

УДК 641.437.075.8

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Ялпачик В.Ф. к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0691) 42-13-06

**Аннотация** – данная работа посвящена определению степени влияния расчетных значений коэффициента теплоотдачи на изменение коэффициента теплопроводности. Теоретические исследования показали, что при определении коэффициента теплопроводности влиянием величины коэффициента теплоотдачи можно пренебречь.

**Ключевые слова** – коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи, вертикально и горизонтально расположенные плоды, квадрооднородное тело.

**Постановка проблемы.** От правильного выбора режимов замораживания плодоовощной продукции зависит срок и качество сохраняемых плодов. Поэтому поставлена задача установления фактора, который являлся бы определяющим при выборе режимов замораживания.

**Целью статьи** является установление влияния коэффициента теплоотдачи на изменение коэффициента теплопроводности.

**Основная часть.** Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  является физической характеристикой материала, и определить его можно только в специальных установках, для положительных температур. Поэтому, при определении  $\lambda$  при отрицательных температурах, в воздушной или жидкой среде, необходимо учитывать конвективные составляющие, которые отображаются коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  и влияют на плотность теплового потока  $q$ , величина которого входит в формулу для определения  $\lambda$ . Таким образом, значение коэффициента теплоотдачи косвенно влияет на изменение величины  $\lambda$ .

Определим степень влияния расчетных значений коэффициента  $\alpha$  на изменение  $\lambda$ .

Исследования изменения коэффициента теплоотдачи при горизонтальном и вертикальном расположении проводились для плодов имеющих цилиндрическую форму (початки кукурузы, баклажаны), коническую (перец сладкий) и плоской пластины (кружочки кабачков).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  для горизонтального расположения плодов, имеющих цилиндрическую форму, определялся по формуле [1, 2, 3]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (1)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;

$\lambda$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К);

$l$  – линейный размер, м.

Критерий Нуссельта определялся по критериальной зависимости [1, 4], в соответствии с III –й теоремой подобия для нашего случая (т.е. для случая свободной конвекции с учетом числа Грасгофа и Прандтля).

$$Nu = (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_i}{Pr_A} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа;

$Pr_{п}$ ,  $Pr_{в}$  – критерий Прандтля соответственно поверхности плода и воздуха.

Эта зависимость выбрана для случая свободной (естественной) конвекции.

Критерий Прандтля определялся по полученным нами эмпирическим зависимостям

$$Pr = 2,3 \cdot 10^{-24} \cdot \dot{O}^3 + 10^{-6} \cdot \dot{O}^2 - 0,0007 \cdot \dot{O} + 0,83, \quad (3)$$

где  $T$  – текущее значение температуры в холодильной камере, °К.

Критерий Грасгофа [6]:

$$Gr = \frac{\beta_t \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (4)$$

где  $\beta_t$  – коэффициент объемного расширения воздуха,

$g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – разность температур плода и воздуха в холодильной камере, °С;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Кинематическая вязкость определялась по полученной нами эмпирической зависимости

$$\nu = (-7,7 \cdot 10^{-7} \cdot \dot{O}^3 + 0,00055 \cdot \dot{O}^2 - 0,053 \cdot \dot{O} + 2,8) : 10^{-6}. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $\alpha$  для вертикального циліндричного плода определяли по формуле (1) выбрав в качестве линейного размера длину плода  $h$ .

Критерий Нуссельта определялась по зависимости [1, 2, 3]:

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_A}\right)^{0,25} \quad (6)$$

Критерий Грасгофа по формуле (4), выбрав в качестве линейного размера длину плода  $h$ ; в данном случае плод расположен вертикально, поэтому условно обозначили длину плода буквой  $h$ :

$$Gr = \frac{\beta_t \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad (7)$$

Проведенные расчеты показали (рис. 1), что коэффициент  $\alpha$  при хранении плодов цилиндрической формы имеющих диаметр 0,07 м и длину 0,18 м практически изменяется на 5 Вт/м<sup>2</sup>К

