

Improving the Energy Efficiency of Mechanical and Thermomechanical Food Technology Systems

Bezbakh I.V., Kepin N. I., Voskrsenskaja E.V.
Odessa National Academy of Food Technologies
Odessa, Ukraine

Abstract. The drawbacks of the equipment for mechanical and thermomechanical treatment of food products are considered. The ways of solving energy problems in technologies of heat treatment of food liquids, drying of dispersed products, and separation of stone fruit crops are proposed. Designs of dryers and apparatus for heat treatment on the basis of rotating thermosiphons are shown. The results of experimental studies of the drying processes, the heat treatment of foods in the machines with rotating thermosiphons have been presented. The models for the calculation of heat and mass transfer processes in heat treatment and drying of food products in these devices had been offered. Descriptions of the machine of rotary type for separation of stone fruit crops have been done. The economic efficiency of the proposed re-direction of primary processing of stone fruit crops has been proved. The modified Newton number is used for generalizing experimental results. The Euler number is used to take into account the energy characteristics of the machine. The criteria equations have been suggested for design and optimization of this class of machines. The proposed devices are able to provide the effective heat transfer in processing of dispersed viscous foodstuffs and to reduce the energy loss up to 30%.

Keywords: thermomechanical processing, energy, food technology, modeling.

Majorarea eficienței energetice a sistemelor mecanice și termomecanice ale tehnologiilor alimentare

Bezbah I.V., Chepin N.I., Voskresenskaia E.V.
Academia națională de tehnologii alimentare din Odesa
Odesa, Ucraina

Rezumat. Sunt studiate neajunsurile echipamentului pentru mecanica și termomecanica de prelucrare a produselor alimentare. Se propun căi pentru rezolvarea problemelor energetice în tehnologiile de prelucrare termică a lichidelor alimentare, uscare a produselor dispersate, separare a produselor alimentare cu sămburi. Sunt prezentate construcții de uscătoare și aparate pentru tratament termic pe baza rotativă Thermosiphons. Sunt prezentate cercetări experimentale ale proceselor de uscare, prelucrare termică a produselor alimentare în aparatele cu termosifoane rotative. Se propun modelele numerice de similaritate pentru calculul proceselor de transfer de masă și căldură în prelucrarea termică și în uscarea alimentelor în aceste aparate. Sunt descrise mașinile de tip rotativ pentru separarea culturilor de fructe cu sămburi. Numărul Newton modificat este folosit la generalizarea datelor experimentale. Caracteristicile energetice ale mașinii sunt luate în considerație prin utilizează numărului Euler. Se propun ecuațiile criteriale pentru proiectarea și optimizarea acestei clase de mașini. Construcțiile propuse ale dispozitivelor sunt capabile să asigure transferul eficient de căldură la prelucrarea produselor alimentare vâscoase și dispersate, reducând pierderile de energie de până la 30%.

Cuvinte-cheie: prelucrarea termomecanică, energie, tehnologii alimentare, modelarea.

Повышение энергетической эффективности механических и термомеханических систем пищевых технологий

Безбах И. В., Кепин Н. И., Воскресенская Е. В.
Одесская национальная академия пищевых технологий
Одесса, Украина

Rezumat. Рассмотрены недостатки оборудования для механической и термомеханической обработки пищевых продуктов. Предлагаются пути решения энергетических проблем в технологиях термообработки пищевых жидкостей, сушки дисперсных продуктов, разделения плодов косточковых культур. Представлены конструкции сушилок и аппаратов для термообработки на базе вращающихся термосифонов. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов сушки, термообработки пищевых продуктов в аппаратах с вращающимися термосифонами. Предлагаются модели в числах подобия, для расчета процессов тепло- массопереноса при термообработке и сушке пищевых продуктов в перечисленных аппаратах. Дано описание машины роторного типа для разделения плодов косточковых культур. Обоснована экономическая эффективность предлагаемого направления первичной переработки косточковых культур. При обобщении экспериментальных результатов использовано модифицированное число Ньютона. Энергетические характеристики машины учтены при использовании числа Эйлера. Предложены критериальные уравнения для проектирования и оптимизации

подобного класса машин. Предложенные конструкции аппаратов способны обеспечить эффективный теплоперенос при обработке вязких и дисперсных пищевых продуктов при уменьшении энергетических потерь до 30 %.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, энергия, пищевые технологии, моделирование.

