

РАЗДЕЛ I. ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ И БИОТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.69540/2949-4079.2024.63.70.001

УДК 66.011

А.А. Славянский, Н.Н. Лебедева, Н.Д. Лукин

A.A. Slavyanskiy, N.N. Lebedeva, N.D. Lukin

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ГЛЮКОЗЫ

FEATURES OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON GLUCOSE CRYSTALLIZATION

Аннотация:

Изучение особенностей тепловых явлений, имеющих место при кристаллизации глюкозы, важно для дальнейшего совершенствования этого процесса. Однако обоснование и теоретические аспекты данной проблемы разработаны недостаточно. С целью оценки влияния термодинамического фактора на протекающий в вакуум-аппарате тепловой процесс в статье предпринимается попытка обосновать физико-математическую модель этой проблемы и провести ее численный анализ. В вакуум-аппарате метастабильный раствор системы типа «жидкость — твердое» может испытывать два фазовых превращения. В состоянии, предшествующем пересыщенному, вблизи центра кристаллизации в рабочем объеме вакуум-аппарата с затратой тепловой энергии развивается экзогенная тепловая реакция. В пересыщенном состоянии этот фактор может спровоцировать скоротечный процесс конденсации (кристаллизации) молекул твердой фазы. Это явление сопровождается выделением внутренней (тепловой) энергии от центра кристаллизации в жидкую фазу раствора. При этом поскольку затраты экзогенной и эндогенной теплоты при конденсации и растворении вещества значительны и эквивалентны по величине, то и при кристаллизации выделяется влияющая на протекание кинетики собственно массообменного процесса в вакуум-аппарате эндогенная теплота, приводящая к резкому повышению температуры в растворе. Что, как известно, в результате тепловой обработки глюкозы может привести к изменению ее физико-химических свойств. А именно, при температуре 50 °С эта субстанция имеет так называемую гидратную форму, а в диапазоне температур от 50 до 85 °С — ангидридную, что, в том числе, приводит к резкому изменению кристаллизационной способности этого продукта. В ходе исследований предложена физико-математическая мо-

дель процесса кристаллообразования глюкозы с учетом выделения теплоты в результате фазового превращения глюкозосодержащего раствора в глюкозный утфель. Кроме того, разработан алгоритм и осуществлен численный эксперимент, расчетные результаты которого выявили адекватность найденных теоретическим путем научных фактов физическому смыслу реального процесса. Полученные с учета влияния выделяющегося при кристаллизации эндогенного тепла аналитические зависимости имеют важное значение при решении инновационных задач в технологии получения кристаллической глюкозы.

Ключевые слова: вакуум-аппарат, глюкоза, фаза, метастабильный раствор, теплота, растворение, конденсация, кристаллизация.

Abstract:

The study of the features of thermal phenomena occurring during glucose crystallization is important for further improvement of this process. However, the rationale and theoretical aspects of this problem are not sufficiently developed. In order to assess the influence of the thermodynamic factor on the thermal process occurring in a vacuum apparatus, the article attempts to substantiate the physical and mathematical model of this problem and carry out its numerical analysis. In a vacuum apparatus, a metastable solution of a liquid—solid system can undergo two phase transformations. In the preceding supersaturated state near the center of crystallization in the working volume of the vacuum apparatus, with the expenditure of thermal energy, an exogenous thermal reaction develops. In a supersaturated state, this factor can provoke a rapid process of condensation (crystallization) of solid phase molecules. This phenomenon is accompanied by the release of internal (thermal) energy from the crystallization center into the liquid phase of the solution. Moreover, since the costs of exogenous and endogenous heat during condensation and dissolution of a substance are significant and equivalent in value, then during crystallization endogenous heat is released, which affects the kinetics of the mass transfer process itself in a vacuum apparatus, leading to a sharp increase in temperature in the solution. Which, as is known, as a result of heat treatment of glucose can lead to a change in its physicochemical properties. Namely, at a temperature of 50 °C this substance has the so-called hydrate form, and in the temperature range from 50 to 85 °C it has an anhydride form, which, among other things, leads to a sharp change in the crystallization ability of this product. In the course of research, a physical and mathematical model of the process of glucose crystal formation was proposed, taking into account the release of heat as a result of the phase transformation of a glucose-containing solution into a glucose masseccuite. In addition,

