

Таким образом, в капиллярах, радиус которых не постоянен, или их поверхность имеет изменяющуюся вдоль канала шероховатость возможны появления нескольких решений в статическом положении мениска, что и является проявлением гистерезиса. Это в еще большей степени относится к различным трещинам, щелям и пористым средам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. - М.: Мир, 1979. - 568 с.
2. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. - М.: Химия, 1976. - 232 с.
3. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. - М. - Л.: ОГИЗ, 1947. - 552 с.

УДК 532.516

В.И. Елисеев, В.И. Луценко

ДИНАМИКА ПАРОВЫХ ПУЗЫРЕЙ И КРИСТАЛЛОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНОМ РАСТВОРЕ

Сформульована математична модель руху двокомпонентного і трьохфазного перегрітого середовища. На прикладі розчину цукрози у воді отримані залежності росту парових бульбашок і зміни радіусів кристалликів цукру по мірі руху розчину.

DYNAMICS OF BUBBLES OF VAPOUR AND CRYSTALS IN TWO- COMPONENTS SOLUTION

Mathematical model of movement of superheated environment two-components and three-phase are formulated. Dependences of growth of steam bubbles and changes of radiuses of crystals of sugar in process of movement of a solution are received by the example of a solution of sucrose in water.

Введение. В настоящее время вопросы тепломассообмена в многокомпонентных и многофазных системах приобретают большую актуальность в связи с развитием новых и усовершенствованием старых технологических процессов приготовления тех или иных продуктов пищевой, химико-технологической или металлургической продукции. В данной работе на основе общих законов тепло- и массообмена в многофазных системах рассмотрим некоторые основные закономерности динамики и роста паровых пузырьков и кристаллов в двухкомпонентном растворе сахарозы.

Постановка задачи и основные уравнения. Будем считать, что среда состоит из двух химически нейтральных компонентов: воды и сахарозы (раствор сахарозы) и трех фаз: жидкой (раствор), твердой (кристаллики сахара) и газообразной (пузырьки пара воды). Используя методологию работы [1], выпишем основные уравнения движения, теплообмена и массообмена, принимая во внимание, что между жидкой фазой и твердой, а также жидкой и газообразной существует обмен массовыми и тепловыми потоками

$$\frac{\partial(n_c u_c)}{\partial x} + \frac{\partial(r n_c v_c)}{r \partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(n_p u_p)}{\partial x} + \frac{\partial(r n_p v_p)}{r \partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_c \rho_c u_c)}{\partial x} + \frac{\partial(r \alpha_c \rho_c v_c)}{r \partial r} = n_c j_c, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p u_p)}{\partial x} + \frac{\partial(r \alpha_p \rho_p v_p)}{r \partial r} = n_p j_p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\alpha_r \rho_r u_r)}{\partial x} + \frac{\partial(r \alpha_r \rho_r v_r)}{r \partial r} = -(n_c j_c + n_p j_p), \quad (5)$$

$$\alpha_r \rho_r \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial(r \tau)}{r \partial r} + (n_c f_c + n_p f_p) + \quad (6)$$

$$+ n_c j_c (u_r - u_c) + n_p j_p (u_r - u_p) - \alpha_r \rho_r g$$

$$(\rho_r + 2\rho_c) \left(u_c \frac{\partial u_c}{\partial x} + v_c \frac{\partial u_c}{\partial r} \right) = 3\rho_r \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \quad (7)$$

$$+ \frac{3}{4} \rho_r c_{\mu c} \frac{|W_{rc}| W_{rc}}{r_c} + 3\rho_r \left(u_c \frac{\partial r_c}{r_c \partial x} + v_c \frac{\partial r_c}{r_c \partial r} \right) W_{rc} - 2g(\rho_c - \rho_r)$$

$$(\rho_r + 2\rho_p) \left(u_p \frac{\partial u_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial u_p}{\partial r} \right) = 3\rho_r \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \quad (8)$$