Введение

Оборудование, которое используется в пищевой промышленности для механической и термомеханической обработки пищевого сырья является одним из наиболее энергозатратных. Рассмотрены достоинства и недостатки оборудования для переработки плодов косточковых культур, термомеханического оборудования для сушки дисперсных продуктов, обработки неньютоновских жидкостей.

В настоящее время существует два основных направления переработки плодов косточковых культур для разделения на полуфабрикат и отходы: без предварительной термообработки и с предварительной термообработкой. При тепловом способе обработки необходимо выделить следующие основные недостатки: тепловая обработка приводит к дополнительным потерям биологического потенциала сырья, что отрицательно сказывается на качестве продукта; имеют место потери тепловой энергии; эксплуатация и обслуживание тепловых аппаратов приводят к дополнительным расходам материальных средств.

Основными проблемами, возникающими при тепловой обработке пищевых неньютоновских жидкостей (ННЖ), являются: изменение качества продукта в зависимости от продолжительности теплового воздействия; процесс интенсивного накипеобразования. Для решения проблем термообработки пищевых ННЖ применяют термомеханические агрегаты (ТМА). Слабым элементом ТМА является узел подвода пара и отвода конденсата. Герметизация узла соединения вращающегося ротора, с неподвижным паропроводом и конденсатопроводом является технически сложной задачей.

Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48 % случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства. Шахтные конвективные зерносушилки имеют ряд недостатков: невысокий КПД использования

объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергозатраты (5 МДж/кг и выше). Поэтому при модернизации предприятий многие аграрии (до 15 %) собираются уделить внимание участкам сушки как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [1]. Гораздо реже (до 5%) на производствах используются сушилки, теплота в которых передается зерну от нагретой поверхности. В качестве нагретой поверхности могут использоваться трубы, обогреваемые изнутри паром или горячей водой. Паровые сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи к зерновому потоку $30...90 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ [2]. Недостатки конструкций паровых сушилок: сложная аппаратно-техническая реализация; необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата; образование водяных пробок в трубках; низкая степень перемешивания зернового потока.

Решение упомянутых проблем при переработке плодов косточковых культур – применение обработки холодным способом (в свежем состоянии) на перфорированной поверхности в поле центробежных сил; проблем при термообработке, сушке дисперсных продуктов и ННЖ – использование аппаратов на базе термосифонов, вращающихся термосифонов (ВТС), тепловых труб.

Применение обработки плодов косточковых культур холодным способом позволяет процесс разделения выполнять в непрерывном режиме, получать полуфабрикат определенной степени измельчения и косточки без изменения их биологических свойств.

Применение ТМА на базе ВТС в пищевой промышленности позволяет реализовать следующие пути снижения энергозатрат: сокращение цепочки трансформации энергии; совмещение в аппарате нескольких технологических процессов; интенсификация теплообмена; эффективная доставка энергии к продукту; утилизация теплоты. Воздействие на вязкий (дисперсный) продукт

с помощью ВТС, способствует эффективному разрушению гидродинамического и теплового пограничных слоев, что приводит к увеличению интенсивности процессов переноса.