an algorithm was developed and a numerical experiment was carried out, the calculated results of which revealed the adequacy of the scientific facts found theoretically with the physical meaning of the real process. The analytical dependencies obtained by taking into account the influence of the endogenous heat released during crystallization are important in solving innovative problems in the technology of producing crystalline glucose.

Keywords: vacuum device, glucose, phase, metastable solution, heat, dissolution, condensation, crystallization.

В сахарном, крахмалопаточном, химическом и ряде других производств процесс кристаллизации реализуют в вакуум-аппарате (ВА), где рабочим телом является утфель, который получают, в зависимости от отрасли, используя растворы глюкозы, сахарозы, соли или другие подобные вещества^{1,2}.

При метастабильном режиме жидкостный раствор ведет себя как гомогенная (условно) жидкость. В метастабильном, близком к пересыщенному состоянию глюкозосодержащем растворе заключенная в нем тонкая взвесь или специальным образом приготовленная и введенная в него измельченная твердая фаза, выступающая в виде центров кристаллизации (ЦК), могут инициировать адиабатический процесс с выделением значительного количества тепловой энергии. Этот фактор приводит к превращению гомогенного раствора в гетерогенную жидкостную систему — глюкозный утфель³.

С позиций трактовки выделения теплоты при кристаллообразовании как физического процесса следует отметить, что это явление, с одной стороны, обусловлено ускоренным, вследствие действия силы притяжения, движением молекул глюкозы к ЦК. С другой стороны, согласно закону сохранения энергии, накопленная при перемещении скопления молекул кинетическая энергия в результате торможения до нулевого значения скорости молекул на поверхности ЦК (в виде приращения кинетической энергии в начале и конце движения) затрачивается на работу по встраиванию молекул в кристаллическую решетку ЦК, а также на потенциальную, внутреннюю, в виде

¹ Хворова Л.С. Кристаллизация как одна из важнейших (завершающих) стадий биотехнологии глюкозы // Актуальная биотехнология. 2020. № 3 (34). С. 239.

² Славянский А.А. Специальная технология сахарного производства. СПб.: «Лань», 2020. 216 с.

³ Хворова Л.С. Научно-практические основы получения кристаллической глюкозы. М.: Россельхозакадемия, 2013. 270 с.

теплоты, энергию. Что в целом объясняет явление конденсации скопления молекул на ЦК как процесс кристаллизации вещества в ВА⁴.

Известно, что энергетика производства, конкретно на крахмалопаточном заводе, базируется на использовании какой-либо из физических форм тепловой энергии воды — жидкостной или парообразной. В тепловых агрегатах вода превращается в пар, после чего эта газообразная субстанция выступает в технологическом потоке получения глюкозы или глюкозных продуктов крахмалопаточного завода в качестве основного генератора тепла (фактически — рабочего тела). Далее, по технологическому потоку, пар либо затрачивается на нагревание с целью испарения влаги из другой гетерогенной жидкостной системы (например, глюкозосодержащего сока в выпарном аппарате), либо, осаждаясь на охлажденных твердых стенках конструктивных элементов оборудования, переходит в новое физическое состояние, превращаясь в жидкость с выделением из пара накопленной в нем теплоты⁵.

В результате фазового превращения пара в жидкость данное явление, обусловленное законом сохранения энергии для перемещающегося в парообразной среде и заторможенного затем на стенке скопления молекул (здесь воды), протекает с выделением, как правило с высокой степенью эффективности, тепловой энергии, что вызывает повышение, в виде приращения кинетической энергии скопления молекул, температуры среды и стенок элементов оборудования. В такой постановке пар выступает уже основным источником тепловой энергии при ее реализации в процессах технологии крахмалопаточного завода.

