

химических превращениях. М.: Издательство МЭИ, 88 – 91 с.

4. *Г.А. Горбенко, П.Г. Гакал.* Математическое и физическое моделирование сложных тепло-энергетических систем // Удосконалення турбоустановок методами мат. і фіз. моделювання: Сб. наук. праць. Харків, ІПМаш НАН України, 2000. с. 69 – 75.

5. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат. 1979, 416 с.

6. *В. А. Бесикерский, Е. П. Попов* Теория автоматического регулирования. М., Наука, 1972, 768 с.

Получено 27.08.2005 г.

УДК 532.516

БОНДАРЕНКО С.Г.², ЕЛИСЕЕВ В.И.², ЛУЦЕНКО В.И.¹

¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

²*Днепропетровский национальный университет*

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Запропоновано та випробувано в промислових умовах спосіб підвищення ефективності процесів у вакуум-апараті для кристалізації цукру. На прикладі наближеної математичної моделі показано, що періодичні зміни зовнішнього тиску приводять до виникнення додаткового коливального руху шарів розчину, що повинно впливати на інтенсифікацію тепло-масообміну у кристалізаторі.

Предложен и опробован в промышленных условиях способ повышения эффективности процессов в вакуум-аппарате для кристаллизации сахара. На примере приближенной математической модели показано, что периодические изменения внешнего давления приводят к возникновению дополнительного колебательного движения слоев раствора, что должно оказывать интенсифицирующее воздействие на теплообмен в кристаллизаторе.

The way of increase of efficiency of processes in the vacuum - device for crystallization of sugar has been offered and tested in industrial conditions. By the example of the approached mathematical model it is shown, that periodic changes of external pressure result in occurrence of additional oscillatory movement of layers of a solution that should render intensifying influence on heat and mass transfer in a crystallizer.

A – амплитуда;

c_{μ} – коэффициент сопротивления;

D – диаметр канала;

H – теплота парообразования, высота слоя;

N – количество каналов;

p – давление;

p_a – атмосферное давление;

r – радиус;

S – площадь поперечного канала;

$S^I = \pi D^2 / 4$,

$S^{II} = \pi N D^2 / 4$

t – время;

u – скорость;

x – координата;

q – плотность теплового потока;

α – объемная доля компонента, коэффициент теплоотдачи;

ρ – плотность;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

τ – напряжение трения;

θ – угол смачивания ($3^\circ < \theta < 125^\circ$);

ω – круговая частота;

γ – показатель адиабаты.

Индексы

c – кристаллический сахар;

p – пар;

r – раствор;

rc – конечный радиус;

ωr – радиус отрыва;

S – насыщение;

0 – параметры при $x=0$;

H – параметры на поверхности слоя;

I – центральный (жидкостной) канал;

II – каналы с паровой фазой.

Введение

Производство сахара – это сложный физико-химический процесс переработки сахарного сырья (свеклы или тростника), требующий больших энергетических затрат. Среди наиболее энергоемких стадий этого общего процесса выделяются процессы уваривания сиропа и кристаллизации сахара. Существующие в сахарном производстве методы интенсификации процессов с фазовыми превращениями в пересыщенных растворах уже практически исчерпали себя.

Из литературных источников, например [1, 2], известно, что колебания жидкости интенсифицируют тепломассообменные процессы, что подталкивает исследователей и инженеров к разработке различных способов организации колебательного движения в промышленных аппаратах. При этом для получения определенных режимов движения сред в производственных условиях необходимо соблюдать целый ряд условий. Дополнительные устройства должны обладать простыми принципами работы и достаточно просто подсоединяться к основному аппарату. Примером такого устройства может служить разработанный авторами специальный активатор, который создает изменение давления над поверхностью кипящего и кристаллизующегося раствора сахарозы. Использование его на ОАО “Губинский сахарный завод” показало реальную возможность воздействия на исследуемый процесс варки сахара.