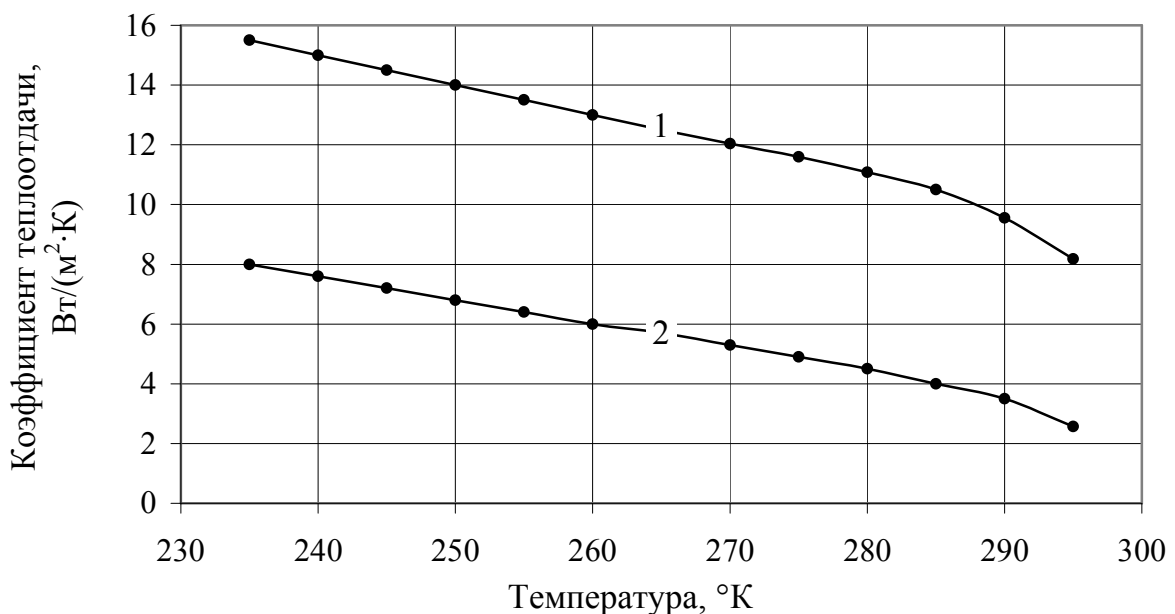


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры для цилиндрических плодов:

1 – горизонтальное расположение плода; 2 – вертикальное расположение

При определении коэффициента  $\alpha$  и критерия Грасгофа для горизонтально расположенной пластины (кружочки кабачков) в формулах (1) и (4), подставляем толщину пластины.

Критерий Нуссельта определяли по зависимости [1, 5]

$$Nu = 0,96 Ra^{\frac{1}{6}}, \quad (8)$$

где  $Ra$  - критерий Релея.

$$Ra = Gr \cdot Pr . \quad (9)$$

При определении коэффициента  $\alpha$  и критерия Грасгофа для вертикально расположенной пластины в формулах (1) и (4), вместо длины плода подставляем диаметр.

Критерий Нуссельта определяли по зависимости [2, 3]

$$Nu = 0,755(Pr^2 \cdot Gr)^{0,25} . \quad (10)$$

Выполним расчет для пластины толщиной 0,02 м, диаметром 0,08 м.

