаллизации сахарозы предполагает следующие исходные данные: образовавшиеся кристаллы сахарозы стандартной формы вытянутого параллелепипеда имеют примерно одинаковые геометрические параметры, центры кристаллизации в растворе распределены равномерно по всему объёму и концентрация сахарозы в исходном межкристалльном растворе одинакова по всему объёму вакуум-аппарата ([18], с. 48–51; [9], с. 75–80; Frenzel, 2020,



р. 1–9; Verma, 2021, р. 110–259). При условии принятия всех вышеперечисленных приближений в качестве рабочей геометрической модели процесса кристаллизации сахарозы можно использовать полупространство $0 \leq x \leq h$, окружающее частицу, ограниченное плоскостью $x = 0$, к которому из области $0 \leq x \leq h$ происходит диффузия молекулы сахарозы (рис. 1).

В этом случае для определения увеличения массы растущего кристалла как исходное положение применяют кинетическое уравнение диффузии [17]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right], \quad 0 < x \leq h, \quad 0 < \tau < \infty, \quad (8)$$

где τ – время, x – координата, D – коэффициент диффузии, рассчитывается по (3).

С условием, что исходный раствор сахарозы находится в состоянии пересыщения ($c_{\text{н}}$), при решении уравнения (8) принимают начальное условие

$$c(x, 0) = c_{\text{н}} = \text{const}, \quad 0 < x \leq h \quad (9)$$

и, так как с течением времени в пограничной зоне растущего кристалла раствор сахарозы становится насыщенным ($c_{\text{н}}$), при этом ровно посередине между двумя соседними кристаллами концентрация сахарозы становится максимальной, в этом случае в качестве граничных условий выбирают

$$c(0, \tau) = c_{\text{н}}, \quad \frac{\partial c(h, \tau)}{\partial x} = 0, \quad 0 < \tau < \infty, \quad c_{\text{н}} > c_{\text{н}}. \quad (10)$$

Вследствие этого поставленную задачу приводят к решению нелинейного дифференциального уравнения (8) с начальным (9) и граничными (10) условиями.

В соответствии с общепринятой методологией граничные условия (10) можно преобразовать, вводя переменную величину s согласно зависимости

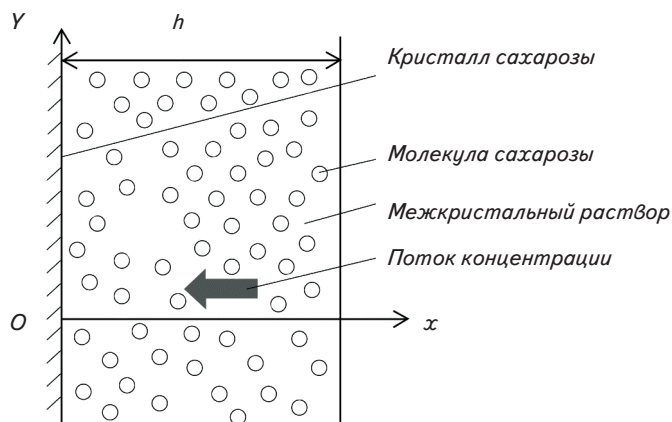


Рис. 1. Геометрическая модель осаждения молекул сахарозы на поверхности кристалла под действием диффузии

$$c = s + c_{\text{н}}, \quad (11)$$

в результате чего граничные условия (10) становятся однородными по переменной s – приведённой концентрации

$$s(0, \tau) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial s(h, \tau)}{\partial x} = 0, \quad 0 < \tau < \infty. \quad (13)$$

В свою очередь, начальное условие (9) принимает вид

$$s(x, 0) = \Delta c, \quad 0 < x \leq h, \quad (14)$$

где $\Delta c = c_{\text{н}} - c_{\text{н}} > 0$ – разность концентраций в начальный период. При этом уравнение (8) по значению s исходя из (11) принимает вид

$$\frac{\partial s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\phi) \frac{\partial s}{\partial x} \right), \quad (15)$$

где $D = D(\phi)$, $D(\phi)$ – определяется по (7), ϕ – коэффициент текучести.

