

Г. В. Алексеев [G. V. Alekseev]

А. П. Савельев [A. P. Saveliev]

Н. Е. Титова [N. E. Titova]

УДК 339.1:664.66

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭНЕРГОРЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПЕКАРНОЙ КАМЕРЕ****SOLUTION OF ENERGY RESOURCES SAVING TASKS BY REGULATION
OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE BAKERY CAMERA***Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики*

Аннотация. *Общемировыми тенденциями – приоритетными направлениями развития пищевой промышленности являются ресурсосбережение и расширение ассортимента производимых продуктов питания для более полного удовлетворения потребителей.*

Материалы и методы, результаты. *В статье рассмотрены вопросы теоретического обоснования возможностей совершенствования хлебопекарного оборудования и даны рекомендации по его дооснащению для обеспечения энерго-ресурсосберегающих режимов его работы. В качестве объекта исследования выбран процесс регулирования температурных полей в туннельных печах конвейерного типа.*

Заключение. *Экспериментальные исследования позволили определить мощность электронагревателя обеспечивающего минимальный упек. Эта мощность составила 12,3 КВт. Контрольные образцы для сравнения качества изделий выпекались в пекарном шкафу ШПЭ-3 мощностью 22,7 КВт, в первом случае снижение мощности электронагревателя составило 15%, а во втором - 46%. Упек при этом составил 3,7% в первом случае и 7,8% во втором случае. При среднем упеке 6% для такого типа изделий очевидны эффекты ресурсосбережения в обоих случаях.*

Ключевые слова: теоретическое обоснование, энерго- ресурсосберегающие режимы, регулирование температурных полей, пекарные камеры.

Abstract. *Global trends – priority directions of development of the food industry are resource saving and expansion of the range of the made food for fuller satisfaction of consumers.*

Materials and methods, results. *The article deals with the theoretical substantiation of the possibilities of improving the baking equipment and provides recommendations for its retrofitting to ensure energy – resource-saving modes of its operation. As the object of investigation, the process of regulation of temperature fields in tunnel ovens of the conveyor type.*

Conclusion. *Experimental studies have allowed to determine the power of the electric heater provides a minimum UPEC. This power was 12.3 KW. Control samples for comparing the quality of products were baked in a baking Cabinet SHPE-3 with a capacity of 22.7 KW, in the first case, the decrease in the power of the electric heater was 15%, and in the second - 46%. UPEC was 3.7% in the first case and 7.8% in the second case. With an average charge of 6% for this type of product, the effects of resource saving in both cases are obvious.*

Key words: theoretical justification, energy-saving modes, regulation of temperature fields, baking chambers.

Введение. В соответствии с общемировыми тенденциями приоритетными направлениями развития пищевой промышленности являются ресурсосбережение и расширение ассортимента производимых продуктов питания для более полного удовлетворения потребителей. Эти тенденции в России сопровождаются национальными особенностями развития производства. Основой совершенствования работы предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности, а также работы большинства научных и исследовательских организаций этого профиля являются директивные документы, которые предусматривают создание опережающего научно-технического задела для агро-промышленного комплекса РФ, базирующегося на «прорывных» сквозных аграрно-пищевых технологиях для решения проблем продовольственной безопасности, здорового питания населения и рационального природопользования. Одной из особенностей современного этапа развития пищевых производств является создание продуктов питания перспективных для использования в районах Арктики. Анализ полученных экспериментальных результатов позволил выработать рекомендации по обеспечению рациональных режимов работы исследованных пекарных камер. Снижение ресурсозатрат в пищевых производствах особенно актуально в частности и из-за того, что часто связь количества потребляемой энергии с количеством полезно используемого пищевого сырья и количеством производимой продукции имеет специфическую форму. Так, например, в хлебопечении иногда рациональное распределение температуры

по объему камеры, при общем снижении теплотрат на выпечку, приводит к уменьшению упека изделий (повышению выхода готовой продукции) [1–3].

Рассмотрение возможностей совершенствования пекарной камеры за счет регулирования распределения температуры, влияющее на характер теплотрат, требует уточнения условия подвода теплоты к нагреваемому объекту и его геометрии.

