

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 664.784.6

**А.Н. Остриков,
Ф.Н. Вертяков**

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ ПАРА ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ СТРУИ ФРУКТОВЫХ И ОВОЩНЫХ ПЮРЕ

Ключевые слова: теплообмен, испарение, плодоовощное пюре, струя, вакуум, диспергированные капли, скорость испарения.

Первым этапом обезвоживания фруктовых и овощных пюре в разработанной двухстадийной технологии производства концентрированных пюре методом сброса давления в вакуум-камере является распыливание тонкоизмельченного и предварительно нагретого пюре с помощью струйной форсунки в вакуум-камере, в которой поддерживается разрежение 4-7 кПа [1]. В результате резкого перепада температуры и давления происходит мелкодиспергированное распыле-

ние продукта, сопровождающееся мгновенным испарением влаги, содержащейся в пюре в перегретом состоянии.

Распад струи пюре, выходящей из сопловой форсунки, на отдельные капли происходил под совместным воздействием кавитационных явлений, возникающих вследствие колебательных процессов, которые сопровождают течение пюре перед распыливанием, и под воздействием турбулентных пульсаций, приводящих к отрыву отдельных частиц пюре [2].

При обосновании выбора дисперсного состава капель пюре руководствовались следующим соображением: необходимо было подобрать такую траекторию, чтобы обеспечить максимально возможную

дальность их полета для обеспечения требуемого времени для взрывного испарения перегретой влаги из пюре за счет перепада давления.

Для вскипания капель пюре необходим их перегрев, т.е. чтобы температура пюре T_{np} превышала температуру насыщения $T_{нас}$ при данной величине разряжения в вакуум-камере. Перегретые капли пюре вскипали очень бурно, взрывообразно. Теплота перегрева пюре расходуется на парообразование, и пюре быстро охлаждается до температуры насыщения. При этом радиус капли пюре снижается за счет испаряемой влаги. Допустим, что форма капли пюре близка к шарообразной, тогда при уменьшении радиуса на dR от капли пюре отводится теплота dQ , определяемая уравнением [3]:

$$dQ = r\rho_{np} 4\pi R^2 dR = q_{ep} 4\pi R^2 d\tau = -\lambda_{np} \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)_R 4\pi R^2 d\tau. \quad (1)$$

После преобразований уравнение (1) приводится к виду:

$$\frac{dR}{d\tau} = -\frac{\lambda_{np}}{r\rho_{np}} \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)_R = -\frac{\lambda_{np} \Delta T}{r\rho_{np} R_o} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial P} \right)_{P=1}. \quad (2)$$

Задавая температурой поверхности капли при ее охлаждении и решая дифференциальное уравнение теплопроводности [4], можно найти величину $(\partial \Theta / \partial P)_{P=1}$

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial P} \right)_{P=1} = -2 \sum_{i=1}^{\infty} \exp[-\varepsilon_i^2 Fo]. \quad (3)$$

Подставляя уравнение (3) в (2), получаем

$$\frac{dR}{d\tau} = 2 \frac{\lambda_{np} \Delta T}{r\rho_{np} R} \sum_{i=1}^{\infty} \exp[-(i\pi)^2 Fo] \quad (4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что ряд быстро сходится. При $Fo > 0,25$ обычно удовлетворяются учетом только первого члена ($i = 1$). Тогда

$$\frac{dR}{d\tau} = 2 \frac{\lambda_{np} \Delta T}{r\rho_{np} R} \exp\left(-\pi^2 \frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (5)$$

Проведем расчет $dR/d\tau$ по формуле (4) для случая испарения пара из капли пюре при $T_n = 374$ К и начальном перегреве $T_n - T_0 = 11$ К, $R_0 = 0,1-0,5$ мм. Считаем, что радиус убывающей капли пюре удовлетворяет уравнению теплового баланса:

$$G_{np}^H c_{np}^H T_{np}^H = G_{np}^K c_{np}^K T_{np}^K + WI + Q_{конц} + Q_{пот}. \quad (6)$$

