

стадию – в среде воздуха при температуре 660 К до достижения соотношения $C/SiO_2 = 3:1$. Вторую стадию – в среде аргона до температуры 1700К. Продолжительность термической обработки ППРШ при скорости нагрева образца 0,6 К/с составляет 3000 с.

Литература

1. Прянишников В.П. Химия кремнезема. – М.: Стройиздат, 1971. – 239 с.
2. Козьмина Е.П., Рис и его качество. – М.: Колос, 1976. – 352 с.
3. Пат. 88748 Україна, МПК С01В33/12. Спосіб одержання діоксиду кремнію із рисового лушпиння/ Сорока П.Г., Гриднєва Т.В. та ін.; заявник та патентовласник ДВНЗ «УДХТУ». - № а200813731; заяв. 28.11.08; опубл. 10.11.09, Бюл. №21
4. Физико-химические основы процесса получения карбида кремния из рисовой шелухи /А.А. Белая, П.И. Сорока, О.А. Тертышный // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2010. – № 10. – С. 78 – 85.
5. Получение ферритовых порошков в потоках высокотемпературных теплоносителей / [В.Д. Пархоменко, П.И. Сорока, Л.А. Голубков, П.В. Липатов]. – Киев: Наук. думка, 1988.-152 с.,
6. Horwitz H.H., Anal. Chem./ H.H. Horwitz, G. Metzger, 1963, v.35, №10, p.1464.
7. Jacob A., Jonson A. Yntrin sic reaction and self –diffusion kinetics for silicon carbide synthesis by rapid carbothermal // Journal American Ceramics Society. – 2002. – № 9. – P.2273-2280.

УДК 664.012.3:005.584.1

МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В АППАРАТАХ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Бурдо О.Г., Мордынский В.П., Харенко Д.А.
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

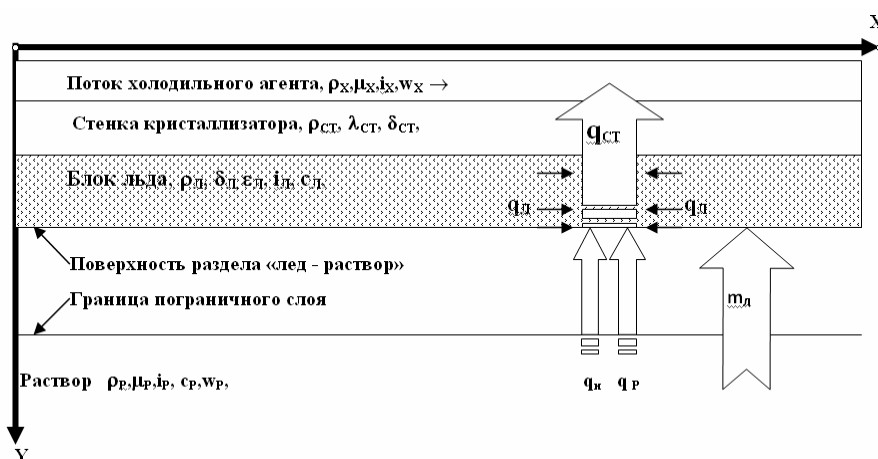
В работе рассмотрены проблемы моделирования сопряженных процессов гидродинамики и тепло-массопереноса в аппаратах блочного вымораживания. Учитываются волновые процессы перемешивания при работе механических низкочастотных и акустических высокочастотных генераторов. Введены: число Рейнольдса пульсационное, его критическое значение и число Эйлера пульсационное. Дан алгоритм минимизации энергетических затрат в установке блочного вымораживания.

The problems of modeling the associated hydrodynamic and heat-mass carry processes in block freezing-out apparatuses. Wave processes of agitation at mechanical low-frequency acoustic high-frequency generators operation are taken into account. The pulsating Reynolds' number, its critical value and pulsating Euler's number have been introduced. The algorithm of energy consumption minimization in block freezing-out apparatus has been given.

Ключевые слова: Установки блочного вымораживания, математическое моделирование, тепло-массоперенос, механические и акустические интенсификаторы.