$$+ \frac{3}{4} \rho_r c_{\mu p} \frac{|W_{rp}| W_{rp}}{r_p} + 3\rho_r \left(u_p \frac{\partial r_p}{r_p \partial x} + v_p \frac{\partial r_p}{r_p \partial r} \right) W_{rp} - 2g(\rho_p - \rho_r)$$

$$\alpha_r \rho_r \left(u_r \frac{\partial c_w}{\partial x} + v_r \frac{\partial c_w}{\partial r} \right) = \rho_r \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \alpha_r D_r \frac{\partial c_w}{\partial r} \right) - \quad (9)$$

$$- n_c j_c (c_{wca} - c_w) - n_p j_p (c_{wpa} - c_w) - n_c g_{wca} - n_p g_{wpa}$$

$$\alpha_r \rho_r \left(u_r \frac{\partial c_s}{\partial x} + v_r \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) = \rho_r \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \alpha_r D_r \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) - \quad (10)$$

$$- n_c j_c (c_{sca} - c_s) - n_p j_p (c_{spa} - c_s) - n_c g_{sca} - n_p g_{spa}$$

$$\alpha_r \rho_r \left(u_r \frac{\partial h_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial h_r}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{r \partial r} r \alpha_r \left(\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial r} + D_r \sum_i h_i \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) - \quad (11)$$

$$- n_c \left[q_{ca} + \sum_i h_{ica} g_{jca} + j_c (h_{rca} - h_r) \right] - n_p \left[q_{pa} + \sum_i h_{ipa} g_{jpa} + j_p (h_{rpa} - h_r) \right]$$

где x, r – система координат; n_j – концентрация гетерогенной фазы; u_j, v_j – компоненты скоростей, соответствующие x, r (индекс $j = r$ – раствор, $j = c$ – кристалл, $j = p$ – пузырь); ρ_j – плотность; r_j – радиус гетерогенной фазы; α_j – объемные

доли жидкости, кристаллов и пузырьков; j_j – массовые потоки на границе гетерогенных фаз; p_r – давление в растворе; $W_{rc} = u_r u_c$; $W_{rp} = u_r u_p$; $\tau = \mu_r (\partial u / \partial r)$ – напряжение трения в растворе; c_i – компоненты раствора ($i = w$ – вода, $i = s$ – сахара); h_r, h_{rcs}, h_{rpa} – энтальпии гомогенной смеси соответственно в объеме и на поверхностях гетерогенных включений; T_r – температура раствора; g_{ija} – диффузионный поток i -го компонента на поверхности j -ой гетерогенной фазы; q_{ja} – тепловой поток на поверхности j -ой гетерогенной фазы; μ_r – эффективная вязкость раствора; λ_r – эффективный коэффициент теплопроводности раствора; D_r – эффективный коэффициент диффузии раствора. В системе (1) – (11) первые два уравнения определяют сохранение количества кристалликов и пузырьков в единице объема среды; три следующих – сохранение масс твердой, газовой и жидкой фаз; уравнения (6), (7), (8) являются уравнениями движения раствора и, соответственно, кристалликов и пузырьков; уравнения (9), (10) описывают диффузию компонентов в растворе, и, наконец, последнее уравнение является уравнением теплообмена в растворе.

Выписанная система уравнений представляет большие трудности для ее решения, несмотря на значительные успехи численных методов. Кроме того, сложность физических свойств рассматриваемых сред не допускает в настоящее время получения четких адекватных зависимостей, поэтому для выяснения основных закономерностей есть смысл в рассмотрении упрощенных постановок. Примем, что течение рассматриваемой среды происходит в трубе в адиабатических условиях и без подвода или отвода фаз и компонентов раствора. Если теперь проинтегрировать выписанные уравнения по поперечной координате в предположении, что все параметры течения не зависят от поперечной координаты, то получим следующую систему одномерных уравнений

