

К вопросу влияния оболочки (кожуры) картофеля на массоперенос при нагреве ЭМЭ поля СВЧ

Вороненко Б.А., Клоков Ю. В., Гоппе Д.А.

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий,
факультет пищевой инженерии и автоматизации,
кафедра ТММП; valdurtera@rambler.ru

Для решения задачи внутреннего массопереноса при нагреве картофеля электромагнитной энергией (ЭМЭ) поля СВЧ экспериментально получена кинетика процесса удаления влаги, характеризующая влияние оболочки (кожуры) на продолжительность процесса и потери массы картофеля. Показано на фотографиях распределение влаги под действием гравитационной силы.

Ключевые слова: оболочка, массоперенос, влаго- и термовлагопроводность, электромагнитная энергия, сверхвысокая частота, удаление влаги, кинетика, гравитационная сила.

Пищевые продукты, как объекты нагрева, рассматриваются как однородные изотропные капиллярно-пористые тела без оболочки или с оболочкой. Известные оболочки природные в виде кожи у водного, кожуры у земного пищевого сырья или аналогичные природным, которые, не являясь абсолютно непроницаемыми, обладают массоизоляционными свойствами.

Картофель согласно структуре потребления продуктов питания [1] относится к углеводсодержащему пищевому сырью, которое нагревают без кожуры (оболочки) или с кожурой (оболочкой) для производства в отварном, обжаренном или выпечном виде. Химический состав картофеля [2]: вода (влажность до 81%), водорастворимые (крахмал до 18% и др.) и неводорастворимые (калий до 570 мг в 100г и др.) элементы.

Известен [3] нагрев картофеля паром (бланширование), при котором создается значительный перепад температур ($t_n \gg t_u$) и имеет место перемещение жидкости совместно с витамином С из кожуры (оболочки) к центру продукта. В [4] подобные результаты получены при диссипации электромагнитной энергии поля высоких частот (ЭМЭ поля ВЧ) — интенсивном нагреве. Последующее охлаждение поверхности ($t_n \ll t_u$) создает ∇t , направленный к центру,

вследствие чего происходит перемещение жидкости с водорастворимыми веществами от центра к поверхности термовлагопроводностью (q_{mi}).

Для разработки комбинированного способа выпекания картофеля была проведена научно-исследовательская работа на 1-м этапе, согласно которой поставлена задача совместного тепломассопереноса физической и соответствующей математической модели процесса диссипации ЭМЭ поля СВЧ в [5], являющейся по отношению к ЭМЭ поля ВЧ-высокоинтенсивным нагревом.

Решение поставленной в [5] задачи определило 2-й этап — экспериментальные исследования — с учетом затухания энергии электромагнитной волны (ЭМВ) по экспоненциальному закону, что позволяет изменить процесс «ВЧ-нагрев-охлаждение» на процесс «СВЧ-нагрев».

Объект исследования — модели картофеля без оболочки и с оболочкой влажностью $W_o = 79,5\%$, сферической формы радиусом согласно глубине проникновения ЭМП ($R = [1 / (1,33 \pi)] \lambda_o (\sqrt{\varepsilon' / \varepsilon''})$ [6]), $R = 14 \cdot 10^{-3}$ м. Источник нагрева — ЭМЭ поля СВЧ с частотой СВЧ-генератора $f = 2,4 \cdot 10^9$ Гц, максимальной удельной мощностью, исключая образование каверн, $U_{y\partial} = 1,8 \cdot 10^6$ Вт/м³.

По результатам опытных данных для модели картофеля с влажосодержанием $u(r, \tau)$ без и с оболочкой получены:

1. кинетика процесса удаления влаги:

- изменение среднего влажосодержания $u(\tau)$ (показано на рис.1), что подтверждает результаты [7],
- скорости удаления влаги $du/d\tau$ (показано на рис. 2), что соответствует результатам [8];

2. динамика процесса удаления влаги (распределение влажосодержания по объему) — фотографии:

- модель картофеля без оболочки $u(r, \tau)$ (рис. 3) (коэффициент линейного подобия $l_R = R_{mk} / R_{po} = 1$),
- модель картофеля с оболочкой $u(r, \tau)$ (рис. 4).