Объекты и методы. Известная тепловая задача для нагрева бесконечной пластины при выполнении функцией распределения температуры $f(x)$ условий Дирихле, показывает, что достаточно хорошее приближение к реальным условиям теплообмена получают при гармоническом распределении температуры по границе раздела греющей среды и нагреваемого объема.

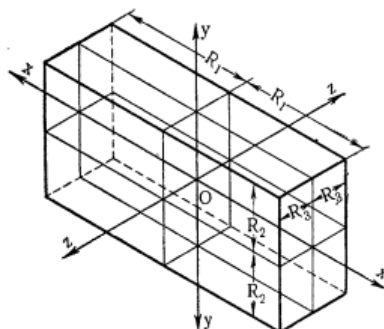


Рис. 1. Модель жарочной камеры в виде трех взаимно перпендикулярных пластин

В складывающихся условиях самым разумным представляется усложнение модели тепловой задачи в направлении изменения геометрии нагреваемого тела, например, заменой бесконечной плоскости на параллелепипед [4].

Для указанных условий вполне правомерна постановка задачи в виде пластины конечных размеров $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$, температура которой везде одинакова и равна T_0 . В момент времени $\tau = 0$ все поверхности пластины мгновенно нагреваются до некоторой температуры $T_c < T_0$, которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса нагревания. Требуется найти распределение температуры в любой момент времени, а также среднюю температуру пластины, необходимую для определения теплотрат. Поместим начало координат в центр параллелепипеда, тогда уточненную задачу математически можно сформулировать следующим образом [5]:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right]$$

где $\tau > 0$; $-R_1 < x < +R_1$; $-R_2 < y < +R_2$; $-R_3 < z < +R_3$;

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = const;$$

$$T(R_1, y, z, \tau) = T_c$$

$$T(x, R_2, z, \tau) = T_c$$

$$T(x, y, R_3, \tau) = T_c$$

Академиком Лыковым А. В. показано, что решение аналогичной задачи можно представить как произведение решений для трех неограниченных пластин, толщина которых соответственно равна $2R_1$, $2R_2$ и $2R_3$.

$$\frac{T(x, y, z, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{T(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} \cdot \frac{T(y, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} \cdot \frac{T(z, \tau) - T_c}{T_0 - T_c}$$

При этом температуры $T(x, \tau)$, $T(y, \tau)$, $T(z, \tau)$ определяются решением дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(y, \tau)}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2}$$

$$T(x, 0) = T(y, 0) = T(z, 0) = T_0 = const$$

$$T(R_1, \tau) = T(R_2, \tau) = T(R_3, \tau) = T_c$$

Подставляя получаемые решения в предыдущее выражение, и после этого в начальные условия, можно получить окончательное решение поставленной тепловой задачи [6–8].

Реальный процесс выпечки сопряжен с различными технологическими воздействиями на распределение температуры в камере, например открытием или закрытием шторок для открытия или закрытия загрузочных окон.

Представляет интерес характер изменения температурного поля в жарочной камере от технологических возмущений, моделируемых периодическим влиянием источника или стока теплоты [9].

Численное моделирование объекта исследования.

Рассмотрим с этой целью численное решение уравнения теплопроводности с конвекционным членом для параболического дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial z} u(x, z) = c^2 \cdot \frac{d^2}{dx^2} u(x, z) - v \cdot \frac{\partial}{\partial x} u(x, z)$$

$$u(0, z) = 0$$

Используем подстрочную индексацию переменных, чтобы написать частные производные, начальные условия и граничные условия. Все уравнения задаются с помощью знаков булевой алгебры.

