

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО СЫРЬЯ¹

Целью исследований данной работы является создание математической модели процесса замораживания фармацевтического сырья (плодов боярышника, клюквы, черники, калины и т.д.)

Быстрое замораживание фармацевтического сырья в жидком азоте необходимо при его переработке методом криосублимационного фракционирования.

При замораживании частицы в классической задаче Стефана [1] процесс фазового перехода протекает при постоянной температуре на границе раздела фаз. В этом случае практически все теплофизические параметры (теплопроводность, теплоемкость, удельное сопротивление) изменяются скачком.

В элементах фармацевтического сырья благодаря его пористой структуре процесс протекает несколько иначе [2]. Содержание жидкой фазы наблюдается при любой (вплоть до -100 °С) температуре. По мере снижения температуры образца уменьшается доля жидкой фазы и увеличивается доля твердой, четкая граница раздела фаз отсутствует.

В процессе замораживания выделяется теплота фазового перехода (скрытая теплота кристаллизации).

При моделировании процесса приняты следующие допущения:

- температура охлаждающего агента остается постоянной;
- плотность замороженного продукта не зависит от температуры;
- температура в любой точке частицы зависит только от текущего радиуса и времени (симметричная задача).

Количество вымороженной воды характеризуется величиной ω , равной отношению массы льда $G_{л}$ к начальной массе воды $G_{н}$ в частице

$$\omega = \frac{G_{л}}{G_{н}}, \quad (1)$$

которая может изменяться от 0 до 1 по мере снижения температуры от $t_{кр}$ ($t_{кр}$ – криоскопическая температура). Для определения ω рекомендована следующая зависимость [3]

$$\omega = \left(1 - b \frac{1 - W}{W}\right) \left(1 - \frac{t_{кр}}{t}\right), \quad (2)$$

где b – содержание прочно связанной воды на единицу массы сухого вещества, кг/кг; W – начальное содержание влаги в продукте; $t_{кр}$ – криоскопическая температура, °С.

Для продуктов растительного происхождения $b = 0,08 - 0,352$ кг/кг [4].

Уравнение теплопроводности для сферической частицы имеет вид

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{2\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r}, \quad (3)$$

где c – теплоемкость, Дж/кг · К; ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/м · К.

Теплоемкость до начала замораживания ($t > t_{кр}$) определяется по формуле

$$c = c_c(1 - W) + c_b W, \quad (4)$$

где c_c , c_b – теплоемкости сухой массы и воды, соответственно, Дж/кг · К.

При достижении криоскопической температуры в частице появляется твердая фаза, доля которой растет по мере снижения температуры.

Теплота фазового перехода, выделяемая при замораживании влаги, учитывается как дополнительная теплоемкость, определяемая соотношением

$$c = c_c(1 - W) + c_{л}\omega W + c_{в}\omega(1 - W) + W r \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (5)$$

где r – теплота кристаллизации воды, кДж/кг.

Первые три слагаемых формулы (5) характеризуют вклад теплоемкостей сухого вещества, льда и воды, соответственно, последнее – теплоту, выделяемую при кристаллизации воды.

Начальное условие: при $\tau = 0$ $t = t_0$.

Граничные условия:

$$\text{при } r = 0 \quad \frac{\partial t}{\partial r} = 0;$$

¹ Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. А.В. Жучкова.

$$\text{при } r=R \quad \lambda \frac{\partial t}{\partial r} = -\alpha(t-t_x)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от частицы к хладагенту, Вт/м²·К; t_x – температура жидкого азота, °С.

Ввиду нелинейного характера поставленной задачи, сложных зависимостей теплофизических характеристик от температуры ее аналитическое решение не представляется возможным. Поэтому процесс смоделирован на персональном компьютере с применением численных методов.

С целью экспериментального исследования процесса замораживания фармацевтического сырья была сконструирована экспериментальная установка (рис. 1).

При выполнении эксперимента в качестве модельной среды использовался горох. В корпус вибротранспортера через некоторые промежутки времени осуществлялась подача жидкого азота. Отсчитывалось время процесса, и через определенные промежутки времени фиксировалось значение температуры в нижней части загрузочной воронки. Также измерялась температура в объеме гороха. Через 15 мин от начала замораживания она составила – 60 °С.

Дискретный аналог уравнения Фурье (3) получен с использованием явной схемы с постоянным шагом по r и τ . Использование явной схемы для аппроксимации дифференциального уравнения накладывает определенные ограничения на выбор величин шагов по времени ($\Delta\tau$) и координате (Δr). Устойчивость вычисления обеспечивается при условии [5]:

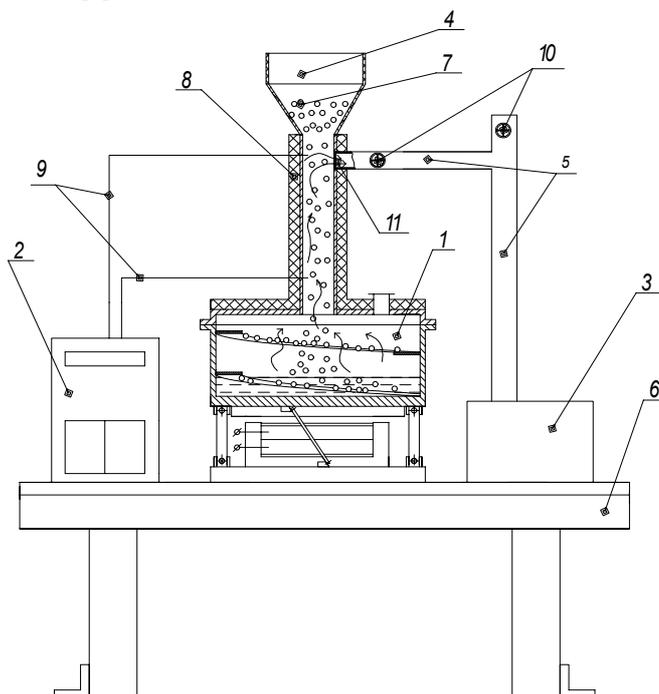


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вибротранспортирующее устройство; 2 – терморегулирующее устройство;
3 – вентилятор; 4 – загрузочная воронка; 5 – трубопровод для отсоса воздуха;
6 – рама; 7 – частицы сырья; 8 – слой теплоизоляции; 9 – термопары;
10 – заслонки; 11 – фильтрующая перегородка

$$Fo < 0,5, \quad (6)$$

где Fo – сеточное число Фурье

$$Fo = \frac{\lambda \Delta\tau}{C\rho(\Delta r)^2}. \quad (7)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

2. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст] : справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М. : Агропромиздат, 1990. – 287 с.
3. Куцакова, В.Е. Консервирование пищевых продуктов холодом (Теплофизические основы) [Текст] / В.Е. Куцакова, В.И. Филиппов, С.В. Фролов. – СПб., 1996. – 211 с.
4. Алямовский, И.Г. Теплофизические характеристики пищевых продуктов при замораживании [Текст] / И.Г. Алямовский // Холодильная техника. – 1968. – № 5. – С. 35–36.
5. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений [Текст] / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.

Кафедра «Машины и аппараты химических производств»