$$u_c \frac{dn_c}{dx} = - \frac{du_c}{dx} n_c, \quad (12)$$

$$u_p \frac{dn_p}{dx} = - \frac{du_p}{dx} n_p, \quad (13)$$

$$j_c = \frac{4}{3} \pi u_c \frac{dM_c}{dx}, \quad M_c = \rho_c r_c^3, \quad (14)$$

$$j_p = \frac{4}{3} \pi u_p \frac{dM_p}{dx}, \quad M_p = \rho_p r_p^3, \quad (15)$$

$$\rho_r \alpha_r \frac{du_r}{dx} = - \rho_r u_r \frac{d\alpha_r}{dx} - n_c j_c - n_p j_p, \quad (16)$$

$$\alpha_c = \frac{4}{3} \pi r_c^3 n_c, \quad \alpha_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 n_p, \quad \alpha_r = 1 - \alpha_c - \alpha_p, \quad (17)$$

$$(\rho_r + 2\rho_c)u_c \frac{du_c}{dx} = 3\rho_r u_r \frac{du_r}{dx} + \frac{3}{4}\rho_r c_{\mu c} \frac{|W_{rc}|}{r_r} W_{rc} +$$

$$+ 3\rho_r u_r \frac{dr_c}{r_c dx} W_{rc} - 2(\rho_c - \rho_r)$$

$$(\rho_r + 2\rho_p)u_p \frac{du_p}{dx} = 3\rho_r u_r \frac{du_r}{dx} + \frac{3}{4}\rho_r c_{\mu p} \frac{|W_{rp}|}{r_p} W_{rp} +$$

$$+ 3\rho_r u_r \frac{dr_p}{r_p dx} W_{rp} - 2(\rho_p - \rho_r)$$

$$\alpha_r \rho_r u_r \frac{du_r}{dx} + \alpha_c \rho_c u_c \frac{du_c}{dx} + \alpha_p \rho_p u_p \frac{du_p}{dx} = -\frac{dp_r}{dx} +$$

$$+ n_c j_c W_{rc} + n_p j_p W_{rp} + 2 \frac{\tau_T}{R_T} - (\alpha_r \rho_r + \alpha_c \rho_c + \alpha_p \rho_p) g$$

$$\alpha_r \rho_r u_r \frac{dc_w}{dx} = -n_c j_c (c_{wca} - c_w) - n_p j_p (c_{wpa} - c_w) - n_c g_{wca} - n_p g_{wpa}, \quad (21)$$

$$\alpha_r \rho_r u_r \frac{dc_s}{dx} = -n_c j_c (c_{sca} - c_s) - n_p j_p (c_{spa} - c_s) - n_c g_{sca} - n_p g_{spa}, \quad (22)$$

$$\alpha_r \rho_r u_r c_r^* \frac{dT_r}{dx} = -n_c j_c c_r^* (T_{ca} - T_r) - n_p j_p c_r^* (T_{pa} - T_r) -$$

$$- n_c [q_{ca} + j_c c_r^* (T_{ca} - T_r)] - n_p [q_{pa} + j_p c_r^* (T_{pa} - T_r)] - 2 \frac{q_T}{R_T}$$

где в отличии от предыдущей системы выписанные параметры являются осредненными по площади поперечного сечения канала параметрами, а τ_T – напряжение трения на стенке трубы; q_T – тепловой поток от стенки; R_T – радиус трубы; c_r^* – коэффициент теплоемкости раствора; c_{wca} , c_{wpa} – концентрации воды на поверхностях кристаллика и пузырька; c_{sca} , c_{spa} – концентрации сахарозы на соответствующих поверхностях; T_r – температура раствора в объеме, T_{ca} – температура кристаллизации, T_{pa} – температура кипения. При получении системы (12) – (23) в уравнении теплопроводности были сделаны некоторые упрощения – был отброшен диффузионный перенос энергии, и коэффициент теплоемкости был принят независимым от координат. К выписанной системе необходимо добавить уравнения движения поверхностей пузырька и кристалла [1], а также уравнения сохранения масс рассматриваемых фаз и температур [2]

