

Н.И. Ботошан, М.К. Болога, С.Е. Берзой

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗОМ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

Ранее [1] выполнено моделирование коэффициента теплопроводности биологической среды с целью оптимизации термообработки при выпаривании влаги с учетом предварительного электроплазмолиза сырья. Отмечена особая роль жидкой фракции при тепловой обработке и выведены формулы скорости испарения и эффекта интенсификации в предположении подвода тепла с плоскопараллельных поверхностей нагрева. Аналогичные исследования тепловых полей цилиндрической и сферической симметрий представляют интерес в аспекте аналитического описания тепловых процессов сушки, жарки и варки биологического сырья, поскольку они часто реализуются для биологических продуктов, близких к этим геометрическим формам. Аппроксимация формы позволяет выявлять параметры и устанавливать зависимости эффекта интенсификации и скорости испарения продукта. Уяснение корреляции между геометрическими размерами продукта и режимом подвода тепла представляет также интерес в плане обеспечения энергосберегающих технологий и режимов.

В биологических средах теплопроводность осложняется эндотермическим эффектом поглощения теплоты в объеме сырья. Наличие стоков теплоты постоянной мощности потребления характерно для стационарных стадий обработки биологического сырья. Нестационарная теплопроводность проявляется при переходах между стадиями стационарности нагрева и по длительности составляет менее 10% процесса тепловой обработки. Объемный нагрев происходит до тех пор, пока температурное поле внутри сырья не стабилизируется на уровне заданного этапа стационарности обработки. Отличительная особенность варки, жарки и сушки продукта определенной формы состоит в выравнивании температурного поля в соответствии с температурой поверхности нагрева при сохранении формы аналитической зависимости от координаты.

Термическую обработку можно формально разделить на отдельные процессы, в которых тепловое поле отличается только граничными условиями нагрева и тепловыми характеристиками среды. Ниже проведен анализ термической обработки для различных процессов: сушки с поверхности продукта, конвективной сушки горячим воздухом, выпаривания влаги в объеме сырья, варки, выпаривания влаги в объеме при нагреве сырья в масле, жарки. Аналитическое описание каждой стадии термической обработки позволяет выделить основные характеристики, с помощью которых можно управлять процессом и осуществлять оптимизацию по затратам и эффективности с учетом электроплазмолиза.

Исследование решений уравнения теплопроводности в стационарном режиме проведено на одномерных задачах для плоскопараллельных ломтиков цилиндрической и сферической форм сырья. Параметром формы служит одна размерная величина. Параметрами режима являются температура нагрева и критическая температура фазового перехода жидкость–пар; характеристиками биологической среды – коэффициенты удельной теплопроводности и удельной теплоемкости в случае сушки, а также характеристики капилляров и уровня электроплазмолиза среды. В случае конвективной сушки параметрами процесса выступают температура, плотность и скорость циркуляции воздуха.

Роль электроплазмолиза в тепловой обработке растительных сред. Удельные характеристики процессов переноса заряда электричества, тепла и массы в растительных средах зависят от от-

ношения долей содержания жидкой фракции во внутриклеточных вакуолях и в межклеточном пространстве [2]. Состояние плазмолиза определяется условием перехода всей внутриклеточной жидкости в свободное состояние для переноса, когда клеточная структура среды полностью разрушена. Заметим, что аналитические модели описания удельных кинетических характеристик среды имеют одинаковую зависимость от параметров среды – содержания сухих веществ z и доли свободной жидкой фракции x . Доля внутриклеточной жидкости определяется из условия полноты $y(x, z) = 1 - x - z$. Таким образом, соответствующий относительный удельный кинетический коэффициент растительной среды представляется аналитическим выражением

$$\frac{\sigma(x, z)}{\sigma_L} = \frac{\gamma(1-x) + xz(1-\gamma)}{\gamma(1-x) + z(1-\gamma)},$$

где σ_L – удельный кинетический коэффициент жидкой фракции; $\gamma = \sigma_s / \sigma_L$, где σ_s – удельный кинетический коэффициент сухих веществ среды; под символом $\sigma(x, z)$ подразумевают один из удельных кинетических коэффициентов переноса среды: σ – электропроводности, λ – теплопроводности, D – удельной диффузии. Отметим, что электроплазмолиз также приводит к модификации коэффициента диэлектрической проницаемости ϵ и времени $\tau_M = \epsilon / \sigma$, определяющей релаксацию свободного заряда в среде.

