

Алексеев Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов пищевых производств института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПб НИУ информационных технологий, механики и оптики», т.: 88123153776, e-mail gva2003@rambler.ru;

Вороненко Борис Авсеевич, доктор технических наук, профессор кафедры техники мясных и молочных производств института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПб НИУ информационных технологий, механики и оптики», т.: 88122330903;

Головацкий Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры техники мясных и молочных производств института холода и биотехнологий ФГБОУ ВПО «СПб НИУ информационных технологий, механики и оптики», т.: 88127743732, e-mail gva54@mail.ru.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО (ДИСКРЕТНОГО) ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОЕ ПИЩЕВОЕ СЫРЬЕ (рецензирована)

В работе приводится математическое описание теплового процесса при первичной обработке пищевого сырья на стадии очистки. Полученное аналитическое решение может быть предложено для инженерных расчетов процесса импульсного воздействия на пищевое сырье при его переработке.

Ключевые слова: импульсное воздействие, тепло- и массоперенос, число Фурье, очистка.

Alexeev Gennadii Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Processes and Apparatus of Food Production, Institute of Refrigeration and Biotechnology FSBEI HPE "SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics", tel.: 88123153776, e-mail gva2003@rambler.ru;

Voronenko Boris Avseevich, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of the Institute of Refrigeration and Biotechnologies of FSBEI HPE "SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics", tel.: 88122330903;

Golovatsky Vladimir Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of the Institute of Refrigeration and Biotechnologies of FSBEI HPE "SPB SRU of Information Technologies, Mechanics and Optics", tel.: 88127743732, e-mail gva54@mail.ru.

ANALYTICAL STUDY OF THE IMPULSE (DISCRETE) THERMAL EFFECT ON PROCESSED FOOD RAW MATERIALS (reviewed)

The article presents a mathematical description of the thermal process in the primary processing of food raw materials at the purification stage. The resulting analytical solution can be offered for engineering calculations of the process of impulse effect on processing food raw materials.

Keywords: impulse exposure, heat and mass transfer, the number of Fourier, purification.

Совершенствованию технологических процессов и соответствующего оборудования для переработки пищевого сырья посвящен ряд работ авторов[1-3]. Выявлено, что обрабатываемые материалы подвергаются значительным температурным воздействиям, влияющим на качество конечного продукта и производительность аппаратов. Многие тепловые процессы на стадии первичной обработки сырья вообще не изучены.

Значительная часть оборудования, применяемого в пищевой промышленности, использует абразивный метод воздействия на объект и изначально предполагает непрерывность контакта рабочих органов с ним. В этой связи одним из путей повышения энергоемкости является дискретный подвод энергии, то есть различная степень контакта обрабатываемого объекта с абразивом. Предполагая, что техническая организация такого процесса возможна, следует решить вопрос о его ресурсосберегающих параметрах.

Поэтому актуальной является проблема получения и аналитического исследования математических моделей, описывающих влияние термических процессов на пищевое сырье на указанном этапе его обработки.

Известны работы, в которых авторами исследуются ступенчатые (дискретные, импульсные) процессы [4-23].

Тепловой эффект при снятии кожуры овощей или оболочки зерновых может быть описан следующим образом при рассмотрении дискретного контакта обрабатываемого продукта с абразивом, то есть вращении продукта или абразива.

Требуется решить уравнение теплопроводности для однородного и изотропного тела сферической формы

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (0 < r < R, \quad \tau > 0) \quad (1)$$

при следующих краевых условиях:

$$t(r,0) = t_0 = \text{const}; \quad (2)$$

$$t(R, \tau) = \begin{cases} t_1 = t_{\min} & \text{для } 0 < \tau < \tau_1; \\ t_2 = t_{\max} & \text{для } \tau_1 < \tau < \tau_2; \\ (t_2 > t_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad t(0, \tau) < \infty \quad (4)$$

Равенство (2) – начальное условие; (3) – граничные условия первого рода, описывающие значения температур на поверхности сферического тела в определенные промежутки времени; (4) – условия симметрии и физической ограниченности температуры в центре шара.