$$u_c \frac{dr_c}{dx} = \frac{u_c}{3\rho_r r_c^2} \frac{dM_c}{dx}, \quad (24)$$

$$(1-\varphi_{11})r_p u_p \frac{dw_a}{dx} = \Phi, \quad (25)$$

$$u_p \frac{dr_p}{dx} = w_a + \frac{u_p}{3\rho_r r_p^2} \frac{dM_p}{dx}, \quad (26)$$

$$c_c u_c \frac{dT_c}{dx} = -15\lambda_c \frac{r_c}{M_c} \left(1 - \frac{c_c}{15\lambda_c r_c} u_c \frac{dM_c}{dx} \right) (T_c - T_{ca}), \quad (27)$$

$$\begin{aligned} (c_p - R)u_p \frac{dT_p}{dx} = RT_p u_p \left(\frac{dM_p}{M_p dx} - 3 \frac{dr_p}{r_p dx} \right) - \\ - 15\lambda_p \frac{r_p}{M_p} \left(1 - \frac{c_p}{15\lambda_p r_p} u_p \frac{dM_p}{dx} \right) (T_p - T_{pa}) \end{aligned} \quad (28)$$

где $\Phi = \frac{p_p - p_r - 2\sigma/r_p}{\rho_r} - 4 \frac{\mu_r}{\rho_r} \frac{w_p}{r_p} - (1-\varphi_2) \frac{3}{2} w_p^2 + \frac{1}{4} (1-\varphi_3) W_{rp}^2$; p_p — давление в

пузырьке; w_p — скорость поверхности пузыря; R — газовая постоянная пара; c_c , c_p — коэффициенты теплоемкостей пара и кристаллика соответственно; λ_c , λ_p — коэффициенты теплопроводности пара и кристаллика; φ_i — коэффициенты из [1]; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Наконец, для замыкания выписанной системы уравнений необходимо записать граничные условия на границах гетерогенных сред, которые имеют следующий вид

$$u_c \frac{dM_c}{dx} = -3r_c^2 \frac{g_{sca}}{1 - c_{sca}}, \quad (29)$$

$$u_p \frac{dM_p}{dx} = -3r_p^2 \frac{g_{wpa}}{1 - c_{wpa}}, \quad (30)$$

$$u_c \frac{dM_c}{3r_c^2 dx} \Delta H_s = (q_{ca}^+ - q_{ca}^-), \quad (31)$$

$$u_p \frac{dM_p}{3r_p^2 dx} \Delta H_p = (q_{pa}^+ - q_{pa}^-); \quad (32)$$

где ΔH_s — теплота растворения сахарозы; ΔH_p — теплота парообразования; $q_{ca}^- = 5\lambda_p(T_c - T_{ca}/r_c)$, $q_{pa}^- = 5\lambda_p(T_p - T_{pa}/r_p)$ — внутренние потоки тепла [2]; при этом внешние потоки массы и тепла могут быть представлены в виде $g_{ija} = \alpha_{mi}(c_{ij,i} - c_{ij})$, $q_{ja}^+ = \alpha_{Ti}(T_{ia} - T)$, $\alpha_{mi} = D_i Nu_{mi}/2r_i$, $\alpha_{Ti} = \lambda_i Nu_{Ti}/2r_i$ — коэффициенты массо- и теплопередачи ($D_w = D_s = D_r$). Числа Нуссельта примем следующими:

для кристалликов [3]

$$Nu_{mc} = 2 + 1.28(Re_c \cdot Sc_r)^{1/3}, \quad Nu_{Tc} = 2 + 1.28(Re_c \cdot Pr_r)^{1/3}, \quad (33)$$

$$Sc_r = \frac{\mu_r}{\rho_r D_r}, \quad Pr_r = \frac{\mu_r c_r^*}{\lambda_r}, \quad Re_c = \frac{2r_c \rho_r |u_r - u_c|}{\mu_r},$$

для пузырьков [1]

$$Nu_{mp} = 2 + 0.6 Re_p^{0.55} Sc_r^{1/3}, \quad Nu_{Tp} = 2 + 0.6 Re_p^{0.55} Pr_r^{1/3}, \quad (34)$$

$$Re_p = \frac{2r_p \rho_r |u_r - u_p|}{\mu_r}.$$

Наконец, вся выписанная система уравнений должна быть дополнена формулами, характеризующими физические свойства раствора. Их можно найти в [4-6], кроме того, в [7] приведены необходимые зависимости, взятые из этих работ.