Преобразования растительной среды в результате электроплазмолиза сводятся к переходу внутриклеточной доли жидкой фракции в состояние свободной внутритканевой жидкости – раствор сухих веществ. Таким образом, электроплазмолиз растительной среды, в которой первоначально доля внеклеточной жидкости составляла x_0 , преобразовывает все кинетические характеристики процессов переноса на величину, определенную разностью

$$\frac{\sigma(1-z, z) - \sigma(x_0, z)}{\sigma_L} = \frac{z(1-\gamma)^2(1-x_0-z)}{\gamma(1-x_0) + z(1-\gamma)} \geq 0.$$

Моделирование этой разности для переноса тепла в растительных средах основывается на составном коэффициенте теплопроводности, определяемом удельными характеристиками теплопроводности жидкой фракции λ_L и сухих веществ среды λ_s . Коэффициент удельной теплопроводности жидкой фракции практически одинаков для внутриклеточной и внеклеточной составляющих $\lambda_L = 0,58 \text{ \AA} / (\text{г} \cdot \text{Е})$. Коэффициенты удельной теплопроводности сухих веществ овощей примерно в пять раз меньше λ_L и соответственно равны [3]: для картофеля – $(0,02-0,13) \text{ \AA} / (\text{г} \cdot \text{Е})$, моркови – $0,12$, свеклы – $(0,13-0,36)$ и для томатов – $(0,15-0,19) \text{ \AA} / (\text{г} \cdot \text{Е})$. Коэффициенты удельной теплопроводности сухих веществ фруктов и овощей, высушенных сублимацией до уровня пюре, в сотни раз меньше удельной теплопроводности воды. Например, коэффициенты теплопроводности сред с содержанием влаги 5% равны: виноградное пюре – $(0,029-0,038) \text{ \AA} / (\text{г} \cdot \text{Е})$; вишневое – $(0,030-0,034)$; яблочное – $(0,035-0,037)$; фруктовая смесь – $(0,026-0,034)$; картофельное пюре – $(0,021-0,023) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Эти обстоятельства составляют основу эффективного применения электроплазмолиза перед тепловой обработкой продуктов растениеводства. Предельный эффект интенсификации тепловой обработки достигается, когда параметр γ стремится к нулю:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\sigma(1-z, z) - \sigma(x_0, z)}{\sigma_L} \approx 1 - x_0 - z.$$

Фазовое равновесие при испарении с открытой поверхностью. Аналитическое описание процесса сушки обосновывается условием равновесия молекул воды в различных фазах на границе их раздела. В термодинамическом процессе испарения число частиц N вещества представляет собой независимую переменную, поэтому к экстенсивным (аддитивным) термодинамическим функциям энтальпии, внутренней, свободной и Гиббса энергий добавляют член, пропорциональный числу частиц. Минимуму энергии Гиббса $G(P, T, N)$ соответствует равенство химического потенциала $\mu_s(P, T) = G/N$ обеих фаз – жидкой и газообразной (s – индекс фазы). Двухфазная система жидкость–газ обладает только одной степенью свободы, поэтому равновесное состояние на (P, T) диаграмме будет изображаться кривой сосуществования двух агрегатных состояний воды.

Определяемый в переменных P и T химический потенциал служит для описания равновесного состояния и вывода кривой равновесия $P_S = P(T)$, точки которой показывают, при каких значениях P и T вода может существовать одновременно в двух агрегатных состояниях – жидкости и пара.