Поставленная краевая задача (1)-(4) решена методом интегрального преобразования Лапласа [24], и распределение полей температуры в теле получено в следующем безразмерном виде:

$$T(X, Fo) = 1 - \frac{Fo_1}{Fo_2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n C_n \frac{\sin(n\pi X)}{n\pi X} \exp(-(n\pi)^2 Fo) - \sum_{m=1}^{\infty} C_m \frac{\sin(m\pi \frac{Fo_1}{Fo_2})}{m\pi X}, \quad (5)$$

где

$$C_n = \frac{2(1 - \exp(-(n\pi)^2 Fo_2 (1 - \frac{Fo_1}{Fo_2})))}{1 - \exp(-(n\pi)^2 Fo_2)};$$

$$C_m = \frac{P_1 \cos\left(2\alpha^2 m \left(Fo - \frac{Fo_1}{2}\right)\right) + P_2 \sin\left(2\alpha^2 m \left(Fo - \frac{Fo_1}{2}\right)\right)}{ch(2\alpha\sqrt{m}) - \cos(2\alpha\sqrt{m})};$$

$$P_1 = sh(\alpha\sqrt{m})\cos(\alpha\sqrt{m})sh(\alpha\sqrt{m}X)\cos(\alpha\sqrt{m}X) + ch(\alpha\sqrt{m})\sin(\alpha\sqrt{m})ch(\alpha\sqrt{m}X)\sin(\alpha\sqrt{m}X);$$

$$P_2 = ch(\alpha\sqrt{m})\sin(\alpha\sqrt{m})sh(\alpha\sqrt{m}X)\cos(\alpha\sqrt{m}X) - sh(\alpha\sqrt{m})\cos(\alpha\sqrt{m})ch(\alpha\sqrt{m}X)\sin(\alpha\sqrt{m}X);$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\pi}{Fo_2}}.$$

Из (5) после некоторых несложных преобразований получено упрощенное решение:

$$T(X, Fo) = \left(1 - \frac{Fo_1}{Fo_2}\right) \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin(n\pi X)}{n\pi X} \exp(-(n\pi)^2 Fo)\right] - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(m\pi \frac{Fo_1}{Fo_2})}{2m\pi X} \cos(2\alpha^2 m (Fo - \frac{Fo_1}{2}) - 2\sqrt{m}(1-X)) \exp(-\alpha\sqrt{m}(1-X)) \quad (6)$$

Результаты проведенного численного моделирования полученных аналитических решений процесса очистки картофеля рабочими органами с различной топологией абразивного покрытия в пакете прикладных программ Mathcad приведены на рисунках 1 и 2.

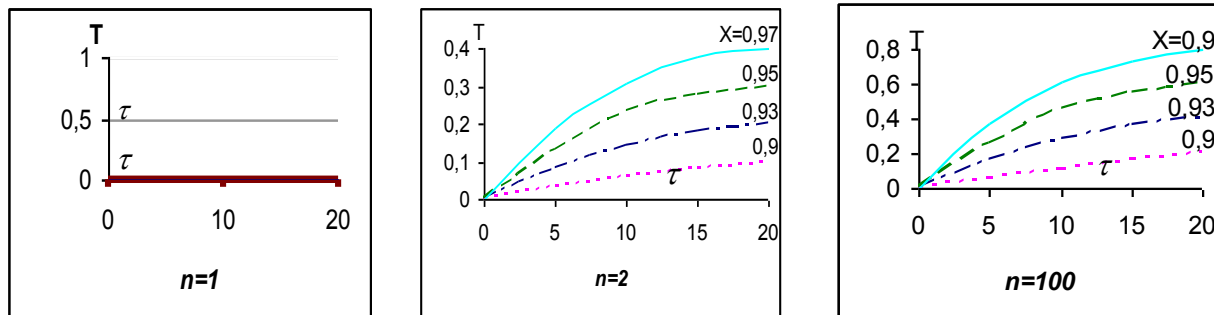


Рис. 1. Изменение величины температуры T по слоям X в зависимости от времени очистки τ для различного количества полос n

На рисунке 1 показано изменение величины относительной температуры T по относительной глубине расположения слоя X в зависимости от времени очистки τ для различного количества полос n . Выбранные параметры моделирования соответствуют отсутствию абразива ($n = 1$), равенству ширины полос без абразива и с абразивным покрытием ($n = 2$), и с практически полным покрытием абразива ($n = 100$).