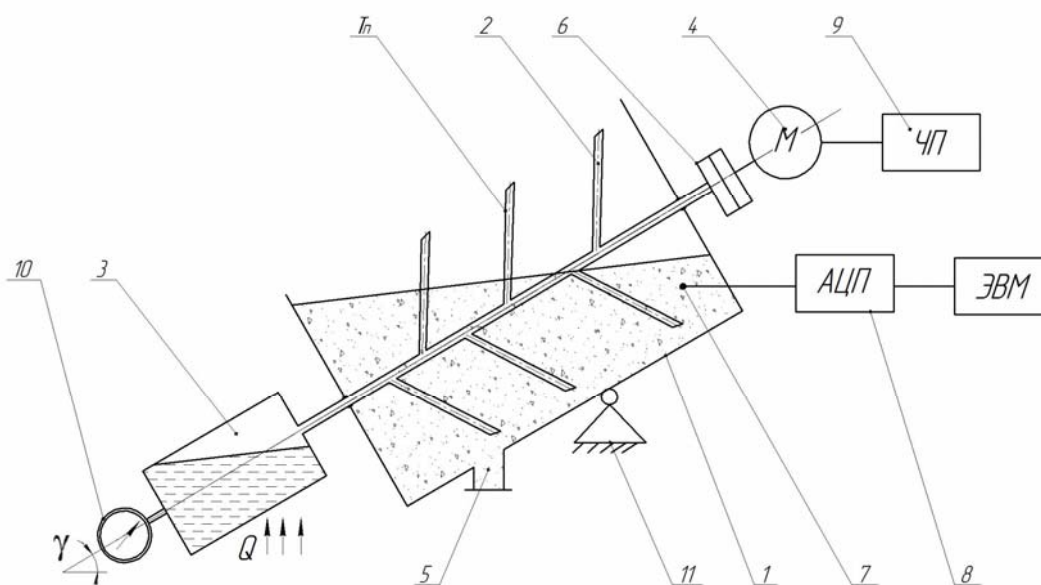
Возможно выделить несколько основных направлений применения аппаратов на базе ВТС. Это теплообменники, выпарные установки, сушилки для дисперсных продуктов.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен ряд экспериментов по сушке дисперсных продуктов, термообработке ННЖ в аппарате с ВТС. Аппарат (рис. 1) состоит из корпуса 1, внутри которого размещен ротор 2, выполненный в виде вращающегося термосифона. Ротор 2 соединен с испарителем 3 и через муфту 6 с

электродвигателем 4. Ротор 2 и испаритель 3 представляют собой герметически закрытую полость, частично заполненную теплоносителем. В нижней части корпуса 1 выполнен патрубок 5 для разгрузки продукта и шарнир 11 для регулирования угла наклона корпуса 1.

Аппарат работает следующим образом. При подводе теплоты (Q) к испарителю 3 теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в ротор 2, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода продукту. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель 3. Происходит сушка, перемешивание, либо нагревание продукта, после чего продукт выгружается через нижний патрубок в корпусе.



1 – корпус, 2 – ротор, выполненный в виде вращающегося термосифона. 3 – испаритель, 4 – электродвигатель, 5 – патрубок, 6 – муфта, 7 – термопара, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – частотный преобразователь, 10 – манометр, 11 – шарнир

Рис. 1. Конструкция аппарата с ВТС

В процессе эксперимента изменяли угол наклона ВТС (γ), частоту вращения ВТС (n). Измерение температуры осуществляли через определенные промежутки времени при помощи термопар 7, помещенных в объем продукта (рис. 1). Термопары подсоединяли к аналого-цифровому комплексу 8. Частота оборотов ВТС измерялась при помощи

тахометра и регулировалась частотным преобразователем 9 типа. Во время экспериментов, давление P в испарителе и конденсаторе ВТС поддерживалось постоянным, таким образом поверхность конденсатора оставалась изотермичной. Давление паров теплоносителя в ВТС измеряли при помощи манометра 10.

В качестве объектов исследований были выбраны крупнозернистые дисперсные продукты: пшеница, вареный горох; мелкозернистые: просо, амарант; неньютоновские жидкости: томатная масса, яблочное пюре.

