

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ПЛОДОВ В ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКА В ПОТОКЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

Введение

Для получения сушеной плодово-ягодной продукции, в которой максимально сохранены все ценные компоненты исходного сырья и его нативные свойства, важное значение имеют технология сушки и ее параметры. Особенно это актуально для плодов рябины обыкновенной, которые являются природной кладовой биологически активных веществ.

Известные способы сушки плодового сырья обладают рядом существенных недостатков: длительность и неравномерность сушки, потери биологически активных веществ, ухудшение органолептических и физико-химических показателей.

В последние годы для интенсификации процесса сушки растительного сырья стали использовать токи высокой и сверхвысокой частот, инфракрасный нагрев, ультрафиолетовые лучи, ультразвук, ионизирующее излучение и др. Перспективна ультразвуковая «безвакуумная» сублимационная сушка в потоке инертного газа, которая позволяет ускорить процессы тепло-массообмена, без существенного повышения температуры сырья, что особенно важно при сушке легкоокисляющихся, термочувствительных материалов. Данная технология была разработана в Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. Данная работа посвящена математическому моделированию этого процесса.

Следует отметить, что вопрос о моделировании тепло- и массообмена сублимационной ультразвуковой сушки рассматривался В.В. Касаткиным и др., однако, по нашему мнению, в этой работе учтены не все факторы, влияющие на процесс сублимации [1].

Модель «безвакуумной» ультразвуковой сублимационной сушки плодов

Рассмотрен следующий технологический процесс. После криогенного замораживания плоды рябины обыкновенной

равномерно пересыпаются в цилиндрическую сушильную камеру, в которую противотоком подается инертный газ при температуре 10°C. Под действием ультразвуковых колебаний и потока газа происходит испарение влаги из замороженного состояния без существенного повышения температуры сырья.

Принято, что форма высушиваемого материала максимально приближена к форме шара с радиусом r , и избыточная температура для любой точки ягоды $\vartheta = t - t_c$. Газ вынужденно движется по трубе, заполненной ягодами, течение которого характеризуется смешанным режимом. Теплообмен сопровождается нагревом материала $t(\tau)$, который описывается уравнением (1) с переменным коэффициентом температуропроводности $a(\tau)$ [2]:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right), \quad (1)$$

с граничными условиями третьего рода: на поверхности шара при $r = r_0$

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta_{r=r_0},$$

где λ – коэффициент теплопроводности ягоды, Вт/м К [3];

α – коэффициент теплообмена, Вт/м² К.

В центре шара из условий симметрии задачи $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=0} = 0$ и начальным услови-

ем: $\tau = 0 \quad \vartheta = \vartheta_0 = t_0 - t_c$ для $0 \leq r \leq r_0$.

Решение имеет вид

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2 \sin(\mu_n R)}{\mu_n R} \exp[-\mu_n^2 Fo], \quad (2)$$

где $\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$, $R = \frac{r}{r_0}$, $Fo = \frac{a \cdot \tau}{r^2}$ – критерий Фурье.

Число μ_n из формулы (2) является корнем трансцендентного уравнения:

$$tg\mu = -\frac{\mu}{Bi-1}, \quad (3)$$

где $Bi = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda}$ – критерий Био.

Плотность теплового потока от конвективного источника выражается законом Ньютона-Рихмана [2]:

$$q_k(\tau) = \alpha(t_s - t(\tau)). \quad (5)$$

В процессе сублимационной сушки происходит расход теплоты на сублимацию, которая определяется скоростью сублимации:

$$q_s = r_f \cdot \rho \cdot r \cdot v, \quad (6)$$

где r_f – теплота фазового перехода, Дж/кг;

ρ – плотность, кг/м³;

v – скорость сублимации, с⁻¹.

Система дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в сферических координатах для ягод имеет вид [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \varepsilon \frac{r_f}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u_i}{\partial \tau} = a_{mi} \cdot \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) + a_{mc}^r \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \varepsilon \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) + a_m^r \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (7)$$

где ε – коэффициент фазового превращения льда в пар;

c – теплоемкость, Дж/(кг°C);

u – влагосодержание.

Начальные условия: при $\tau=0$ $u = u_0$ для $0 \leq r \leq r_0$.

Граничные условия:

$$-\lambda(\nabla t)_n + q_n(\tau) - r_f j_n(\tau) = 0.$$

От системы дифференциальных уравнений (7) выполнен переход к интегральному уравнению тепло- и влагообмена:

$$q(\tau) = r_f \rho R_v \frac{d\bar{u}}{d\tau} + c \rho R_v \frac{dt}{d\tau}, \quad (8)$$

где $R_v = \frac{V}{F} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\pi r^2} = \frac{r}{3}$ – отношение объема к поверхности тела.