Аналогично, когда в пересыщенном растворе (например, в глюкозосодержащем) расстояние между ЦК становится достаточно малым для того, чтобы развились силы притяжения молекул глюкозы к ЦК. Поэтому, согласно тому же закону, развивается явление кристаллизации или, что то же самое, конденсации, реализуемое в результате осаждения молекул глюкозы на поверхности ЦК⁶.

Проблеме научно-технического исследования поведения раствора в метастабильном и пересыщенном состояниях, как одного из ключе-

⁴ *Vogel K., Greinert T., Reichard M.* Thermodynamics and kinetics of glycolytic reactions. Part I: Kinetic modeling based on irreversible thermodynamics and validation by calorimetry // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. № 21. P. 1—20.

⁵ *Славянский А.А., Лукин Н.Д., Лебедева Н.Н.* Промышленное производство крахмала и крахмалопродуктов. М.: «Инфра-М», 2022. 271 с.

⁶ *Хворова Л.С.* Вопросы кристаллизации пищевой гидратной глюкозы // *Пищевая промышленность*. 2018. № 12. С. 59—63.

вых факторов в технологическом процессе глюкозного и близких к нему по физической природе производств, уделено значительное внимание во многих литературных источниках^{7,8,9}.

В настоящей статье исследуется задача оценки влияния выделяющейся в процессе кристаллизации теплоты на физическую форму и эффективность процесса кристаллообразования глюкозы¹⁰.

Физико-математическое моделирование этого явления допускает не сильно искажающую реально протекающий процесс схематизацию этого явления. При этом можно считать правомерным допущение сферической симметричности смеси «жидкость + твердое» относительно центра O в области $0 < r < \xi$, где, соответственно, r , ξ — текущий радиус и среднее радиальное расстояние между шарами (Рисунок 1). Это позволяет сформулировать следующую краевую задачу.

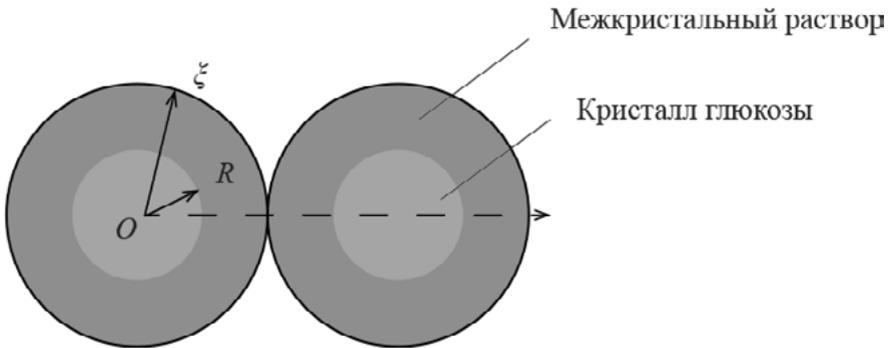


Рис. 1. Схема к расчету процесса кристаллизации гидратной глюкозы в глюкозосодержащем растворе.

Допускается некоторый объем межкристалльного раствора в виде сферической области радиусом ξ , имеющий центр в точке O при темпе-

⁷ Хворова Л.С. Виды кристаллической глюкозы для получения растворов и таблетированных форм // Фармация. 2020. Т. 69. № 5. С. 24—29.

⁸ Carneiro A, Rodríguez O, MacEdo E. Fructose and glucose dissolution in ionic liquids: Solubility and thermodynamic modeling // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2013. V. 52. № 9. P. 3424—3435.

⁹ Хворова Л.С. Современные технологии получения кристаллической глюкозы // Крахмал и его производные. 2023. № 1. С. 47—55.