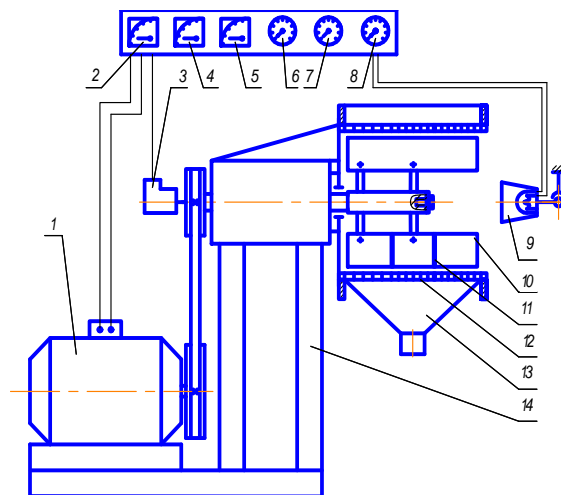
Зерно пшеницы увлажняли до состояния сырого. Начальная влажность зерна пшеницы в опытах соответствует 22,5 %.

Начальная влажность дисперсных продуктов поддерживалась на уровне технологических требований. Конечная влажность продуктов обычно выбиралась из таблиц как равновесная для данных атмосферных условий. Температура поверхности конденсатора ВТС поддерживалась такой, чтобы не происходило перегрева продукта выше технологических требований.

В связи с отсутствием информации о переработке косточковых плодов в свежем виде на перфорированной поверхности в поле центробежных сил, были выполнены экспериментальные исследования [3-5].

На первом этапе исследования проведены с одиночными плодами. Для этого разработана экспериментальная установка (рис. 2). Установка состоит из рамы 14, на которой установлены электродвигатель постоянного тока 1, подшипниковый узел, на выходном валу которого находится двухлопастной ротор 10. На одной из лопастей смонтировано гнездо 11. Угол опережения лопастей равен нулю. Установка комплектуется цилиндрическими перфорированными оболочками внутренним диаметром 125 мм, каждая из которых разделена в осевом направлении на три участка шириной 60 мм.

В состав установки входит тахогенератор типа Д-2ММ, тахометр типа ТЗиЗМ класса точности 1,5% с целью регулирования частоты вращения ротора. Для визуального наблюдения за процессом установка была оснащена стробоскопом типа ИСШ-15.



1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – амперметр; 3 – тахогенератор; 4 – вольтметр; 5 – ваттметр; 6 – тахометр; 7, 8 – приборы управления и регистрации частоты вращения стробоскопа; 9 – стробоскоп; 10 – лопастной ротор; 11 – гнездо; 12 – перфорированная обечайка; 13 – сборник; 14 – рама