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса определяет для равновесия между фазами зависимость теплоты испарения от температуры, изменение объема при фазовом переходе и производную давления по температуре $Q = T \Delta V \frac{dP_S}{dT}$. Экспериментальные точки [4] этой кривой в различных интервалах по температуре ложатся на параболы, представленных аналитическими формулами и рис. 1–3.

$$P_S = (1,17t^2 - 14,67t + 62,28)10^{-4} \hat{e} \tilde{A} / \hat{m}^2, 0 \leq t \leq 100^\circ \text{C},$$

$$P_S = (1,44t^2 - 282,69t + 14938,2)10^{-3} \hat{e} \tilde{A} / \hat{m}^2, 100 \leq t \leq 200^\circ \text{C},$$

$$P_S = (6,2t^2 - 2357,99t + 239286,66)10^{-3} \hat{e} \tilde{A} / \hat{m}^2, 200 \leq t \leq 374^\circ \text{C}.$$

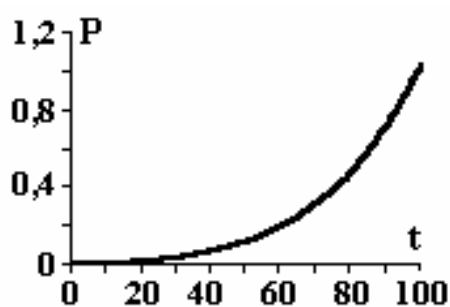


Рис. 1

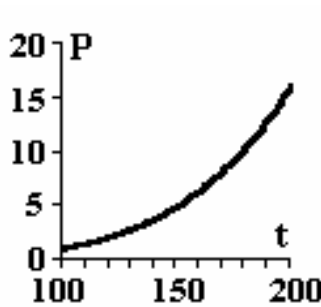


Рис. 2

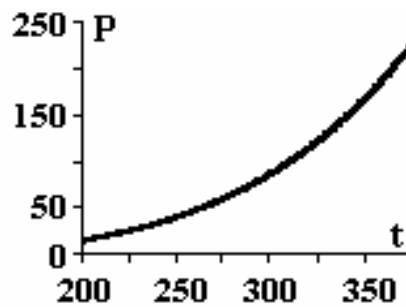


Рис. 3

Здесь t – температура по шкале Цельсия. Интервальная интерполяция кривой равновесия выполняется с точностью отклонения, не превышающего 1%, притом интервалы по температуре могут быть любыми, не превышающими 200 градусов ширины.

Таким образом, вследствие испарения жидкости при заданной температуре парциальное давление пара может возрасти только до предела, определенного давлением насыщенного пара согласно кривой равновесия $P_S = P(T)$. Присутствие паров воды в воздухе определяется влажностью (отношением массы водяного пара к объему). Унос паров воды из объема создает условия для поверхностного испарения, которое зависит от свойств жидкости и структуры поверхности. Для растительных сред особенно важны структура капиллярности поверхности и вязкость жидкости, зависящие явно от уровня электроплазмолиза.

В отличие от испарения с открытой поверхности свободной жидкости сушка характеризуется своеобразным парообразованием с поверхности сырья. Для сушки биологического продукта плоской формы толщиной d скорость распространения теплового потока внутри сырья a определяется его теплопроводностью $\lambda(x, z)$, разностью температур поверхности нагрева T_0 и центральной части ломтика T_c и выражается формулой [1]:

$$a = \frac{8\lambda(T_0 - T_c)}{q\rho d^2},$$

где q – удельная теплота испарения, ρ – плотность сырья.

При переходе жидкости в пар молекулы воды преодолевают силы молекулярного сцепления в жидкости. Работа выхода, а также преодоление внешнего давления уже образовавшегося пара совершаются за счет кинетической энергии теплового движения молекул. Поэтому для протекания процесса испарения при постоянной температуре необходимо подвести определенное количество теплоты, иначе жидкость будет охлаждаться.

Срезы и поверхности биологических сред представляют собой пористые структуры, пронизанные большим числом капилляров. Массоперенос в такой среде зависит от уровня электроплазмолиза через коэффициент удельной диффузии $D(x, z)$. Следовательно, чем больше поверхность суши, тем эффективнее испарение с учетом огромного числа капилляров для переноса жидкости к по-

верхности. При сушке давление пара у входа в капиллярах пористого вещества приравнивается к давлению жидкости в капилляре:

$$P_g - \frac{\rho_b v^2}{2} = P_l + \frac{2\sigma_N \cos \alpha_N}{r},$$

где P_g и P_l – давления в газовой и жидкой фазах, ρ_b – плотность воздуха, v – скорость конвективного потока, σ_N – поверхностное натяжение жидкости, r – радиус капилляра, α_N – краевой угол смачивания на границе вода–капилляр.

