

Дмитренко И. М., аспирант, Погорельый Т. М., канд. техн. наук, доцент
Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА БОЛЬШЕЙ И МЕНЬШЕЙ ЯЧЕЕК САХАРОЗЫ В ПРОЦЕССЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЗОНАХ ИХ КОНТАКТА С ПЕРЕГРЕТЫМ РАСТВОРОМ

В данной статье предложено методика определения скорости нагрева ячеек при теплообмене между большей и меньшей ячейками межкристалльного раствора сахарозы с окружающим их перегретым раствором, на основе решения нестационарной задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями второго рода численными методами, с использованием программного комплекса Flow Vision.

Результаты, полученные в процессе моделирования теплообмена между большей и меньшей ячейками межкристалльного раствора сахарозы с окружающим их перегретым раствором, подтвердили правомерность использования теории процесса рекристаллизации по колебательному механизму.

The article deals with the heating rate determination method of the cells at heat exchange between the greater and lesser cells of sucrose mother liquor with their surrounding superheated solution based on the unsteady problems decision of heat transfer with inhomogeneous boundary conditions of the second kind by numerical methods using the software FlowVision.

The results obtained on modeling of heat exchange between the greater and lesser cells of sucrose mother liquor with their surrounding superheated solution confirms using rightfulness of recrystallization process theory over the vibrational mechanism

Ключевые слова: ПК Flow Vision, процесс рекристаллизации, сахароза, моделирование, теплообмен.

Несмотря на высокий уровень развития современных методов научного познания явлений и процессов окружающей действительности, всё же остаются области малоизученных процессов. Одним из таких процессов является кристаллизация растворённого вещества из растворов. Данный процесс наиболее широко используется в таких отраслях промышленности, как пищевая и химическая. Множество исследований во всём мире проведены по раскрытию механизма протекания процесса кристаллизации из растворов. Результатом этих исследований стало множество выдвинутых теорий процесса роста и растворения кристаллов, наиболее известные из них — термодинамическая, диффузионная, молекулярно-кинетическая, а также дислокационная теории роста и растворения кристаллов [1, 2, 3].

Следует отметить, что всем рассмотренным теориям роста и растворения кристаллов присущи некоторые односторонность и ограниченность [1, 2]. Эти теории не учитывают всего многообразия процессов, происходящих при росте и растворении кристаллов, ведь реальный рост и растворение кристаллов, особенно при массовой кристаллизации, происходят при одновременном воздействии кинетических, диффузионных, тепловых, гидродинамических и других факторов, учесть которые пока ни одна теория не может.

Исследователями НУПТ была предложена теория массовой кристаллизации растворённого вещества путём испарения растворителя [2], ключевая идея которой состоит в том, что данный процесс в изотермически-изогидрических условиях кипения кристаллизующейся дисперсной системы происходит следующим образом — в пересыщенном растворе зарождаются кристаллы критической концентрации предельной, коллоидной дисперсности, после чего из подкачиваемого раствора вода полностью испаряется, а растворенное вещество выкристаллизовывается в виде мельчайших частиц, которые затем вступают в процесс рекристаллизации. Анализ существующих теорий рекристаллизации [2], таких как механизм остальдова созревания, рекристаллизация основанная на принципе Гиббса — Кюри — Вульфа, механизм структурной переконденсации, показывает, что ни одна из них не может объяснить наблюдаемой асимметрии во влиянии размера кристаллов на их скорость роста и растворения.

Экспериментальные данные, полученные в результате многочисленных исследований проведённых в НУПТ, позволили определить новый вид переконденсации, играющего большую роль в укрупнении частиц дисперсной фазы в самых разнообразных практически важных дисперсных системах. Исследователями НУПТ была предложена теория процесса рекристаллизации по колебательному механизму [2, 4], ключевое положение которой заключается в том, что одним из необходимых условий протекания процесса рекристаллизации является периодическое колебание температуры или концентрации дисперсной среды. В данной теории рассматривается ячеистая модель коллективного роста и растворения частиц дисперсной фазы, согласно которой в дисперсной системе, где частицы располагаются во всём объёме, дисперсная среда не является общей для какой либо частицы, а распределяется между ними пропорционально их размера, создавая с частицами ячейки, из которых и происходит их рост и растворение. Согласно данной теории, при контакте двух ячеек различного размера, в момент их контакта с источником теплоты, ячейка меньшего размера интенсивнее приобретает или отдаёт относительное количество теплоты (отношение количества теплоты которую отдала или преобрела ячейка к её размеру) и, как следствие, охладится или нагреется на большую величину чем ячейка большего размера при одинаковом времени контакта. При этом в обеих ячейках пропорционально изменению