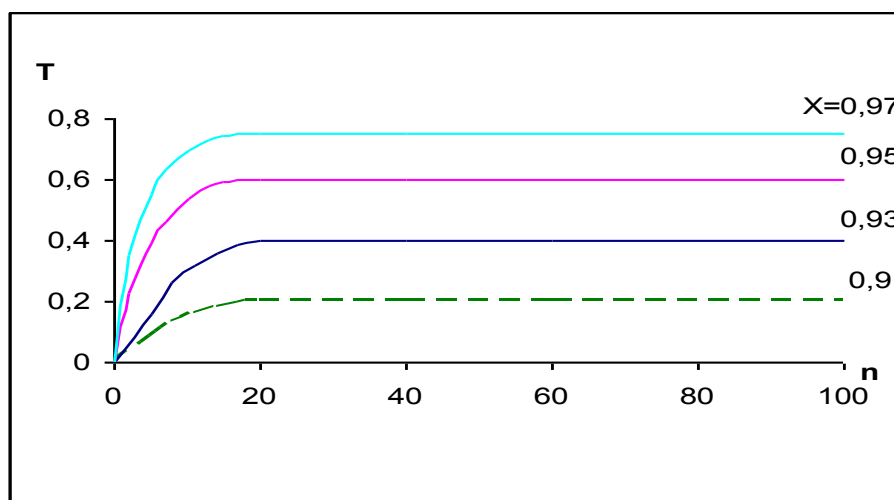


Рис. 2. Изменение величины температуры T по слоям X в зависимости от количества полос (n) при времени очистки 20 с

Рисунок 2 показывает изменение величины относительной температуры T по относительной глубине расположения слоя X в зависимости от количества полос n при фиксированном времени очистки 20 с.

Анализ результатов моделирования подтверждает известные закономерности распространения теплоты по объему тела, нагреваемого с его поверхности. Представляет интерес отраженное на рис.1 изменение характера выпуклости кривых распределения температуры по времени при $X = 0,9$ и $X = 0,97$. Это может быть объяснено различными условиями теплообмена поверхностных слоев очищаемого картофеля с окружающей средой и теплопереноса между слоями, находящимися в глубине клубня. Характер температурных кривых, изображенных на рис. 2, говорит о более существенном влиянии абразива на приповерхностные слои очищаемого клубня и может служить предварительной оценкой топологии рабочих органов.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель в виде аналитического решения соответствующей краевой задачи теплопроводности дает возможность прогнозировать и управлять температурным полем тела сферической формы (клубня картофеля, зерна, крупы), предотвращая перегрев продукта, и тем самым влиять на его качество.

2. Существенное влияние на температуру отношения $\frac{Fo_2}{Fo_1}$ свидетельствует о важности влияния топологии покрытия на потребительские характеристики очищенного картофеля. Задав время τ_1 и τ_2 , можно определить интервалы $[\tau_1, \tau_2]$, за которое температура тела достигает своей верхней границы, т.е. оптимальное соотношение периодов $[0, \tau_1]$ и $[0, \tau_2]$, что дает возможность минимизировать расход энергии на поддержание соответствующего режима.

3. Полученное решение позволяет решить обратную задачу по нахождению времени, необходимого для достижения нужной температуры в любой точке обрабатываемого тела.

4. Полученное аналитическое решение может быть предложено для инженерных расчетов процесса импульсного воздействия на пищевое сырье при его переработке.

Обозначения

$t = t(r, \tau)$ – температура; t_0 – начальная температура;

r – текущий радиус обрабатываемого продукта (например картофеля);

R – радиус картофеля; $X = \frac{r}{R}$ – безразмерная координата.

τ – время;

a – коэффициент температуропроводности;

$T(X, Fo) = \frac{t(r, \tau) - t_1}{t_2 - t_1}$ – безразмерная относительная температура, $0 < T < 1$;

$Fo = \frac{a \tau}{R^2}$ – число Фурье; $Fo_i = \frac{a \tau_i}{R^2}$ ($i=1,2$);

$n = \frac{Fo_2}{Fo_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1}$ – количество пар полос абразив-пробел на одном и том же участке рабочего органа

(цилиндрической оболочки).

Литература:

1. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. СПб.: ГИОРД, 2009. 448 с.

2. Устройство для измельчения растительного сырья: патент 2228795 Рос. Федерация: МПК В02С007/14 / Алексеев Г.В., Забодалова Л.А., Верболоз Е.И., Иванова А.С., Головацкий В.А., Жукова С.Б.; заявитель Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. №2003114175/032003114175/03; заявл. 20.05.04. 5 с.