Given

$$u_z(x, z) = \frac{1}{4} \cdot u_{xx}(x, z) - \frac{1}{2} \cdot u_x(x, z)$$

Начальное состояние:

$$u(0, z) = 0 \quad u(L, z) = 0$$

$$u(x, 0) = \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{L}\right) + \frac{1}{2} \cdot \sin\left(3 \cdot \pi \cdot \frac{x}{L}\right)$$

Граничные условия Дирихле:

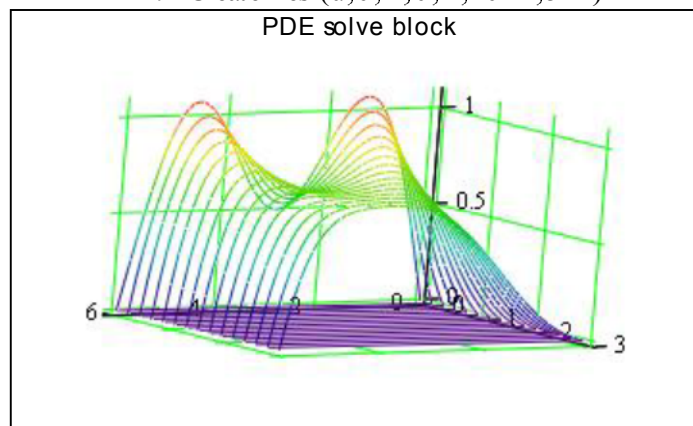
$$u := \text{Pdsolve}\left[u, x, \begin{pmatrix} 0 \\ L \end{pmatrix}, z, \begin{pmatrix} 0 \\ T \end{pmatrix}, \text{spacepts}, \text{timepts}\right]$$

Задачу будем решать для $u(x, z)$ в пределах от 0 до L для x и от 0 до T для z . Можно оценить функцию u при других значениях x и z в указанных диапазонах. Заметим, что в функции $u(x, z)$ и ее производных нужно указывать обе переменные, то есть $u = (x, 0)$, а не просто $u(x)$ [10–11].

$$u(0.1, 0.2) = 0.08 \quad x := 0, 0.2..L \quad z := 0..T$$

Полученное решение на трехмерном графике будет выглядеть следующим образом

$$A1 := \text{CreateMesh}(u, 0, L, 0, T, 10 \cdot L, 5 \cdot T)$$



A1

Рис. 2. Возмущения температурного поля при наличии источников или стоков теплоты

Экспериментальные исследования изучаемого процесса

Полученные результаты свидетельствуют о том, что обеспечение оптимальных условий выпечки хлеба, обеспечиваемых регулированием распределения температуры требует применения дополнительных устройств для перераспределения теплоты по объему пекарной камеры [12].

Анализ современного состояния техники для хлебопечения позволил выделить в качестве одного из наиболее перспективных типов оборудования для обеспечения выпечки хлеба в регулируемом тепловом поле туннельные конвейерные жарочные печи.

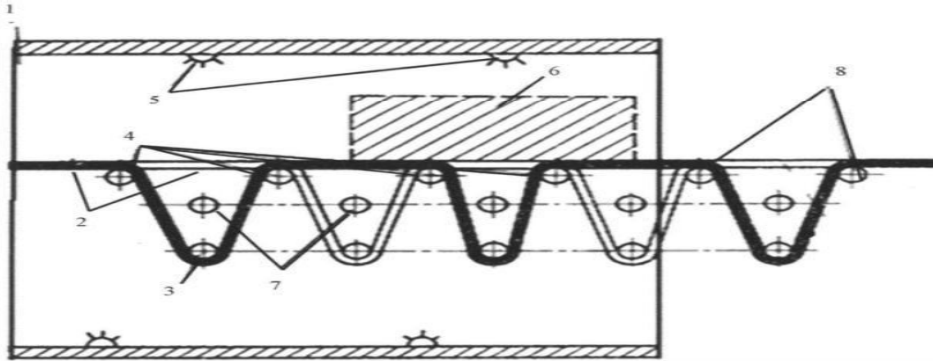


Рис. 3. Схема регулирования температуры в пекарной камере

Схема снижения теплотребления при выпечке хлеба в конвейерной жарочной камере представлена на рис. 3 и включает в себя корпус камеры 1, внутри которой размещен транспортер 2, состоящий из двух четных и двух нечетных лент, которые расположены параллельно друг к другу с зазором. Они чередуясь огибают теплонагруженные ролики верхнего ряда 4 и поддерживающие ролики нижнего ряда 3, размещенные в шахматном порядке по высоте относительно друг друга [13].

