УДК 621.560, 664.8.037

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В КАМЕРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПАКОВОК РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Томчик Елена Николаевна *младший научный сотрудник ПНИЛ ХТ*
Кочетов Валентин Петрович *к.т.н., доценкт*
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса.
Tomchyk O.
Kochetov V.
Odessa national academy of food technologies,Odessa

Аннотация: *в статье приведены результаты экспериментальных исследований по хранению яблок в упаковках с жидкостными (водяными) прослойками с повы-шенной теплоустойчивостью и аккумулятивной способностью для хранения плодоовощной продукции, обеспечивающих защиту продукта от температур-ных колебаний в камере, возникающих в процессе хранения.*

По данным измерений температуры, полученных во время проведения исследований, выявлен закон изменения температуры воздуха в камере, и, на основе результатов исследований, разработана математическая модельтеплообмена между продуктом и окружающей средой при изменении температуры окружающей среды по периодическому закону.

Изложены результаты расчетов по модели, и их сопоставление с результатами экспериментальных исследований.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о том, что предлагаемая математическая модель может применяться для описания характера изменения и определения амплитуды колебаний температуры продукта в объеме упаковки при периодических колебаниях температуры окружающей среды, в зависимости от конфигурации упаковок.

Ключевые слова: *плоды, хранение, упаковка, температурные колебания, теплоустойчивость, водяные прослойки.*

Постановка вопроса и взаимосвязь с важнейшими научными и практическими задачами.Осуществление стратегии оптимального развития холодильного хозяйства на основе внедрения новых технологий и конструк-тивных решений в процессе обновления действующих и строительства новых объектов, является главным направлением обеспечения требований к под-держанию на законодательном уровне условий национальной,продовольст-венной и энергетической безопасности.

Рассмотрение результатов многочисленных исследований ведущих орга-низаций свидетельствуют о том, что, несмотря на использование новых техно-логий хранения и конструктивных решений для их осуществления, потери растительной продукции при хранении остаются на достаточно высоком уровне в связи с влиянием систематических нарушений параметров технологического регламента в грузовом пространстве в процессе хранения, которые периоди-чески возникают в камераххолодильников с любыми охлаждающими система-ми и строительными конструкциями, и определяющее влияние на стабильность параметров технологического регламента оказывает амплитуда колебаний температуры. Колебания температуры в грузовом пространстве действующих холодильников возникают по различным причинам (неполная загрузка камер, проведение

грузовых операций, цикличность работы воздухоохладителей, инфильтрация наружного воздуха и др.), и могут составлять $\Delta T_{кам}$ = 6..12 °С.

В качестве способа защиты продукта от температурных колебаний в грузовом объеме камер авторами предложенык примененияупаковки с жидкостными (водяными) прослойками с повышенными показателями теплоустойчивости и аккумулирующей способности [1, 2, 3].

Целью работы являетсяразработка математической модели теплообме-на между упаковкой с плодами и окружающей средой в условиях постоянных периодических температурных колебаний окружающей среды (воздуха каме-ры), позволяющей оценить влияние конструктивных особенностей упаковок на стабильность поддержания температуры продукта в этих упаковках.

Математическая модель разработана на основе результатов проведенных авторами экспериментальных исследований по хранению плодов яблони(Гала, 1 сорт) в разных условиях влияния нарушений параметров технологического регламента с использованием упаковок различной конфигурации – контроль-ных (без водных прослоек) и опытных (с водяными прослойками).Исследова-ния проводили в камерах разного типа при модификации возможных отклоне-ний температуры воздуха в камере, которые имеют место в практике хранения, и приводят к увеличению потерь продукции.

Изложение основного материала

При изучении влияния постоянных периодических колебаний температуры в камере на параметры технологи-ческого регламента в объеме упаковок различной конфигурации применяли специально изготовленные упаковки из органического стекла толщиной 3 мм.

Использовали 2 упаковки (ящика) с одинаковыми наружными размерами 600×400×288 мм (с крышкой). Один из ящиков (контрольный) загружали пло-дами, закрывали крышкой и помещали в холодильную камеру. Во второй (экс-периментальный) ящик поочередно, в процессе проведения исследований, по-мещали загруженные плодами ящики меньшего размера, одинаковые проме-жутки между которыми заполняли водой. Принимали две толщины слоя воды между поверхностями внутренних и наружных ящиков (δ_w) – 7..10 мм и 27..30 мм, соответственно. Размеры наружных упаковок оставались неизменными, толщина водяной прослойки в экспериментальных упаковках изменялась за счет размеров внутренних упаковок. В крышках упаковок предусмотрены отверстия диаметром 12 мм для поступления воздуха к плодам.

