

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СУШКЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Устинова М.Э., Яшонков А.А.

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Российская Федерация

Аннотация. В статье обоснована возможность применения метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS для компьютерного моделирования нестационарного теплообмена. Представлены результаты компьютерного моделирования периода прогрева морковного снека в процессе вакуумной сушки. Установлена продолжительность периода прогрева при различной температуре окружающей среды.

Ключевые слова. Компьютерное моделирование, нестационарный теплообмен, вакуумная сушка, программный комплекс ANSYS, морковные чипсы, снеки.

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD FOR MODELING NON-STATIONARY HEAT TRANSFER DURING FOOD DRYING

Ustinova M.E., Yashonkov A.A.

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

Abstract. The article substantiates the possibility of using the finite element method implemented in the ANSYS software package for computer modeling of non-stationary heat transfer. The results of computer simulation of the warm-up period of carrot snack during vacuum drying are presented. The duration of the warm-up period at different ambient temperatures is set.

Keywords. Computer modeling, non-stationary heat transfer, vacuum drying, ANSYS software package, carrot chips, snacks.

В соответствии со Стратегией повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.06.16 №1364-р., к приоритетным направлениям относятся создание условий для производства пищевой продукции нового поколения с заданными характеристиками качества, продвижение принципов здорового питания и т.д. [1]. Современное состояние пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации требует разработки и внедрения в производство новых, полезных, необходимых населению продуктов питания [2].

Анализ ассортимента пищевых продуктов показал, что особым спросом пользуются так называемые снековые продукты, в том числе чипсы. В достаточном количестве производят и реализуют мясные и фруктовые чипсы, тогда как овощные, в основном, представлены только картофельными.

Среди столовых овощей-корнеплодов морковь наиболее ценная культура. Она помогает человеку избавиться от малокровия и упадка сил, укрепляет организм и защищает его от разного рода инфекционных заболеваний, способствует лечению расстройства зрения. В корнеплодах моркови содержится до 18% сухого вещества. Морковь богата каротиноидами (α -, β -, γ -каротины, фитофлуен, фитоен и др.), витаминами (В₁, В₂, В₆, С, К), углеводами (до 16%), среди которых найдены глюкоза, фруктоза и сахароза. Кроме них, обнаружены следы эфирного масла, фосфолипиды, стеринны. Богаты корнеплоды минеральными солями натрия, кальция, калия, магния, железа, фосфора, йода.

По результатам предварительных исследований предложена технология изготовления чипсов из моркови [3]. Для обеспечения сохранности термолабильных витаминов, которыми богато исходное сырье нами заменен процесс обжарки в растительном масле на процесс вакуумной сушки при температуре не выше 55°C. С целью интенсификации процесса сушки, который в общем случае может длиться более 6 часов предложено проводить предварительное порообразование прогретого исходного сырья путем резкого сброса давления. Это позволит увеличить площадь поверхности испарения влаги, как следствие снизить энергозатратность процесса.

Максимального эффекта по количеству получаемых пор в исходном сырье можно добиться в случаи минимальных потерь влаги в процессе прогрева, т.е. до начала основных этапов сушки, а также обеспечения прогрева сырья до заданной температуры по всей толщине продукта.

Целью настоящих исследований является определение параметров процесса прогрева исходного сырья при производстве снеков из моркови путем проведения компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определить физико-механические свойства исходного сырья;
- выполнить разработку компьютерной модели исследуемого образца с разделением на конечные элементы;
- провести моделирование термического процесса нагрева морковного сырья и анализ полученных результатов.

На основании проведенных исследований [4] нами были определены необходимые для моделирования физико-механические свойства моркови, а именно плотность продукта - $1180,00 \pm 1,68$ кг/м³; коэффициент теплопроводности - $0,5608 \pm 0,0027$ Вт/(м·°C); удельная теплоемкость - $3850,16 \pm 31,71$ Дж/(кг·°C).

Для проведения компьютерного моделирования нестационарного теплотехнического процесса нами была использована CAE-система инженерного анализа ANSYS, которая в основе своих расчетов использует метод конечных элементов и сертифицирована в соответствии со стандартами ISO 9000, 9001, 9000-3.

Рассматривая процесс нагрева снековой продукции, необходимо было установить минимальное время процесса с целью исключения преждевременного испарения влаги, обеспечивая при этом равномерность прогрева до заданной температуры по всему объему продукта. Таким образом, был рассмотрен процесс нестационарного теплообмена, т.е. нагрева, при котором температура тела приближается к состоянию теплового равновесия.