Получено следующее решение:

$$\bar{u}(\tau) = \frac{1}{r_f \rho R_v} \int_0^\tau q(\tau) d\tau - \frac{c}{r_f} t(\tau), \quad (9)$$

где $q(\tau) = q_k(\tau) - q_s$, знак «-» соответствует оттоку теплоты.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты осуществлялись в математическом пакете программ Maple 9.

На рисунке 1 приведена кривая изменения температуры внутри ягоды.

На рисунке 2 приведены кривые изменения влагосодержания плодов от времени.

Адекватность математической модели проверена путем сравнения расчетных данных с экспериментальными (рис. 2). Модель адекватна с надежностью 95%.

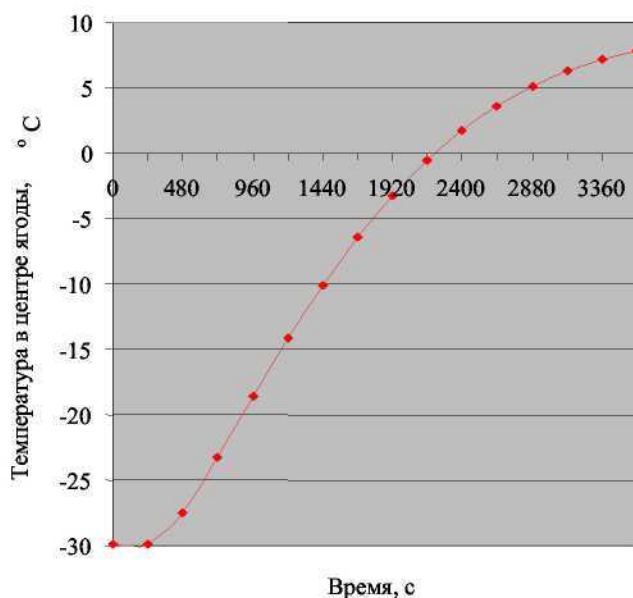


Рис. 1. Кривая изменения температуры в центре плодов рябины обыкновенной

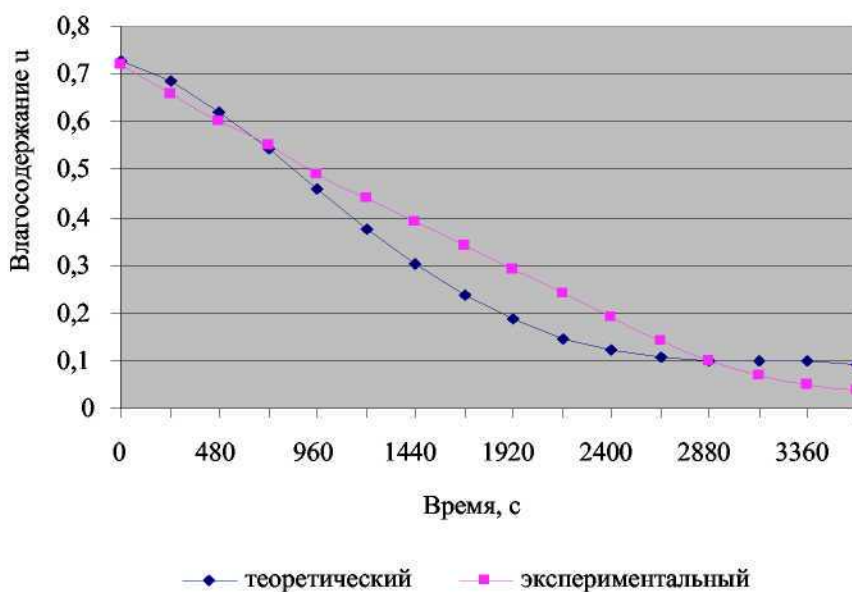


Рис. 2. Кривая изменения влагосодержания ягоды при сублимационном обезвоживании

Заключение

Представленная математическая модель процесса «безвакуумной» сублимационной сушки позволяет адекватно описывать процессы тепло- и массообмена в условиях комбинированного энергоподвода, строить изменение температуры и влажности продукта, рассчитывать время сушки при заданных условиях и управлять процессом сублимационной сушки без применения дорогостоящего эксперимента.