Полагая, что теплотой концентрирования $Q_{конц}$ можно пренебречь и потери теплоты в окружающую среду отсутствуют, т.е. $Q_{пот} = 0$, а также,

$$G_{np}^H = \rho_{np}^H V_{капл}^H = \rho_{np}^H \frac{4}{3} \pi R_o^3 \quad \text{и}$$

$$G_{np}^K = \rho_{np}^K V_{капл}^K = \rho_{np}^K \frac{4}{3} \pi R^3, \quad \text{уравнение (6)}$$

после ряда преобразований приводится к виду

$$\rho_{np}^H R_o^3 c_{np}^H T_{np}^H = \rho_{np}^K R^3 c_{np}^K T_{np}^K + Wc'T_{нап}. \quad (7)$$

Из уравнения материального баланса $G_{np}^H = G_{np}^K + W$ выразим количество испаряемой из пюре влаги W и подставим в уравнение (7). Тогда

$$\rho_{np}^H R_o^3 c_{np}^H T_{np}^H = \rho_{np}^K R^3 c_{np}^K T_{np}^K + (\rho_{np}^H R_o^3 - \rho_{np}^K R^3) c'T_{нап}. \quad (8)$$

Считаем, что плотность пюре в процессе выпаривания изменяется мало, т.е.

$$\rho_{np}^H = \rho_{np}^K, \quad \text{тогда}$$

$$R_o^3 c_{np}^H T_{np}^H = R^3 c_{np}^K T_{np}^K + (R_o^3 - R^3) c'T_{нап}. \quad (9)$$

Вводя безразмерные переменные K , P , Θ , уравнение теплового баланса принимает следующий вид:

$$P = \sqrt[3]{(1-K)/(\Theta-K)}. \quad (10)$$

В начальный момент времени перегрев $\Theta = 1$ и $P = P_0 = 1$; при $T \rightarrow T_n$ имеем $\Theta \rightarrow 0$ и конечный радиус капли $P_{кон} = R_{кон}/R_0$ определяется уравнением

$$P_{кон} = 1 - \Delta P_K = \sqrt[3]{(K-1)/K}. \quad (11)$$

Исходя из изложенного, функцию, аппроксимирующую численные значения $R(R_0, \tau)$, можно искать в виде

$$P = 1 + \Delta P_K \psi(Fo), \quad (12)$$

где $0 \leq \psi(Fo) \leq 1$. Таблица значений $R(R_0, \tau)$ была описана формулой

$$P = 1 - \Delta P_K \sqrt{1 - \exp(-\pi^2 Fo)}. \quad (13)$$

Безразмерная скорость уменьшения капли:

$$\frac{dP}{dFo} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{1-K}{K}} \right) \frac{\pi^2 \exp(-\pi^2 Fo)}{\sqrt{1 - \exp(-\pi^2 Fo)}}. \quad (14)$$

Как показали проведенные исследования, из-за скоротечности процесса испарения радиус капли уменьшается незначительно.

Диспергирование струи придает процессу отчетливо выраженный статистический характер, поэтому для математического описания процесса теплообмена используем уравнение [3], которое определяет тепловыделение по объему диспергированной струи

$$Q_v = \int_V q_v dV = 4\pi \int_{V_R} r \rho_{np} R^2 \frac{dR}{d\tau} \frac{dn}{dR} dR dV. \quad (15)$$

Если скорость убыли капли оценивать интенсивностью убыли ее массы $\frac{dM}{d\tau} = \rho_{np} \frac{dV}{d\tau}$, то

$$q_v = r \int_0^\infty \frac{dM}{d\tau} \varphi(R) dR. \quad (16)$$

Рассмотрим теплообмен при испарении пара из струи диспергированного пюре, движущегося в направлении оси x (в радиальном направлении). Для описания скорости убыли капли используем уравнение (5). Функцию распределения опишем уравнением

$$\varphi(R) = \frac{const}{p} R \cdot \exp(-pR). \quad (17)$$

Определив постоянную из условия нормировки, можно написать:

$$\varphi(R) = N p^2 R \cdot \exp(-pR). \quad (18)$$

В соответствии с уравнением (4) скорость убыли массы капли равна

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{8\pi R_o \lambda_{np} \Delta T}{r} \exp\left(-\pi^2 \frac{a_{np} \tau}{R_o^2}\right). \quad (19)$$