Описание установки и принципа действия

Подвод внешней энергии к многофазной среде внутри вакуум-аппарата (густой сироп, кристаллы сахара, паровая фаза) является перспективным методом интенсификации процесса. В промышленных условиях был реализован наиболее простой и эффективный, на наш взгляд, способ подвода дополнительной энергии во внутрь аппарата – это наложение низкочастотных колебаний на многофазную среду по магистрали вакуумирования аппарата (рис. 1). Внутри вакуумной магистрали 7 (внутренний диаметр 1000 мм), которая соединяет вакуум-аппарат с водно-коль-

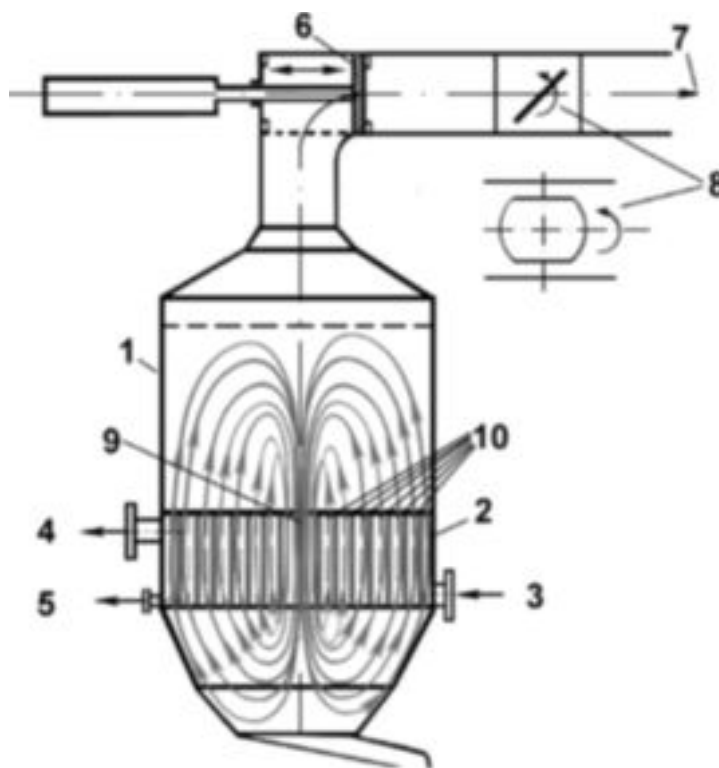


Рис. 1. Конструктивная схема установки:
 1 – вакуум-аппарат, 2 – трубочатая паровая камера, 3 – вход перегретого пара, 4 – выход отдавшего тепло пара, 5 – выход конденсата, 6 – отсечной клапан, 7 – вакуумная магистраль, соединяющая вакуум-аппарат с водно-кольцевым насосом, 8 – виброакустический активатор, 9 – центральный канал, 10 – теплообменные каналы.

цевым насосом, за отсечным клапаном был установлен виброакустический активатор 8. Он представляет собой металлический вал с двумя большими лопатками в виде полукругов в одной плоскости со срезанной с двух сторон хордой. Размеры и конфигурация лопаток определялись расчетным путем с учетом геометрических размеров и расходных характеристик вакуумной магистрали. Вал активатора через приспособление, которое передает его вращение, соединен с электродвигателем постоянного тока. Электронным блоком управления можно менять нагрузку на двигателе и этим изменять количество оборотов самого активатора.

Колебания откачиваемого из вакуум-аппарата парогазового потока будут распространяться в середину аппарата по всей массе утфеля. Внешняя энергия колебаний, которая подводится к ут-

фелю равномерно или по заранее заданному закону распределяется как вдоль, так и поперек массы увариваемого утфеля, который находится в аппарате, с разной степенью затухания. Вибродатчики, установленные в нескольких точках аппарата, зарегистрировали этот факт. Именно это влияет нужным образом на поле скоростей взаимодействующих фаз, интенсифицирует рост кристаллов сахара за счет омывания их все новыми порциями пересыщенного сиропа. Активатор включается в работу после наполнения вакуум-аппарата сиропом, и на всех стадиях работы аппарата (сгущение сиропа, кристаллообразование, подкачки раствора, рост кристаллов и уваривание утфеля) подбирались оптимальная частота колебания среды. При максимальной амплитуде частота изменялась от 12 до 27 Гц. В процессе испытаний виброакустического активатора на одном из трех вакуум-аппаратов контролировались исходные параметры сиропа (плотность и доброкачественность) и теплоэнергоносителя (давление и температура нагреваемого пара), начальный уровень разрежения в вакуум-аппарате, начальный уровень заправки сиропа и уровень утфеля перед выгрузкой. Испытания показали, что при равных исходных условиях данный способ интенсификации процесса кристаллизации уменьшает общее время работы вакуум-аппарата емкостью 80 т утфеля не менее, чем на 30 минут. Это, в свою очередь, существенно способствует уменьшению общих энергозатрат в сахарной промышленности за счет уменьшения топливных потерь.