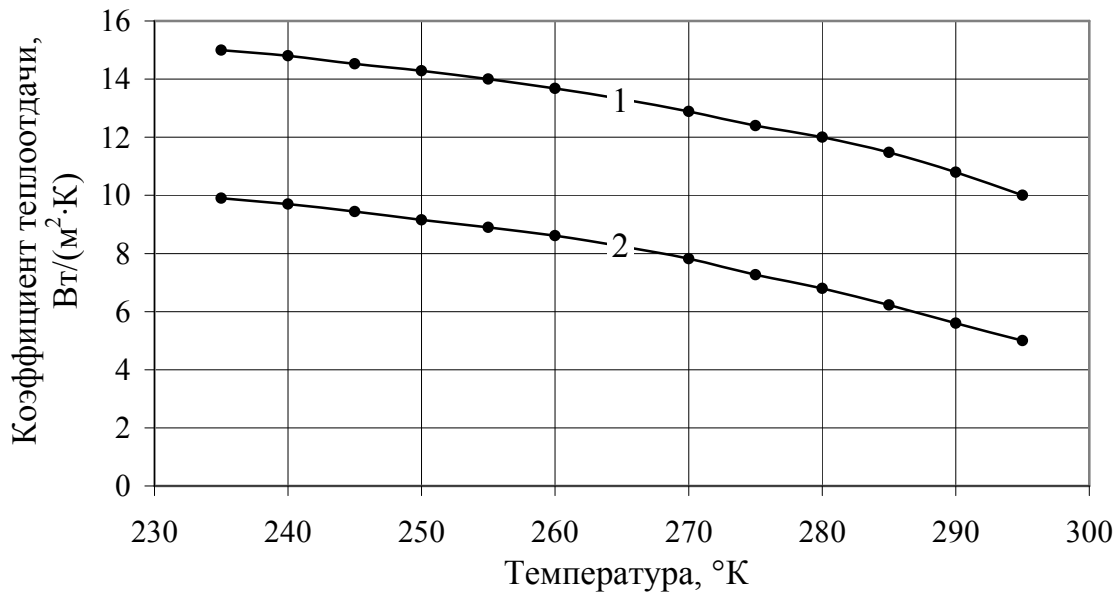


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры для объектов, имеющих форму пластины:  
1 – горизонтальное расположение; 2 – вертикальное расположение

Проведенные расчеты показали (рис. 2), что коэффициент  $\alpha$  хранения плодов максимум изменяется на 5 Вт/м²К.

Для плодов, имеющих коническую форму, расположенных горизонтально, критерий Нуссельта определялся по зависимости: [2, 3, 5]

$$Nu = 0,615 Re^{0,486} , \quad (11)$$

где  $Re$  - число Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d_{\bar{n}\delta}}{\nu} , \quad (12)$$

где  $v$  - скорость движения воздуха, равна 0,6 м/с;

$d_{\bar{n}\delta}$  - средний диаметр конуса, равен 0,05 м.

Для вертикально расположенного конуса критерий Нуссельта определяли по зависимости [2, 3, 5]

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}, \quad (14)$$

где  $h$  - высота, равна 0,08 м.

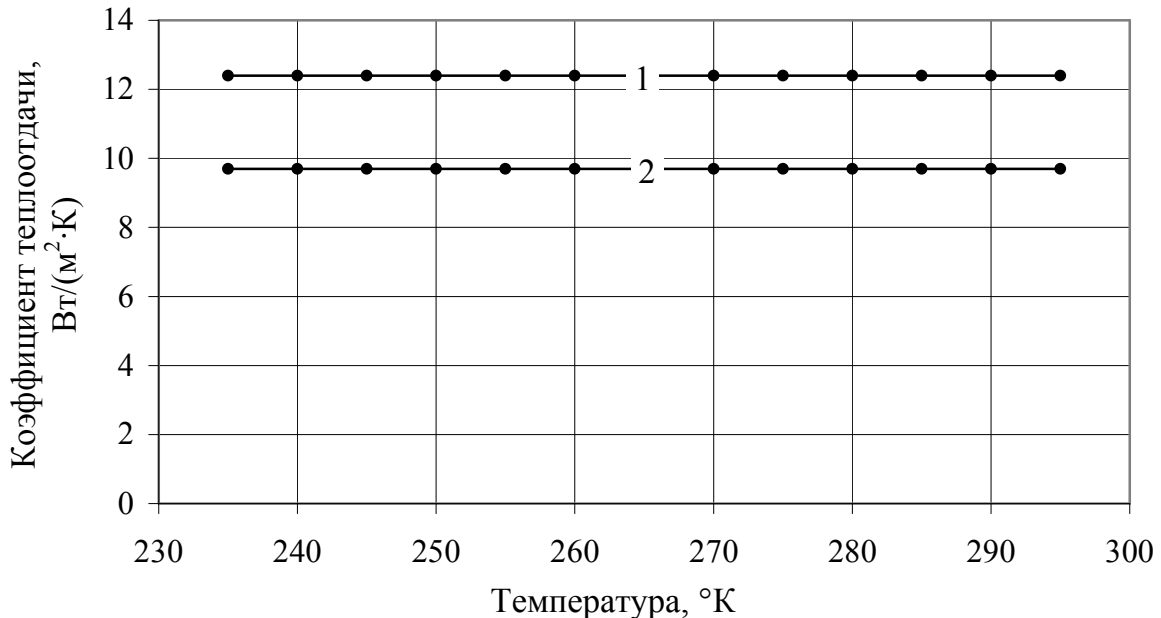


Рис. 3. Изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры для плодов, имеющих коническую форму:  
1 – горизонтальное расположение; 2 – вертикальное расположение

Приведенные расчеты показали (рис. 3), что коэффициент теплоотдачи для плодов, имеющих форму конуса практически не изменяется от температуры.