¹⁰ Славянский А.А., Семенов Е.В., Лебедева Н.Н., Неделькин В.И., Егорова М.И. Математическое моделирование кинетики кристаллизации гидратной глюкозы // Сахар. 2014. № 5. С. 45—49.

ратуре насыщения T_0 и моделирующий частицу глюкозы в виде шара радиусом $r = R$ и центром O .

Причем шары статистически равномерно распределены в жидкостной системе, а в качестве модели процесса теплопередачи от жидкости к шарам выбирают изолированный шар радиусом R .

Дополнительно к этим условиям предполагается, что в качестве геометрической модели частицы глюкозы в виде шара из прилегающего к нему объема жидкости ($R < r < \xi$) (где 2ξ — расстояние между центрами шаров) в условиях радиальной симметрии направлен молекулярный поток глюкозы из ее раствора (Рисунок 1).

При этом, если $V_{\text{ш}}$ и $V_{\text{ж}}$ — соответственно, объем шаров и объем жидкости в жидкостной системе, v — объемная концентрация шаров в ней, то в соответствии с принятой геометрической моделью системы «жидкость + система шаров» половина расстояния ξ между центрами соседних шаров составит

$$\xi = Rv^{-1/3}, \quad 0 < v < 1, \quad (1)$$

$$\text{где } v = V_{\text{ш}} / (V_{\text{ш}} + V_{\text{ж}}).$$

В качестве исходного, описывающего кинетику кристаллизации соотношения выбирают, как обычно, отнесенное к сферическим координатам, с началом координат в центре O шара, уравнение

$$\partial c / \partial t = D(\partial^2 c / \partial r^2 + 2\partial c / \partial r / r) \quad (R < r < \xi), \quad (2)$$

где c — объемная концентрация глюкозы в глюкозосодержащем растворе (утфеле), t — время, D — коэффициент диффузии.

Начальное условие $c(r, 0)$ по концентрации глюкозы в шаровом слое для простоты выбирают как равномерно распределенное по данному объему

$$c(r, 0) = c_{\text{n}} \quad (R < r < 2\xi - R), \quad (3)$$

где c_{n} — исходная концентрация глюкозы в растворе (концентрация пересыщения).

В принятом допущении относительно характера данного распределения при количественном анализе процесса кристаллизации ограничиваются расчетом концентрации в шаровом слое толщиной равной половине расстояния между центрами шаров, т. е. вместо (3) принимается

$$c(r, 0) = c_{\text{n}} = \text{const} \quad (R < r < \xi), \quad (4)$$

что в условиях симметричности задачи приводит к граничному условию для концентрации твердой фазы в растворе между центрами шаров в процессе кристаллизации

$$\partial c(\xi, t) / \partial r = 0 \quad (0 < t < \infty). \quad (5)$$

Последнее условие отвечает максимуму концентрации пересыщения посередине между шарами в процессе кристаллизации.

Имея в виду, что поток концентрации развивается от межкристалльного раствора к шаровой поверхности, в качестве граничного условия на ней исходят из зависимости

$$-\partial c(R, t)/\partial r + K[c(R, t) - c_n] = 0 \quad (0 < t < \infty), \quad (6)$$

где принято $K = \beta/D$ — число Био (кристаллохимическое), β — коэффициент массоотдачи, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, характеризующий массовую скорость поверхностных процессов, $c_n = \text{const}$ — концентрация насыщения глюкозы на поверхности частицы (шара).

Согласно выше оговоренным условиям (4)—(6), в рамках принятой терминологии получают задачу третьего рода для дифференциального уравнения теплопроводности (2) путем замены переменной

$$c(r, t) = c_n + u(r, t), \quad (7)$$

где u — приведенная концентрация.