Для более глубокого понимания происходящих в кристаллизаторе процессов и эффективного управления ими, на базе физической модели и ранее проведенных модельных экспериментальных исследований [2], была разработана приближенная математическая модель, изложенная ниже.

Математическая модель колебаний раствора в аппарате

Создание математической модели рассматриваемого процесса представляет значительные сложности. Однако важной стороной математического описания является получение некоторых модельных представлений о тех составляющих

элементах, которые определяют процесс в целом. В частности, таким важным элементом является колебание среды в аппарате. В [3] теоретически было показано, что для вязкой кипящей жидкости изменение давления газа над поверхностью кипящего слоя приводит к возникновению его колебаний в аппарате. В данной работе рассмотрим этот же вопрос применительно к сахарным растворам, т.е. рассмотрим задачу организации колебаний высоковязкой жидкости, свойства которой близки к свойствам сахарных растворов и утфелей. В точной постановке эта задача не поддается решению, т.к. в нее входят много различных параметров, определение которых возможно только приближенными методами, и сами их значения имеют значительный разброс. Поэтому рассмотрим ее в приближенной постановке, т.к. нам важно определить качественные зависимости, характеризующие процесс колебаний высоковязкой двухфазной среды в аппарате. Примем ту же схему течения, что и в [3], при этом, принимая во внимание схему кристаллизатора, будем считать, что центральный канал, в котором раствор или утфель не кипит и не имеет паровой фазы, один; а теплообменных каналов, в которых происходит кипение, несколько, но все они сообщаются друг с другом.

Используя одномерные нестационарные модели течения, запишем основные уравнения движения для осредненных по площади поперечного сечения параметров:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{dp}{dx} - \rho g - \pi \frac{D}{S} \tau, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Проинтегрируем эти уравнения по x от 0 до верхней границы H , тогда для областей I и II будем иметь уравнения, которые после некоторых преобразований примут вид

$$\rho^{II} \left(H^{II} + \frac{S^{II}}{S^I} H^I \right) \frac{d^2 H^{II}}{dt^2} + 2 \frac{d\rho^{II}}{dt} \frac{S^{II}}{S^I} H^I \frac{dH^{II}}{dt} - \\ - \left[\frac{1}{\rho^{II}} \left(\frac{d\rho^{II}}{dt} \right)^2 H^{II} - \frac{d^2 \rho^{II}}{dt^2} \left(\frac{1}{2} H^{II} + \right. \right.$$

$$+ \frac{S^{II}}{S^I} H^I \left. \right] H^{II} + g(\rho^{II} H^{II} - \rho^I H^I) +$$

$$+ \pi \left(\frac{D^{II}}{S^{II}} \tau^{II} H^{II} - \frac{D^I}{S^I} \tau^I H^I \right) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dH^I}{dt} = - \frac{S^{II}}{\rho^I S^I} \left(\rho^{II} \frac{dH^{II}}{dt} + \frac{d\rho^{II}}{dt} H^{II} \right). \quad (3)$$

При получении выражений (2), (3) было положено, что $u^I = u_H^I = u_0^I$ и $p_H^I = p_H^{II} = p_H$, $u_H^{II} = dH^{II}/dt$, $u^{II} = 1/2(u_0^{II} + u_H^{II})$. В выражениях (2), (3) верхний индекс указывает на канал, индекс "0" на параметры при $x = 0$, индекс "H" – на параметры на поверхности жидкости. При этом было принято, что при $x = 0$ выполняется условие сохранения массы

$$\rho^I u_0^I S^I = -\rho^{II} u_0^{II} S^{II}. \quad (4)$$

Плотности ρ^I и ρ^{II} выразим через параметры основных компонентов среды $\rho^I = \alpha_c \rho_c + (1 - \alpha_c) \rho_r$, $\rho^{II} = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) [\alpha_c \rho_c + (1 - \alpha_c) \rho_r]$, при этом объемные доли частиц и пузырьков определяются через их концентрации (n_c, n_p) и соответственно радиусы (r_c, r_p): $\alpha_c = 4/3\pi n_c r_c^3$, $\alpha_p = 4/3\pi n_p r_p^3$.