Обсуждение результатов. Для проведения расчетов в начальном сечении задавались величины скоростей фаз и температур, а также начальные значения концентраций кристалликов и пузырьков. При этом было принято еще одно предположение о том, что центрами кипения и центрами кристаллизации являются соответственно пузырьки и кристаллики в начальном сечении трубы. Результаты расчетов показаны на рисунках 1-6. На рисунках 1-3 показаны кривые изменения температур $\Delta T = T_r - T_{po}$ (рис. а) и кривые изменения концентрации сахарозы в растворе $\Delta c = c_s - c_{s0}$ (рис. б) по мере движения среды в трубе.

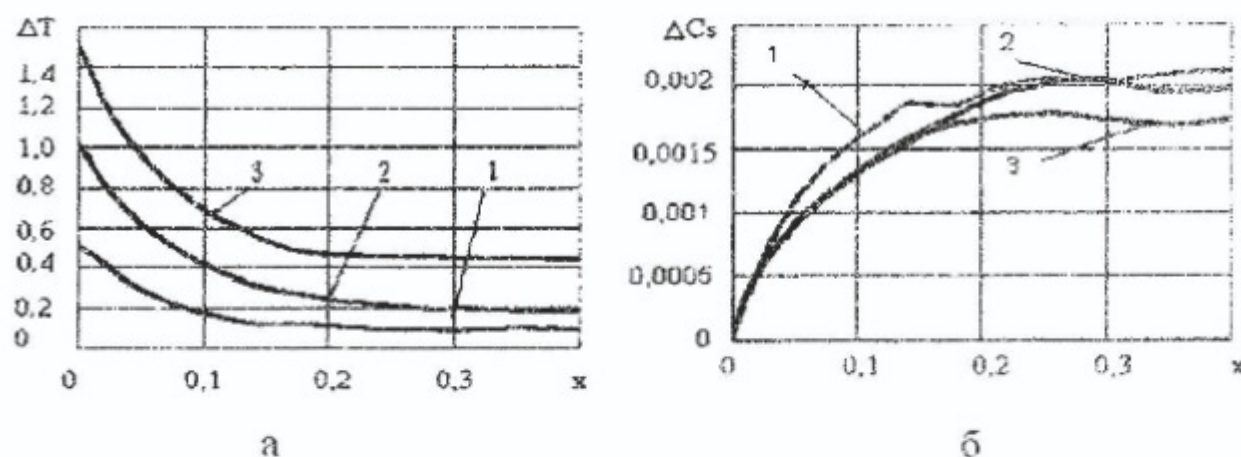
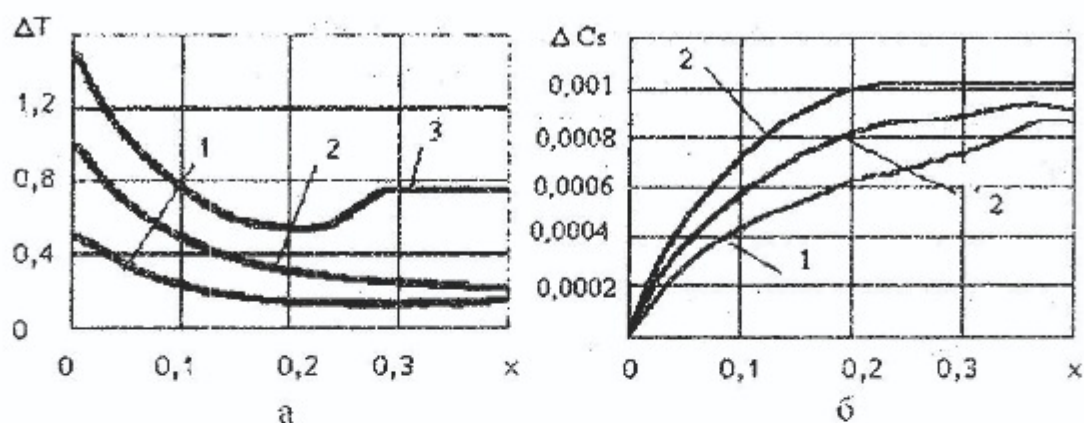