Тогда задача (2), (4)—(7) относительно функции и принимает вид

$$\partial u/\partial t = a(\partial^2 u/\partial r^2 + 2\partial u/\partial r/r) \quad (R < r < \xi), \quad (8)$$

$$u(r, 0) = \Delta c \quad (R < r < \xi), \quad (9)$$

$$\Delta c = c_n - c_n > 0, \quad (10)$$

$$\partial u(\xi, t)/\partial r = 0 \quad (0 < t < \infty), \quad (11)$$

$$-\partial u(R, t)/\partial r + Ku(R, t) = 0 \quad (0 < t < \infty). \quad (12)$$

Частным решением дифференциального уравнения (2) является

$$u(r, t) = (C \sin kr + D \cos kr) \exp(-ak^2 t)/r,$$

где C, D, k — определяемые при решении задачи (8)—(12) параметры.

В таком случае, опуская промежуточные выкладки, можно показать, что применительно к рассматриваемой проблеме общее решение краевой задачи (8)—(12) выражается в форме

$$u(r, \tau) = \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \psi(k_n, r) \exp(-ak_n^2 \tau), \quad (13)$$

где

$$\psi(k, r) = \sin k_r r + \phi(x_i) \cos k_r r, \quad (14)$$

$$\phi(x) = (x - \text{tg} x)/(1 + x \text{tg} x), \quad (15)$$

$$k_i = x_i/\xi, \quad (16)$$

k_i — i -е собственное значение краевой задачи (8) — (12), $i = 1, 2, \dots$;

x_i — i -й корень характеристического уравнения

$$[k + H \cdot \phi(x)]/R - \phi(x)/R^2 + \{[H - k \cdot \phi(x)]/R - 1/R^2\} \cdot \text{tg}(kR) = 0, \quad (17)$$

$$k = x/\xi, \quad (18)$$

ξ определяется по (1), $\phi(x)$ — по (15).

Для того чтобы определить входящий в (13) коэффициент C_n , подставляют (13) в (10), интегрируя затем обе части полученного соотношения по r в пределах от R до ξ , что позволяет выразить C_i в виде

$$C_i = \Delta c \cdot \int_R^{\xi} \psi(k_i, r) r dr / C_{i0}, \quad (19)$$

где

$$C_i = \Delta c \cdot \int_R^{\xi} \psi(k_i, r) r dr / C_{i0}, \quad \text{— квадрат нормы собственной}$$

функции (14). (20)

Для того чтобы вычислить поток q концентрации на поверхности $r = R$ частицы, в основу берется первый закон Фика¹¹, который ограничивается n слагаемыми в выражении суммы (13)

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial r}_{r=R} = -D \frac{\partial u}{\partial r}_{r=R} = -\frac{D}{r^2} \sum_{i=1}^n C_i [\psi(k_i r) - r \psi'(k_i r)] \exp(-k_i^2 D t)_{r=R}, \quad (21)$$

где $\psi(k_i r)$ определяется по (14), C_i — по (19), (20),

$$\psi'(k_i r) = k_i [\text{Cos}(k_i r) - \varphi(x_i) \text{Sin}(k_i r)], \quad (22)$$

Это позволяет иметь полный объемный расход Q глюкозы за время t на базе (19)—(22) в виде

$$Q(t) = \int_0^t q(t) dt = \frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{k_i^2} [r \psi'(k_i r) - \psi(k_i r)] \cdot [1 - \exp(-k_i^2 D t)]_{r=R}, \quad \text{м}^3/\text{м}^2. \quad (23)$$

Тогда как текущий массовый расход, в свою очередь, будет иметь вид

$$M(t) = \rho \cdot Q(t), \quad \text{кг}/\text{м}^2, \quad (24)$$

где ρ — плотность глюкозы, $Q(t)$ определяется по (23).