Рис. 2. Схема экспериментальной установки по переработке косточковых плодов

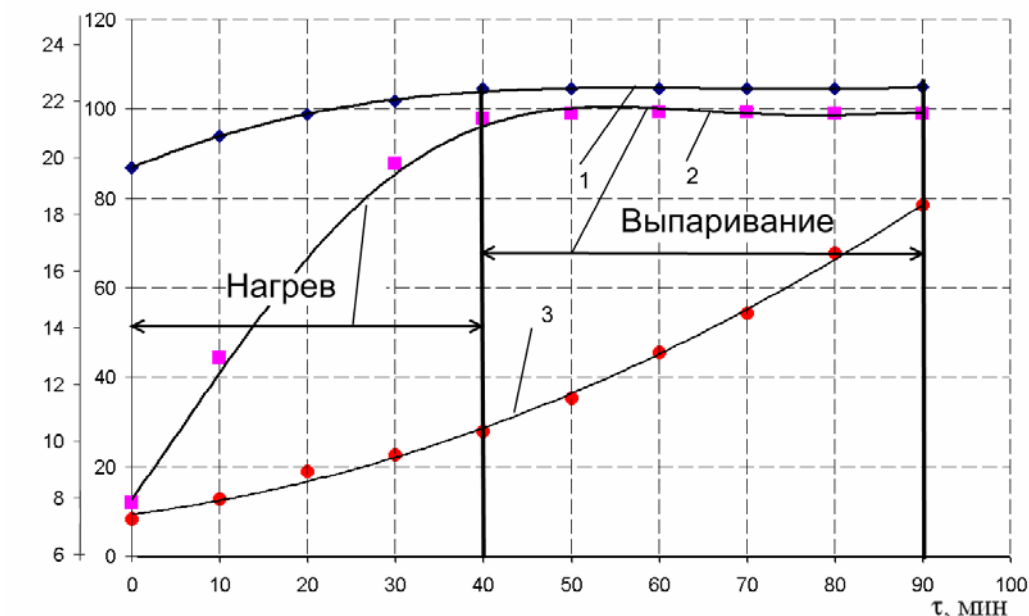
Последовательность выполнения экспериментов заключалась в следующем. Формировали партию плодов примерно одинаковых размеров, без механических повреждений. В случае необходимости удаляли плодоножки. После этого случайным образом из партии извлекали отдельные плоды, определяли массу каждого плода, формируя, таким образом, их количество в зависимости от плана проведения эксперимента на каждом уровне. С помощью стробоскопа в холостом режиме устанавливали необходимую частоту вращения оборотов лопастей. После этого электродвигатель выключали, устанавливали плод в гнездо, включали электродвигатель с одновременным включением секундомера. Фиксировали время переработки плода, после чего отключали электродвигатель с одновременной остановкой секундомера. Определяли остаточную массу мякоти с косточкой или массу чистой косточки. Разделив разницу исходной и остаточной масс плода на время его переработки, определяли интенсивность отделения мякоти от косточек.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены эксперименты по выпариванию яблочного пюре в аппарате с ВТС. Концентрация при выпаривании

яблочного пюре при частоте оборотов ВТС $n=14$ об/мин, и угле наклона $\gamma=30^\circ$ увеличивается, приближаясь к теоретической границе (рис. 3). Концентрация яблочного пюре увеличена с 7,3 до 18,4 % СВ. Период нагрева раствора до температуры кипения около 40 мин. Раствор кипит при

атмосферном давлении. Наблюдается испарение влаги в период нагрева раствора до температуры кипения. Скорость удаления влаги в период нагрева в 2 раза ниже, чем во время интенсивного кипения раствора.



1 – температура поверхности ВТС; 2 – температура продукта; 3 – концентрация сухих веществ

Рис. 3. Изменение концентрации СВ и термограммы при выпаривании яблочного пюре, $n=14$ об/мин, $\gamma=30^\circ$

Проведены эксперименты по сушке пшеницы в аппарате с ВТС (рис. 4). В процессе нагрева зерна происходит интенсивное парообразование на поверхности продукта, поэтому периода прогрева материала на кривой сушки не наблюдается.

В первом периоде сушки скорость сушки изменяется в пределах 0,0072...0,0056 %/с, в зависимости от температуры материала. Продолжительность первого периода составляет около 1000 с. Далее скорость сушки падает примерно в три раза и составляет 0,0024...0,0017 %/с.

Сушка идет в стесненных условиях – в плотном зерновом слое. Поэтому постоянно

присутствует поверхностная влага, что характерно для периода постоянной скорости сушки [6-8].

Влияние на скорость сушки оказывает изменение температуры поверхности конденсатора ВТС. Влажность зерна в серии опытов снижается в среднем на 10%, что соответствует стандартным зерносушилкам.

Зависимости интенсивности отделения мякоти от косточек при переработке косточковых плодов в свежем виде на перфорированной поверхности в поле центробежных сил представлены на рис. 5. Представлены результаты для абрикос сорт “Домашний”.