Библиографический список

1. Касаткин В.В. Сублимационная сушка жидких термолабильных продуктов

пищевого назначения. Технология и оборудование с комбинированным энергоподводом / В.В. Касаткин, Д.П. Лебедев, В.В. Фокин, Н.Ю. Литвинюк и др. Ижевск: РИО ИжГСХА, 2004. 307 с.

2. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1975. 488 с.

3. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.

Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.



УДК 631.431.:436.6

Ю.А. Савельев

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ ПРОМОРАЖИВАНИЕМ

Введение

Для оценки саморазуплотняющей способности почвы посредством промораживания необходимо знать для данного типа почвы, при какой плотности и при какой влажности осуществляется процесс наиболее эффективного разуплотнения (оструктурирования) почвы промораживанием [1, 2].

Объект

Процесс разуплотнения среднесуглинистого среднесиловатого чернозема промораживанием проводился в лабораторно-полевых условиях.

Метод

Величина разуплотнения определялась как разность плотностей почвы до и после промораживания:

$$\Delta\rho = \rho' - \rho,$$

где $\Delta\rho$ – изменение плотности почвы от морозного пучения, г/см³;

ρ' – плотность почвы после промораживания, г/см³.

Определение величины плотности почвы после промораживания выполнялось по результатам проведения лабораторно-полевых экспериментов с образцами почвы различной плотности и различной влажности.

Подготовка образцов почвы с различной плотностью для промораживания осуществлялась при определенных влажностях почвы [3]:

$$W_1 \rightarrow \rho_{11}; \rho_{12}; \rho_{13} \dots \rho_{1n}$$

$$W_2 \rightarrow \rho_{21}; \rho_{22}; \rho_{23} \dots \rho_{2n}$$

.....

$$W_m \rightarrow \rho_{m1}; \rho_{m2}; \rho_{m3} \dots \rho_{mn}$$

где W_1, W_2, \dots, W_n – влажности образцов почвы;

$\rho_{11}; \rho_{12}; \rho_{13} \dots \rho_{1n} \dots \rho_{mn}$ – требуемая плотность почвы, г/см³.

Для этого вес навески рассчитывается по формуле:

$$m = \rho \cdot V \cdot (W + 1),$$

где m – масса навески влажной почвы, г;

ρ – требуемая плотность почвы, г/см³;

V – объем уплотненного образца почвы, см³;

W – влажность образца почвы.

Подготовка образцов почвы для исследований осуществлялась на лабораторной установке (рис. 1).

Лабораторная установка состоит из металлического цилиндра 1, ограничительного диска 2, перемещаемого по штоку прессующего поршня 3, основания 4, силового гидроузла 5, опоры 6, нижней 7 и верхней 8 упорных плит, возвратных пружин 9, направляющей пластины 10 (предметного столика) и стяжек 11.

Подготовка образцов почвы выполнялась следующим образом. Навеска почвы засыпается в цилиндр 1, помещенный в основании 4, и устанавливается для уплотнения на направляющую пластину 10. При помощи силового гидроузла 5 образец почвы уплотняется до ограничительного диска 2. После отключения силового действия гидроузла 5 возвратные пружины 9 перемещают пластину 10, возвращая

шток силового гидроузла 5 в исходное положение.

Металлический цилиндр с уплотненным образцом почвы снимается с установки и помещается в холод для промораживания. Температура промораживания -17...-22°C. Время промораживания – 3-4 дня.

В объеме цилиндра образец почвы располагается в середине, оставляя по обе стороны определенный незанятый объем.

После промораживания образцов определялось приращение объема от морозного пучения. Для этого объем цилиндра, не занятый почвой, засыпается песком. При помощи чистика уровень песка выравнивается по торцу цилиндра, после чего песок ссыпается в измерительную мензурку и определяется объем песка, который равен части объема цилиндра, не занятого почвой. Аналогичные действия выполняются для другого объема с противоположной стороны цилиндра.

После определения незанятого почвой объема цилиндра аналитически определяется плотность промороженного образца почвы по формуле [3]:

$$\rho' = \frac{m}{V'},$$

где ρ' – плотность промороженной почвы, г/см³;

V' – объем цилиндра, занимаемый промороженной почвой, см³.

Объем цилиндра V' , занимаемый промороженной почвой, определится по формуле:

$$V' = V_{\text{ц}} - V_{\text{п}},$$

где $V_{\text{ц}}$ – объем цилиндра, см³;

$V_{\text{п}}$ – суммарный объем песка, помещенный в цилиндр, см³.