Четная лента ленточного транспортера огибает ролик верхнего ряда, одновременно касаясь ролика нижнего ряда. Источники теплоты 5 для нагрева воздуха установлены в нижней и верхней частях пекарной камеры. Источник теплоты в виде перфорированной трубы 7, подающей горячий воздух, зафиксирован в средней части пекарной камеры, между роликом верхнего ряда непосредственно над роликом нижним ряда. Ролик верхнего ряда, при этом, имеет возможность соединения с замкнутой магистралью теплоносителя. Вне пекарной камеры установлен насос, который по теплоизолированной трубе удаляет избытки теплоты за пределы пекарной камеры. Поступающий по магистрали горячий воздух через валики 8 осуществляет предварительный подогрев тестовой заготовки 6.

Проведенный предварительно анализ позволяет для эксперимента определить в качестве параметров, ответственных за качество выпечных изделий, энергопотребление в процессе выпечки и упек изделий, равномерность распределения температурного поля по объему пекарной камеры (разность между температурой верхних и нижних слоев теплоносителя в камере ΔT) и скорость регулирования температуры поступающего в камеру теплоносителя (V) [14].

Применительно к модели, на которой ставился эксперимент, с первым параметром можно связать величину зазора (h) в окнах боковых поверхностей камеры, а со вторым мощность нагревателей (W).

В ходе планирования эксперимента в качестве варьируемых выбирались:

- параметр h с интервалом $0 \leq h \leq 40$ мм;
- параметр W , с интервалом $0 \leq W \leq 20$ (КВт).

В соответствии с принятыми интервалами варьирования кодированные переменные записывались в виде

$$X_1 = (h - 20) / 20 \text{ и } X_2 = (W - 10) / 10.$$

Для детального исследования влияния указанных параметров на эксплуатационные характеристики для разработки рекомендаций по проектированию управляющих параметров целесообразно провести факторный эксперимент, выбрав указанные выше интервалы в качестве интервалов варьирования изменяемых факторов.

Для отыскания зависимости адекватной реальной выбирали план эксперимента в виде центрального композиционного ротатбельного плана со звездным плечом $\sqrt{2}$.

Зависимости Y_1 и Y_2 от варьируемых параметров в этом случае искали в виде

$$f = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Проведенные вычисления включали оценку значимости полученных коэффициентов и позволили уравнения регрессии записать в виде ($Y_1=z1(x,y)$ $Y_2=z2(x,y)$):

$$z2(x,y) := 5.689 + 1.667x + 0.382x^2 + 1.333y + 3.716y^2$$

$$z1(x,y) := 11.156 - 5x + 2.409x^2 - 4y + 5.743y^2$$

где $x=X1$ и $y=X2$

Обсуждение полученных результатов

Для удобства использования полученных моделей процесса выпечки при реальном проектировании нормированные факторы целесообразно перевести в физические переменные. С этой целью в полученные уравнения регрессии необходимо подставить выражения для кодированных переменных. Записанные соотношения могут служить для прогнозирования энергопотребления в процессе выпечки (Y_1) и упека изделий (Y_2) от величины зазора (h) в окна боковых поверхностей камеры и мощности нагревателей (W). С другой стороны, для заранее заданных значений h_0 и W_0 могут быть подобраны величины (Y_1) и (Y_2), удовлетворяющие заказчика по технологическим или экономическим соображениям.

Таким образом, полученные уравнения регрессии могут служить математическими моделями новых, процессов выпечки, которые целесообразно использовать для достижения поставленных технологических требований, например, уменьшения упека.

Вторые степени варьируемых переменных говорят об экстремальном характере полученных моделей и вызывают необходимость исследования характера монотонности функций отклика в выбранных диапазонах изменения независимых параметров.