Поскольку нелинейное по концентрации s дифференциальное уравнение (15) не допускает решение в аналитической форме, количественное исследование краевой задачи (12)–(15) в данной работе реализуют на базе метода осреднения.

С этой целью предварительно с небольшой погрешностью начальное условие (9) заменяют на его осреднённое по прилегающей к кристаллу области значению $x \in (0, h)$

$$\frac{1}{h} \int_0^h s(x, 0) dx = \Delta c. \quad (16)$$

В свою очередь, такое же осреднение проводят и с дифференциальным уравнением (15), интегрируя обе его части в области $0 \leq x \leq h$. В результате приходят к интегральному соотношению

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^h s(x, \tau) dx = D(\phi) \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right) \Big|_{x=h} - D(\phi_{\text{н}}) \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}. \quad (17)$$

Вследствие граничного условия (13) выражение (17) упрощается и принимает форму

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^h s(x, \tau) dx = -D(\phi_{\text{н}}) \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}. \quad (18)$$

Искомую функцию $s(x, \tau)$ разыскивают в виде

$$s(x, \tau) = \psi(\tau)x^2 + M(\tau) + N(\tau), \quad (19)$$

где $\psi(\tau)$, $M(\tau)$, $N(\tau)$ – подлежащие определению произвольные функции времени τ .

Далее, подставляя (19) в (12), получают $N(\tau) = 0$.

После чего согласно (19) имеют

$$\frac{\partial s}{\partial x} = 2\psi(\tau)x + M(\tau). \quad (20)$$

И поэтому в силу (13), (20) находят

$$M(\tau) = -2\psi(\tau)h.$$

В результате функция $s(x, \tau)$ преобразуется к виду

$$s(x, \tau) = \psi(\tau)(x^2 - 2hx). \quad (21)$$

Кроме того, вследствие (20)

$$\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)_{x=0} = -2\psi(\tau)h. \quad (22)$$

Поэтому в силу (22) выражение (18) принимает форму

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^h s(x, \tau) \partial x = 2D(\varphi_n)\psi(\tau)h. \quad (23)$$

Подставляя (21) в (23), имеем

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} \int_0^h (x^2 - 2hx) \partial x = 2D(\varphi_n)\psi(\tau)h.$$

Откуда получают дифференциальное уравнение по ψ

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + 3D\frac{(\varphi_n)\psi(\tau)}{h^2} = 0,$$

интегрируя которое, получают

$$\psi(\tau) = P_0 \exp(-\alpha\tau), \quad (24)$$

где P_0 произвольная постоянная,

$$\alpha = 3D(\varphi_n)/h^2 \quad (25)$$

– удельное по h^2 значение коэффициента диффузии.

Подставляя (21), (24), (25) в (16), приходят к условию для определения P_0 :

$$\frac{1}{h} \int_0^h s(x, 0) \partial x = \frac{1}{h} \int_0^h \psi(0)(x^2 - 2hx) \partial x = \Delta c,$$

откуда, имея в виду, что $\psi(0) = P_0$, получают

$$P_0 = -\frac{1,5\Delta c}{h^2}. \quad (26)$$

В результате согласно (24), (26) имеют

$$s(x, \tau) = -\frac{1,5\Delta c}{h^2} \exp(-\alpha\tau)(x^2 - 2hx), \quad (27)$$

где $\psi(\tau) = -1,5\Delta c \cdot \exp(-\alpha\tau) / h^2$.

Выведенное уравнение (27) приведённой концентрации $s(x, \tau)$ имеет удобную мультипликативную форму для количественного и качественного анализа.