Колебания температуры в камере КХК-6 в пределах от – 3,4 до +5,7 ºС создавали за счет увеличения дифференциала терморегулятора.

При проведении исследований в охлажденные упаковки загружали предварительно охлажденные плоды. Плоды в упаковках выдерживали в камере на протяжении 4 недель, после окончания экспериментов проводилиоценка качества продукции и определяли общие потери массы [4].

Исследования показали, что при наличии периодических колебаний температуры воздуха в камере в обоих случаях колебания температуры плодов в контрольных упаковках составили 0,5..0,7 °С, колебания температуры плодов в объеме опытных упаковок не превышали 0,2 °С, при этом характер колебаний температуры плодов зависел от толщины

прослойки (рисунок 1); температура воды в прослойках T_wколебалась около среднего значения температуры воздуха в камере $T_{окр.\ ср\ средн.}$с амплитудой $A_w \approx$ 0,3..0,4 ºС.

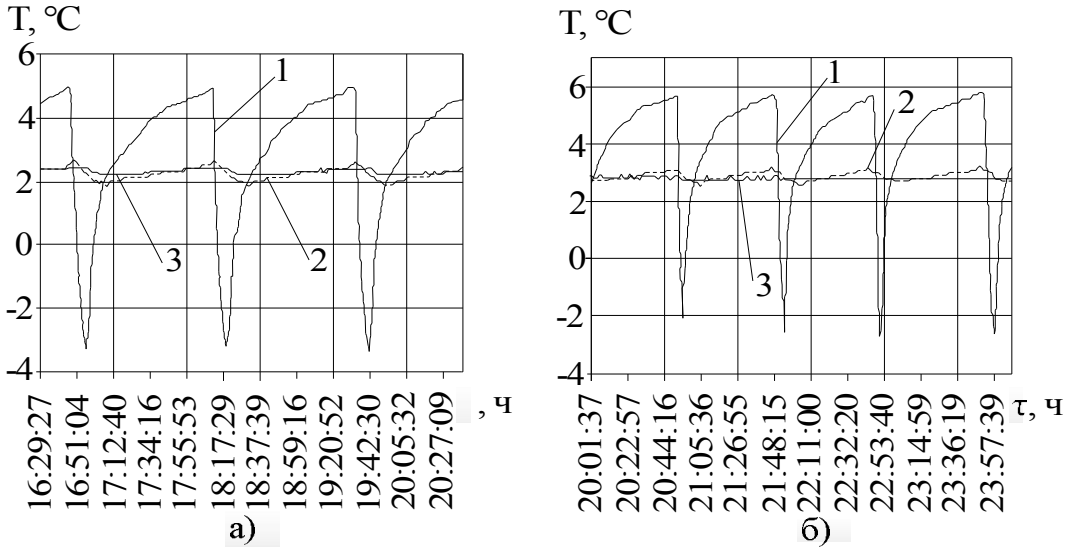

Рис. 1. Изменение температуры плодов в объеме экспериментальных (с водными прослойками) и контрольных упаковок при постоянных периодических колебаниях температуры воздуха в камере: а) при δ_w = 7..10 мм; б) δ_w = 27..30 мм; 1 – температура в камере; 2 – температура плодов в контрольныхупаковках; 3 – температура плодов в опытных упаковках.

Температуры в камере и в объеме упаковок непрерывно фиксировали, что позволило по экспериментальным данным определить закон изменения температуры воздуха в камере.

Поскольку периодическое изменение температуры продукта (плодов) в упаковке от минимальной ($T_{пр.min}$) до максимальной ($T_{пр.max}$), по сути, является чередованием процессов охлаждения и нагрева в течение определенного периода времени, можно считать, что хранение осуществляется в нестационар-ном режиме.Теплообмен между продуктом в упаковке и окружающей средой:

$$Q = m_{пр} \cdot \left[c_{пр} \cdot \Delta T_{пр.} + q_{дых}\right] = \alpha_{пов} \cdot F_{пов} \cdot \Delta T + Q_{дых}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где Q – общий тепловой поток, отводимый от продукта при хранении, Вт.