Согласно эффекту Джоуля-Томсона для газа Ван-дер-Ваальса у поверхности образца биологического сырья, подверженного сушке, разность температур пара в капилляре и на поверхности образца в жидкости при термическом равновесии составляет:

$$T_g - T_l = \left(\frac{2\alpha}{RT_l} - \beta \right) \frac{P_g - P_l}{C_p} = \frac{0,424}{C_p} \left(\frac{2\sigma_N \cos \alpha_N}{r} + \frac{\rho_b v^2}{2} \right),$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении. Постоянные Ван-дер-Ваальса для водяного пара соответственно равны: $\alpha = 5,65 \text{ ат}^* \text{м}^6 / \text{кмоль}^2$, $\beta = 0,031 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$ и $R = 8,314 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$. Расчет проведен для комнатной температуры.

Фактически в каждом капилляре поверхности сырья происходит испарение, определенное подводом жидкости к поверхности силами поверхностного натяжения и конвективным всасыванием. В случае конвективной сушки горячим воздухом также следует учитывать разность температур, определенную внешней температурой нагрева жидкости с поверхности сырья, заменяя $T_0 - T_c = (T_g - T_l) + (T_l - T_c)$, где T_l – температура жидкой фазы у поверхности сырья.

Стоки тепловой энергии при обработке биологического сырья. Предположив, что коэффициент теплопроводности после электроплазмолиза $\lambda(x, z)$, изучение процесса нагрева можно разделить на этапы стационарности, когда температурное поле нагрева среды зависит от параметра q_v / λ , определяющего градиент температуры в установившемся режиме нагрева на единицу длины нагреваемой области. Характеристиками этапов стационарности процесса являются различные стоки тепла q_v , описываемые физическим параметром каждого этапа нагрева в отдельности: нагрев, варка, выпаривание и жарка биологических сред. Здесь рассмотрены случаи описания процесса нагрева путем решения одномерного уравнения теплопроводности с граничными условиями для простейших геометрических форм среды – плоской, цилиндрической или шаровой. Такой подход позволяет изящно оптимизировать исследуемый процесс по режиму нагрева и геометрическому, размерному параметру нагреваемой среды. С другой стороны, этапное описание температурного поля позволяет рассматривать классические процессы термообработки: сушки, варки и жарки биологических сред определенных геометрических форм. Наиболее интересными являются формы ломтика плоскопараллельного среза, цилиндра, полого цилиндра и шара. На различных этапах теплового процесса обработки температурные поля для этих геометрических форм обладают единой зависимостью от размерного параметра. Отличие заключено только в параметре описания стоков q_v / λ , который содержит характерные тепловые характеристики этапа, уровня электроплазмолиза и скорости процессов.

Стадии процесса термообработки биологического сырья в стационарном режиме, определенные стоками тепла и температурой, разделяют процесс на этапы по аналитическому виду описания параметра поглощения тепла. Например, на стадии нагрева сырья величина q_v определяет поглощаемую средой плотности ρ_m и теплоемкости C_m тепловую энергию $q_v = -C_m \rho_m b_m (T_c - T_m)$, где T_c – температура кипения воды, T_m – начальная температура среды. Параметр b_m определяет среднюю скорость нагрева среды, измеряемую в единицах обратного времени s^{-1} . На стадии объемного испарения влаги $q_v = -q \rho a$, где a – величина, определяющая скорость испарения влаги в объеме сырья [1].

Стадия нагрева сырья после выпаривания влаги определяется модифицированным стоком $q_v = -C_n \rho_n b_n (T_0 - T_c)$, где ρ_n и C_n – плотность и теплоемкость обезвоженного сырья. Величина b_n определяет скорость нагрева на стадии обезвоживания сырья.

