

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБРАБОТКИ И СУШКИ ТОМАТОВ НА БИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАГРЕВА

I.V. Altukhov, S.M. Bykova

THE INFLUENCE OF PULSE INFRARED PROCESSING AND DRYING OF TOMATOES AT BIOTECHNICAL CONDITIONS OF HEATING

Алтухов И.В. – д-р техн. наук, проф. каф. энергообеспечения и теплотехники Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, пос. Молодежный.

E-mail: altukhigor@yandex.ru

Быкова С.М. – ст. преп. каф. энергообеспечения и теплотехники, зам. декана энергетического факультета Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, пос. Молодежный.

E-mail: bickowa.swetlana2011@yandex.ru

Altukhov I.V. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply and Heating Engineering, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, S. Molodezhny.

E-mail: altukhigor@yandex.ru

Bykova S.M. – Senior Lecturer, Chair of Power Supply and Heating Engineering, Deputy Dean, Power Faculty, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, S. Molodezhny.

E-mail: bickowa .swetlana2011@yandex.ru

В пищевых отраслях экономики и промышленности большинства стран томаты считаются самой широко распространенной культурой благодаря своим ценным питательным и диетическим качествам, большому многообразию сортов и видов, высокой отзывчивости на используемые технологии выращивания. Несмотря на их востребованность, длительное хранение томатов остается весьма проблематичной задачей, решение которой так и не найдено. Много научных работ посвящено решению данной проблемы, но какое-либо единогласие до настоящего времени не достигнуто. Из существующих многочисленных способов и методик консервирования томатов, с сохранением их ценных питательных свойств, наибольшее внимание в первую очередь уделяется таким, при реализации которых продукт не только сохраняет определённые свойства и качества, но и способность применения для получения разнообразных кулинарных блюд. К этим методикам можно отнести обработку и сушку, осуществляемые по установленным закономерностям передовых инновационных технологий. Внедрение представленного способа определения постоянной времени нагрева позволяет обна-

ружить действенные режимы для обработки и сушки томатов на основании теплофизических качеств и геометрических характеристик продуктов. Определенный режим со снижающимся уровнем подвода энергии дает возможность реализовать биотехнические условия нагрева и получить продукты с высококачественными показателями. При изучении режимов импульсной инфракрасной обработки и сушки томатов выявлено, что зависимость изменения влагосодержания и температуры продукта от значения подвода энергии всецело отражает требования биотехнического нагрева при понижении значения уровня подвода, а длительность сушки занимает меньше времени.

Ключевые слова: режим, томаты, технология, сушка, инфракрасное излучение, нагрев, биотехнические условия, показатели качества.

In food branches of economy and industry of the majority of the countries tomatoes are considered to be the most widespread culture thanks to valuable nutritious and dietary qualities, a wide range of varieties and types, high responsiveness on used technologies of cultivation. Despite the demand, long-term storage of tomatoes remains very prob-

lematic task which solution has not been found. Many scientific papers are devoted to the solution of the problem, but no unanimity so far has been achieved. Among existing numerous ways and techniques of conservation of tomatoes with preservation of their valuable nutritious properties, the greatest attention is first of all paid to such at which realization the product not only retains certain properties and qualities, but also the ability of application for receiving various culinary dishes. It is possible to refer the processing and drying which are carried out on determined consistent patterns of advanced innovative technologies to these techniques. Introduction of presented way of definition of the constant of time of heating allows finding effective modes for processing and drying of tomatoes on the basis of heat and physical qualities and geometrical characteristics of the products. A certain mode with decreasing level of the supply of energy gives the chance to realize biospecifications of heating and to receive products with high-quality indicators. When studying the modes of pulse infrared processing and drying of tomatoes it has been revealed that the dependence of change of moisture content and temperature of the product on the value of the supply of energy entirely reflects requirements of biotechnical heating at decrease of value of level of a supply, and duration of drying takes less time.

Keywords: *mode, tomatoes, technology, drying, infrared radiation, heating, biotechnical conditions, quality indicators.*

Введение. Стратегической задачей аграрной политики государства считается увеличение производительности переработки сельскохозяйственных продуктов, в том числе томатов, так как томаты относятся к скоропортящимся продуктам [1]. Выполнение поставленной таким образом задачи вполне вероятно за счет внедрения новейших прорывных технологий переработки томатов, позволяющих многократно уменьшить издержки продукции при их хранении. Решение проблемы комплексной переработки томатного сырья и получение конкурентоспособных товаров базируются на инновационных разработках их изготовления, применении физических, биологических и технологических способов переработки, а также на использовании передовых технических средств.