Продукт (плоды) в упаковках с водными прослойками, и без прослоек, может быть представлен в качестве однородногофизическоготелапроизволь-ной формы с заданными площадью поверхности ($F_{пов}$, м^2) и объемом ($V_{пр}$, м^3), заключенного в 1..n защитных оболочек (их число зависит от конфигурации упаковки), и находящегося в среде, температура которой изменяется по периодическому закону. Теплофизические характеристики тела – конвективный коэффициент теплоотдачи от поверхности к окружающей среде ($\alpha_{пов}$, Вт/(м^2·°С)), теплоемкость ($c_{пр}$, Дж/(кг·°С)), плотность ($\rho_{пр}$, кг/м³), – постоянны. В качестве оболочек приняты стенки упаковок. Теплообмен с окружающей средой осуществляется по закону Ньютона-Рихмана (конвективный теплообмен при граничных условиях 3-го рода). Внутри тела непрерывно действует источник тепла мощностью $Q_{дых}$(рисунок 1). Предполагается, что тепло с поверхности объекта хранения

отводится равномерно, температура продукта одинакова и равна средней температуре продукта по объему упаковки.

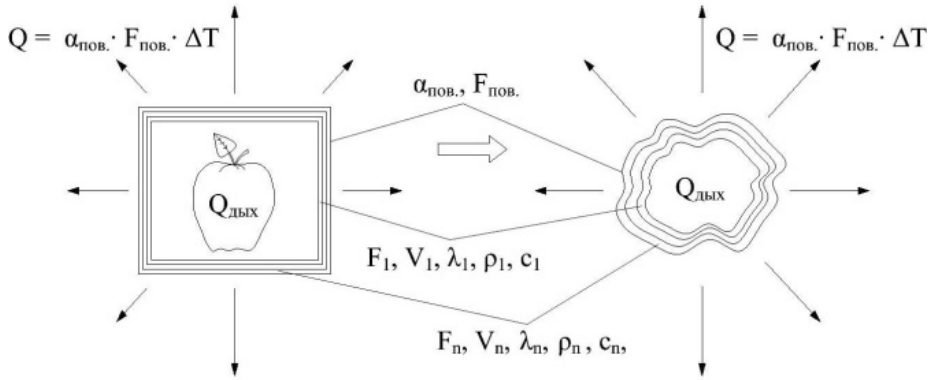

Рис. 2. Расчетная схема теплообмена между продуктом (плодами) в упаковке и окружающей средой.

Определение характера изменения температуры продукта в объеме упаковки при постоянных периодических колебаниях температуры в охлаждаемом объеме, при наличии тепловыделений продукта потребовало разложения на 2 отдельные задачи, с последующим сложением решений:

1) определение зависимости изменения температуры продукта при изменении температуры окружающей среды по периодическому закону;

2) определение влияния теплоты дыхания на температурупродукта в зависимости от изменения характера температуры продукта.

Для решения первой задачи последовательно рассмотрены: процессы охлаждения/нагрева однородного тела, температурный режим однородного тела при периодическом изменении температуры его поверхности и температурный режим однородного тела в оболочке.

Представим продукт без упаковки как однородное тело произвольной формы с параметрами $F_{пов}$, $V_{пр}$, $\alpha_{пов}$, $\rho_{пр}$, $c_{пр}$, охлаждаемое с поверхности F, м^2, в объеме которого выделяется тепло.Дифференциальное уравнение нагрева/ охлаждения однородного тела:

$$-\alpha_{пов} \cdot F_{пов} \cdot \Delta T = \rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр} \cdot \frac{dT}{d\tau} \qquad (2)$$

Для данного тела, находящегося в среде, температура которой ($T_{окр.\ ср.}$) изменяется по периодическому косинусоидальному закону

$$T_{окр.\ ср.}(\tau) = A_{T_{окр.\ ср.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \qquad (3)$$

уравнение, описывающее температурный режим тела,имеет вид:

$$\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} \cdot \frac{dT}{d\tau} + T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср}(\tau) \qquad (4)$$

где$A_{T_{окр.\ ср.}}$ – амплитуда колебаний температуры окружающей среды;

$T_{пр}(\tau)$ – искомая функция изменения температуры рассматриваемого тела.

Решением уравнения (4) является косинусоида вида:

$$T_{пр.}(\tau) = A_{T_{пр.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi), \quad (5)$$

где $A_{T_{пр.}}$ – амплитуда колебаний температуры продукта.