Расчеты показали, что количество отдаваемой теплоты в интервале температур от 25° до минус 40° С, для исследуемых плодов, изменяется примерно на 0,10-0,20 Вт на один градус.

Поэтому при определении коэффициента теплопроводности  $\lambda$  косвенным влиянием величины  $\alpha$  можно пренебречь.

На основании экспериментальных исследований, проведенных нами, получен обширный экспериментальный материал по определению коэффициента теплопроводности овощей различных типов, прежде всего кукурузы молочно-восковой спелости, баклажан, перца, тыквы и винограда [6, 7].

Флодоовощную продукцию можно рассматривать как капиллярно-пористую структуру, теплофизические характеристики которой из-за сложности и многофазности зависят от влажности,

плотности, температуры, химико-минерального (почвенного) происхождения и т.д. [8, 9].

Как правило, подобная задача требует составления, решения и анализа дифференциального уравнения типа:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{I}{c\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (15)$$

где  $t$  - температура, °С;

$\tau$  - время, с;

$c$  - удельная теплоемкость, кДж/(кг · К);

$\rho$  - плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;

$x, y, z$  - координаты ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);

$q_v$  -интенсивность источников теплоты, Вт/м.

Теплопроводность овощей можно представить, как теплопроводность системы состоящей из сухого вещества, воды, льда и паров т.е.

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\text{нóò}}(\dot{O}) \\ \lambda_{\text{áíáú}}(\dot{O}) \\ \lambda_{\text{ëüáä}}(\dot{O}) \\ \lambda_{\text{íäðíä}}(\dot{O}) \end{cases}$$

Однако, наши исследования показали, что эквивалентное значение  $\lambda_{\text{экв}}$  количественно отображает структурные зависимости указанной системы не раскрывая их взаимосвязи, что вполне достаточно для технических расчетов. Известно, что теплопроводность материала зависит от различных факторов, а именно от влагосодержания, плотности, диапазона температур в котором проводятся измерения теплопроводности.

$$\lambda = f(W, \rho, T, C).$$

Нами установлено, что влагосодержание и плотность в стадии технической спелости, для каждого сорта овощей, является практически величиной постоянной.

Анализ литературных источников [10, 11, 12, 13, 14, 15] показал, что зависимость теплоемкости от температуры подчиняется полиномиальному закону (Рис. 4).

Из рис. 4. можно сделать вывод, что при температуре ниже 0 Цельсия теплоемкость несколько понижается, а затем имеет характерный скачек, связанный с фазовым превращением и

увеличением доли вымороженной воды до некоторого значения, после которого теплоемкость уменьшается.

Однако, в интервале исследуемых нами температур, от криоскопической до минус 20°C теплоемкость изменяется не более чем на 12,3% (0,440 кДж/кг·°К) и ее влияние на изменение коэффициента теплопроводности можно не учитывать. Учитывая выше сказанное в дальнейших исследованиях основное влияние уделялось изучению влияния изменения температуры на теплоемкость.