Поскольку процесс кристаллизации вещества всегда сопровождается выделением тепла с повышением температуры, характеризуемый уравнением

$$\delta T = Q_{\text{уд}} / c_0, \quad (25)$$

где $Q_{\text{уд}}$ — удельная теплота, Дж/кг; c_0 — теплоемкость продукта (глюкозы), Дж/(кг·К), то зависимость температуры $\delta T_{\text{гл}}$ в процессе кристаллизации глюкозы от времени t в соответствии с (24), (25) составляет

$$\delta T_{\text{гл}} = Q_{\text{уд}} c \cdot [M(t) / M_0] / c_0, \quad \text{К}, \quad (26)$$

где $M(t)$ определяется по (24), M_0 — массовое содержание глюкозы в глюкозосодержащем растворе.

Причем ранее установленные зависимости (7), (24), (26) были положены в основу численного моделирования процесса кристаллизации глюкозы с учетом роста температуры при реализации этого процесса.

¹¹ Семенов Е.В., Славянский А.А., Сергеева Е.А., Щитова Т.А. Особенности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы // Сахар. 2013. № 3. С. 46—50.

Предполагается, что глюкозосодержащий раствор в состоянии насыщения имеет $c_n = 1,1$, а в пересыщенном $c_n = 1,2$ и $\Delta c = c_n - c_n$ обогащается порошкообразной затравкой из частиц радиусом $R = 5 \times 10^{-5}$ м при объемной концентрации частиц затравки в растворе при $v = 40$ и 50 %. Тепловые параметры процесса кристаллизации: исходная температура раствора гидратной глюкозы 40 °С, коэффициент удельной теплоемкости $c_0 = 1,26$ кДж/(кг·К), удельная теплота кристаллизации $Q_{\text{уд}} = 109,8 \times 10^3$ Дж/кг.

В соответствии с данными¹² коэффициент диффузии $D = 3,8 \times 10^{-10}$ м²/с.

Численное моделирование проводили с использованием алгоритмического инструментария компьютерных средств среды Mathcad.

Все числовые вычисления построены на основе системы соотношений (13)—(18). При этом дополнительно для определения корней уравнения (18), (19) использовали процедуру root, в выражениях суммы (13) и др., ограничиваясь в расчетах четырьмя слагаемыми.

Относящиеся к обоснованию решения краевой задачи (14)—(18) данные по расчету собственных значений краевой задачи приведены в Таблице 1.

Табл. 1. Результаты расчета собственных значений краевой задачи.

Корень уравнения (18), x_i $i = 1, 2, 3, 4$	$x_1 = 2,125$	$x_2 = 2,785$	$x_3 = 6,13$	$x_4 = 6,40$
Собственное значение (19), $k_i = (x_i/\xi_1) \times 10^4, \text{ м}^{-1};$ $\xi_1 = 6,786 \times 10^{-5}, \text{ м}$ $i = 1, 2, 3, 4$	$k_1 = 3,131$	$k_2 = 4,104$	$k_3 = 9,033$	$k_4 = 9,431$
Корень уравнения (18), x_i $i = 5, 6, 7, 8$	$x_5 = 1,197$	$x_6 = 2,785$	$x_7 = 5,94$	$x_8 = 6,14$
Собственное значение (19), $k_i = (x_i/\xi_2) \times 10^4, \text{ м}^{-1};$ $\xi_2 = 6,786 \times 10^{-5}, \text{ м}$ $i = 5, 6, 7, 8$	$k_5 = 1,90$	$k_6 = 4,421$	$k_7 = 9,429$	$k_8 = 9,747$

¹² Семенов Е.В., Славянский А.А., Сергеева Е.А., Щитова Т.А. Особенности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы.

Приведенные на Рисунках 2, 3 результаты вычислений показывают согласие полученных результатов количественного моделирования исследуемого процесса с физическим смыслом задачи. Как видно из Рис. 2, 3, процесс кристаллизации гидратной глюкозы развивается сравнительно быстро, в течение нескольких секунд.