Теперь для замыкания задачи необходимо рассмотреть вопросы тепломассообмена в растворе. Однако это достаточно сложная проблема, которая требует самостоятельного рассмотрения, поэтому примем ряд серьезных предположений, которые значительно упрощают рассматриваемую задачу. Так как кристаллик находится в квазиравновесном состоянии (параметры раствора изменяется медленно) и его радиус очень слабо меняется со временем, примем, что r_c за время колебаний остается постоянным. Кроме того, положим, что n_c также не меняется со временем. Если далее принять, что плотность пузырьков в слое постоянна, т.е. уходящее количество пузырьков компенсируется вновь образующимися при кипении (здесь мы не рассматриваем влияние колебаний на кипение), а масса пузырька не

меняется со временем (газовый пузырь), то получим уравнение для определения α_p

$$\frac{d\alpha_p}{dt} = 3\alpha_p \frac{dr_p}{r_p dt}. \quad (5)$$

Положим теперь величину давления в пузырьке в виде

$$p_p = p_H + 2 \frac{\sigma}{r_p}, \quad (6)$$

где $p_H = p_a(1 + A \sin(2\pi\omega t))$. Т.к. колебательный процесс происходит около некоторого среднего значения радиуса пузырька, примем, что в целом за время одного колебания полный тепловой поток и соответственно и массовый поток на поверхности пузырька равны нулю, т.е. $M_p = Const$. Тогда можно принять, что плотность адиабатически связана с давлением

$$p_p = C \rho_p^\gamma. \quad (7)$$

Объединяя (6) и (7), будем иметь выражение для плотности пузырька через внешнее давление над поверхностью раствора

$$\rho_p = \left(\frac{p_H}{C} \right)^{1/\gamma} \left(1 + 2 \frac{\sigma \rho_p^{1/\gamma}}{p_H M_p^{1/3}} \right)^{1/\gamma}. \quad (8)$$

Теперь необходимо определить средний по высоте радиус пузырька. Примем, что он может быть представлен как $r_p = \frac{1}{2}(r_{otr} + r_{pc})$, где радиус отрыва r_{otr} определяется по формуле [4]

$$r_{otr} = 0,0104\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho^{II} - \rho_p)}}. \quad (9)$$

Для нахождения среднего радиуса пузырька необходимо рассмотреть движение пузырька и его рост в перегретой жидкости. Принимая, что пузырек поднимается равновесно, будем иметь упрощенное уравнение вида, полученное из более общей системы в работе [5]

$$\frac{1}{2} \frac{n_p}{\alpha_p} \pi \rho^{II} c_\mu r_p^2 u_p^2 = g(\rho^{II} - \rho_p). \quad (10)$$

Изменение массы пузырька можно оценить из условия, что вся теплота, которая поступает к нему из раствора, идет на парообразование, тогда

$$\rho_{ps} H \frac{dr_p}{dt} = -\alpha(T_s - T_r) \quad (11)$$

Плотность на поверхности пузырька определяется из уравнения состояния

$$\rho_{ps} = \frac{P_p}{R_p T_s} \quad (12)$$

Коэффициент сопротивления c_μ и коэффициент теплоотдачи α определяются из критериальных соотношений, взятых из [5].

Наконец, последним параметром, который должен быть определен, является объемная доля пузырьков в кипящей жидкости. Ее найдем из условия, что вся внешняя теплота, поступающая на кипение идет на парообразование, т.е.

$$q = \alpha_p \rho_p u_p H \quad (13)$$

Это равенство и является граничным условием для уравнения (5). Таким образом, рассматриваемая задача в довольно грубой постановке полностью сформулирована. К ней необходимо добавить теплофизические параметры утфеля, которые можно найти в [6-8]. В работе [9] приведены также необходимые зависимости и аппроксимации, относящиеся к теплофизическим параметрам раствора сахарозы.