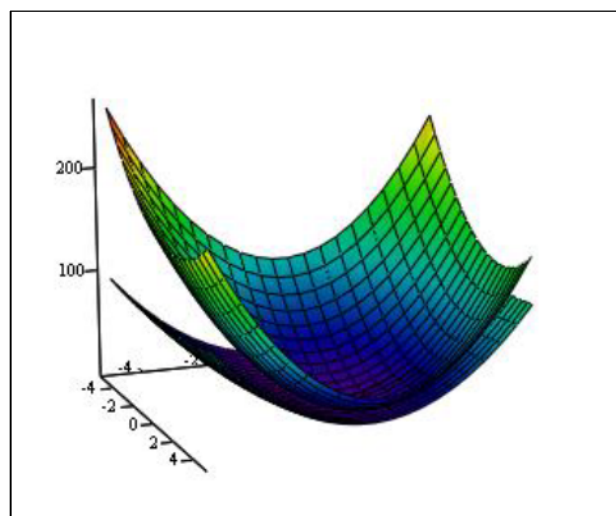
$$z1(x,y) = 11.156 - 5x + 2.409x^2 - 4y + 5.743y^2$$

$$z2(x,y) = 5.689 + 1.667x + 0.382x^2 + 1.333y + 3.716y^2$$

Такое исследование целесообразно провести графически с помощью пакета Mathcad.

Поверхности отклика, изображенные на рисунке, позволяют определить компромиссные режимы выпечки в зависимости от особенностей теста и имеющегося пекарного оборудования, обеспечивая максимально возможную экономию энергоресурсов и минимальны упек изделий.

Определение области экстремума, то есть значений изменяемых параметров, при которых достигаются минимальные удельная энергоемкость и минимальный упек, определяется дифференцированием полученных уравнений и проверкой критерия Сильвестра.



$z1, z2$

Рис. 4. Поверхности отклика для выбора режимов выпечки $z1(x,y)$ – теплоемкость процесса выпечки; $z2(x,y)$ – упек изделия

Для Y_1 из равенств $\partial Y_1 / \partial X_1 = \partial Y_1 / \partial X_2 = 0$ имеем: $(w) = 13,48$ при полностью открытом газоре.

Для Y_2 из равенств $\partial Y_2 / \partial X_1 = \partial Y_2 / \partial X_2 = 0$ имеем: $(w) = 8,21$ при полностью закрытом газоре.

Таким образом, минимальная относительная энергоёмкость выпечки достигается при полностью открытом газоре и мощности электронагревателя 19,22 кВт при времени выпечки 2 мин.

Выводы. Окончательные вычисления позволяют определить мощность электронагревателя обеспечивающего минимальный упек при таком же времени выпечки при закрытом газоре. Эта мощность составит 12,3 кВт. Учитывая, что контрольные образцы для сравнения качества изделий выпекались в пекарном шкафу ШПЭ-3 мощностью 22,7 кВт, в первом случае достигается снижение мощности электронагревателя на 15 %, а во втором – 46 %. Упек при этом составит в первом случае 3,7 % и 7,8 % во втором случае. При среднем упеке 6 % для такого типа изделий очевидны эффекты ресурсосбережения в обоих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartree, Mem. Manch. Lit. Phil. Soc. 80, 85, 1935.
2. Horenstein, Quart. Appl. Math. 3, 183 (1945).
3. Stemmow, Munford. Phil. Trans. Roy. Soc. A245, 189-211, 1952.
4. Kaye, J. Math. Phys. 34. 119-125, 1955.
5. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства: Учебник. 9-е изд.; перераб. и доп. / под общ. ред. Л. И. Пучковой. СПб: Профессия, 2005. 416 с.
6. Аттетков А. В., Волков И. К. Аналитические методы исследования теплового состояния области с движущейся границей в условиях нестационарного теплообмена с внешней средой // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. № 1. С. 125-130.
7. Карташов Э. М. Аналитические методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности в областях с движущимися границами (Обзор) // Инженерно-физический журнал. 2001. Т. 74. № 2. С. 171-195.
8. Алексеев Г. В., Верболоз Е. И. Современные подходы к рациональному использованию ресурсов при первичной обработке пищевого сырья. Вестник Международной академии холода. 2003. № 4. С. 35-39.
9. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. 535 с.
10. Вороненко Б. А., Белобородов В. В. Разработка математической модели и алгоритма расчета процесса разогрева теплоносителя в аппарате с принудительной конвекцией // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции «Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания»; Харьков, 1981. с. 291-292.
11. *hleb-produkt.ru* от 13.09.15.
12. Савельев А. П. Патент РФ №178 792, А21В 1/22. Устройство для снижения энергоёмкости при выпечке хлеба в конвейерной хлебопекарной печи, 2018
13. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
14. Кондратов А. В., Верболоз Е. И., Алексеев Г. В. О модели развития кавитационной полости при измельчении пищевого сырья. Хранение и переработка сельхозсырья. 2007. № 11. С. 27-29.