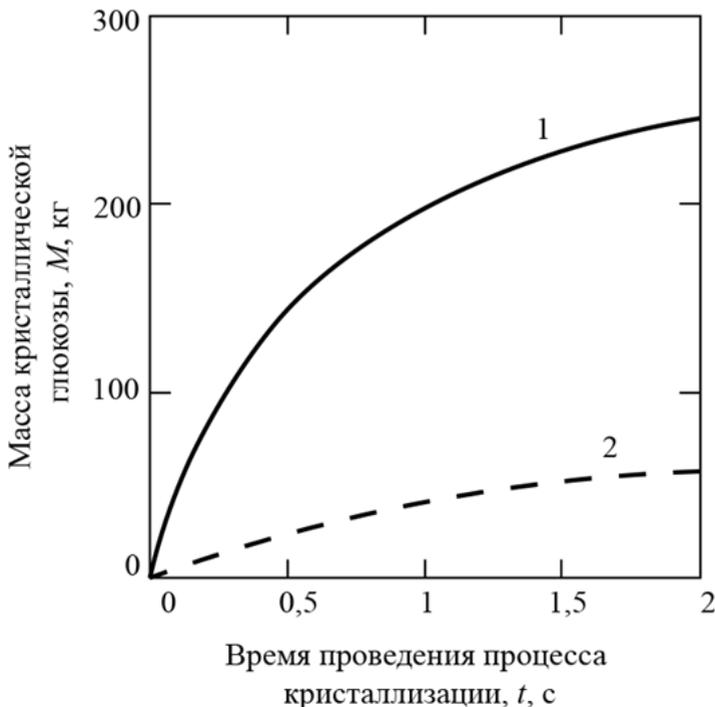


Рис. 2. Зависимости массы M глюкозы от времени t проведения процесса кристаллизации и объемной концентрации v частиц затравочного материала ($1 - v = 40\%$; $2 - v = 50\%$).

Как видно из кривых на Рис. 2, снижение по массе концентрации глюкозы в растворе за счет ее кристаллизации с течением времени растет. Причем интенсивность данного процесса возрастает, когда объемная концентрация v твердой фазы в utfеле снижается (кривая 1 выше кривой 2), поскольку в этом случае сырьевые ресурсы межкристалльного раствора utfеля выше, и наоборот.

С другой стороны, отмечается и противоположная тенденция. Так, по отраженной на Рис. 3 зависимости диапазона температуры δT кристаллизации глюкозы от времени t проведения процесса кристаллизации и объемной концентрации v частиц затравочного материала мас-

са кристаллизующейся глюкозы при больших ресурсах молекулярного сырья, естественно, выше (кривая 1 ниже кривой 2).

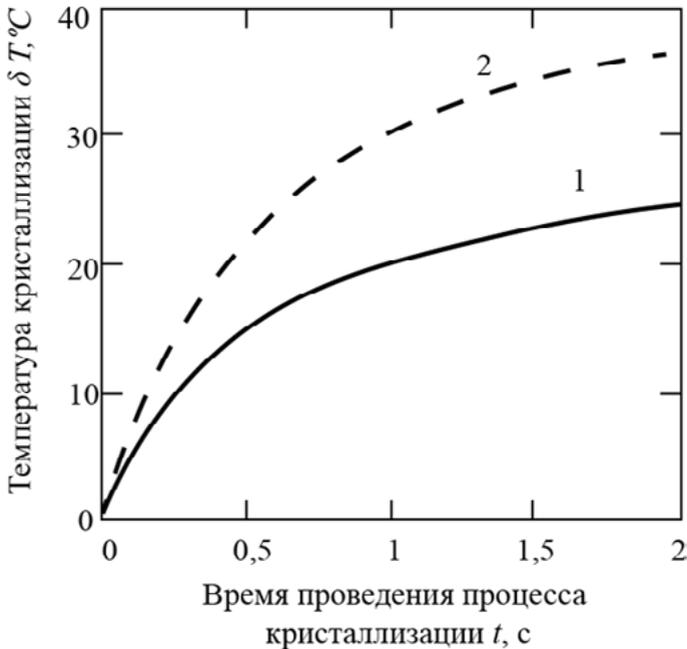


Рис. 3. Зависимости температуры δT кристаллизации глюкозы от времени t проведения процесса кристаллизации и объемной концентрации v частиц затравочного материала (1 – $v = 40\%$; 2 – $v = 50\%$).