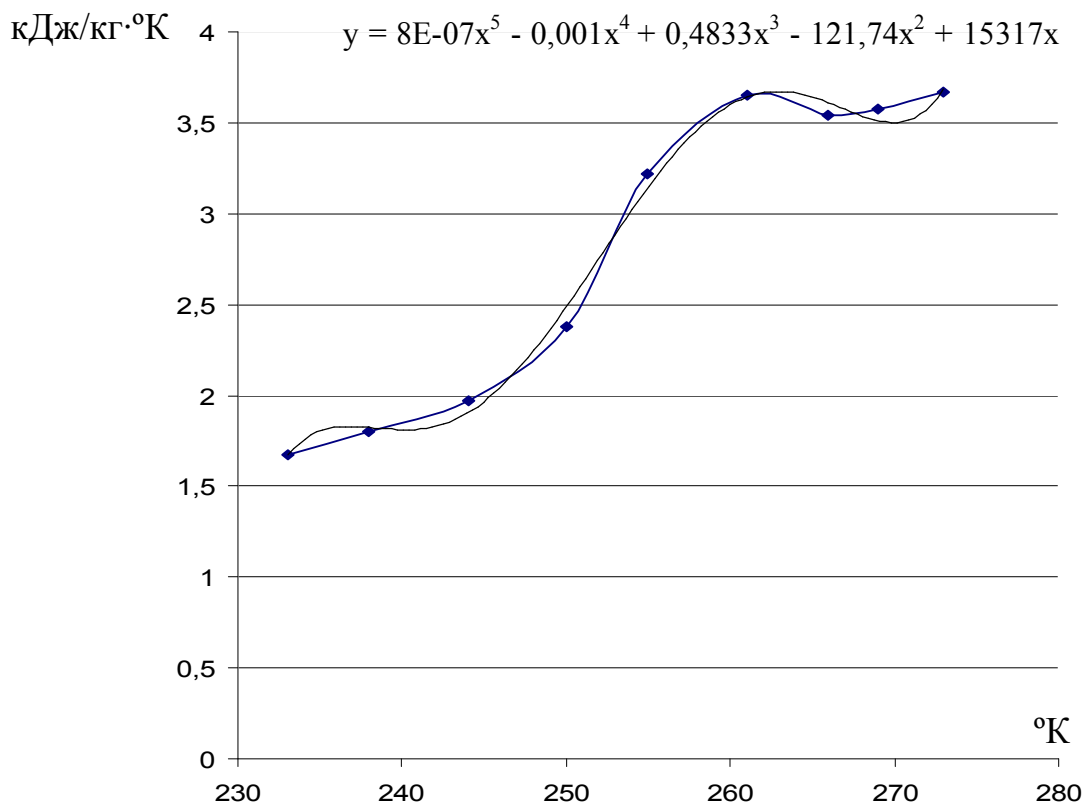


Рис. 4. Изменение теплоемкости от температуры

Уравнение 15 можно записать с использованием оператора Лапласа.

Однако определение оператора Лапласа сопряжено с некоторыми трудностями математического характера.

Поэтому рациональнее определять эффективный коэффициент теплопроводности, рассматривая плоды или овощи как некое квазиоднородное тело.

Для таких овощей, как баклажаны, можно воспользоваться теорией распространения теплоты поперек бесконечного цилиндрического стержня постоянного сечения, початка кукурузы молочно-восковой спелости – бесконечной цилиндрической стенки

(трубы), для фрагмента (кубика) тыквы – однородной пластины, а для перца – конуса с полостью.

Источником теплоты можно считать сам материал плода, нагретый до комнатной температуры (в летнее время 29...32 °С). Условно источник теплоты концентрируется вдоль оси плода. Перейдя к абсолютной температуре, получим упрощенное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (16)$$

где  $T$  - температура, К;

$x$  - расстояние от центра плода, м.

Решением этого уравнения является следующее выражение: [10, 11]

$$T(x, \tau) = T_0 \left[ 1 - \hat{O} \left( \frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}} \right) \right], \quad (17)$$

где  $T(x, \tau)$  - температура в момент времени  $\tau$  на расстоянии  $x$  от оси, К;

$T_0$  - начальная температура плода, К;

$\Phi$  - интеграл вероятности Гаусса [16];

причем

$$\hat{O} \left( \frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}} \right) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}}} e^{-\frac{\left(\frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}}\right)^2}{2}} \cdot d \left( \frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}} \right). \quad (18)$$

Для определения численного значения интеграла Гаусса проведены эксперименты по замораживанию образцов плода баклажана, кукурузы молочно-восковой спелости, перца и тыквы в парах азота и холодильной камере.