После статистической обработки полученных экспериментальных данных построены кривые, характеризующие зависимость эффективности процесса разуплотнения уплотненной почвы промораживанием в зависимости от ее плотности и влажности.

Экспериментальная часть

Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности процесса разуплотнения почвы промораживанием представлены на рисунке 2.

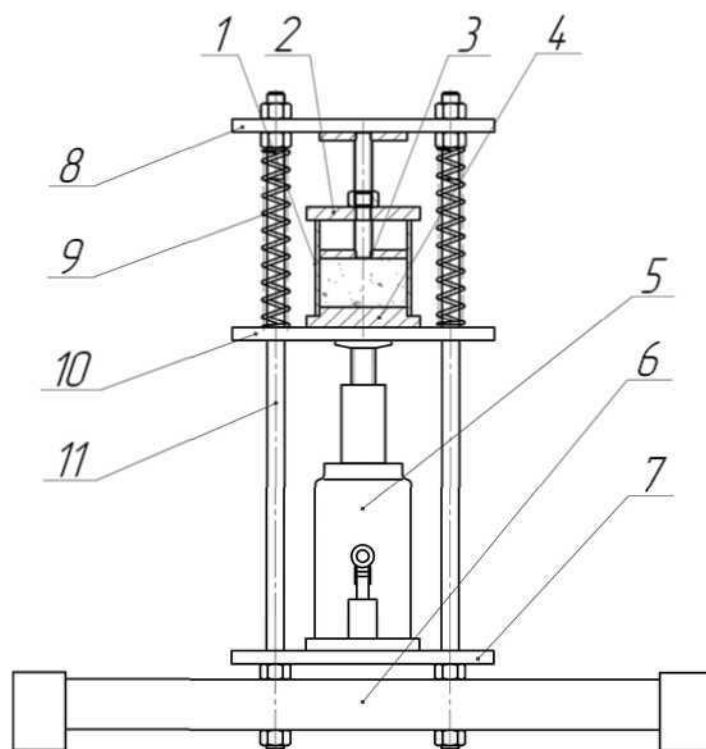


Рис. 1. Лабораторная установка для уплотнения образцов почвы:
 1 – металлический цилиндр; 2 – ограничительный диск; 3 – прессующий поршень; 4 – основание;
 5 – силовой гидроузел; 6 – опора; 7, 8 – нижняя и верхняя упорные плиты;
 9 – возвратные пружины; 10 – направляющая пластина (предметного столика); 11 – стяжки