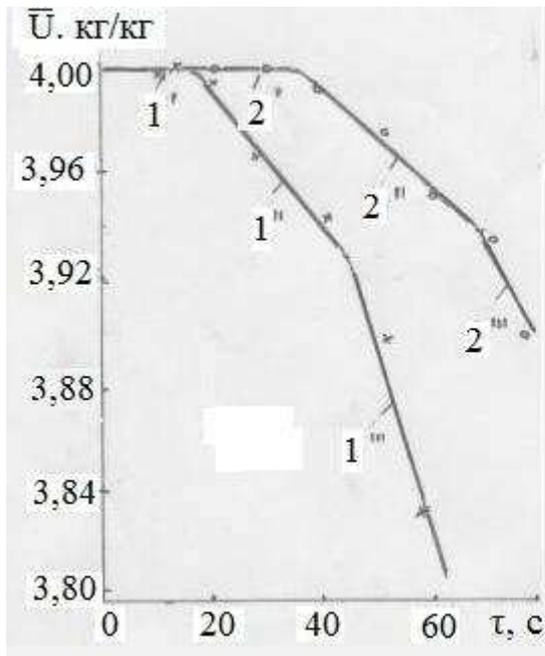


Рис. 1. $u(\tau)$

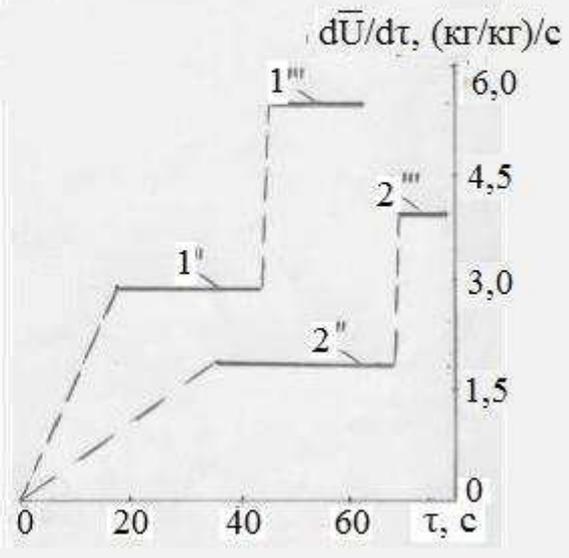


Рис. 2. $du/d\tau = f(\tau)$

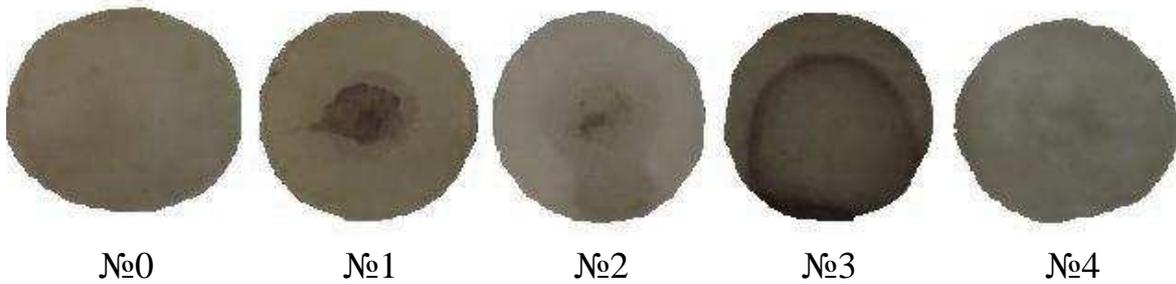


Рис. 3. $u(r, \tau)$

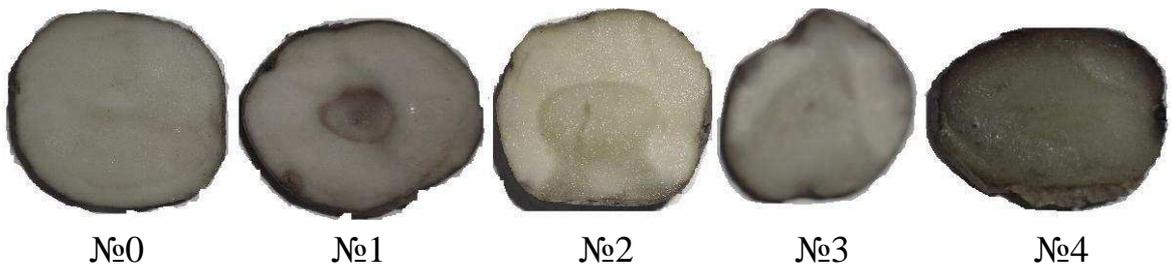


Рис. 4. $u(r, \tau)$

Для модели картофеля без оболочки удаление влаги $u(\tau)$ показано на рис. 1 (1' — стадия прогрева, 1'' — стадия постоянной скорости, 1''' — стадия возросшей (2-й постоянной) скорости), скорость удаления влаги $du/d\tau$ на рис. 2 (1'' — стадия постоянной скорости, 1''' — стадия возросшей (2-й постоянной) скорости), а с оболочкой $u(\tau)$ на рис. 1 (2' — стадия прогрева, 2'' — стадия постоянной скорости, 2''' — стадия возросшей (2-й постоянной) скорости), $du/d\tau$ на рис. 2 (2'' — стадия постоянной скорости, 2''' — стадия возросшей (2-й постоян-

ной) скорости). Эти закономерности кинетики процесса характеризуются прямыми, которые можно рассматривать как необходимое условие существования стадии постоянной скорости удаления влаги [3].

Оболочка, являясь массоизоляцией, препятствует удалению влаги, что характеризуется уменьшением скорости удаления влаги (рис. 2, кривые 1, 2), а на распределение влаги по объему, показанное на фотографиях (рис.3, 4), существенное влияние оказывает гравитационная сила, независимо от того, имеется оболочка или нет [9].