При жарке сырья следует определить и стадию нагрева, когда происходит термическое преобразование характеристик биологической среды (коагуляция, свертывание): $q_v = -q_k \rho_k a_k$, где q_k , ρ_k и a_k – величины, аналогичные стадии испарения влаги, относящиеся к термическому преобразованию белковой массы сырья.

Таким образом, изучение процесса термической обработки биологического сырья допускает аналитическую, стадийную интерпретацию, позволяющую вывести критерии эффективности теплового процесса и оптимизировать процесс по уровню минимальных потерь тепла. При этом имеет общий характер зависимости температурного поля от координаты, присущий всем стадиям стационарности.

Температурное поле цилиндра. Уравнение теплопроводности для цилиндра с постоянным, изотропным коэффициентом теплопроводности имеет вид

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{dT}{r dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0,$$

где q_v – объемная плотность тепловой энергии, поглощаемая стоками при испарении в объеме влагонесущей среды: $q_v = -q \rho a$, где ρ – плотность жидкости, a – скорость изменения долевой части жидкой фракции среды. Предполагая q_v / λ постоянной в объеме цилиндра (однородная среда), запишем решение для температурного поля $T(r)$ и потока тепла $\Phi(r)$ в виде

$$T(r) = -\frac{q_v r^2}{4\lambda} + C_1 \ln r + C_2, \quad \Phi(r) = -\lambda \left(-\frac{q_v r}{2\lambda} + \frac{C_1}{r} \right).$$

Температурное поле и тепловой поток одинаковы по величине на изотермических поверхностях цилиндрической формы (зависимость от одной координаты r). Тепловой поток равен нулю на поверхности $r = r_s$, если константа C_1 определена соотношением $C_1 = \frac{q_v r_s^2}{2\lambda}$. Температура поверхности нулевого потока $\Phi(r_s) = 0$ определяется формулой

$$T_s = -\frac{q_v r_s^2}{4\lambda} + \frac{q_v r_s^2}{2\lambda} \ln r_s + C_2.$$

Следовательно, температурное поле цилиндра можно выразить уравнением

$$T(r) = T_s - \frac{q_v}{4\lambda} (r^2 - r_s^2) + \frac{q_v r_s^2}{2\lambda} \ln \frac{r}{r_s}.$$

Температура на поверхности цилиндра равна температуре нагрева T_0 , поэтому

$$T_0 - T_s = -\frac{q_v r_0^2}{4\lambda} (1 - \gamma^2 + \gamma^2 \ln \gamma^2), \quad \text{где } \gamma = \frac{r_s}{r_0}.$$

Добьемся, чтобы изотермическая поверхность нулевого потока $\Phi(r_s) = 0$ совпала с осью симметрии цилиндра $r_s = 0$. Тогда температура на оси цилиндра определится соотношением

$T_s = T_0 + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda}$, а температурное поле цилиндра для оптимального режима нагрева примет вид

$$T(r) = T_0 + \frac{q_v}{4\lambda} (r_0^2 - r^2).$$

Идеальное согласование температуры нагрева T_0 сырья цилиндрического вида с размерной характеристикой радиуса цилиндра r_0 будет только в том случае, если температура на оси цилиндра

будет равна нулю. Таким образом, между температурой нагрева и размером цилиндрической формы сырья при сушке, жарке или нагреве в стационарном режиме существует согласование $T_0 = qv r_0^2 / 4\lambda$. Другими словами, режим испарения влаги внутри объема цилиндрической формы определен основным параметром режима нагрева T_0 , размером цилиндра r_0 и тепловыми характеристиками сырья ρ , $\lambda(x, z)$ и q : $a = 4\lambda T_0 / \rho q$.