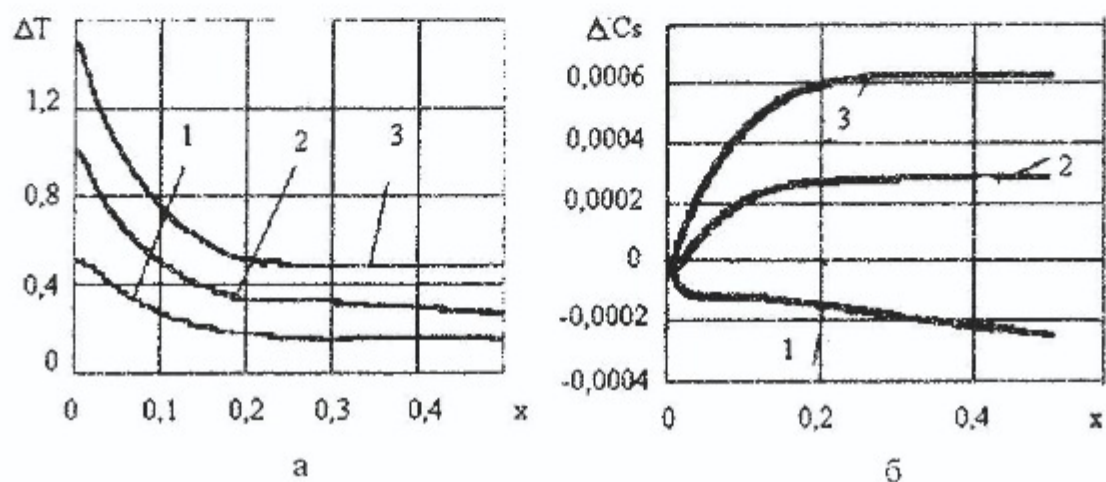
Рис. 1 – Изменение температур (а) и концентраций (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($\sigma = 0.6$): 1 – $\theta = 0.5$; 2 – 1.0; 3 – 1.5

На рис. 4-6 приведены кривые $\bar{r}_p = r_p/r_{p0}$ (серия а) и кривые $\delta = r/r_{c0} - 1$ (серия б), полученные при соответствующих условиях, показанные в подрисуночных подписях. Расчеты были проделаны для начальных концентраций сахарозы $c_{s0} = 0.6$; 0.8 и 0.92 и для начальных перегревов растворов $\Delta T = 0.5$; 1.0 и 1.5 градуса.



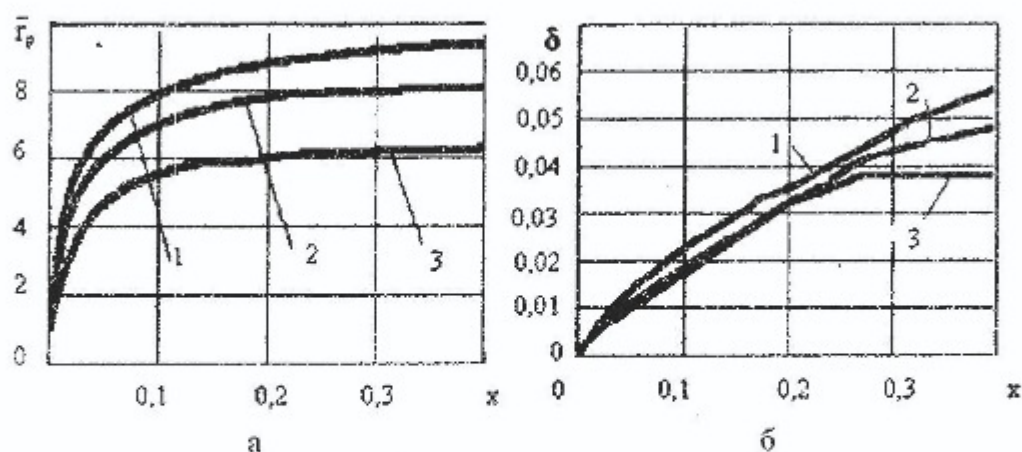
1 - $\Delta T_0 = 0.5$; 2 - 1.0; 3 - 1.5