Используя полученные опытным путем значения  $T(x, \tau)$ , определяли численное значение интеграла Гаусса по формуле:

$$\hat{O} \left( \frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}} \right) = \frac{\hat{O}_0 - \hat{O}(\delta, \tau)}{\hat{O}_0}. \quad (19)$$

По численному значению интеграла Гаусса из таблиц [16] определялась величина аргумента функции:

$$y = \frac{x\sqrt{\rho c}}{2\sqrt{\lambda \tau}},$$

В свою очередь, интересующая нас величина коэффициента теплопроводности, вычислялась по формуле:

$$\lambda = \frac{\delta^2 \cdot \rho \cdot \tilde{n}}{4 \cdot \tau \cdot y^2}. \quad (20)$$



**Выводы.** Проведенные исследования позволили определить величину коэффициента теплопроводности при отрицательных температурах для баклажан, початков кукурузы молочно-восковой спелости, перца и тыквы.

#### Литература

1. *Антуфьев В.М.* Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева / В.М. Антуфьев. – М. : Энергия, 1966. – 184 с.
2. *Исаченко В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. *Кэйс В.М.* Конвективный тепло и массообмен / В.М. Кэйс. – М. : Энергия, 1972. – 448 с.
4. *Белінська С.О.* Товарознавча характеристика нових видів заморожених гарбузових овочів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.18.15 “Товарознавство харчових продуктів” / С.О. Белінська. – К. : 2000. – 22 с.
5. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление / С.С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
6. *Иванченко В.И.* Определение коэффициента теплопроводности плодоовощной продукции при замораживании / В.И. Иванченко, А. Э. Модонкаева, В.Ф. Ялпачик и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 12. – С. 24–25.
7. *Иванченко В.И.* Обоснование интервала температур замораживания плодоовощной продукции / В.И. Иванченко, В.Ф. Ялпачик, К.Н. Стручаев // „Магарач“ Виноградарство и виноделие. – 2001. – № 2. – С. 23–27.
8. *Гинзбург А.С.* Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М. : Колос, 1984. – 304 с.
9. *Громов М.А.* Универсальное уравнение для расчета коэффициентов теплопроводности соков / М.А. Громов // Консервная и овощная промышленность. – 1972. – № 8. – С. 32–33.
10. *Стручаев К.Н.* Выбор режимов замораживания и хранения с.х. продукции при отрицательных температурах / К.Н. Стручаев, В.Ф. Ялпачик // Холодильная техника и технология. №4, 2004г., с.45-49.
11. *Гайдук В.Н.* Електротеплові властивості солом'яної січки / В.Н. Гайдук // Доповіді української академії с.г. наук №6, 1958р., с.53-57.
12. Холодильное оборудование / под ред. С.П. Белоусов/ - Ростов-на-Дону, “Феликс”, 2000.-320с.
13. Levin D.N. Plant handbook data.- Food Engineering, 1962, №3 p.89-94.

14. *Ильина С.А.* Обобщение величины удельной теплоемкости пищевых продуктов / С.А. Ильина // Материалы междунар. конф. т.г. Вологда. ВолГТУ, 2005.
15. *Ильина С.А.* Таблицы теплофизических характеристик овощных продуктов / С.А. Ильина. Астрахань. СХУРАН, отдел энергетических проблем, 2000.-19с.
16. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

**КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЯК КРИТЕРІЙ  
ОЦІНКИ РЕЖИМІВ ЗАМОРОЖУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Ялпачик В.Ф.

*Анотація* - дана робота присвячена визначенню ступеня впливу розрахункових значень коефіцієнта тепловіддачі на зміну коефіцієнта теплопровідності. Теоретичні дослідження показали, що при визначенні коефіцієнта теплопровідності впливом величини коефіцієнта тепловіддачі можна нехтувати.

**COEFFICIENT OF HEAT-CONDUCTING AS CRITERION  
OF ESTIMATION OF MODES OF FREEZING AND STORAGE OF  
AGRICULTURAL PRODUCT**

V. Yalpachik

*Summary*

This work is given devoted to determination of degree of influencing of calculations values of coefficient of heat emission on changing of coefficient of heat-conducting. Theoretical researches rotined that at determination of coefficient of heat-conducting it is possible to ignore influencing of size of coefficient of heat emission.