3. Головацкий В.А. Совершенствование процессов и аппаратов для переработки пищевого сырья. СПб.: НИЭУИД, 2008. 123 с.

4. Skrivanek // Chemicky Prumysl. 1965. №8. Р. 461-464.

5. Скрживанек Я., Крживски З. // ЖПХ. 1969. Т.42, вып. 2. С. 348-354.

6. Davidson J.F., Robson M.W.L., Roesler F.C. // Chem.Eng.Sci.1969. V.24, №5. Р.815-828.

7. Simmons P.J., Spinner I.H. // AIGhE Journal. 1969. V. 15, №4. Р. 489-494.

8. Козлова М.С. Аналитическое исследование тепло- и массообмена в неограниченной пластине и шаре // Труды МТИПП. 1960. Вып. 15, Вопросы теплового переноса. С. 74-81.

9. Белобородов В.В., Вороненко Б.А., Дементий В.А. Математическая модель диффузии с дискретным отводом вещества // Труды ВНИИЖ. 1971. Вып. 28. С. 95-101.

10. Вороненко Б.А. Аналитическое исследование массо-и теплопереноса в капиллярно-пористых коллоидных материалах основных процессов производства растительных масел: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1974. 44 с.

11. Кошевой Е.П., Скрипников А.А. Дискретная диффузия из твердой фазы в много-ступенчатом противоточном процессе экстракции (МППЭ) // Известия СКЦ ВШ. Серия: Технические науки. 1976, №1. С. 94-96.

12. Рудобашта С.П., Огнев Э.Н., Плановский А.П. Зональный метод расчёта кинетики процесса сушки // ТОХТ. 1975. Т. 9, №2. С. 185-192.

13. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г. О процессах переноса тепла или вещества при ступенчатом изменении потенциала среды // Там же. №5. С. 780-783.

14. Вороненко Б.А., Белобородов В.В. Аналитическая оценка эффективности диффузии с дискретным отводом вещества в сравнении с непрерывной диффузией // Труды ВНИИЖ. 1972. Вып. 29. С. 66-69.

15. Козлова М.С., Красников В.В. Об оптимальном периоде осциллирования // Тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых телах и процессах сушки: сб. Минск, 1972. С. 134-143.

16. Михайленко А.В., Фролов В.Ф. К расчёту тепло- и массопереноса в аппаратах с периодически изменяющимся потенциалом среды // ТОХТ. 1979. Т. 13, №3. С. 389-395.

17. Миссии О.Н. Ступенчатый расчёт процесса экстрагирования // Там же. 1989. Т. 23, №4. С. 545-548.

18. Вороненко Б.А., Марков В.Н., Репало А.Г. Сравнительный анализ промышленных методов экстрагирования на основе вычислительного эксперимента // Масло-жировая промышленность. 1994. № 5-6. С. 7-12.

19. Кошевой Е.П., Скрипников А.А. Исследования многоступенчатых процессов экстракции из твердой фазы // Известия СКНЦ ВШ. Серия: Технические науки. 1975. №1. С. 55-59.

20. Кошевой Е.П., Вороненко Б.А., Рослякова Т.К. Дискретная диффузия при много-ступенчатой экстракции растительного материала с различной степенью вскрытия клеточной структуры // Тезисы докл.

Всесоюз. конф. по экстракции. Рига: Зинатне, 1977. Т. 2. С. 89-93.

21. Вороненко Б.А., Кошевой Е.П. Аналитическая оценка эффективности дискретной диффузии из двухзонных частиц в сравнении с непрерывной диффузией при многоступенчатой экстракции // Математическое моделирование и оптимизация процессов масло-жировой промышленности: тез. Всесоюз. семинара. Краснодар, 1983. С. 97-98.

22. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

23. Вороненко Б.А., Ключкин В.В. Аналитическое исследование температурного поля слоя масличных семян при управляемых температурных воздействиях // Масло-жировая промышленность. 1997. №3-4. С. 1-4.

24. Мартыненко В.С. Операционное исчисление. Киев: Вища школа, 1990.

References:

1. Aret V.A., Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. *Physical and mechanical properties of raw materials and finished products*. St. Ptb.: GIOR, 2009. 448 p.