Аналитическое описание процесса теплопроводности включает в себя дифференциальное уравнение и условия однозначности (граничные условия). Дифференциальное уравнение имеет следующий вид [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (1)$$

где ρ – истинная плотность исследуемого сырья, кг/м³;

c – удельная теплоемкость исследуемого сырья, Дж/(кг·K);

a – коэффициент температуропроводности исследуемого сырья, м²/с;

q_v – удельное количество теплоты, которое выделяется в единицу времени, Дж/(м³·с).

В качестве граничных условий нами были приняты:

- форма исследуемого образца и его габаритные размеры;
- теплофизические свойства исходного морковного сырья;
- распределение температуры внутри сырья в начальный момент времени (начальные условия);
- условия взаимодействия исследуемого образца с окружающей средой.

Для проведения компьютерного моделирования средствами программного комплекса ANSYS была построена модель морковного снека (чипсы), для этого использовали трехмерный тепловой 10-узловой конечный элемент Solid 87 [6,7]. Были заданы необходимые для моделирования теплофизические свойства сырья, а также параметры его взаимодействия с окружающей средой. Для повышения точности проводимых расчетов применили вдвое уменьшенную конечно-элементную сетку. В рамках исследуемого диапазона температур, который в общем случае не превышает 50°C, изменение теплофизических характеристик исходного сырья в зависимости от температуры не задавали, т.е. считали их постоянными при нагреве продукта от начальной температуры 20°C до конечной температуры 60°C.

Для визуального наблюдения за полями распределения температуры внутри снека, нами снек был условно рассечен пополам плоскостью, параллельной диаметальному основанию. Пример полученных результатов компьютерного моделирования приведен на рис. 1, а графическое распределение температур внутри снека показано на рис. 2.

Анализ рисунков 1 и 2 показал, что при температуре нагрева 55°C сырье в центральной части снека прогревается до этой температуры почти 3 минуты, что негативно сказывается на количестве свободной влаги, необходимой для дальнейшего порообразования.

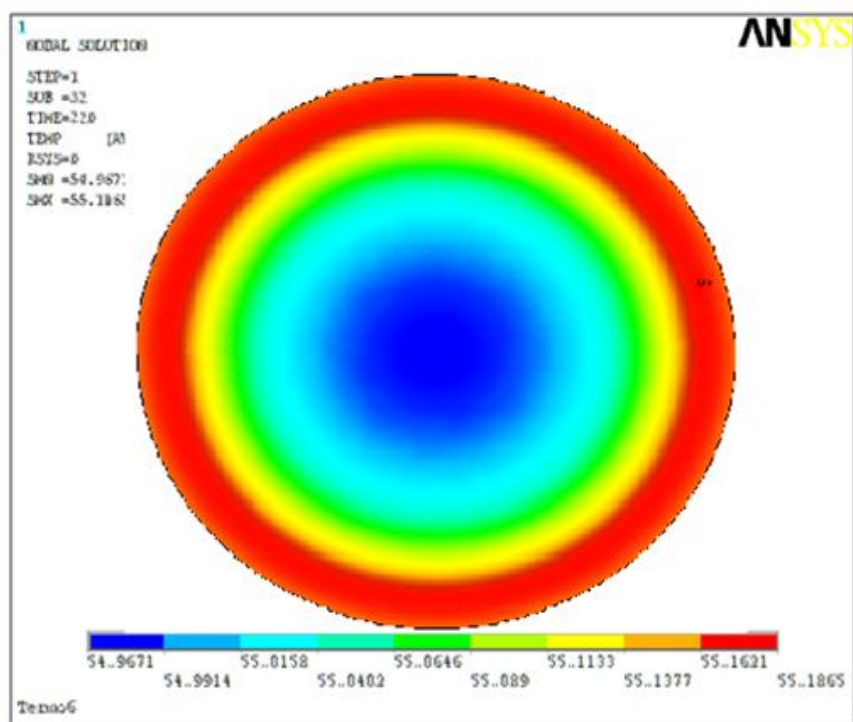


Рисунок 1 – Распределение полей температуры при нагреве снека из моркови (температура нагрева 55°C)