Подставив функции скорости убыли капли (19) и распределения по размерам (18) в интегральное уравнение (15), получим:

$$q_v = 8\pi \lambda_{np} \Delta T N p \int_0^\infty R R_o \exp(-\pi^2 F_o) \exp(-pR) dR. \quad (20)$$

Положим $R \approx R_o$ и введем средний

радиус \tilde{R} капель $\tilde{R} = \frac{\pi a_{np} \tau}{\ln(\bar{R}^3 / 4I)}^{1/2}$, то-

гда

$$q_v = 8\pi \lambda_{np} \Delta T N p^2 \exp\left(-\pi^2 \frac{a_{np} \tau}{R^2}\right) \int_0^\infty R^2 \exp(-pR) dR. \quad (21)$$

Время пребывания капли при ее движении в направлении оси x равно

$$\tau = \int_0^x \frac{dx}{w(x)} \approx \frac{x}{w_0}. \quad (22)$$

Подставив значение τ и выполнив интегрирование, из выражения (21) имеем:

$$q_v = 8\pi \lambda_{np} \Delta T N \bar{R} \exp\left(-\pi^2 \frac{a_{np} x}{\tilde{R}^2 w_0}\right). \quad (23)$$

В последнем уравнении содержатся три определенных различным образом средних радиуса капель: \bar{R} , \tilde{R} , \bar{R}_{03} . Заменим \bar{R} и \tilde{R} средним объемным радиусом \bar{R}_{03} , учитывая, что \bar{R} , \tilde{R} и \bar{R}_{03} являются величинами одного порядка. В результате для локальной объемной плотности тепловыделения получаем формулу

$$q_v = 6 \frac{\lambda_{np} \Delta T c_x}{\bar{R}_{03}^2 \rho_{np}} \exp\left(-\pi^2 \frac{a_{np} x}{\bar{R}_{03}^2 w_0}\right), \quad (24)$$

или в безразмерных величинах

$$\Pi_q = 6 \frac{\lambda_{np} \Delta T}{r \rho_{np} w_0 \bar{R}_{03}} C_x \exp(-\pi^2 P e_{03np}^{-1} X). \quad (25)$$

Интегрируя последнее уравнение в пределах от 0 до X , получаем:

$$\int_0^X \Pi_q C_x^{-1} dX = \frac{6}{\pi^2} \frac{1}{K} [1 - \exp(-\pi^2 P e_{03np}^{-1} X)]. \quad (26)$$

Последнее уравнение определяет суммарное тепловыделение на участке 0- X . Его безразмерная величина согласно (26)

равна $\frac{6}{\pi^2} \frac{1}{K}$ при $X \rightarrow \infty$. При $X = 0$ тепловыделение равно нулю.

При $K \gg 1$ ($P \approx 1$, $R \approx R_o$) уравнение непрерывной скорости убыли капли (26) можно представить в виде

$$\frac{dM_{кан}}{d\tau} = 2\pi^3 a_{np} \rho_{np} R F(K, \theta), \quad (27)$$

где

$$F(K, \theta) = \left[\left(\sqrt[3]{\frac{K+1}{K}} - 1 \right) \left(\sqrt[3]{\frac{K+1}{K+1+\theta}} - 1 \right) \right] / \left(\sqrt[3]{\frac{K+1}{K+1+\theta}} - 1 \right).$$

В безразмерной записи уравнение (27) имеет следующий вид:

$$\frac{dY_{кан}}{dX} = A_0 U^{-1} Y^{\frac{1}{3}} F(K, \theta). \quad (28)$$

Уравнения скорости охлаждения капли (28) позволяют определить температуру и скорость капель в текущем сечении струи.