2. Device for crushing food raw materials: patent № 2228795 of the RF:IPC B02C007/14 / Alexeev G.V., Zabodalova L.A., Verboloz E.I., Ivanova A.S., Golovatsky V.A.; declarant St.-Petersburg university of low temperature and food technologies. № 2003114175/032003114175/03 ; appl. 20.05.04. 5 p.

3. Golovatsky V.A. *Improving processes and apparatus for processing food raw materials*. - St. Petersburg.: NIEUD, 2008.123p.

4. Skrivaneck J. // *Chemicky Prumysl*. 1965, № 8. P.461-464.

5. Skrzhivaneck J., Krzhivski Z. // *Journal of Applied Chemistry*. 1969. V.42. Issue 2. P. 348-354.

6. Davidson J.F., Robson M.W.L, Roesler F.C. // *Chem.Eng.Sci*. 1969. V.24. № 5. P.815-828.

7. Simmons P.J., Spinner I.H. // *AIChE Journal*. 1969. V.15, № 4. P.489-494.

8. Kozlova M.C. Analytical study of heat and mass transfer in an infinite plate and ball // *Proceedings of MTIPP*. No. 15, Issues of heat transfer. 1960. P.74-81.

9. Beloborodov V.V., Voronenko B.A., Dementiy V.A. Mathematical model of diffusion with discrete tap of the substance // *Proceedings of VNIIZH*. 1971. Issue 28. P.95-101.

10. Voronenko B.A. Analytical study of mass and heat transfer in capillary - porous colloidal materials of the main processes of production of vegetable oils: abstract of Diss. ...Cand. Of Tech. Sciences. Krasnodar, 1974.- 44 p.

11. Koshevoy E.P., Skripnikov A. A. Discrete diffusion from the solid phase in a multistage countercurrent extraction process (MCEP) // *Proc. of SCC HS. Technical Series*. 1976, № 1. P. 94-96.

12. Rudobashta S.P., Ognev E.N., Planovsky A.P. The zonal method for calculating the kinetics of the drying process // *TOCHT*. 1975. Vol 9. № 2. P. 185-192.

13. Gelperin N. I., Aynshteyn V.G. On processes of heat transfer or of substance with a step change in potential of the medium // *TOCHT*. 1975. № 5. P. 780-783.

14. Voronenko B.A., Beloborodov V.V. Analytical evaluation of the effectiveness of diffusion with discrete tap of substance in comparison with the continuous diffusion // *Proceedings of VNIIZH*. 1972. № 29. P. 66-69.

15. Kozlova M.S., Krasnikov V.V. On the optimal period of oscillation // *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies and processes of drying:coll.* Minsk, 1972 P. 134-143.

16. Mikhailenko A.V., Frolov V.F. Calculation of heat and mass transfer in apparatus with a periodically varying potential of the medium // *TOCHT*. 1979, Vol 13, №3. P. 389-395.

17. Missii O.N. Stepwise calculation of the extraction process // *TOCHT*. 1989. Vol 23, № 4. P. 545-548.

18. Voronenko B.A., Markov V.N., Repalo A.G. Comparative analysis of industrial methods of extraction based on computer simulation // *Fat and oil industry*. 1994. № 5-6. P. 7-12.

19. Koshevoi E.P., Skripnikov A.A. Studying of multistage extraction processes of the solid phase // *Proceedings of SKNTS HS. Technical Sciences Series*. 1975. № 1. P. 55-59.

20. Koshevoi E.P., Voronenko B.A., Roslyakova T.K. Discrete diffusion in a multi-stage extraction of plant material with different degrees of opening of the cell structure // *Abstracts of the All-Union conference for extraction*. Riga: Zinatne, 1977. V. 2. P. 89-93.

21. Voronenko B.A., Koshevoi E.P. Analytical evaluation of the effectiveness of the two-band discrete diffusion of particles in comparison with the continuous diffusion in a multi-stage extraction // *Mathematical modeling and optimization of oil and fat industry: abstracts of the All-Union Seminar*. Krasnodar, 1983. P. 97-98.

22. Lykov A.V. *The theory of heat*. M.: High School, 1967.

23. Voronenko B.A., Klyuchkin V. V. Analytical study of the temperature field of oil seed layer under controlled temperature effects // *Fat and oil industry*. 1997, № 3-4. P. 1-4.

24. Martynenko V.C. *Operational calculus*. Kiev: High school, 1990.