Низкотемпературные технологии переработки пищевого сырья отличаются высоким качеством готового продукта, позволяют в полной мере сохранить полезные компоненты сырья. Для концентрирования пищевых жидкостей стали применять аппараты блочного вымораживания, которые привлекают простотой и надежностью конструкции, энергетической эффективностью [1]. Подтверждена их перспективность при концентрировании соков, экстрактов, молочной сыворотки, виноматериалов, в технологиях производства уксуса и пищевых красителей [1]. Вместе с тем, специфика процессов в концентраторе определяют, что резервы по интенсификации массопереноса далеко не исчерпаны. При этом, наиболее простые способы интенсификации теплообмена, связанный с увеличением скорости потока, в установках блочного вымораживания крайне ограничены так как с ее ростом возрастает величина теплового потока (связанная с диссипацией энергии в нагнетателе, диссипацией при трении в потоке и с системными теплопритоками) к границе раздела фаз. Согласование этих потоков энергии является задачей системной оптимизации всей установки, включающей и криоконцентратор, и холодильную машину.

Физическая модель системы вымораживания. Физическая схема исследуемых процессов переноса представлена на (рис.1), а поля параметров – на (рис.2).



ρ - плотність; μ - вязкість; i - ентальпія; c - удельная теплоемкость; λ - коефіцієнт теплопроводности; δ - товщина; ϵ - пористість; w - скорость; q - плотность теплового потока. Индексы: r - раствор; l - лед; st - стенка; x - холодильный агент; u - интенсификатор.

Рис. 1 – Теплофизическая схема процесса вымораживания

По принятому механизму формирования кристалла льда возможность его роста или плавления определяется результирующим тепловым потоком на границе «блок льда – пограничный слой» (рис.1). Стенка канала, в котором протекает холодильный агент либо хладоноситель, непроницаема для потока массы (m_l). Вместе с тем, поток m_l является определяющим при формировании тепловых балансов в системе. Поэтому, суммарный тепловой поток через блок льда и через стенку ($q_{ст}$) значительно превышает тепловой поток от самого раствора (q_r), который расходуется на охлаждение раствора (масса которого M_r) и на компенсацию теплопритоков из окружающей среды (q_{oc}) через корпус концентратора. Поток (q_l) учитывает расход энергии на кристаллизацию льда массой m_l при теплоте фазового перехода Ω и расход энергии на переохлаждение всего блока (масса которого M_l а снижение температуры Δt_l). Кроме того, следует предусмотреть количество энергии от генератора колебаний (интенсификатора q_u):

$$q_{ст} = q_l + q_r + q_u = m_l \Omega + M_l c_l \Delta t_l + M_r c_r \Delta t_r + q_{oc} + q_u \quad (1)$$

Таким образом, задачей сопряженной тепловой и массообменной модели является определение полей температур в блоке льда и в стенке, энтальпий, полей температур и концентраций в блоке льда, пограничном слое и в объеме раствора.

Температурные поля в элементах системы определяются величинами соответствующих термических сопротивлений, параметрами холодильного агента и кинетическими характеристиками процесса льдообразования (рис.2). В условиях естественной конвекции поля концентраций (рис.2) имеют ярко выраженный пик на границе раздела «твердая фаза – пограничный слой».

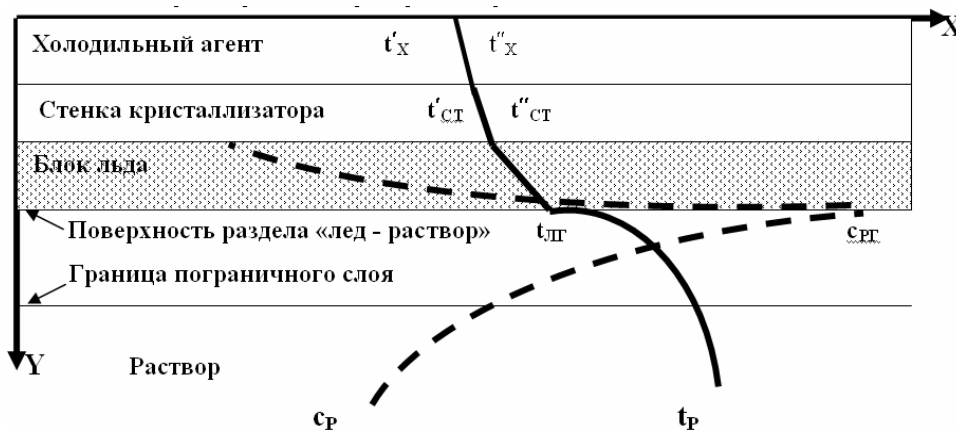


Рис. 2 – Поля температур и концентраций

Физическая схема процесса кристаллизации при воздействии на пограничный слой перфорированным пульсатором приведена на рис. 3.6.