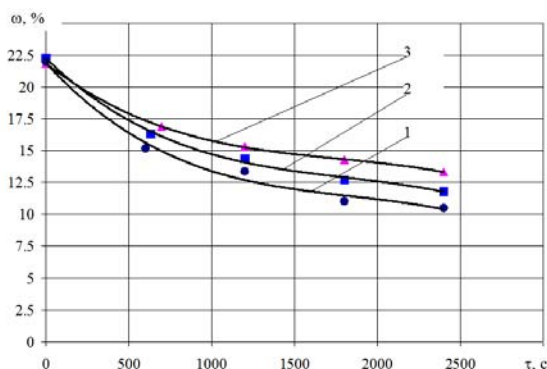


Рис. 4. Кривые сушки зерна пшеницы при различных температурах поверхности конденсатора T_n .

1 – $T_n=115^\circ\text{C}$; 2 – $T_n=100^\circ\text{C}$; 3 – $T_n=85^\circ\text{C}$

Степенной вид кривых (рис. 5) характерен при использовании отверстий диаметром 2 и 4 мм. Это можно объяснить наличием двух этапов при отделении мякоти от косточек. На первом этапе происходит постепенное разрушение покровных тканей в результате циклического воздействия кромок отверстий при вращательном движении плодов. Второй этап характеризуется резким увеличением количества отделяемой мякоти в связи с разрушением покровной ткани на некотором участке поверхности плода.

III. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вид критериальных уравнений для обобщения экспериментальных данных получен при использовании метода анализа размерностей.

При обобщении результатов по сушке дисперсных продуктов в аппарате с ВТС получено уравнение вида:

$$Nu_m = 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{0.5} \cdot \left(\frac{T_n}{T_3}\right)^{0.4} \quad (1)$$

где:

Nu_m – число Нуссельта диффузионное;

Pe – число Пекле тепловое;

(T_n/T_3) – симплекс температур.

База экспериментальных данных по кинетике сушки пшеницы в сушилке с ВТС удовлетворительно обобщается критериальным уравнением. С погрешностью не более 15% уравнение (1) позволяет рассчитать коэффициент массоотдачи β в пределах $1,2 \cdot 10^3 \leq Pe \leq 1,3 \cdot 10^4$, и параметрического комплекса $2,1 \leq (T_n/T_3) \leq 4$.

При обобщении результатов по обработке плодов холодным способом:

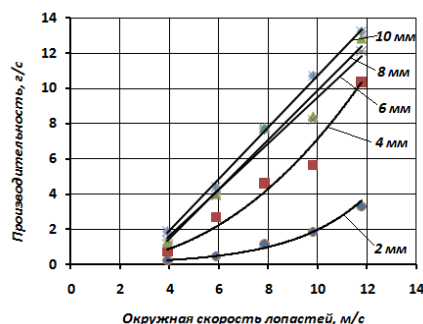


Рис. 5. Зависимость интенсивности отделения мякоти от косточек от окружной скорости лопастей и диаметров отверстий: абрикос сорт “Домашний”.

$$Ke = 2 \cdot 10^{-8} \cdot Ne^{2.17} \cdot \left(d_o/d_i\right)^{1.53} \quad (2)$$

где:

Ne – модифицированное число Ньютона;

Ke – число подобия, характеризует влияние параметров на эффективность процесса отделения мякоти от косточек;

(d_o/d_i) – геометрический симплекс.

Уравнение (2) справедливо для диапазона числа Ньютона $500 \leq Ne \leq 5000$, отношение диаметров отверстий в диапазоне $1,00 \leq (d_o/d_i) \leq 0,20$ при переработке исследуемых плодов в пределах прочности покровных тканей на прокол ($0,1 \leq \sigma \leq 0,4$) Н/мм² и средней плотности мякоти $\rho = 1020$ кг/м³.

Критериальное уравнение зависимости числа Эйлера от числа Ньютона при переработке абрикос холодным способом имеет вид:

$$Eu = 3 \cdot 10^6 \cdot Ne^{-1.02} \quad (3)$$

где:

Eu – число Эйлера;

Ne – модифицированное число Ньютона.