Распределение влаги в модели картофеля перед началом нагрева показано на фотографии №0. Окончание стадии прогрева за счет затухания ЭМВ поля СВЧ по экспоненте характеризуется значительным перепадом температуры ($t_n \ll t_u$), что приводит к превалированию влагопроводности над термовлагопроводностью ($q_m \gg q_{mt}$), способствующим направлению потока влаги с водорастворимыми веществами к центру, увеличивая их концентрацию в центральной области модели объекта (фото №1) и подтверждает выводы [10]. Аналогичный результат показан на фотографии в [4].

На стадии линейной зависимости («постоянной» скорости) удаления влаги перепад температуры уменьшается ($t_n < t_u$) и перемещение влаги в нижнюю область модели объекта (фото №1 — начало стадии, фото №2 — средняя часть стадии, фото №3 — окончание стадии), а из нижней области на нижнюю поверхность (фото №5), определяет гравитационная сила (показано на рис. 5).

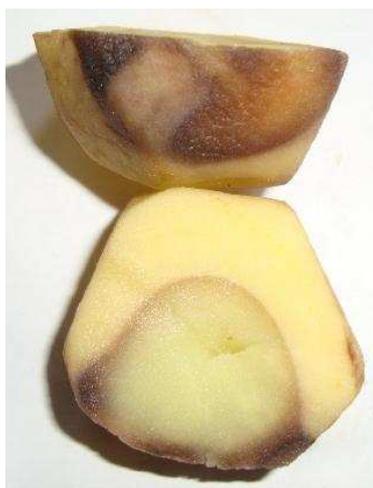


Рис. 5. распределение влагосодержания между состояниями, изображенными на фотографиях №2 и №3.

На стадии возросшей (2-й «постоянной») скорости удаления влаги перепад температуры уменьшается, но превалирование влагопроводности (q_m), определяемой градиентом влагосодержания ∇u , над термовлагопроводностью (q_{mt}),

определяемой градиентом температуры ∇t , и переносом жидкости под действием гравитационной силы, вызывающей поток влаги q_{mg} , сохраняется; поэтому поток влаги (q_m) направлен к верхней области модели объекта (фото №3 — начало стадии, фото №4 — окончание стадии), что приводит к равномерному распределению влаги по поверхностному слою.

Определяющий параметр окончания процесса диссипации ЭМЭ поля СВЧ в модели картофеля — температура кулинарной готовности продуктов питания ($t \approx 82^\circ\text{C}$) [11].