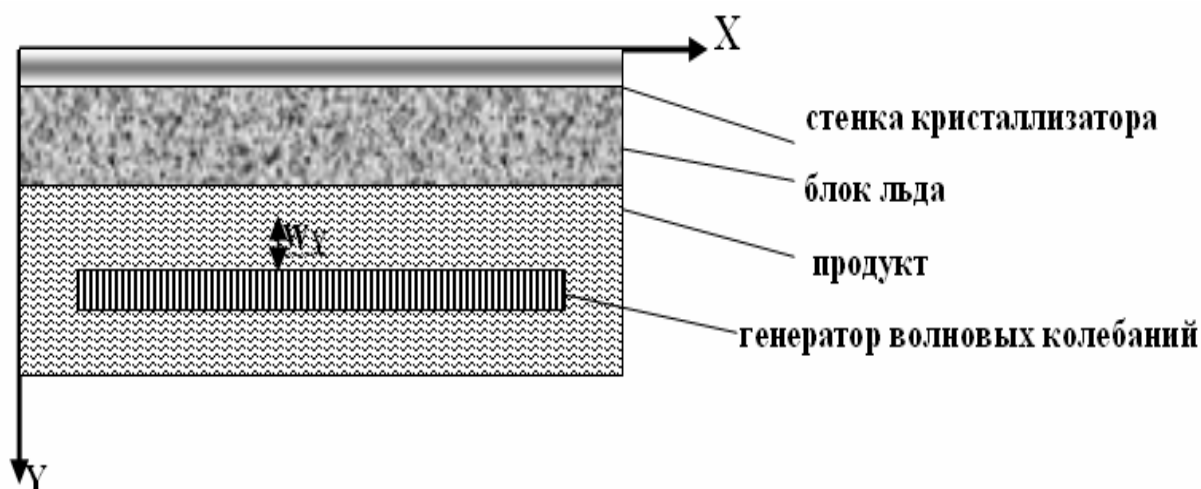


Рис. 3 – Схема процесса кристаллизации при действии генератора колебаний

Элементами схемы являются: горизонтальная стенка кристаллизатора, блок льда и продукт, в объеме которого перемещается со скоростью w_y мембрана – пульсатор. Принципиально это могут быть как генератор механических колебаний, так и акустических. Для анализа удобна декартова система координат, в которой можно записать все основные соотношения модели вымораживания приведенной выше.

Конкретизируем массовые внешние силы, которые воздействуют на объем продукта. Пульсатор генератора, перемещаясь в объеме продукта с частотой π и амплитудой A , воздействует на пограничный слой у границы блока льда. При этом продукту сообщается определенное количество энергии. Частично эта энергия расходуется на возмущение пограничного слоя (что интенсифицирует массоперенос), а частично на нагрев продукта в связи с диссипацией. Мощность, которая расходуется на привод пульсатора, имеет поэтому противоречивое влияние. Причем, особенно этот фактор существенен в системах вымораживания. Чем больше мощность, тем больше скорость продукта на границе «лед - раствор», но тем выше диссипативный тепловой поток, тем ниже скорость вымораживания. На основе этих положений можно представить параметрическую модель процесса. Параметрами качества являются массовый поток льда и концентрация раствора. Факторами, которые определяют интенсивность процесса, являются геометрические характеристики аппарата, свойства продукта, параметры холодильной системы и пульсатора.

Формулировка математической задачи. Для кристаллизатора с принятым расположением осей координат (рис.3) составим систему уравнений, которая описывает сопряженные процессы тепломассопереноса и гидродинамики, при следующих допущениях:

1. Жидкость является несжимаемой.
2. Физические параметры жидкости постоянны.
3. Рассматриваемый процесс является квазистационарным.
4. Теплопроводностью жидкости вдоль пограничного слоя можно пренебречь.
5. Величина гидродинамического пограничного слоя равна толщине пограничного теплового и диффузионного слоев.

При этих допущениях поля температур и скоростей можно описать дифференциальными уравнениями в приближении пограничного слоя. Учтем дополнительно подъемную силу $\rho g \beta \Delta t$, считая ее соизмеримой с вязкостным комплексом ($\mu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}$). Влияние пульсатора выразим через инерционное ускорение j , которое определяется отношением разности массовых сил (ΔF) к плотности жидкости (ρ). Введем обозначения: $v = t - t_0$. Очевидно, что $dt = dv$, т. к. $t_0 = \text{const}$. Тогда на основе [2, 3]:

уравнение энергии:

$$w_x \frac{\partial v}{\partial x} + w_y \frac{\partial v}{\partial y} = a \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (2)$$

уравнение движения:

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + g \beta v + j \quad (3)$$

уравнение сплошности:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \lambda \nabla^2 t + (\sigma : \nabla \bar{v}) \quad (5)$$

Запишем граничные условия.