температуры произойдёт изменение коэффициента растворимости и, как следствия, пересыщения межкристалльного раствора, который окружает кристалл (согласно ячеистой модели коллективного роста и растворения частиц дисперсной фазы), что и приведёт к массообмену некоторого количества вещества от ячейки меньшего размера к ячейке большего размера.

При рассмотрении теории процесса рекристаллизации по колебательному механизму возникает вопрос, какой промежуток времени ячейки должны находиться в контакте с источником теплоты, чтобы произошел теплообмен, достаточный для изменения коэффициента пересыщения в окружающем кристалл растворе, или какая скорость нагрева ячеек при теплообмене с источником теплоты?

В данной статье предложено методику определения скорости нагрева ячеек при теплообмене между большей и меньшей ячейками межкристалльного раствора сахарозы с окружающим их перегретым раствором. Физическая сторона задачи заключается в следующем: в вакуум-аппарате периодического действия, на завершающей стадии процесса уваривания сахарного утфеля, i -я ячейка межкристалльного раствора сахарозы большего размера, контактируя с j -й ячейкой межкристалльного раствора сахарозы меньшего размера, попадают в пристенный перегретый слой раствора в кипяtilьной трубке во время циркуляции (рис. 1).

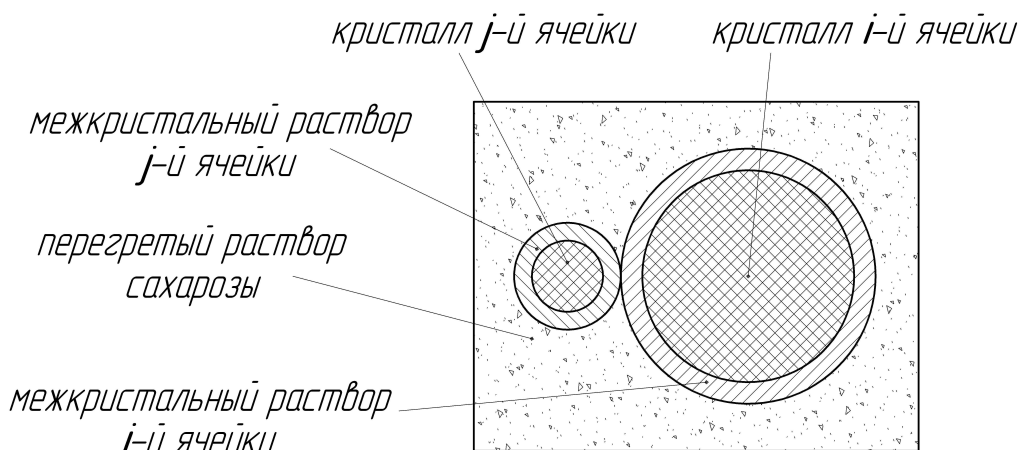


Рис. 1. К описанию физической стороны задачи.

На основе решения нестационарной задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями второго рода для трёх трёхмерных областей, контактирующих между собой по идеальному закону теплообмена численными методами, с использованием программного комплекса Flow Vision [5, 6], было смоделировано теплообмен между большей и меньшей ячейками межкристалльного раствора сахарозы с окружающим их раствором, при условии их попадания в перегретую зону рабочего объёма аппарата.

Теплообмен в программном комплексе Flow Vision моделируется путём использования модели «твёрдый материал», на основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности записанного в следующем виде:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho} \quad (1)$$

где h – удельная энтальпия, Дж/кг;

t – время, с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ρ – плотность, кг/м³;

C_p – удельная теплоёмкость для изобарного процесса, Дж/(кг·К);

Q – внутренний источник тепла, Вт/м³.

Согласно методике описанной в [7], определяем геометрические размеры ячеек межкристалльного раствора сахарозы, окружающих кристаллы различной величины.