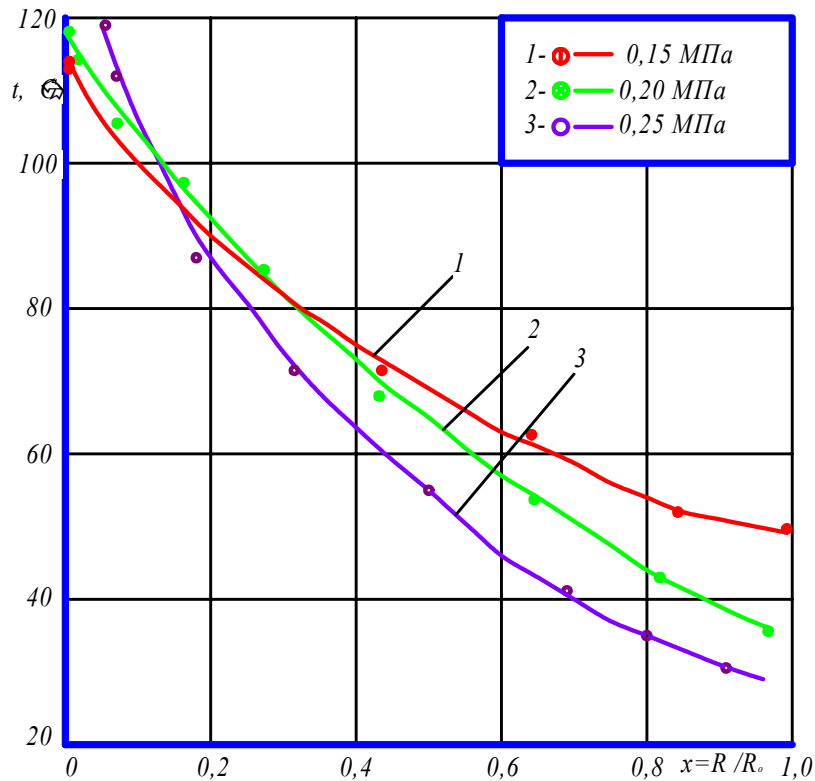


Рис. Зависимость изменения температуры диспергированных капель абрикосового пюре от безразмерной координаты $x = R / R_0$

Исследования проводились при истечении фруктовых и овощных пюре через сопловую форсунку в вакуум-камеру [1, 2]. Форсунка устанавливалась в верхней крышке в вакуум-камеры диаметром 500 мм и высотой 800 мм. Использовались форсунки с диаметром сопла 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0 мм. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал хорошую сходимость (рис.). Полученное уравнение скорости охлаждения капли (28) позволяет определить температуру диспергированных капель пюре и массовую долю испаренной из пюре влаги. Это является важным моментом не только при выборе рационального температурного режима, но и качества получаемого пюреобразного концентрата.

Условные обозначения:

Q – теплота, кДж; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; ρ_n, ρ_{np} – плотность пара и пюре, кг/м³; R, R_0, R_k – текущий, начальный и конечный радиус капли пюре, м; $q_{zp} = r\rho_{np} dR/dt$ – плотность теплового потока, кДж/(м²·с); τ – время, с; λ_{np} – коэффициент теплопроводности пюре, Вт/(м·К); T – сред-