1. Вдали от поверхности теплообмена:
 $y \rightarrow s \quad v = v_0 = 0; \quad w_y = 0$
2. На поверхности кристаллизатора:
 $y = 0 \quad ; \quad 0 \leq X \leq l_0; \quad v = v_{cr} \equiv t_{cr} \quad t_0 = \text{const}; \quad w_x = w_y = 0$
3. На поверхности пограничного слоя:
 $y = \delta_\tau \quad \frac{dM}{d\tau} = \beta F [C(t_{kp}) - C]$
 $- \alpha v_{cr} = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y = \delta_\tau}$

$\left. \vphantom{\begin{matrix} 1. \\ 2. \\ 3. \end{matrix}} \right\} (6)$

где w_x и w_y – проекции вектора скорости на соответствующие координатные оси; t – текущие значения температуры в некоторой точке пространства; λ, μ, ρ, C_p – коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости, плотность, теплоемкость продукта; $F = \rho g \beta \Delta t$ – подъемная сила; g – гравитационная константа; β – коэффициент объемного расширения; δ – толщина пограничного слоя; τ – время; F – площадь поверхности фазового контакта; C – концентрация; M – массовый расход льда; α – коэффициент теплоотдачи; β – коэффициент массоотдачи.

Таким образом, поставлена сопряженная задача гидродинамики, тепло-и массообмена в кристаллизаторе усложненная действием плоского пульсатора. По сути, это двумерная, нестационарная, нелинейная задача. Видно, что даже при серьезном упрощении аналитическое решение задачи слишком громоздко и в настоящее время нецелесообразно. Основная трудность в расчете поля скоростей, расчете пульсационного инерционного ускорения j .

Поэтому перейдем к анализу задачи методами теории обобщенных переменных.

Приведение математического описания краевой задачи к записи в безразмерных обобщенных переменных. В системе дифференциальных уравнений зависимость теплофизических параметров от температуры и от концентрации продукта сильно усложняет решение задачи. В задачах тепломассопереноса достаточно апробирован переход к осредненным значениям $\lambda, \mu, \rho, C_p, a, D$. При этом величина этих параметров определяется по средней температуре процесса, по средней концентрации продукта. Вторым барьером является наличие в системе уравнений $\frac{\partial w_x}{\partial \tau}$. Переход к квазистационарной задаче

тоже широко практикуется в практике решения задач теплопереноса. Однако, здесь следует провести анализ гидродинамики пульсационного потока. Пульсационное течение сильно отличается от ламинарного и от традиционного турбулентного. Рассмотрим качественный характер пульсационного течения в аппарате.

Технически обеспечиваются пульсации скорости у границы блока льда механическим или акустическим мембранным устройством. В случае механического генератора ход мембраны остается постоянным, а частота – регулируется. Например, с помощью частотного преобразователя изменяются обороты вала и секундный объем, который описывает мембрана. В результате изменяется объемный расход продукта. Представляется, что схема перемешивания жидкости будет следующей. При минимальных оборотах вала будет минимальная объемная производительность мембраны, наиболее низкая скорость невозмущенного потока. Естественно такая система будет потреблять и наименьшее количество энергии.

С акустическим генератором изменяются параметры входа пьезоэлемента, что приводит к изменению частоты пульсаций.

С ростом мощности, потребляемой генератором колебаний, будет расти объемный расход, перепад давлений и скорость набегающего потока. При пульсации скорости происходит перенос механической энергии. Важно организовать этот перенос на границе гидродинамического пограничного слоя, результатом этого будет разрушение пограничного слоя. Представляется, что общую гидродинамическую ситуацию в аппарате может характеризовать суммарная осредненная скорость потока, соответствующее ей число Рейнольдса. Однако, в этом случае число Рейнольдса должно вместе с числом Грасгофа характеризовать общую гидродинамическую ситуацию в теплообменнике.

Естественно, запись числа Рейнольдса следует модифицировать, привести его к характерным параметрам аппарата. Обычно скорость потока выражают отношением объемного расхода жидкости (V) к площади живого сечения канала (F). В поставленной задаче в явном виде эти параметры выразить сложно. Поэтому представим их как зависимость от известных параметров, которые определяют значения (V) и (F).