Обсуждение результатов

Как видно из приведенных выражений, основные уравнения (2, 3) обладают характерными свойствами для описания колебательного движения системы. При линеаризации их можно получить собственные частоты рассматриваемой рабочей среды. Проведенные численные решения показали, что в системе возникают колебания, заключающиеся в подъеме и опускании уровней слоев, при этом характер движений зависит от частоты изменения давления в аппарате над поверхностью раствора. Кроме того, значительное влияние на само движение оказывают как объемная доля пузырей в кипящем слое, так и ширина кипящей зоны. В качестве примера на рис. 2 по-

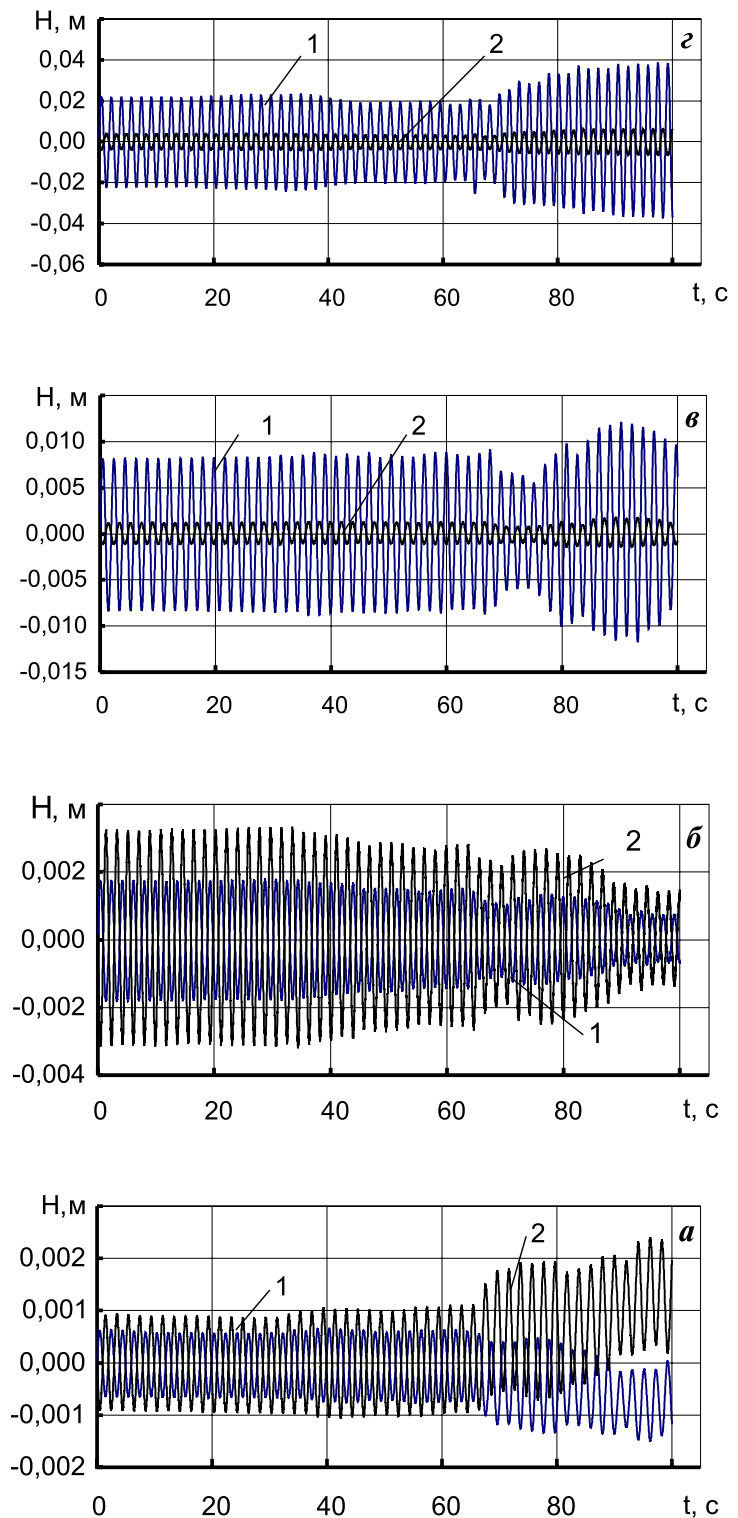


Рис. 2. Изменение высоты слоев по времени для частоты 10 Гц.