Рис. 2 - Изменение температур (а) и концентраций (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($c_{s0} = 0.8$)



1 - $\Delta T_0 = 0.5$; 2 - 1.0; 3 - 1.5

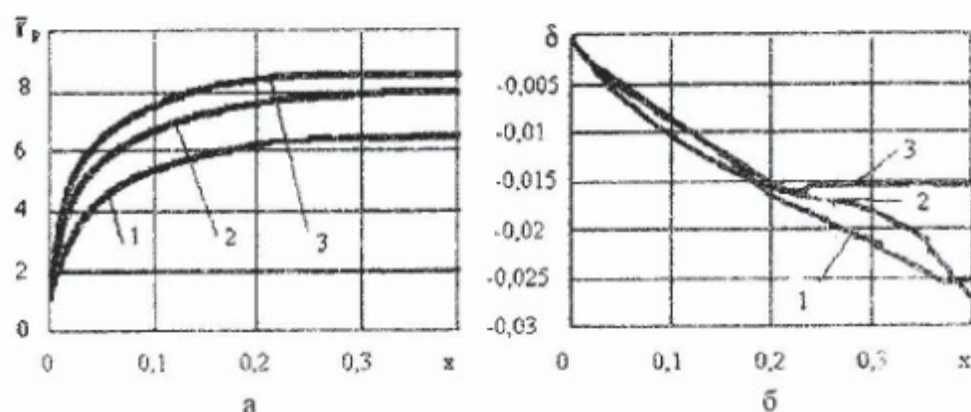
Рис. 3 - Изменение температур (а) и концентраций (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($c_{s0} = 0.92$)



1 - $\Delta T_0 = 0.5$; 2 - 1.0; 3 - 1.5

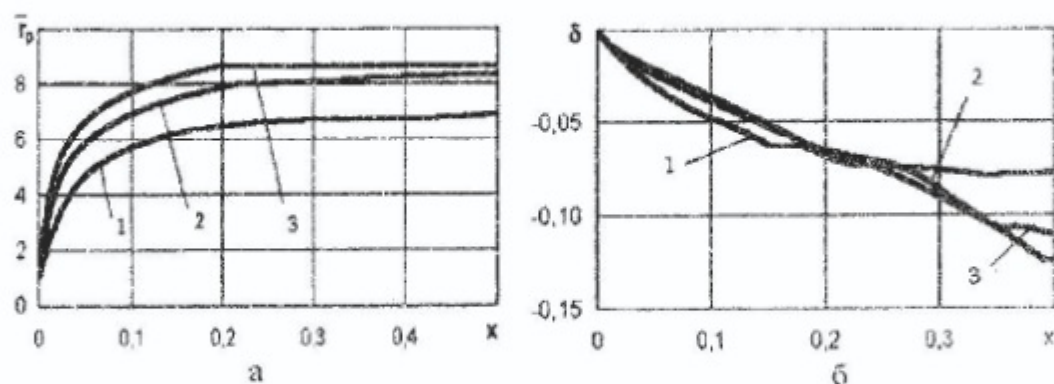
Рис. 4 - Изменение размеров паровых пузырей (а) и кристалликов сахара (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($c_{s0} = 0.6$)