Представляется, что объемный расход жидкости можно выразить через ход мембраны s, частоту пульсаций f и диаметр мембраны пульсатора d при помощи коррелирующих коэффициентов k:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} sf = k_1 d^2 k_2 df = k_3 d^3 f \quad (7)$$

Аналогично выразим площади живого сечения как разницу между сечением аппарата (F_A) и площадью мембраны (F_M):

$$F = F_A - F_M = \frac{\pi d_A^2}{4} - \frac{\pi d_M^2}{4} = k_4 d^2 - k_5 d^2 = k_6 d^2 \quad (8)$$

Таким образом, искомая скорость продукта в аппарате определится как:

$$w = \frac{V}{F} = \frac{k_3 d^3 f}{k_6 d^2} = k_7 d f \quad (9)$$

Приняв в качестве характерного размера системы диаметр мембраны, с учетом (9) получим модифицированное волновое число Рейнольдса:

$$Re_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu} \quad (10)$$

Влияние энергии, сообщаемой продукту мембраной, на кинетику процесса кристаллизации учтем на основе дифференциального уравнения Фурье – Кирхгофа:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \lambda \nabla^2 t + \mu \Phi \quad (11)$$

В декартовой системе координат в одномерной записи диссипативная функция Рэлея (Φ) имеет вид [2]:

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (12)$$

Если принять, что тепловые процессы в аппарате определяются только диссипацией энергии движения, то подстановка (3.75) в (3.74) даст:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \frac{4}{3} \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (13)$$

Применив известные из теории подобия правила получения безразмерных обобщенных чисел подобия, получим:

$$c_p \rho \frac{dt}{d\tau} \left(\frac{dy}{dw} \right)^2 \frac{1}{\mu} = 1 \quad (14)$$

Вычеркиванием символов дифференцирования, выбрав в качестве определяющего параметра высоту продукта в аппарате (h) получим безразмерное число Эйлера волнового:

$$c_p \rho \frac{\Delta th}{\tau \mu w^2} = Eu_B \quad (15)$$

Поскольку произведение теплоемкости, плотности, разности температур отнесенное ко времени есть удельная объемная мощность q_V (Вт/м³), то:

$$Eu_B = \frac{q_v h^2}{\mu w^2} \quad (16)$$

С учетом зависимости скорости от параметров волнового перемешивания (9):

$$Eu_B = \frac{q_v}{\mu f^2} \quad (17)$$

Конвективные процессы в аппарате характеризует число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta t h^3}{\nu^2}, \quad (18)$$

а определяемое число подобия – модифицированное число Стантона волнового:

$$St_B = \frac{\beta}{df} \quad (19)$$

Тогда искомое уравнение в обобщенных переменных примет вид:

$$St_B = A (Gr)^b (Re_B)^n (Sc)^m \quad (20)$$

Определение констант A, b, n, m, k является задачей экспериментального моделирования.

Оптимизация режимов работы холодильной системы и криоконцентратора с пульсатором.

Вопросы оптимизации установок блочного вымораживания без элементов интенсификации рассмотрены в [1, 4]. В качестве параметра оптимизации здесь исследовалась температура поверхности кристаллизации, а целевой функцией принималась величина удельных энергетических затрат. В установках с пульсационными элементами интенсификации процедура оптимизации должна учитывать вклад энергии диссипации, который характеризует число Эйлера пульсационное (17).

Сформулированное выше научное противоречие о возможности пульсационных воздействий на пограничный слой и снижения его диффузионного сопротивления при одновременном повышении энергетической нагрузки на холодильную систему предполагает, что существует мера предельной целесообразности мощности генератора колебаний. Логично, что таким параметром может быть критическое число Рейнольдса волнового ($Re_{вкр}$). Тогда схема минимизации энергетических затрат будет следующей:

- расчет значения критического числа Рейнольдса, определение частоты пульсаций;
- по соотношению (17) определяется удельная мощность генератора колебаний;
- по соотношению (19) определяется время, которое необходимо для решения технологической задачи;
- устанавливается уровень затрат энергии холодильной машиной за время цикла;
- по соотношению (1) рассчитываются суммарные затраты энергии в системе при разных анализируемых вариантах.

Выводы. Минимизация энергетических затрат при работе установок блочного вымораживания возможна при совместном рассмотрении моделей кинетики массопереноса и энергетики элементов системы. Кинетика массопереноса при комбинированных процессах кристаллизации представляется зависимостью числа Стантона от традиционных чисел Шмидта и Грасгофа и оригинального числа Рейнольдса волнового, которое ответственно за гидродинамическую ситуацию в аппарате в условиях волновых пульсационных процессов перемешивания. Предел целесообразного повышения частоты пульсаций устанавливается критическим числом Рейнольдса волнового. Уровень диссипации энергии при работе генератора пульсаций устанавливается волновым числом Эйлера.

Литература

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
2. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник) – М.: «Энергия», 1971 – 560с.
3. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. – Одесса: Друк, 2008 – 348с.