Создаём 3D-модель теплообмена между i -й и j -й ячейками межкристалльного раствора сахарозы в перегретой зоне рабочего объёма аппарата с целью расчёта в программном комплексе Flow Vision на основании программного продукта Autodesk Inventor (рис. 2). Поскольку слои межкристалльного раствора сахарозы ячеек, кристаллы, а также перегретый раствор имеют различные физико-химические и теплофизические свойства, то полученная модель будет состоять из пяти подобластей, что и позволит присвоить каждой из них соответствующие свойства. Заметим, что программный комплекс Flow Vision позволяет обозначить поверхности, между которыми происходит контакт, что обуславливает специфический вид модели. Созданная 3D-модель полностью отображает физическую сторону задачи.

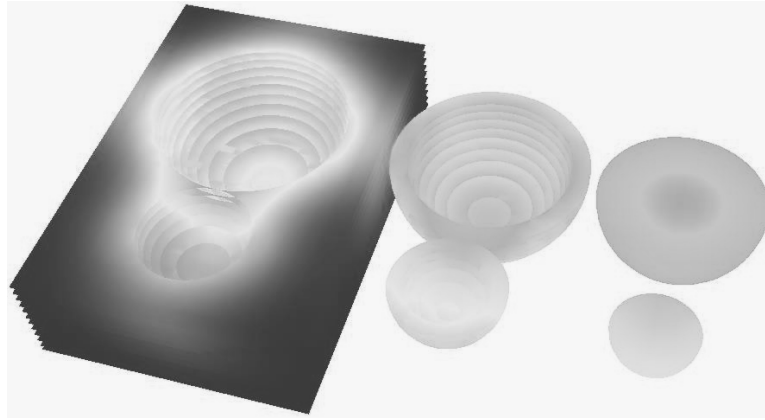


Рис. 2. Модель для расчета в программном комплексе Flow Vision

В результате проведенного моделирования получаем распределение температур между контактирующими ячейками межкристального раствора сахарозы в разные моменты относительного времени уваривания сахарного утфеля 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 (рис. 2).

Используя возможности ПК Flow Vision и программный продукт Exel 2003 получаем:

- зависимости средней по координате X температуры в i -м и j -м слоях межкристального раствора сахарозы ячеек от времени их контакта с достаточно высокой точностью (критерием служит коэффициент корреляции r):

$$T_{cp_i} = 105,14 \cdot t^{0,0569} \quad (2)$$

$$T_{cp_j} = 114,2 \cdot t^{0,0825} \quad (3)$$

- зависимости средней по координате X температуры в i -м и j -м кристаллах сахарозы от время контакта ячеек, в которых они заключены, с достаточно высокой точностью (критерием служит коэффициент корреляции r):

$$T^{kp}_{cp_i} = -4710,5 \cdot t^3 + 1092,1 \cdot t^2 + 65,25 \cdot t + 69,5 \quad (4)$$

$$T^{kp}_{cp_j} = -1166,9 \cdot t^2 + 373,1 \cdot t + 67,7 \cdot t \quad (5)$$

После дифференцирования уравнений (2), (3), (4), (5) получаем соответственно:

- скорость нагрева слоя межкристального раствора сахарозы i -й ячейки:

$$U_{t^{яч}_i} = \frac{dT_{cp_i}}{dt} = \frac{d}{dt} (105,14 \cdot t^{0,0569}) = \frac{6,2453}{t^{0,9406}} \quad (6)$$

- скорость нагрева слоя межкристального раствора сахарозы j -й ячейки:

$$U_{t^{яч}_j} = \frac{dT_{cp_j}}{dt} = \frac{d}{dt} (114,2 \cdot t^{0,0825}) = \frac{9,4215}{t^{0,9175}} \quad (7)$$

Строим графики зависимостей $U_{t^{яч}_i} = f(t)$ и $U_{t^{яч}_j} = f(t)$ (рис. 3).