Если рассматривать случай, когда поток тепла на поверхности $r = r_s$ предполагается отличным от нуля ($\Phi(r_s) = \Phi_s$), тогда $C_1 = q_v r_s^2 / 2\lambda - r_s \Phi_s$. Аналогично можно ввести температуру изотермической поверхности $T_s = -\frac{q_v r_s^2}{4\lambda} + \frac{q_v r_s^2}{2\lambda} \ln r_s - r_s \Phi_s \ln r_s + C_2$, и тогда для температурного поля цилиндра получаем выражение

$$T(r) = T_s - \frac{q_v}{4\lambda} (r^2 - r_s^2) + \left(\frac{q_v r_s^2}{2\lambda} - r_s \Phi_s \right) \ln \frac{r}{r_s}.$$

Температура на поверхности нагрева, согласно этой формуле, зависит от параметров произвольной точки поверхности $r = r_s$ и потока на ней:

$$T_0 = T_s - \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} (1 - \gamma^2) - \left(\frac{q_v \gamma r_0^2}{2\lambda} - r_0 \Phi_s \right) \gamma \ln \gamma.$$

В пределе, когда произвольная поверхность $r = r_s$ совпадает с осью цилиндра, температура на оси зависит только от температуры нагрева и радиуса цилиндра через характеристики стоков поглощения тепла и коэффициент теплопроводности среды и выражается соотношением $T_s = T_0 + q_v r_0^2 / 4\lambda$. Характерно, что в этой формуле не содержится зависимость от значения потока тепла на оси.

В отсутствие стоков тепла ($q_v = 0$), например при жарке сырья в масле, когда внутренняя влага уже испарилась, температура поверхности ($r = r_s$) приравнивается к температуре нагрева T_0 . Требование, чтобы поверхность r_s совпала с центром цилиндра, приводит к известному выражению для температурного поля цилиндра.

Отдельный интерес представляет нагрев цилиндрических трубок, чему соответствует варка трубчатых макарон или жарка и выпечка булочных изделий в форме полого цилиндра. В этом случае очевидное требование $T_s = T_0$ приводит к соотношению для потока

$$\Phi_s = \frac{q_v r_s}{2\lambda} - \frac{q_v (r_0^2 - r_s^2)}{4\lambda r_s \ln(r_0 / r_s)}.$$

Температурное поле полого цилиндра определяется соотношением

$$T(r) = T_0 - \frac{q_v}{4\lambda} (r^2 - r_s^2) + \frac{q_v}{4\lambda} (r_0^2 - r_s^2) \ln \frac{r}{r_s} / \ln \frac{r_0}{r_s}.$$

Температура принимает минимальное значение на изотермической поверхности:

$$r = r_m = \sqrt{\frac{r_0^2 - r_s^2}{\ln \left(\frac{r_0}{r_s} \right)^2}} = r_s \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\ln \gamma^2}}, \text{ где } \gamma = \frac{r_0}{r_s}, \text{ равное } T_m = T_0 - \frac{q_v}{4\lambda} \left(r_m^2 - r_s^2 - r_m^2 \ln \left(\frac{r_m}{r_s} \right)^2 \right).$$

Температурное поле биологического сырья сферической формы. Температурное поле и тепловой поток в сырье сферической формы определяются решением стационарного уравнения Фурье со сферической симметрией на различных этапах нагрева. Уравнение теплопроводности для изотропного шара, среда которого удовлетворяет условию однородности тепловых коэффициентов теплопроводности и удельной теплоты источников, имеет вид

$$\frac{d^2(RT)}{RdR^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0.$$

Уравнение температурного поля $T(R)$ и теплового потока $\Phi(R)$ определяется формулами

$$T(R) = -\frac{q_v R^2}{6\lambda} + C_1 + \frac{C_2}{R}, \quad \Phi(R) = \lambda \left(\frac{q_v R}{3\lambda} + \frac{C_2}{R^2} \right).$$

Изотермическая поверхность нулевого потока $\Phi(R_s) = 0$ определяется выбором константы интегрирования $C_2 = -\frac{q_v R_s^3}{3\lambda}$.