Из полученного выражения видно, что концентрация сахарозы пропорциональна разности концентрации Δc , а так как $\alpha > 0$, то согласно (27) концентрация сахарозы убывает по времени τ , и скорость её убывания возрастает с ростом коэффициента диффузии D . Кроме того, в силу (27) концентрация межкристалльного раствора возрастает в интервале $0 \leq x \leq h$ в фиксированный момент времени.

Отмеченные особенности процесса кристаллообразования находятся в согласии с физической стороной описываемого явления.

С учётом замены (9) и формулы (27) истинная концентрация с определяется зависимостью

$$c(x, \tau) = c_n - \frac{1,5\Delta c}{h^2} \exp(-\alpha\tau)(x^2 - 2hx). \quad (28)$$

На базе зависимости (28) рассчитывают объёмный и массовый расход сахарозы в процессе кристаллообразования в вакуум-аппарате.

Отнесённый к единице площади поверхности объёмный расход сахарозы составляет

$$j(\tau) = -D(\varphi_n) \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} = -D(\varphi_n) \left(\frac{\partial s(0, \tau)}{\partial x}\right) = \frac{3\Delta c}{h} D(\varphi_n) \exp(-\alpha\tau),$$

а по массе

$$J(\tau) = j(\tau)\rho, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (29)$$

где ρ – плотность сахарозы.

На основе (29) интегрированием по периоду времени τ вычисляют полный отнесённый к единице площади поверхности массовый расход сахарозы в процессе кристаллообразования в вакуум-аппарате

$$W(\tau) = \int_0^\tau J(\tau) \partial \tau, \text{ кг}/\text{м}^2. \quad (30)$$

В допущении, что частицы сахарозы имеют шарообразную форму диаметром δ , объёмом $\pi\delta^3/6$, с площадью поверхности частицы $s = \pi\delta^2$ и скоплением N частиц сахарозы в 1 м^3

$$N = 6/(\pi\delta^3), 1/\text{м}^3,$$

общая площадь поверхности частиц в 1 м^3 составит

$$S = \frac{6\sigma}{\delta}, \text{ м}^2, \quad (31)$$

где σ – объёмное содержание твёрдого (сахара-песка) в 1 м^3 сахаросодержащей суспензии (утфеля).



Поэтому за период времени τ в 1 м^3 при кристаллообразовании утфеля образуется масса сахара-песка

$$Q = W \cdot S, \text{ кг}, \quad (32)$$

где W вычисляется по (30), S – по (31).

Численный эксперимент

Для проведения численного эксперимента за исходные данные было принято:

- значение температуры раствора $70 \text{ }^\circ\text{C}$;
- объёмное содержание твёрдой фазы $\sigma = 0,5$;
- мольная доля насыщенного раствора сахарозы $c_n = 0,7$ и $0,8$, пересыщенного – $c_n = 0,8$ и $0,9$, что равняется среднему значению параметра пересыщения c_n/c_n^* 1,17 и 1,14 соответственно;
- диаметр частиц сахарозы: $\delta \in [10^{-4}, 2 \cdot 10^{-4}]$, $h = \delta$, м [10];
- время обработки раствора $\tau = 30$ с.

Соответственно зависимости (4) и, например, значению $c_n = 0,7$ для коэффициента текучести имели $\phi = 280$ и поэтому, согласно (7) – для коэффициента диффузии $D(\phi_n) = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При расчёте формулы (32) значение разности концентраций раствора принимали за $\Delta c = c_n - c_n^* = 0,1$.

Результаты

На рис. 2, 3 приведены графики кривых, отражающих особенности кристаллообразования в вакуум-аппарате. Причём результаты вычислений не показывают расхождения результатов, полученных в ходе количественного моделирования процесса с его физическим смыслом. Например, на рис. 2 видно, что снижение концентрации сахарозы в растворе с течением времени начинает уменьшаться.