В то же время, поскольку рассчитанные значения диапазона температуры δT могут достигать $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. температура в вакуум-аппарате возрастает до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, это обстоятельство может привести к фазовому превращению гидратной глюкозы в ангидридную глюкозу, с соответствующим изменением ее физико-химических свойств.

В заключение следует отметить, что в проведенных исследованиях обоснована физико-математическая модель и показаны ее возможности в прогнозировании явления роста кристаллов глюкозы в данном растворе. Обоснованы условия кристаллизации глюкозы и предложен аналитический аппарат для расчета зависимости от времени массы глюкозы в ее уфельной массе в процессе кристаллизации. Кроме того, на основе разработанного аналитического аппарата проведено количественное моделирование данного процесса и дана оценка влияния воз-

растания температуры раствора с учетом теплоты кристаллообразования в глюкозном утфеле.

Список литературы

1. Семенов Е.В., Славянский А.А., Сергеева Е.А., Щитова Т.А. Особенности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы // Сахар. 2013. № 3. С. 46—50.
2. Славянский А.А. Специальная технология сахарного производства. СПб.: «Лань», 2020. 216 с.
3. Славянский А.А., Лукин Н.Д., Лебедева Н.Н. Промышленное производство крахмала и крахмалопродуктов. М.: «Инфра-М», 2022. 271 с.
4. Славянский А.А., Семенов Е.В., Лебедева Н.Н., Неделькин В.И., Егорова М.И. Математическое моделирование кинетики кристаллизации гидратной глюкозы // Сахар. 2014. № 5. С. 45—49.
5. Хворова Л.С. Виды кристаллической глюкозы для получения растворов и таблетированных форм // Фармация. 2020. Т. 69. № 5. С. 24—29.
6. Хворова Л.С. Вопросы кристаллизации пищевой гидратной глюкозы // Пищевая промышленность. 2018. № 12. С. 59—63.
7. Хворова Л.С. Кристаллизация как одна из важнейших (завершающих) стадий биотехнологии глюкозы // Актуальная биотехнология. 2020. № 3 (34). С. 239.
8. Хворова Л.С. Научно-практические основы получения кристаллической глюкозы. М.: Россельхозакадемия, 2013. 270 с.
9. Хворова Л.С. Современные технологии получения кристаллической глюкозы // Крахмал и его производные. 2023. № 1. С. 47—55.
10. Carneiro A., Rodríguez O., MacEdo E. Fructose and glucose dissolution in ionic liquids: Solubility and thermodynamic modeling // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2013. V. 52. № 9. P. 3424—3435.
11. Vogel K., Greinert T., Reichard M. Thermodynamics and kinetics of glycolytic reactions. Part I: Kinetic modeling based on irreversible thermodynamics and validation by calorimetry // International Journal of Molecular Sciences. 2020. № 21. P. 1—20.

Сведения об авторах

Славянский Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: a.slavyanskiy@mgutu.ru

Лебедева Наталья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: n.lebedeva@mgutm.ru

Лукин Николай Дмитриевич, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Всероссийского научно-исследовательского института крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья (филиала) Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха. E-mail: vniik@arrisp.ru

Information about the authors

Slavyanskiy Anatoliy Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies of Products from Vegetable Raw Materials, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. E-mail: a.slavyanskiy@mgutm.ru

Lebedeva Natalya Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of Products from Vegetable Raw Materials, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. E-mail: n.lebedeva@mgutm.ru

Lukin Nikolay Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Deputy director for research, All-Russian Research Institute of Starch and Processing of Starch-Containing Raw Materials (branch) of the Russian Potato Research Centre. E-mail: vniik@arrisp.ru