Подставляя (5) в (4), получим:

$$\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} \cdot \omega \cdot A_{T_{пр.}} \cdot \cos\left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + A_{T_{пр.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) = A_{T_{окр.\ ср.}} \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad (6)$$

$$A_{T_{пр.}} = \frac{A_{T_{окр.\ ср.}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} \cdot \omega\right)^2}} \quad (7)$$

Угол сдвига по фазе между $T_{пр}$ и $T_{окр.\ ср.}$:

$$\varphi = -arctg\left(\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} \cdot \omega\right)^2 \quad (8)$$

Для синусоиды:

$$T_{окр.\ ср.}(\tau) = A_{T_{окр.\ ср.}} \cdot sin\ (\omega \cdot \tau) \quad (9)$$

уравнение (6) примет вид:

$$\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} \cdot \omega \cdot A_{T_{пр.}} \cdot sin\left(\omega \cdot \tau + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + A_{T_{пр.}} \cdot sin(\omega \cdot \tau + \varphi) = A_{T_{окр.\ ср.}} \cdot sin\ (\omega \cdot \tau) \quad (10)$$

В случае несинусоидального периодического изменения температуры окружающей среды $(T_{окр.ср.})$ для нахождения температуры тела $(T_{пр.})$ следует использовать разложение несинусоидальной функции в ряд Фурье с последующим решением задачи для каждой гармоники.

По результатам измерений температуры, проведенных во время исследований, установлено, что изменение температуры в камере можно описать двумя экспоненциальными функциями с разными постоянными времени (z_1, z_2) на участках возрастания и убывания температуры(рисунок 2).

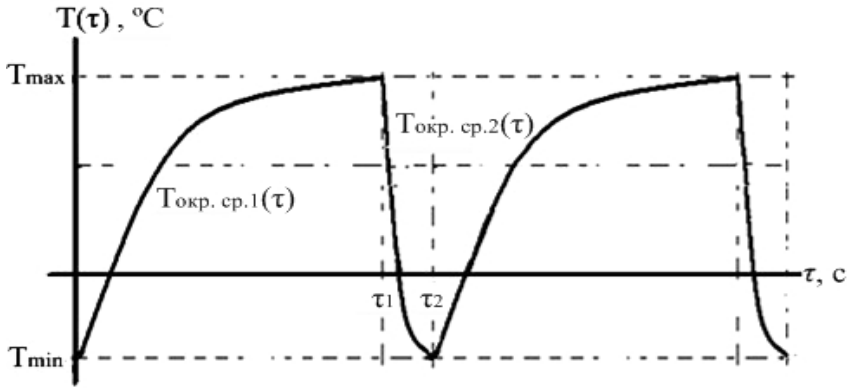

Рис. 2. Закон изменения температуры воздуха в охлаждаемой камере ($T_{окр.\ ср.}$) во время проведения экспериментальных исследований.

Периодическая функция представлена двумя экспонентами:

при $0 < \tau < \tau_1$:

$$T_{окр.\ ср._1}(\tau) = T_{окр.\ ср_1} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{z_1}\right)} + G_1 \tag{11}$$

при $\tau_1 < \tau < \tau_2$:

$$T_{окр.\ ср_2}(\tau) = T_{окр.\ ср_2} \cdot e^{\left(-\frac{\tau}{z_2}\right)} + G_2 \tag{12}$$

Разложение функции в ряд Фурье в общем случае имеет вид:

$$T_{окр.\ ср.}(\tau) = T_{окр.\ ср._{средн.}} + \sum_1^n (a_k \cdot cosk\omega\tau + b_k \cdot sink\omega\tau) \tag{13}$$

где k = 1, 2 ,3, 4, 5, ... n – число гармоник.

$$T_{окр.\ ср._{средн.}} = \frac{1}{\tau_2}\int_0^{\tau_2} T_{окр.\ ср.}(\tau)d\tau \tag{14}$$

$$a_k = \frac{2}{\tau_2}\int_0^{\tau_2} T_{окр.\ ср.}(\tau)cosk\omega\tau d\tau \tag{15}$$

$$b_k = \frac{2}{\tau_2}\int_{\tau_1}^{\tau_2} T_{окр.\ ср.}(\tau)sink\omega\tau d\tau \tag{16}$$

Выполняя интегрирование, получим:

$$T_{окр.\ ср._{средн.}} = \frac{1}{\tau_2}\cdot\left(z_1 \cdot T_{окр.\ ср._1} \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{\tau_1}{z_1}\right)}\right) + \tau_1 \cdot G_1\right) + \\ + \frac{1}{\tau_2}\cdot\left(z_2 \cdot T_{окр.\ ср._2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(\tau_2-\tau_1)}{z_2}}\right) + (\tau_2 - \tau_1)\cdot G_2\right) \tag{17}$$