немассовая температура убывающей капли пюре, К; T_0 – начальная температура капли пюре, К; $\Delta T = T_u - T_0$; T_u – температура испарения влаги из капли пюре, К; $P = R / R_0$; $\varepsilon_i = i\pi$; $Fo = a_{np}\tau / R^2$ – число Фурье; a_{np} – коэффициент теплопроводности пюре, м²/с; $K = r / [c_{np}(T_u - T_0)]$, $\Theta = (T_u - T) / (T_u - T_0)$, $\Delta P_k = (R_k - R_0) / R_0$ – безразмерные переменные; $dR / d\tau = w(R)$ – линейная скорость убыли единичной капли пюре, м/с; $\varphi(R) = dn / dR$ – дифференциальная функция распределения капель по размерам, м⁻⁴; dn – счетная концентрация капель данной фракции ($R, R + dR$); V – объем, м³; q_v – объемная интенсивность тепловыделения, Вт/м³; w – линейная скорость полета капли пюре, м/с; $p = 2 / \bar{R}$; \bar{R} – средний арифметический радиус, м; $N = 4c_x / 3\pi\rho_{np}\bar{R}_{03}^3$ – локальное значение суммарной счетной концентрации капель всех размеров; c_x – локальная концентрация пюре в паре, кг/м³; \bar{R}_{03} – средний объемный радиус капель

пюре, м; $I = \int_0^{\infty} R^2 \exp(-\frac{\pi^2 a_{np} \tau}{R^2} - pR) dR$;

$C_x = c_x / \rho_{np}$; $\Pi_q = q_v \bar{R}_{03} / r \rho_{np} w_o$;

$A_\theta = 1,5\pi^2 / Pe_{03np}$; $U = w / w_o$;

$dM_{кан} / d\tau = wdM_{кан} / dx$; $X = x / \bar{R}_{03}$;

$Y = M / M_o$; c_{np} – изобарная теплоем-

кость пюре, Дж/(кг·К); $Pe_{03np} = w_o \bar{R}_{03} / a_{np}$

– число Пекле; a_{np} – коэффициент тем-

пературопроводности пюре, м²/с;

$M_{кан}$ – масса капли пюре, кг; $Q_{конц}$ – те-

плота концентрирования, кДж; $Q_{пот}$ – по-

тери теплоты в окружающую среду, кДж.

Библиографический список

1. Вертяков Ф.Н. Новая технология производства пюреобразных фруктовых

концентратов / Ф.Н. Вертяков, А.Н. Остриков, Г.О. Магомедов // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Потребительский рынок: качество и безопасность товаров и услуг» / Орловский гос. технич. ун-т. – Орел: ОрелГТУ, 2007. – С. 467-468.

2. Остриков А.Н. Определение дисперсных характеристик при распыливании фруктовых и овощных пюре / А.Н. Остриков, Ф.Н. Вертяков // Известия вузов. Пищевая технология. – 2008. – № 2-3. – С. 76-78.

3. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

4. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.



УДК 631.362:6.621.365.46

И.А. Худонов

ТЕОРИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАК ОСНОВА РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ МЕТОДОВ ИК-ЭНЕРГОПОДВОДА В ТЕХНОЛОГИИ ОЗДОРОВИТЕЛЬНОГО ЧАЯ

Ключевые

слова: ИК-энергоподвод, тепломассообмен, сушка, лекарственные растения, термодинамика, соотношение взаимности Онзагера, поток теплоты, поток влаги, капиллярно пористое тело, ряд Маклорена, нагрев.

В числе основополагающих теоретических исследований особое место занимают работы А.В. Лыкова и его учеников, направленные на выявление особенностей процессов тепломассообмена в материалах при ИК-энергоподводе [1-7].

Сушка и термообработка представляют собой чрезвычайно сложный комплекс явлений, развивающихся как внутри высушиваемого материала, так и в среде сушильной камеры. Указанные явления раз-

виваются не изолированно друг от друга, а в самом тесном взаимодействии. Анализ этих явлений и их влияния одного на другое вскрывает механизм переноса тепла и влаги и позволит использовать ресурсосберегающие методы управления ИК-энергоподводом в процессе переработки лекарственных растений в оздоровительный чай.

Явление переноса энергии и вещества при сушке подчиняется общим закономерностям термодинамики необратимых процессов и является их конкретным проявлением. Поэтому для изучения этих явлений целесообразно применить термодинамику необратимых процессов, которая позволяет в неразрывной связи рассматривать явления переноса вещества и энергии.