1 – жидкостный слой; 2 – слой с паровыми пузырьками,

а – $N = 1, \alpha_p = 0,0923$; б – $1, 0,277$;

в – $10, 0,0923$; г – $10, 0,277$.

казаны кривые изменения высот слоев по времени $\Delta H^I = H^I - H_0^I$ и $\Delta H^{II} = H^{II} - H_0^{II}$ ($H_0^I = 1$ м, H_0^{II} – начальные значения высот слоев, находящихся в равновесии) для частоты 10 Гц и амплитуды 0,001. На рис. 2а и 2б показаны колебания слоев, когда число $N = 1$, а объемная доля пузырей составляет соответственно 0,0923 и 0,277; на рис. 2в и 2г такие же кривые при $N = 10$. На рисунке видны собственные колебания слоев. Из рисунка следует, что увеличение α_p приводит к увеличению амплитуды колебаний слоев, а изменение N – к перераспределению этих амплитуд. Так, из рис. 2б и 2г хорошо видно, что при $N = 1$ амплитуда второго слоя больше первого, а при $N = 10$ наблюдается обратное явление. Общим для рассмотренных вариантов является то, что собственные колебания практически начинаются сразу вместе с вынужденными, которых на рисунке не видно, т.к. амплитуды их значительно меньше, а частота выше. Кроме того, примерно до $t = 70$ с колебания можно считать регулярными, затем эта регулярность так или иначе постепенно нарушается. При частоте 10 Гц амплитуды колебаний небольшие, однако при 100 Гц они возрастают и соответственно нерегулярность начинается раньше. Расчеты показали, что с ростом частоты колебания приобретают явно нерегулярный характер с резким подъемом амплитуды. Таким образом, колебания внешнего давления приводят к появлению дополнительного движения слоев, которое должно оказывать интенсифицирующее влияние на теплообмен в аппарате. В реальных условиях картина течения значительно сложнее. В частности, реальные свойства паровых пузырьков, которые не учитываются в данной модели, должны значительно повлиять на характер движения, т.к. фазовый переход и перенос массы в пузырях, с одной стороны, в большой степени демпфируют колебания, а, с другой, сдвигают его по фазе. Однако, из рассмотренной модели видно, что колебательные движения возникают вследствие наличия пузырьков в растворе и их неоднородного распределения. Именно это и мо-

жет приводить к возникновению каких-то колебательных структурированных движений.

Вывод

Предложенный в настоящей работе способ интенсификации процессов кристаллизации сахара дает возможность заметно повысить эффективность сахарного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В.* Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.
2. *Присняков В.Ф. и др.* Теплообмен и вибрация. – Одесса: Нептун-Технология, 2001. – 208 с.
3. *Анфимова Н.П. и др.* К вопросу о возможности организации колебаний высоковязкой жидкости в сложных теплотехнических аппаратах / Проблемы высокотемпературной техники. Збірник наукових праць, Дніпропетровськ, ДНУ, с. 4–9.
4. *Герлига В.А., Скалозубов В.И.* Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992, 432 с.
5. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука, 1987, 464 с.
6. *Попов В.Д.* Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахара. – М.: Пищ. пром., 1973, 320 с.
7. *Зубченко А.В.* Новое в кинетике кристаллизации сахара. – М.: Пищ. пром., 1973, 160 с.
8. *Гулый И.С.* Непрерывная варка и кристаллизация сахара. – М.: Пищ. пром., 1976, 270 с.
9. *Анфимова Н.П., Елисеев В.И., Луценко В.И.* Теплообмен парового пузырька, движущегося в растворе сахарозы / Геотехнічна механіка. Міжвід. зб. наук. праць., ІГТМ, Дніпропетровськ, 2004, вип. 48, с. 279–285.

Получено 03.10.2005 г.