Для коэффициентов a_k и b_k интегрирование выполнено численно методом прямоугольников. При разбиении периода функции на N интервалов:

$$a_k = \frac{2}{\tau_2}\sum_{i=1}^{N} T_{окр.\ ср.}(i \cdot \Delta\tau)cos\,(k \cdot \omega \cdot i \cdot \Delta\tau) \cdot \Delta\tau \tag{18}$$

$$b_k = \frac{2}{\tau_2}\sum_{i=1}^{N} T_{окр.\ ср.}(i \cdot \Delta\tau)sin(k \cdot \omega \cdot i \cdot \Delta\tau) \cdot \Delta\tau \tag{19}$$

Окончательное решение, с учетом (6) и (10), можно представить в виде:

$$T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср._{средн.}} + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1 + \left(\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр} \cdot \frac{1}{\alpha_{пр} \cdot F_{пр}} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot cos\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right) + \\ + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1 + \left(\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр} \cdot \frac{1}{\alpha_{пов.} \cdot F_{пов.}} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot sin\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right) \tag{20}$$

где

$$\varphi = -arctg\left(\frac{\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр}}{\alpha_{пов.} \cdot F_{пов.}} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right) \tag{21}$$

Если однородное тело заключить в 1..n оболочек, то эти оболочки создадут дополнительные тепловые сопротивления; поверхность конвективного теплообмена также можно рассматривать как тепловое сопротивление на пути движения теплового потока, таким образом:

$$\sum\rho \cdot c \cdot V \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_{об_i} \cdot F_{об_i}}\right) \cdot \frac{d\tau}{d\tau} + T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср.}(\tau) \qquad (22)$$

В соответствии с физической моделью упаковки (рисунок 1), плоды в контрольной упаковке представлены как тело с одной защитной оболочкой – наружной стенкой упаковки. Тепло отводится конвективным путем с наружной поверхности упаковки. Уравнение (22) для плодов в упаковке без прослойки:

$$\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \frac{1}{\lambda_{ст_1} \cdot F_{ст_1}}\right) \cdot \frac{dT}{d\tau} + T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср.}(\tau) \qquad (23)$$

Закон изменения температуры плодов в упаковке без водяной прослойки:

$$T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср.\ средн.} + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1+\left(\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \frac{1}{\lambda_{ст_1} \cdot F_{ст_1}}\right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right) +$$

$$+ \sum_1^n \frac{b_k}{\sqrt{1+\left(\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \frac{1}{\lambda_{ст_1} \cdot F_{ст_1}}\right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right), \qquad (24)$$

где

$$\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i = \rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр} + \rho_{ст1} \cdot c_{ст1} \cdot V_{ст1}$$

Плоды в опытной упаковке представлены как тело, окруженное 3 защитными оболочками: наружной стенкой упаковки, водяной прослойкой, и внутренней стеной упаковки. Для плодов в упаковке с водяной прослойкой:

$$\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_i \cdot F_i}\right) \cdot \frac{dT}{d\tau} + T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср.}(\tau) \qquad (25)$$

Изменение температуры плодов в упаковке с водяной прослойкой:

$$T_{пр}(\tau) = T_{окр.\ ср.\ средн.} + \sum_1^n \frac{a_k}{\sqrt{1+\left(\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_i \cdot F_i}\right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right) +$$

$$+ \sum_1^n \frac{b_k}{\sqrt{1+\left(\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{пов} \cdot F_{пов}} + \sum \frac{1}{\lambda_i \cdot F_i}\right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2}\right)^2}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot k \cdot \pi}{\tau_2} \cdot \tau + \varphi\right), \qquad (26)$$

где

$$\sum\rho_i \cdot c_i \cdot V_i = \left(\rho_{пр} \cdot c_{пр} \cdot V_{пр} + \rho_{ст1} \cdot c_{ст1} \cdot V_{ст1} + \rho_{ст2} \cdot c_{ст2} \cdot V_{ст2} + \rho_w \cdot c_w \cdot V_w\right),$$

$$\sum \frac{1}{\lambda_i \cdot F_i} = \sum R_{об_i} = \left(\frac{1}{\lambda_{ст1} \cdot F_{ст1}} + \frac{1}{\lambda_{ст2} \cdot F_{ст2}} + \frac{1}{\lambda_w \cdot F_w}\right)$$

Результаты расчетов по предлагаемой математической модели, выполненные с помощью программыQBasic, приведены на рисунке 3.