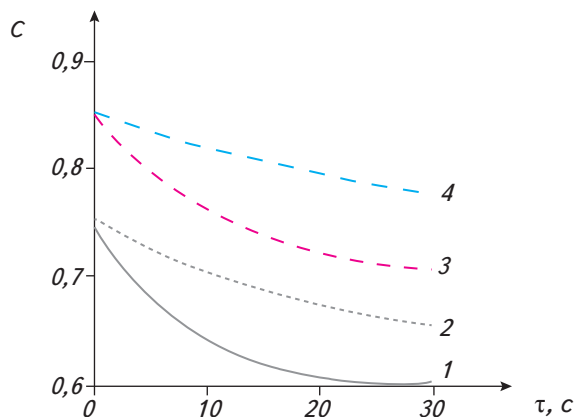


Рис. 2. Зависимость концентрации сахарозы в межкристалльном растворе от времени τ (с) проведения процесса кристаллизации с использованием заправки с различным диаметром частиц δ и значений насыщенной c_n и пересыщенной c_n^* концентрации при фиксированной концентрации σ твёрдой фазы в утфеле ($\sigma = 50\%$; $\Delta c = 0,1$ при $c_n = 0,7$ и $c_n^* = 0,8$: кривая 1 – $\delta = 10^{-4}$, кривая 2 – $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; при $c_n = 0,8$ и $c_n^* = 0,9$: кривая 3 – $\delta = 10^{-4}$, кривая 4 – $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м)

Вместе с тем в каждый момент времени при одинаковой концентрации из-за снижения удельной поверхности частицы в ходе процесса подача сахарозы из раствора к частице уменьшается, что наглядно иллюстрируют кривые на рис. 3. В свою очередь, также из-за сокращения удельной поверхности частицы и, следовательно, вследствие снижения подачи сахарозы, время обработки раствора увеличивается, производительность по кристаллообразованию в аппарате убывает (см. рис. 3). Причём из анализа расположения кривых на рис. 2 и 3 по расчёту пробного можно заключить, что процесс кристаллообразования сахарозы практически завершается примерно к 20-й секунде, и поэтому для активизации процесса варки необходимо прибегать к раскатке утфеля путём обогащения его пересыщенным сиропом сахарозы.

Выводы

Таким образом, в работе обоснована физико-математическая модель прогнозирования процесса кристаллизации сахарозы в растворе. Согласно проведённому количественному и качественному анализу процесса кристаллизации сахарозы в метастабильном сахарсодержащем растворе, в рамках базирующейся на понятии коэффициента текучести диффузионной модели рассматриваемого процесса выявлена расчётная зависимость времени кристаллизации сахарозы от относительной концентрации частиц сахара в растворе. При этом установлено соответствие полученных результатов с физическим смыслом исследуемого процесса. Результаты исследования могут быть эффективно использованы при количественном анализе уваривания утфеля, когда в результате изменения температуры (например, при кристаллообразовании в условиях теплового фазо-

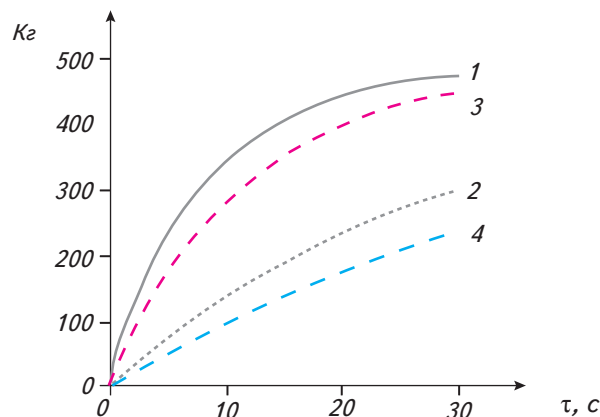
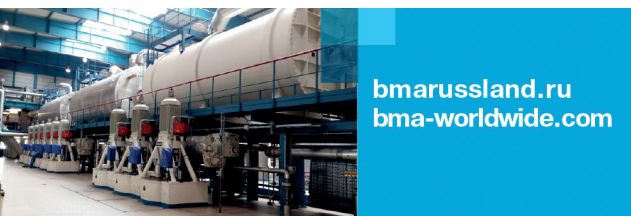