IV. ВЫВОДЫ

Установлено, что на интенсивность теплопереноса при обработке ННЖ в аппарате с ВТС существенно влияет частота вращения конденсатора, угол его наклона и физические свойства продукта. С повышением вязкости продукта эффективность аппаратов с ВТС (по сравнению с традиционными) возрастает. Установлено, что аппарат с ВТС обеспечивает коэффициенты теплопередачи, при обработке пищевых ННЖ с вязкостью от

0,8 до 1,5 Па·с, в диапазоне 500...2600 Вт/м²·К.

Установлено, что при выпаривании яблочного пюре в аппарате с ВТС, увеличение частоты вращения конденсатора в 7 раз приводит к повышению содержания сухих веществ до 33 %, а коэффициента теплоотдачи в 4,4 раза. При обработке томатной массы повышение частоты вращения конденсатора в 7 раз приводит к повышению содержания сухих веществ в 1,7 раз. Увеличение угла наклона ВТС с 30° до 45° приводит к повышению содержания сухих веществ в продукте до 36%, а коэффициента теплоотдачи в 1,3 раза.

Существенное влияние на коэффициент массоотдачи при сушке дисперсных продуктов имеет частота вращения и температура поверхности ВТС. Рост скорости вращения ВТС в 2 раза приводит к повышению коэффициента массоотдачи на 40%, повышение температуры поверхности термосифона на 10°C приводит к росту коэффициента массоотдачи β на 8%.

Предложенные конструкции аппаратов с ВТС способны обеспечить эффективный теплоперенос при обработке вязких и дисперсных пищевых продуктов при уменьшении энергетических потерь до 30 %.

Литература (References)

[1] Bezbah I. V. Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs / Bezbah I. V.,

Burdo O. G. // Applied Thermal Engineering 11/2006.

- [2] Burdo O.G., Smirnov G.F., Terziev S.G., Zyikov A.V. Innovatsionnyie teplotehnologii APK na osnove teplovyih trub [Innovation heat technologies in AIC on heatpipes base] - Odessa: «INVATs», 2014 – 376p.
- [3] Siddiqui M W, Chakraborty I, Ayala-Zavala JF, Dhua RS. Advances in minimal processing of fruits and vegetables: a review. J Sci Ind Res India. 2011;70:823–34.
- [4] Watson RR, Preedy VR, Zibadi S. Polyphenols in human health and disease. San Diego, CA, USA: Academic Press, Elsevier; 2014.
- [5] Jakobek L, Šeru ga M, Novak I, Medvidović-Kosanović M. Flavonols, phenolic acids and antioxidant activity of some red fruits. Deut Lebensm-Rundsch. 2007;103:369–78.
- [6] Burdo O.G. Evolyutsiya sushilnyih ustanovok [Dryers evolution]– Odessa: Poligraf, 2010 – 368p.
- [7] Burdo O.G. Energeticheskiy monitoring pischevyih proizvodstv [Food production energy monitoring]– Odessa: Poligraf, 2008 – 244p.
- [8] Burdo O.G., Terziev S.G., Bandura V.N. Printsipyi napravlennogo energeticheskogo deystviya v pischevyih nanotekhnologiyah [Principles Of DirectedEnergy Action In Food Nanotechnologies]/ Problemele energeticii regionale, Chisinau, 2015. #1 (27) – pp.79–85 (In Russian).

Сведения об авторах:



Безбах Игорь Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: **теплотехнологии АПК, энергоэффективное оборудование на базе термосифонов.**
E-mail: igor-bezbakh@ya.ru



Кепин Николай Иванович - кандидат технических наук, доцент кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: **механические процессы и оборудование для разделения плодовой продукции.**
E-mail: kepinni@yandex.ru



Воскресенская Елена Владимировна – инженер кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: **теплотехнологии и оборудование для сушки дисперсных пищевых продуктов.**
E-mail: icpa2006@mail.ru