Томаты, подверженные технологической обработке, имеют значительную биологическую ценность, антиоксидантную активность и иммунозащитные качества. В данном продукте в высококонцентрированном виде присутствуют биологически активные элементы, определённое содержание ликопина, β -каротина, витамина С, полифенолов и флавоноидов. Высокое значение имеет ликопин, имеющий не только антиоксидантные качества, но и лечебно-профилактические. Ликопин может применяться для изготовления функциональных продуктов питания и биологически активных добавок к пище. Значительную важность представляет в мякоти и кожице томатов ликопин, который позволяет обогащать им другие пищевые продукты [2, 3]. Свежее овощное сырьё имеет определённые сроки хранения, вследствие чего для большей сохранности ценных и питательных веществ необходимо разрабатывать щадящие способы консервирования томатов.

В связи с этим весьма актуальной считается задача улучшения методов сушки с наибольшим сохранением физиологически ценных веществ свежих томатов [4]. Для получения сушёных томатов высочайшего качества необходимо производить технологическую обработку соответствующим образом, а именно – с соблюдением биотехнических критериев нагрева, то есть при такой температуре сушильного агента, которая не разрушит витаминных и минеральных качеств томата, а, наоборот, сохранит и приумножит. Все плодовоовощное сырьё обладает термолабильными свойствами. Томаты в данном случае не исключение. Ведущей предпосылкой нежелательных перемен их состава в процессе сушки, в частности органолептических показателей, считаются реакции меланоидинообразования (Майяра), которые обуславливают неферментативное покоричневение томатов в процессе термической обработки [5].

Цель исследований. Изучение влияния режимов импульсной инфракрасной обработки и сушки томатов на биотехнические условия нагрева.

Объект и методы исследований. Как уже говорилось ранее, томаты обладают термолабильными свойствами. Для большинства таких материалов и пищевых продуктов фактором, лимитирующим длительность их присутствия в

сушильной камере, считается максимально допустимая температура нагрева или биотехнические ступени нагрева [2, 6], поэтому для этих продуктов следует использовать разбивку процесса сушки на отдельные зоны. Процесс сушки при этом осуществляется по ступенчатому режиму с постепенным изменением в каждой последующей зоне параметров сушильного агента. Обычно главным параметром сушильного агента, определяющим режим сушки, является его температура, которая в значительной степени обуславливает температуру продукта. Температура продукта считается обобщенным показателем интенсивности протекания массообмена и теплообмена. Значение температуры продукта обуславливается, во-первых, температурой сушильного агента, во-вторых, влажностью продукта, определяя, таким образом, в значительной степени и интенсивность протекания химических реакций. Таким образом, поддержание температуры продукта на протяжении всего процесса сушки ниже значения некоторой критической ступени, определяемой биотехническими условиями, позволяет в значительной степени уменьшать ненужные изменения свойств термочувствительных продуктов [7].

На основании исследования динамики становления реакций неферментативного покоричневения в процессе сушки томатов при разных температурах был разработан ступенчатый режим сушки с различным уровнем энергоподвода. В качестве критического параметра была принята температура продукта. В ходе проведения эксперимента и его анализа определена критическая температура томатов, которая равна 58 °С, следовательно, в дальнейшем процессе сушки уровень данного параметра не должен превышать [4].

Для того чтобы увеличить производительность процесса сушки, нами были использованы импульсные керамические нагреватели, которые основаны на применении импульсной инфракрасной сушки [8]. Преимуществом технологии данной сушки является возможность производить продукты без консервантов, наполнителей, химических и нежелательных ароматических веществ и множества иных добавок. Это объясняется тем, что источник излучения обла-

дает своими особенностями. Входящая в состав нихромовая спираль, расположенная в трубке, изготовленной из чистого кварцевого стекла, покрытого многослойным функциональным керамическим покрытием, является источником первичного ИК-излучения. Имеющееся керамическое покрытие гарантирует преобразование полного диапазона ИК-излучения от нагревательного элемента в излучение очень узкого диапазона ближней области ИК-спектра, при этом излучение проходит не в непрерывном режиме, а идет в виде ряда импульсов продолжительностью 10 мк в секунду. Уровень энергии соответствует излучаемому ИК-диапазону [9].