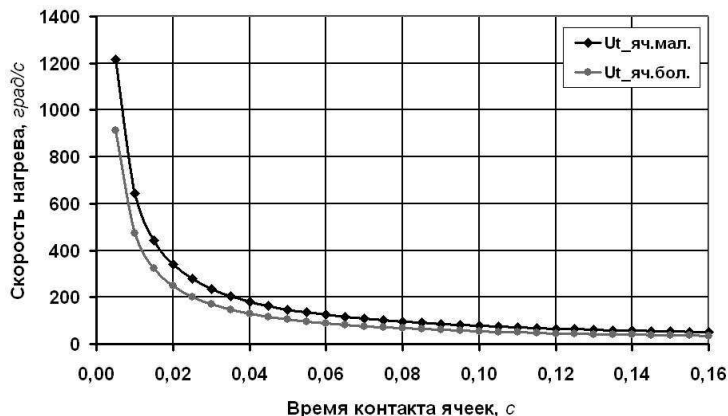


Рис. 3. График зависимостей: $U_{t^{яч}_i} = f(t)$; $U_{t^{яч}_j} = f(t)$

- скорость нагрева кристалла сахарозы i -й ячейки:

$$U_{t^{kp}_i} = \frac{dT^{kp}cp_i}{dt} = -14131,5 \cdot t^2 + 2184,2 \cdot t + 62,5 \quad (8)$$

- скорость нагрева кристалла сахарозы j -й ячейки:

$$U_{t^{kp}_j} = \frac{dT^{kp}cp_j}{dt} = -2333,8 \cdot t + 373,79 \quad (9)$$

Строим график зависимостей $U_{t^{kp}_i} = f(t)$ и $U_{t^{kp}_j} = f(t)$ (рис. 4).

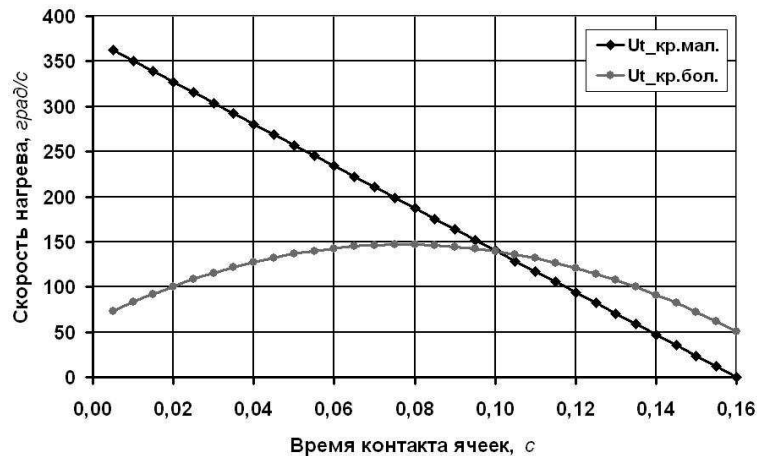


Рис. 4. График зависимостей $U_{t^{kp}_i} = f(t)$, $U_{t^{kp}_j} = f(t)$

Вывод

В результате проведённого моделирования были получены зависимости скорости нагрева слоёв межкристалльного раствора сахарозы и кристаллов на протяжении времени их контакта (рис. 2, рис. 3), которые показывают, что наиболее интенсивный теплообмен между ячейками с источником теплоты соответствует первым 0,08 с. Вероятность контактов между ячейками различного размера с определённой нами продолжительностью во время уваривания в вакуум-аппарате чрезвычайно велика.

Таким образом, теорию процесса рекристаллизации по колебательному механизму необходимо применять для описания процессов, происходящих при массовой кристаллизации растворённого вещества путём испарения растворителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларичев Т. А., Сотникова Л. В., Сечкарев Б. А., Бреслав Ю. А., Утехин А. Н. Массовая кристаллизация в неорганических системах: учеб. пособие. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. — 176с.
2. Бажал И. Г., Куриленко О. Д. Переконденсация в дисперсных системах. — К.: Наукова думка, 1975. — 216 с.
3. Матусевич Л. Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности — М.: Химия, 1968
4. Об условиях рекристаллизации в вакуум-аппаратах / Штангеев В. О, Мирончук В. Г., Гулый И. С, Бажал И. Г. // Сахарная промышленность. — 1981. — Вып. 3. — С. 12—18.
5. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.2. Руководство пользователя. — М.: Тесис, 2005. — 304 с.
6. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В., Евдокимов А.В., Зуев А.П. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие — М.: МФТИ, 2005. — 104 с.
7. Мирончук В. Г., Погорілий Т. М., Дмитренко І. М. Моделювання теплообміну в процесі рекристалізації сахарози при уварюванні цукрового утфелю // Харчова промисловість. Науковий журнал — Київ.: НУХТ, 2012 — №12 — С. 232—236.