Рис. 3. Зависимость массы сахарозы в 1 м^3 в объёме вакуум-аппарата от времени τ (с) проведения процесса кристаллизации с использованием заправки с различным диаметром частиц δ и значений насыщенной c_n и пересыщенной c_n^* концентрации при фиксированной концентрации σ твёрдой фазы в утфеле ($\sigma = 50\%$; $\Delta c = 0,1$ при $c_n = 0,7$ и $c_n^* = 0,8$: кривая 1 – $\delta = 10^{-4}$, кривая 2 – $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; при $c_n = 0,8$ и $c_n^* = 0,9$: кривая 3 – $\delta = 10^{-4}$, кривая 4 – $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м)



вого перехода) существенно изменяется, возрастая, коэффициент диффузии раствора.

Список литературы

1. *Силин, П.М.* Технология сахара / П.М. Силин. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М. : Пищевая промышленность, 1967. — 626 с.
2. *Сапронов, А.Р.* Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М. : Колос, 1999. — 496 с.
3. *Gibbs, J.W.* Collected works / J.W. Gibbs. — 1928. — 531 p.
4. *Van Hook, A.* Growth rate curves of sucrose crystals / A. Van Hook // *Zuckerindustrie*. — 1984. — S. 109. — № 7. — P. 638–641.
5. *Brown, D.J.* Crystal growth measurement and modeling of fluid flow in a crystallizer / D.J. Brown, K.A. and F. Boysan // *Zuckerind.* — 1992. — S. 117. — № 1. — P. 35–39.
6. *Каганов, И.Н.* Процесс кристаллизации сахара : дисс. ... д-ра техн. наук / Исаак Натанович Каганов ; Моск. технол. ин-т пищевой пром-сти. — М. : МТИПП, 1968. — 400 с.
7. *Кот, Ю.Д.* Рост кристаллов в растворах / Ю.Д. Кот, Е.М. Глыгало // *Труды ВНИИСП*. — В. XVII. — Киев, 1971. — С. 230–246.
8. Физико-химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый, В.М. Лысянский, Л.П. Рева [и др.]. — М. : Агропромиздат, 1987. — 264 с.
9. *Славянский, А.А.* Пути повышения качества и выхода сахара-песка / А.А. Славянский, А.Р. Сапронов // *Международный сельскохозяйственный журнал*. — 1988. — № 6. — С. 75–80.
10. Обобщённое расстояние между частицами при кристаллизации из растворов / С.В. Штерман, Л.А. Каплин, В.И. Тужилкин, А.Н. Филиппов // *Сахар*. — 2010. — № 6. — С. 54–59.
11. *Громковский, А.И.* Дозирование затравочных материалов в современных технологиях кристаллизации сахарозы / А.И. Громковский, Н.Н. Бражников, Ю.И. Послехова // *Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий*. — 2012. — № 3 (53). — С. 170–172.
12. Интенсификация процесса кристаллизации сахарозы свеклосахарного производства / С.А. Чугунов, В.Н. Базлов, И.А. Авилова [и др.] // *Известия Юго-Западного гос. ун-та. Сер. : Техника и технологии*. — 2015. — № 1 (14). — С. 107–111.
13. Моделирование альтернативной технологии непрерывной кристаллизации сахарозы / В.И. Тужилкин, М.Б. Мойсеяк, Д.А. Клемешов, В.А. Ковалёнок // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. — 2017. — № 1 (355). — С. 42–48.
14. Новые технологии кристаллизации сахарозы / В.И. Тужилкин, М.Г. Балыхин, Н.Д. Лукин, В.А. Ковалёнок // *Достижения науки и техники АПК*. — 2018. — Т. 32. — № 12. — С. 82–85.
15. Моделирование процесса роста кристаллов сахарозы в сахаросодержащем растворе // Е.В. Семёнов, А.А. Славянский, В.А. Грибкова [и др.] *Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий*. — 2021. — Т. 83. — № 1 (87). — С. 62–70.
16. Оценка влияния термодинамического фактора на процесс кристаллизации в вакуум-аппарате / Е.В. Семёнов, А.А. Славянский, В.А. Грибкова [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. — 2021. — № 5–6 (383–384). — С. 42–47.
17. *Будак, Б.М.* Сборник задач по математической физике / Б.М. Будак, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. — М. : ГИТТЛ, 1956. — 684 с.