POST26
TEMP_4

ANSYS

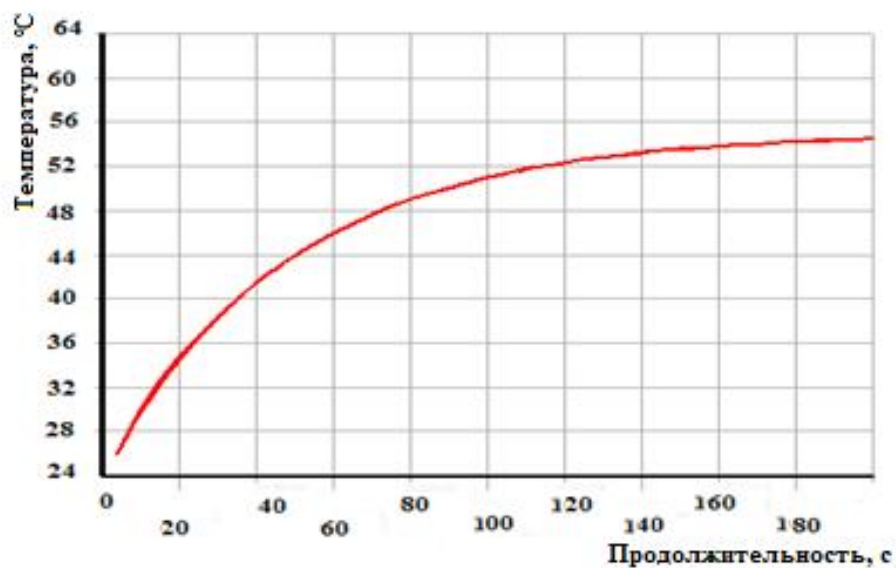


Рисунок 2 – Графическая интерпретация изменения температуры в центре снека из моркови при нагреве (температура нагрева 55°C)

С целью сокращения времени прогрева исходного сырья нами было проведено компьютерное моделирование с последовательным повышением температуры до 60°C с шагом 1°C. Дальнейшее повышение температуры было признано нецелесообразным из-за инертности системы и возможном превышении граничного значения температуры внутри продукта свыше 55°C и как следствие отрицательного влияния на количество термолабильных витаминов в продукте. Графическая интерпретация продолжительности нагрева снека при температуре 60°C приведена на рисунке 3.

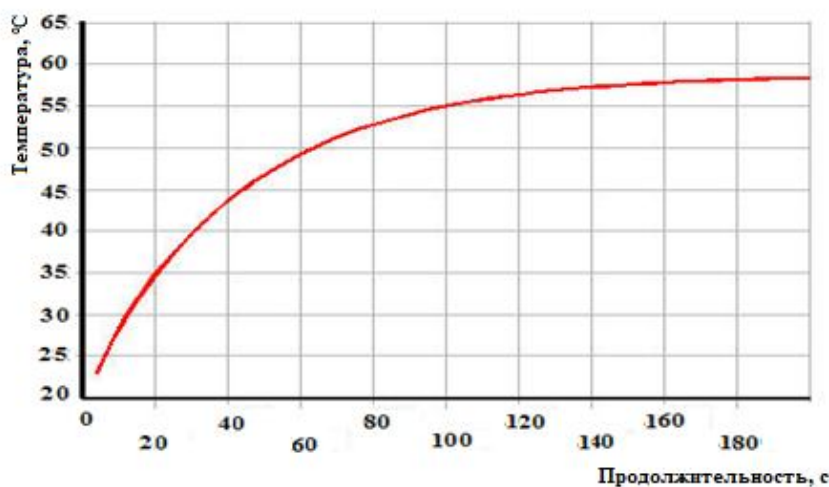


Рисунок 3 – Графическая интерпретация изменения температуры в центре снека из моркови при нагреве (температура нагрева 60°C)

Анализ рисунка 3 позволяет сделать вывод, что увеличение температуры внутри камеры прогрева на 5°C уменьшает время прогрева сырья с 175 до 98 секунд.

Таким образом, полученные данные будут использованы в расчетах и моделировании процесса производства морковных чипсов с использованием технологии вакуумной сушки с предварительным порообразованием.

Список использованных источников

1. Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение правительства РФ №1364-р от 29.06.2016.
2. Размерная классификация плодов и овощей, близких к округлой форме / А.Л. Фалько, Д.В. Степанов, И.Н. Хохлач, А.В. Кривошея // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2017. №3-1(25). С.46-54.
3. Яшонков А.А., Курдогло М.Э. Исследование влияния предварительного порообразования на кинетику процесса сушки при получении снеков из моркови // Ползуновский вестник. 2018. №4. С.64-67.
4. Экспериментальное определение теплофизических характеристик исходного сырья для производства морковных чипсов / М.Э. Курдогло, А.А. Яшонков // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2019): сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ДГТУ (РИСХМ). Ростов-на-Дону, 2019. С.170-174.
5. Кудрявцев И.Ф., Карпенко В.А. Электрический нагрев и электротехнология. М.: Колос, 1975. 384 с.
6. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
7. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.