Задача по определению изменения температуры тела за счет выделения тепла дыхания в условиях периодических колебаний температуры аналогична решению задачи для охлаждения конвективным путем кусочно-однородного шара. Для решения использовали

упрощенную модель из сфер с заданными теплофизическими и геометрическими характеристиками. Радиусы сфер принимали по площадям поверхностей, участвующих в теплообмене.

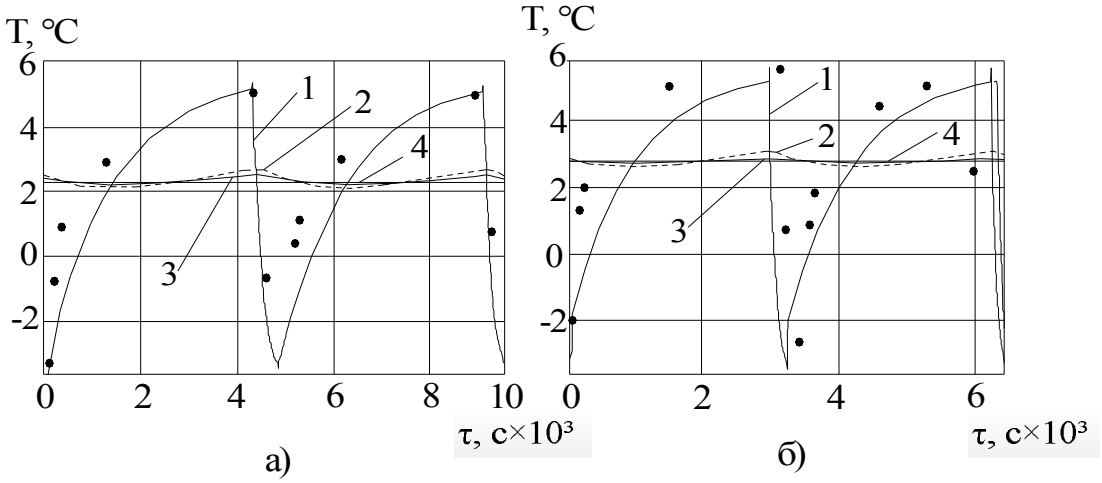

Рис. 4. Колебания температуры плодов в объеме упаковок за счет теплообмена с окружающей средой, при изменении температуры камеры по экспоненциальному закону: а) при δ_w = 7..10 мм; б)приδ_w = 27..30 мм;1 – температура в камере; 2 – температура плодов в контрольных упаковках; 3 – температура плодов в опытных упаковках; 4 – средняя температура в камере.

Общее решение задачи теплопроводности в пределах i-той сферы:

$$T_i = -\frac{1}{\lambda_i}\cdot\frac{q_i r^2}{6} + \frac{A_i}{r} + B_i \qquad (27)$$

В центре шара (r = 0) тепловой поток равен нулю$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\,|_{r=0}$, отсюда, A_1 = 0:

$$A_i = -\frac{(q_i - q_{i-1})\cdot r_i^3}{3\lambda_i} + \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_i}\cdot A_{i-1} \qquad (28)$$

Тепло, выделяющееся в объеме шара:

$$Q_V = \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot 4\pi \cdot \frac{r_i^3}{3} \qquad (29)$$

Тепло, отводимое конвекцией с поверхности шара:

$$Q_F = 4\cdot\pi\cdot r^2\cdot\alpha(T_r - T_{окр.\ ср.\ средн.}) \qquad (30)$$

где T_r – температура на поверхности шара.
Из уравнения теплового баланса $Q_V = Q_F$:

$$T_r = \frac{1}{3\cdot r^2\cdot\alpha}\cdot\sum_{i=1}^{n} q_i\cdot r_i^3 + T_{окр.\ ср.} \qquad (31)$$

С другой стороны, на поверхности шара:

$$T_r = -\frac{1}{\lambda_n} \cdot \frac{q_n \cdot r^2}{6} \cdot \frac{A_n}{r} + B_n \qquad (32)$$

Из условия непрерывности функции $T_{i-1}(r) = T_i(r)$:

$$B_{i-1} = \frac{q_{i-1} \cdot r_i^3}{6 \cdot \lambda_{i-1}} - \frac{q_i \cdot r_i^3}{6 \cdot \lambda_i} + \frac{A_i}{r_i} - \frac{A_{i-1}}{r_i} + B_i \qquad (33)$$

Математическая модель также реализована в программе QBasic.

Полное решение задачи представляет собой решение первой задачи, с учетом повышения температуры продукта на величину, характеризующую влияние тепла дыхания, полученную в результате решения задачи 2.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных при использовании контрольных и опытных упаковок с различной толщиной водяных прослоек приведено в таблице 1.