Эффект импульсного преобразования основан на циклических энергетических превращениях, происходящих в системе. Благодаря тому, что керамика аккумулирует тепловое излучение, преобразует его, а далее импульсно «выстреливает» излучение в нужной области спектра, представленный вид излучателей приобретает большую индивидуальность и востребованность в данной сфере деятельности. Длина волны генерируемого излучения находится в пределах 1,7÷5,8 мкм. В результате высокой проникающей способности импульсного ИК-излучения определенной мощности и с соответствующей длиной волны органические и биоорганические молекулы диссоциируют микроорганизмы, споры, грибки с последующим разрушением и уничтожением вирусов [9, 10]. Таким образом, использование особенностей импульсного ИК-излучения позволяет получать продукты длительного хранения за счет обеззараживания продуктов и одновременного удаления влаги [11, 12].

При применении в технологии ИК-обработки и сушки импульсных керамических ИК-излучателей режим управления можно именовать импульсной инфракрасной обработкой с определенным способом энергоподвода. В представленном режиме были исследованы три варианта использования импульсного метода управления ИК-энергоподводом: повторно-кратковременный энергоподвод (рис. 1), с возрастанием уровня энергоподвода (рис. 2), со снижением уровня энергоподвода (рис. 3).

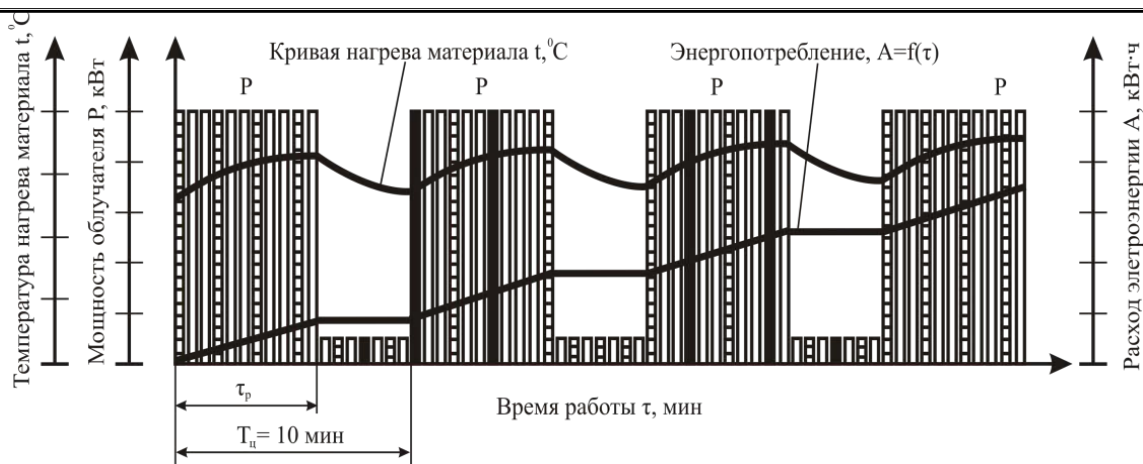


Рис. 1. Повторно-кратковременный режим управления энергоподводом

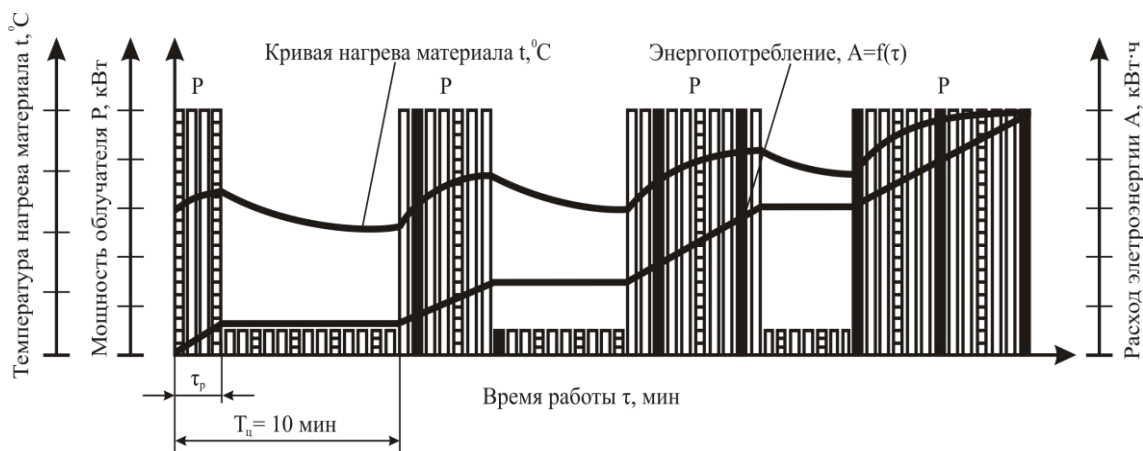


Рис. 2. Режим управления с возрастанием уровня энергоподвода

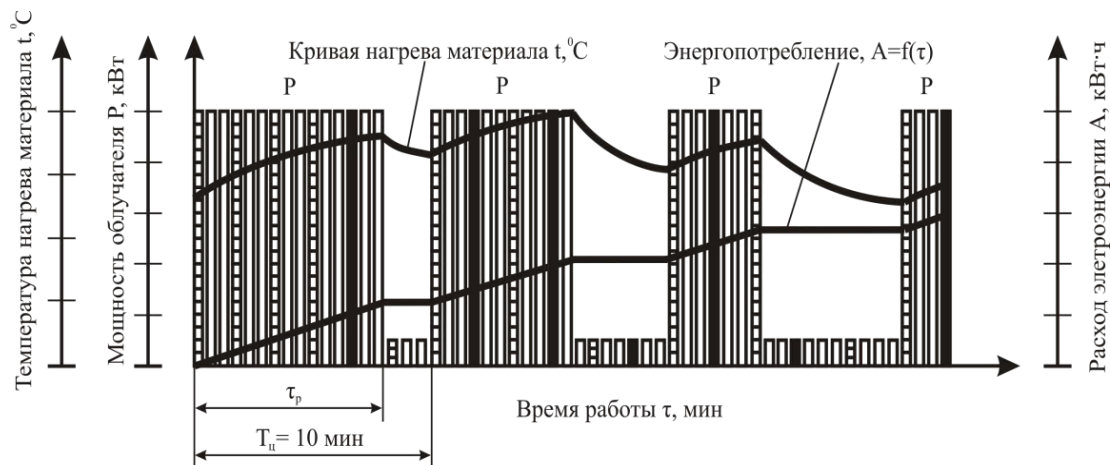


Рис. 3. Режим управления со снижением уровня энергоподвода

При изучении управления режимами энергоподвода с импульсными керамическими нагревателями в процессах переработки томатов были взяты во внимание данные лабораторных и производственно-экспериментальных исследо-

ваний, целью которых являлось определение времени работы облучателя в первом цикле, оно определялось по методике, представленной в работе [2]