В результате формула температурного поля шара принимает вид

$$T(R) = -\frac{q_v R^2}{6\lambda} + C_1 - \frac{q_v R_s^3}{3\lambda R}.$$

Температура поверхности нулевого потока позволяет определить первую константу интегрирования:

$$T_s = -\frac{q_v R_s^2}{2\lambda} + C_1.$$

Температурное поле шара можно выразить формулой

$$T(R) = T_s + \frac{q_v R_s^2}{2\lambda} - \frac{q_v R^2}{6\lambda} - \frac{q_v R_s^3}{3\lambda R}.$$

Температура на поверхности сферы взаимосвязана с температурой изотермической поверхности нулевого потока соотношением

$$T_0 = T_s + \frac{q_v}{6\lambda R_0} (3R_s^2 R_0 - R_0^3 - 2R_s^3).$$

Температурное поле зависит от координат изоповерхностей нагрева и нулевого потока следующим образом:

$$T(R) = T_0 + \frac{q_v R_0^2}{6\lambda} \left(1 - \frac{R^2}{R_0^2} \right) - \frac{q_v R_s^3}{3\lambda R} \left(1 - \frac{R}{R_0} \right).$$

Когда процесс тепловой обработки проводится для образца сферической формы, тогда обеспечение оптимального режима требует выполнения условия $T(R_{\min}) = 0$, которое приводит к необходимости соблюдения критериев нагрева при сушке:

$$T_0 = -\frac{q_v R_0^2}{6\lambda} \quad \text{— для сырья без косточки и}$$

$$T_0 = \frac{q_v R_0^2}{6\lambda} \left(-1 + 3 \frac{R_s^2}{R_0^2} - 2 \frac{R_s^2}{R_0^2} \right) - \text{для сырья с косточкой радиусом } R_s.$$

Температура нагрева для сушки равна нулю, если $R_s = R_0$, что соответствует отсутствию массы для нагрева. Поэтому интенсификация нагрева и понижение температурного градиента зависят от толщины слоя, подверженного тепловой обработке $\delta = R_0 - R_s$. Согласование температуры нагрева T_0 с толщиной слоя δ является принципиально важным для получения высококачественных продуктов при сушке. В самом распространенном случае сушки, когда испарение происходит в полном объеме, следует учитывать свойства капилляров биологического сырья.

Таким образом, изучение процессов тепловой обработки биологических сред, основанное на стационарном решении уравнения теплопроводности со стоками тепла, позволяет оптимизировать этапы нагрева и вывести критерии, связывающие режим нагрева с размерными параметрами геометрии формы сырья [1]. Фактически эволюция этапов тепловой обработки должна описываться сложными изменениями во времени как теплового поля и потока тепла, так и внутренними стоками тепла. Поэтапное дробление процесса термообработки позволяет судить об установившихся параметрах нагрева на этапах обработки и вывести полезные критерии. Например, в случае варки биологического сырья температура нагрева всегда ниже 100°C , что указывает на ее пониженное значение внутри сырья по сравнению с температурой кипения.

Основным аспектом управления тепловой обработкой растительного сырья является моделирование коэффициента переноса тепла $\lambda(x, z)$ электроплазмолизом. Моделированию кинетических характеристик процессов переноса электроплазмолизом клеток сырья посвящена статья [2]. Смоделированные коэффициенты электропроводности $\sigma(x, z)$, теплопроводности $\lambda(x, z)$, удельной диффузии $D(x, z)$ биологических сред позволяют оценить длительность этапов термообработки, интенсификация которых предопределяет экономию тепловой энергии и повышение качества готового продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е. Интенсификация теплообмена в биологической среде электроплазмолизом // *Электронная обработка материалов*. 2005. № 1. С. 68–75.
2. Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е. Модель описания электроплазмолиза двухкомпонентного биологического сырья // *Электронная обработка материалов*. 2005. № 2. С. 64–68.
3. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
4. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Поступила 10.10.06

Summary

Intensification and optimization of heat treating (drying, cooking, evaporation, and frying) of vegetal raw materials by simulation of specific heat conductance coefficient and dividing the process of treatment into steady phases are considered. Three main models of one dimensional equation of heat conduction in the presence of drainages of heat energy, depending on time, are investigated. Optimization for heat loss level is carried out. Relationships between mode of heating, geometrical parameters and the level of electroplasmolysis of biological raw material are found. To simplify analysis we consider the simplest geometrical forms of raw materials (plate, cylinder, and ball). This approach makes it possible to optimize stages of the process for mode of heating, geometrical, dimensional parameter and level of electroplasmolysis of treated medium.