Таблица 1

Изменение температуры плодов в объеме контрольной и опытной упаковок, при изменении температуры камеры по экспоненциальному закону

Температура, °С	Эксперимент №1				Эксперимент №2			
	Тип упаковки							
	Опытная (δ_w = 7 мм.)		Контрольная		Опытная (δ_w = 27 мм.)		Контрольная	
Средняя температура камеры, $T_{окр.\ ср.\ средн.}$, °С	опыт/расчет				опыт/расчет			
	≈ 2,3/2,3153				≈ 2,8/2,7863			
Изменение температуры плодов с учетом влияния тепла дыхания, °С	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
	$T_{пл.\ max} + \Delta T_{дых}$, °С							
	2,4	2,494	2,5..2,6	2,668	2,9	2,854	3,1..3,2	3,087
	$T_{пл.\ min} + \Delta T_{дых}$, °С							
	2,2	2,229	1,9..2	2,124	2,8	2,762	2,6..2,7	2,638
	$\Delta T = (T_{пл.\ max} - T_{пл.\ min}) + \Delta T_{дых}$, °С							
	0,2	0,265	0,6..0,7	0,544	0,1	0,092	0,5..0,6	0,449

Так как теплопередача через жидкостные прослойки осуществлялась теплопроводностью и конвекцией, для учета конвективной составляющей в расчетах использовали эквивалентный коэффициент теплопроводности ($\lambda_{экв}$).

Вывод

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность

предлагаемой математической модели. Полученная модель теплообмена между продуктом и окружающей средой при изменении температуры окружающей среды по периодическому закону позволяет определить характер изменения и амплитуду колебаний температуры продукта в объеме упаковки в зависимости от амплитуды и характера колебаний температуры окружающей среды, а также от теплофизических и конструктивных характеристик применяемых упаковок.

Литература

1. Пат. 41517 Україна, B 65 D 81/24, F 25 D 29/00. Пластикова тара для зберігання плодоовочевої продукції / Томчик О. М. (Україна) – № u200814732; заявл. 22.12.08; опубл. 25.05.2009, бюл. № 10/2009. – 2 с.

2. Пат. 44897 Україна, A 01 F 25/00, B 65 D 85/34. Контейнер для зберігання плодоовочевої продукції / Томчик О. М. (Україна) – № u200900999; заявл. 09.02.09; опубл. 26.10.2009, бюл. № 20/2009. – 3 с.

3. Пат. 48587 Україна, B 65 D 81/24, F 25 D 29/00. Пластикова тара для зберігання плодоовочевої продукції / Томчик О. М. (Україна) – № u200909923; заявл. 29.09.09; опубл. 25.03.2010, бюл. № 6/2010. – 2 с.

4. Томчик, Е. Н. Результаты применения нових типов упаковок с повышенной тепловой инерционностью для хранения растительной продукции / Е. Н. Томчик, В. П. Кочетов // Современные проблемы холодильной техники и технологии: материалы IX Междунар. науч.-техн. конференции, Одесса, 10-12 сентября 2013 г.//ОНАХТ, УН ИХКЭ – Херсон, Гринь Д. С., 2013. –С. 120-122.

5. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления В 2 кн. Кн. 2. / Н. С. Пискунов. –13-е изд. – М.: Наука, 1985. – 560 с.

6. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики. / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1977. – 456 с.

7. Марчук, Г. И. Введение в проекционно-сеточныеметоды. / Г. И. Марчук, В. И. Агошков – М.: Наука, 1981 г. – 416 с.

8. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов – М.: Наука, 1975 г.– 632 с.

9. Грей, Э. Метьюз, Г. Б. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике / Э. Грей, Г. Б. Метьюз; пер. с англ. С. Я.Коган. – М.: Иностранная литература, 1953. – 371 с.

10. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд; под ред. Б. Е. Победри; пер. с англ. А. А. Шестакова – М.: Мир, 1979. – 392 с.

References

1. Pat. 41517 Ukraina, B 65 D 81/24, F 25 D 29/00. Plastykova tara dlia zberihannia plodoovochevoi produktsii / Tomchyk O. M. (Ukraina) – № u200814732; zaiavl. 22.12.08; opubl. 25.05.2009, biul. № 10/2009. – 2 s.

2. Pat. 44897 Ukraina, A 01 F 25/00, B 65 D 85/34. Konteiner dlia zberihannia plodoovochevoi produktsii / Tomchyk O. M. (Ukraina) – № u200900999; zaiavl. 09.02.09; opubl. 26.10.2009, biul. № 20/2009. – 3 s.