18. Кристаллизация сахарозы как диффузионный процесс / Е.В. Семёнов, А.А. Славянский, М.Б. Мойсеяк [и др.] // *Сахар*. — 2003. — № 1. — С. 48–51.

19. *Славянский, А.А.* Физико-химические основы промышленной кристаллизации сахарозы / А.А. Славянский, В.А. Грибкова, Н.В. Николаева // *Сахар*. — 2021. — № 4. — С. 28–33.

АННОТАЦИЯ. В настоящее время в сахарной промышленности при анализе кристаллизационных процессов обычно исходят из условий постоянства коэффициента диффузии в растворе и изотермического характера процесса. В то же время экспериментальные работы показывают наличие быстрого снижения коэффициента диффузии вместе с убыванием значения концентрации раствора при обессахаривании межкристалльного раствора в процессе кристаллизации сахарозы. Данный факт снижает достоверность теоретических результатов расчёта эффективности процесса кристаллизации, если в них не учитывается условие изменения коэффициента диффузии. В работе предлагается новая схема расчёта размера кристаллов и массы получаемого продукта в зависимости от времени кристаллизации с учётом динамики изменения коэффициента диффузии по содержанию сухого вещества в межкристалльном растворе в течение всего процесса кристаллизации. Теоретический эксперимент, представленный в работе, подтверждён экспериментальными данными, отражающими особенности кристаллообразования сахарозы в вакуум-аппарате. В данной работе с учётом фактора зависимости характера диффузии интенсивность молекулярного массопереноса коэффициента диффузии обоснована постановка задачи, аналитическая формализация и численный расчёт, проверка адекватности полученных теоретических результатов опытным наблюдениям и физическому смыслу предмета исследования, применение полученных расчётных зависимостей для оценки эффективности работы вакуум-аппарата.

Ключевые слова: утфель, сахаросодержащий раствор, вакуум-аппарат, процесс кристаллизации, коэффициент диффузии, моделирование процесса, пересыщение раствора.

Summary. Currently, in the sugar industry, when analyzing crystallization processes, they usually proceed from the conditions of constancy of the diffusion coefficient in solution and the isothermal nature of the process. At the same time, experimental work shows the presence of a rapid decrease in the diffusion coefficient along with a decrease in the concentration of the solution during desaccharification of the intercrystal solution during the crystallization of sucrose. This fact reduces the reliability of the theoretical results of calculating the efficiency of the crystallization process, if they do not take into account the condition for changing the diffusion coefficient. In this paper, the authors propose a new scheme for calculating the size of crystals and the mass of the resulting product depending on the crystallization time, taking into account the dynamics of the diffusion coefficient change in the dry matter content in the intercrystal solution during the entire crystallization process. The theoretical experiment presented in the paper is confirmed by experimental data reflecting the features of sucrose crystal formation in a vacuum apparatus. In this paper, taking into account the dependence factor characterizing the intensity of molecular mass transfer of the diffusion coefficient, the formulation of the problem, analytical formalization and numerical calculation, verification of the adequacy of the obtained theoretical results to experimental observations and the physical meaning of the subject of the study, the use of the obtained calculated dependencies to evaluate the efficiency of the vacuum apparatus are justified.

Keywords: utfel, sugar-containing solution, vacuum apparatus, crystallization process, diffusion coefficient, process modeling, supersaturation of the solution.