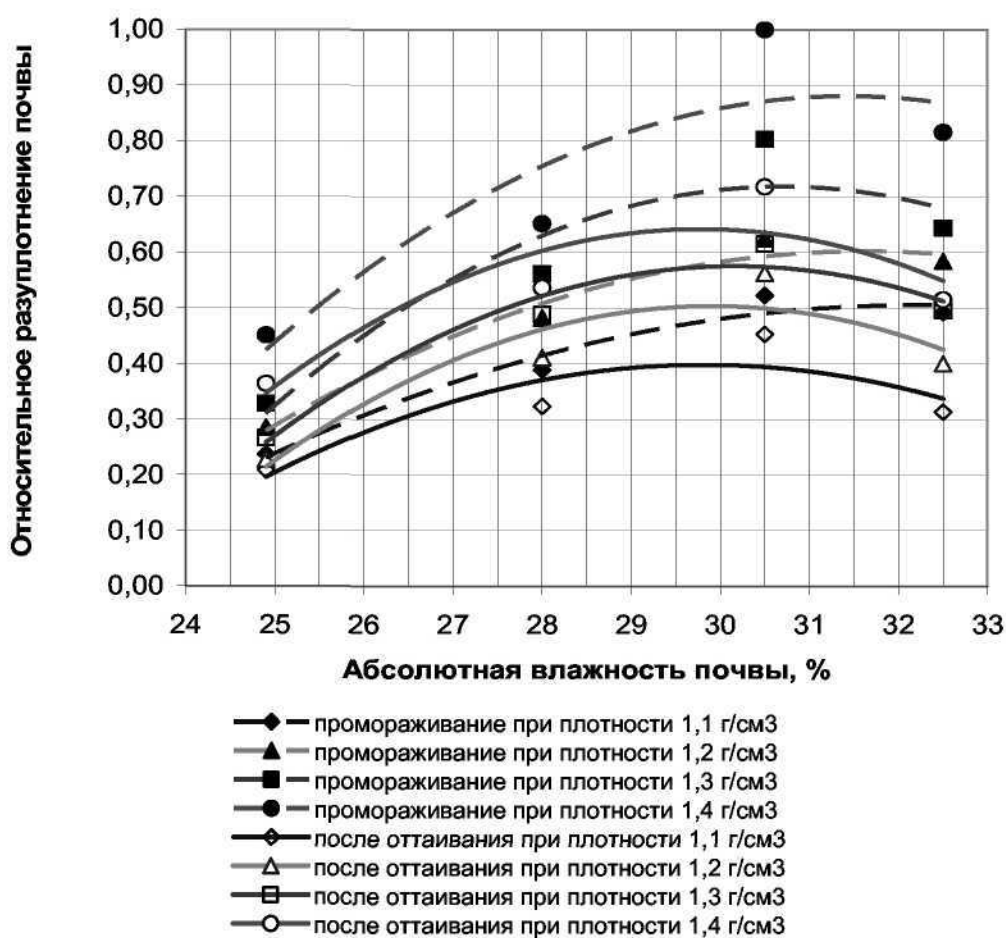


Рис. 2. Эффективность процесса разуплотнения почвы промораживанием

**Результаты экспериментов
и их обсуждение**

Данные показывают, что эффективность процесса разуплотнения почвы промораживанием зависит от ее влажности и плотности на момент промораживания. Эта зависимость является нелинейной и имеет точку максимума, соответствующую оптимальной влажности, при которой почва определенной плотности максимально эффективно разуплотняется. Например, для почвы плотностью 1,1 и 1,2 г/см³ оптимальным интервалом влажности для разуплотнения промораживанием является 29-31%, для более плотной почвы с исходной плотностью 1,3 и 1,4 г/см³ – 28,5-30,5 и 28-30% соответственно.

Таким образом, для обеспечения эффективного процесса разуплотнения уплотненной почвы промораживанием необходимо оптимальное количество влаги – не менее 28%.

Вывод

Анализ экспериментальных данных позволяет прогнозировать эффективность процесса саморазуплотнения почвы промораживанием в естественных условиях, а также наметить и разработать необходимые мероприятия при осенней обработке почвы.

Библиографический список

1. Ревут И.Б. Физика в земледелии / И.Б. Ревут. М.: Физматгиз, 1960.
2. Скворцова Е.Б. Трансформация порового пространства уплотненных почв в ходе сезонного промерзания и оттаивания / Е.Б. Скворцова, П.М. Сапожников // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1371-1381.
3. Почвоведение / под ред. И.С. Кауричева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1982. 496 с.



УДК 633.34:664.0:636.084

Г.М. Харченко

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
БИКОНИЧЕСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЦЕНТРИФУГИ ВФКЦ-2
НА КИСЛОТНОЕ ЧИСЛО ОЧИЩЕННОГО ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА**

Теоретическим основам производства и очистки растительных масел, вопросам совершенствования конструкций аппаратов, оптимизации параметров и их рабочих органов посвящены работы следующих авторов: В.А. Арутюнян, В.В. Белобородова, И.В. Гавриленко, Г.И. Гарбузовой, А.И. Голдовского, В.П. Доценко, С.М. Доценко, Б.Н. Тютюнникова, В.Г. Щербакова, М.И. Журавлева, В.Х. Паронян, В.М. Копейковского, И.М. Товбина, Г.Г. Фаниева, В.А. Жужжикова, В.И. Соколова и др.

В работах В.А. Жужжикова, В.И. Соколова большое внимание уделяется теоретическим основам очистки растительных масел, в частности, центрифугированию и анализу конструкций центрифуг [1, 2]. Технологический процесс очистки растительных масел в биконической центрифуге описан в монографии [3].

В биконической фильтрующей центрифуге ВФКЦ-2 процесс очистки растительных масел будет происходить путем осаждения в центробежном и гравитационном полях с одновременной фильтрацией при прохождении через слой фильтрующего материала – цеолита.

Качество очистки в центрифуге ВФКЦ-2 зависит от производительности, которая регулируется за счет изменения площади выходных отверстий из рабочего пространства ротора [4, 5]. Течение масла через отверстие небольшой длины, равной 0,5 от диаметра отверстия, можно рассматривать как течение при полном сжатии струи. При толщине крышки, равной 3 мм, и диаметре отверстия 1,5 мм, принятых в центрифуге, это условие обеспечивается за счет притупления кромки. В этом случае можно принять

$$W = F_{отв} \cdot \mu_1 \rho_f (2\Delta\rho/\rho_f)^{0,5}, \quad (1)$$