3. Pat. 48587 Ukraina, B 65 D 81/24, F 25 D 29/00. Plastykova tara dlia zberihannia plodoovochevoi produktsii / Tomchyk O. M. (Ukraina) – № u200909923; zaiavl. 29.09.09; opubl. 25.03.2010, biul. № 6/2010. – 2 s.

4. Tomchik, E. N. Rezultaty iprimeneniya novih tipov upakovok s povyishennoy teplovoy inertsionnostyu dlya hraneniya rastitelnoy produktsii / E. N. Tomchik, V. P. Kochetov // Sovremennyie problemyi holodilnoy tehniki itehnologii: materialyi IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konferentsii, Odessa, 10-12 sentyabrya 2013 g.// ONAHT, UNIHKE – Herson, GrinD. S., 2013. – S. 120-122.

5. Piskunov, N. S. Differentsialnoe i integralnoe ischisleniya V 2 kn. Kn. 2. / N. S. Piskunov. –13-e izd. – M.: Nauka, 1985. – 560 s.

6. Marchuk, G. I. Metodyi vyichislitelnoy matematiki. / G. I. Marchuk. – M.: Nauka, 1977. – 456 s.

7. Marchuk, G. I. Vvedenie v proektsionno-setochnyiemetodyi. / G. I. Marchuk, V. I. Agoshkov – M.: Nauka, 1981 g. – 416 s.

8. Bahvalov, N. S. Chislennyie metodyi / N. S. Bahvalov – M.: Nauka, 1975 g.– 632 s.

9. Grey, E. Metyuz, G. B. Funktsii Besselya i ih prilozheniya k fizike i mehanike / E. Grey, G. B. Metyuz; per. s angl. S. Ya. Kogan. – M.: Inostrannayaliteratura, 1953. – 371 s.

10. Segerlind, L. Primenenie metoda konechnyih elementov / L. Segerlind; pod red. B. E. Pobedri; per. s angl. A. A. Shestakova – M.: Mir, 1979. – 392 s.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В УМОВАХ ПЕРІОДИЧНИХ КОЛИВАНЬ ТЕМПЕРАТУРИ У КАМЕРІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ УПАКОВОК РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Анотація: *у статті наведені результати експериментальних досліджень по зберіганню яблук в упаковках з рідинними (водяними) прошарками з підвищеною теплостійкістю і акумулятивною здатністю для зберігання плодо-овочевої продукції, що забезпечують захист продукту від температурних коливань в камері, що виникають у процесі зберігання.*

За данимивимірюваньтемператури, отриманихпід час проведеннядосліджень, визначено закон змінитемпературиповітря в камері, і, по результатамдосліджень, розробленоматематичну модель теплообмінуміж продуктом і навколишнімсередовищем при змінітемпературинавколишньогосередовища по періодичному закону.

Викладено результати розрахунків по моделі, і їх зіставлення з результатами експериментальних досліджень.

Порівняння розрахункових і експериментальних даних свідчить про те, що запропонована математична модель може застосовуватися для описання характеру зміни та визначення амплітуди коливань температури продукту в обсязі упаковки при періодичних коливаннях температури навколишнього середовища, залежно від конфігурації упаковок.

Ключові слова: *Плоди, зберігання, упакування, температурні коливання, теплостійкість, водяні прошарки.*

THE MODELLING OF HEAT TRANSFER PROCESSESIN THE CONDITIONS OF PERIODIC A TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN THE CHAMBER AT THE USAGE OF DIFFERENT CONFIGURATIONS PACKAGES

Summari: *the results of experimental studies of apples storage in packaging with liquid (water) interlayers with high thermal stability and accumulative capacity for storage fruit and vegetables that protect the products from temperature fluctuations in the chamber that eventuate during the storage are published.*

According to the temperature measurements data obtained during the research, the law of change of air temperature in the chamber is revealed, and, on the basis of research results, a mathematical model of heat transfer between the product and the environment at ambient temperature change on the periodic law is developed.

The results of model calculations and their comparison with the results of experimental studies are represented.

Comparison of calculated and experimental data shows that the proposed mathematical model can be used for the description the nature of change and determining the amplitude of temperature fluctuations in the bulk product packaging in the periodic fluctuations in ambient temperature, depending on the configuration of packages.

Keywords: *the fruit, storage, packaging, temperature fluctuations, thermal stability, water layer (interlayer).*