Из рис. 1 и 4 следует, что для начальной концентрации сахарозы, равной 0.6 перегрев раствора приводит к растворению кристалликов сахара. При этом величина перегрева постепенно уменьшается, концентрация раствора повышается, радиусы пузырей возрастают и достигают некоторых предельных величин, обусловленных начальной величиной перегрева. С увеличением начального перегрева идет более интенсивный рост пузырей и более интенсивное растворение кристалликов. Для более высокой начальной концентрации сахарозы ($c_{s0}=0.8$) процесс массообмена проходит в том же направлении, т.е. величина перегрева уменьшается, концентрация сахарозы в растворе растет, но значительно слабее, происходит растворение сахара, но с меньшей скоростью. Наконец, при очень высокой концентрации раствора ($c_{s0}=0.92$), как следует из рис. 3 и 6 вместе с кипением происходит процесс кристаллизации. При небольшом начальном перегреве ($\Delta T = 0.5$) кристаллизация проходит сравнительно интенсивно, так что при этом концентрация раствора уменьшается. С ростом начального перегрева кристаллизация замедляется, в результате чего концентрация раствора увеличивается.



1 — $\Delta T_0 = 0.5$; 2 — 1.0; 3 — 1.5

Рис. 5 — Изменение размеров паровых пузырей (а) и кристалликов сахара (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($c_{s0} = 0.8$)



1 — $\Delta T_0 = 0.5$; 2 — 1.0; 3 — 1.5

Рис. 6 — Изменение размеров паровых пузырей (а) и кристалликов сахара (б) в растворе при адиабатическом движении раствора сахарозы ($c_{s0} = 0.92$)

Выводы. Таким образом, в данной работе на основе теории гетерогенных сред проанализировано поведение трехфазной двухкомпонентной системы. На примере раствора сахарозы в воде показано влияние начальных перегревов раствора и начальной концентрации на процессы кипения, растворения и кристаллизации сахара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. - М.: Наука, 1987. - 464 с.
2. Елисеев В.И. Тепломассообмен в пузырьке, движущемся в многокомпонентном растворе // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Механіка. 2003. - Вип. 7. - Т. 1. - С. 20-25.
3. Веригин А.Н., Щуцкая И.А., Михалев М.Ф. Кристаллизация в дисперсных системах: инженерные методы расчета. - Л.: Химия, 1986. - 248с.
4. Попов В.Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахара. - М.: Пищ. пром., 1973. - 320 с.
5. Зубченко А.В. Новое в кинетике кристаллизации сахара. - М.: Пищ. пром., 1973. - 160 с.
6. Гулый И.С. Непрерывная варка и кристаллизация сахара. - М.: Пищ. пром., 1976. - 270с.

УДК 622.235.5: 622.271.3

А.И. Чайковский

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫПУСКА ГРАНУЛИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ БУНКЕРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПОКАЗАТЕЛЯ СЫПУЧЕСТИ

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу самоплину вибухових речовин під силою ваги із ємкості і встановленні їх показники сипкості.

RESEARCH OF PROCESS OF RELEASE GRANULE EXPLOSIVE SUBSTANCES FROM THE BUNKER AND EXPERIMENTAL DEFINITION OF THEIR PARAMETER LOOSENESS

The results theoretical and experimental researches of process of gravitational release of explosive substances from capacity are given and their parameters looseness are determined

Управление процессом гравитационного выпуска взрывчатых веществ из бункеров погрузочных устройств на базисных или расходных складах взрывчатых материалов и транспортно – смесительно-зарядных машин должно производиться с учетом формы расходной характеристики истечения. Знание формы расходной характеристики значительно облегчает задачу регулирования и стабилизации производительности выпуска и управление процессом дозирования взрывчатых материалов.

Расход сыпучих материалов через выпускное отверстие бункера может быть определен по формулам приведенным в табл. 1.

Отсутствие данных и большой объемом экспериментальных исследований по определению значений физико-механических характеристик, входящих в формулы, не позволяют их применить для расчета параметров истечения гранулированных ВВ.