REFERENCES

1. Nagtgee, Mem. Manshg. Lit. Rhil. Sos. 80, 85, 1935.
2. Hogenstein, Quart. Arrl. Math. 3, 183 (1945).
3. Stemmow, Munford. Phil. Tgapz. Rou. Sos. A245, 189-211, 1952.
4. Kaue, J. Math. R"ys. 34. 119-125, 1955.
5. Auerman L. Ya. Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva: Uchebnik. 9-e izd.; psrerab. i dop. / Pod obshch. red. L. I. Puchkovoï. SPb: Professiya, 2005. 416 s.
6. Attetkov A. V., Volkov I. K. Analiticheskie metody issledovaniya teplovogo sostoyaniya oblasti s dvizhushcheisya granitseï v usloviyakh nestatsionarnogo teploobmena s vnesheï sredoi // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2000. T. 73. № 1. S. 125-130.
7. Kartashov E. M. Analiticheskie metody resheniya kraevykh zadach nestatsionarnoi teploprovodnosti v oblastiakh s dvizhushchimisya granitsami (Obzor) // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2001. T. 74. № 2. S. 171-195.
8. Alekseev G. V., Verboloz E. I. Sovremennye podkhody k ratsional'nomu ispol'zovaniyu resursov pri pervichnoi obrabotke pishchevogo syr'ya.. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2003. № 4. S. 35-39.
9. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. Teoriya teplo- i massoperenosa. Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1963. 535 s.
10. Voronenko B. A., Beloborodov V. V. Razrabotka matematicheskoi modeli i algoritma rascheta protsessa razogreva teplonositelya v apparate s prinuditel'noi konvektsiei // Tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchnoi konferentsii «Problemy vliyaniya teplovoi obrabotki na pishchevuyu tsennost' produktov pitaniya»; Khar'kov, 1981. s. 291-292.

11. hleb-produkt.ru ot 13.09.15.
 12. Savel'ev A.P. Patent RF №178 792, A21B 1/22. Ustroistvo dlya snizheniya energoemkosti pri vypечhke khleba v konveinoi khlebopekarnoi pechi, 2018.
 13. Kartashov E. M. Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel. M.: Vysshaya shkola, 2001. 550 s.
 14. Kondratov A. V., Verboloz E. I., Alekseev G. V. O modeli razvitiya kavitatsionnoi polosti pri izmel'chenii pishchevogo syr'ya. Khranenie i pererabotka sel'khozsy'r'ya. 2007. № 11. S. 27-29.

ОБ АВТОРАХ

Алексеев Геннадий Валентинович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, пр-т Кронверкский, 49, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101; e-mail: gva2003@mail.ru, м.т. 89213350796
Alexeev Gennadii Valentinovich, Dr of Tech. Sci., Professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Avenue, St. Petersburg, Russia, 197101; e-mail: gva2003@mail.ru tel.89213350796

Савельев Алексей Петрович, курсант, Военная академия материально-технического обеспечения МО РФ, наб. Макарова д.8, г. Санкт-Петербург, Россия, 199034, e-mail: gva2003@mail.ru, м.т. 89115862536
Savelyev Alexey Petrovich, cadet, Military Academy of Material and Technical Support of the Ministry of Defense of the Russian Federation, nab. Makarova d.8, St. Petersburg, Russia, 199034, e-mail: gva2003@mail.ru, tel. 89115862536

Титова Наталия Евгеньевна, магистр, Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, пр-т Кронверкский, 49, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101; e-mail: nattit1993@mail.ru, м.т. 89216350299
Titova Natalia Evgenievna, Magister, St. Petersburg State National Research University of Information Technologies of Mechanics and Optics, pr-t Kronverksky, 49, St. Petersburg, Russia, 197101; e-mail: nattit1993@mail.ru, mt 89216350299

Дата поступления в редакцию 23.08.2018