Полученные опытным путем результаты определяют необходимость проведения биохимических исследований химического состава влаги с водорастворимыми веществами в центральной области картофеля для принятия процесса нагрева картофеля с оболочкой или без нее в приготовлении комбинированного способа выпекания картофеля и выяснения причин возникновения стадии возросшей (2-й постоянной) скорости удаления влаги, показанной в [8].

Выводы

1. Процесс «СВЧ-нагрев» по сравнению с процессом «ВЧ-нагрев-охлаждение» является более рациональным в связи с отсутствием энергозатрат на стадию «охлаждение».
2. Диссипация электромагнитной энергии не влияет на продолжительность нагрева продукта с оболочкой или без нее.
3. Появление стадии возросшей скорости удаления влаги можно объяснить изменением пористости материала и замены молекулярного уровня переноса массы вещества более интенсивным — молярным.

Список литературы

1. Клоков Ю.В., Доценко В.А., Орлов В.В. Пищевая индустрия Федерального округа // Пищевая промышленность, 2001, № 6. — С. 22–24.
2. Химический состав пищевых продуктов //Под ред. Скурихина И.М., Волгарева М.Н. М.: Агропромиздат, 1987. — 359 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.
4. Максимов Г.А. Исследование процессов тепло- и массообмена при внутреннем источнике тепла. Автореф. дис. д.т.н. — М.: МТИПП, 1956. — 28 с.
5. Вороненко Б.А., Клоков Ю.В., Гоппе Д.А. Постановка задачи совместного тепломассопереноса при выпекании картофеля с использованием энергии электромагнитного поля СВЧ [Электронный ресурс]: Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств» ГОУ ВПО «Санкт-

Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. — Электрон.журнал — Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2010, № 5. — март 2010.

6. Клоков Ю.В. Теория удаления влаги. 2. О нагреве пищевых продуктов в ЭМП СВЧ «объемно» // Хранение и переработка сельхозсырья, № 7. 2003. — С. 29–31.
7. Стариков В.В. Интенсификация процесса копчения мясных колбасных продуктов на основе математического моделирования. Автореф. дис. к.т.н. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. — 15с.
8. Клоков Ю.В., Остапенков А.М., Гинзбург А.С. Сушка в электромагнитном поле// Известия вузов, «Пищевая технология», Краснодар, №5, 1987. — С. 76–79.
9. Арс Алиев Р.З., Романков П.Г., Медведев А.А. Об уравнениях молекулярной диффузии в гравитационном поле // Сб. Процессы химической технологии. — М.-Л: Наука, 1965. — С. 133–138.
10. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 200с
11. Клоков Ю.В. Способ тепловой обработки пищевых продуктов // Патент на изобретение, № 1796131, Бюллетень открытий и изобретений, 1993, № 7.

Обозначения

- $t(r, \tau)$ — температура, К, °С;
- t_n — температура поверхности картофеля, К, °С;
- $t_{ц}$ — температура центра картофеля, К, °С;
- $q_m(\tau)$ — удельный поток массы вещества влагопроводностью, кг / (м²·с);
- $q_{mt}(\tau)$ — удельный поток массы вещества термовлагопроводностью, кг / (м²·с);
- $q_{mg}(\tau)$ — удельный поток массы вещества под действием гравитационной силы, кг / (м²·с);
- λ_o — длина ЭМВ, м;
- ε' — действительная часть диэлектрической проницаемости;
- ε'' — коэффициент диэлектрических потерь;
- r — текущая координата, м, $0 < r < R$;
- τ — время, с;
- W_o — начальная влажность, %;
- $u(r, \tau)$ — влагосодержание, кг влаги / кг абс.сух.вещества;
- $u(\tau)$ — среднее влагосодержание, кг влаги / кг абс.сух.вещества;
- $R_{мк}$ — радиус модели картофеля, м;
- R_{po} — радиус реального объекта, м.

On the effect of potato membrane (peel) on mass-transfer when it is heated by electromagnetic energy of SHF field

Voronenko B.A., Klokov U.V., Goppe D.A.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering

To solve a problem of inner mass-transfer when potato is heated by electromagnetic energy of SHF field the kinetics of moisture removal was experimentally obtained. It characterized the influence of membrane (peel) on the process period and potato mass loss. The photos show distribution of moisture under gravity.

Keywords: membrane, mass transfer, moisture and head conductivity, electromagnetic energy, super high frequency, moisture removal, cinetics, gravity.