$$t_{\max}^1 = t_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\tau_0}{T_n}} \right) + t_{\min} \cdot e^{-\frac{\tau_0}{T_n}}. \quad (1)$$

Основание (1) определяется по формуле

$$t_{\max}^1 = t_{\max} - t_{\max} \cdot e^{-\frac{\tau_0}{T_n}} + t_{\min} \cdot e^{-\frac{\tau_0}{T_n}}. \quad (2)$$

$$e^{-\frac{\tau_0}{T_n}} (t_{\max} - t_{\min}) = t_{\max} - t_{\min}. \quad (3)$$

$$e^{-\frac{\tau_0}{T_n}} = \frac{t_{\max} - t_{\max}^1}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (4)$$

Прологарифмируем выражение (4) по основанию

$$-\frac{\tau_0}{T_n} = \ln \frac{t_{\max} - t_{\max}^1}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (5)$$

$$\tau_0 = T_n \ln \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\max}^1}. \quad (6)$$

Так как время сушки материала значительно влияет на максимальную возможную скорость нагрева, то из выражения (6) следует

$$\tau_{01} = T_n \ln \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - T_n \cdot V_{\text{пред.дон}}}, \quad (7)$$

где T_n – постоянная времени нагрева; t_{\max} – максимально допустимая температура нагрева; t_{\min} – минимальная температура; $V_{\text{пред.дон}}$ – предельно допустимая скорость нагрева.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате теоретических исследований были найдены закономерности управления прерывным облучением. Характеристика этих закономерностей укладывается в теорию степенных рядов. Длительность работы облучателя для второго и последующих циклов определяется по формуле

$$\tau_{\text{раб}} = \exp(-T_{\text{цикл}} / T_n), \quad (8)$$

где $\frac{T_{\text{цикл}}}{T_n}$ – отношение времени цикла или его

части к постоянной времени нагрева корнеплодов. С использованием разработанной аналитической модели, выявленных закономерностей управления облучением обоснованы эффективные дискретные режимы изменения периода работы излучателя, представленные в [7]

$$f(\tau) = \begin{cases} \text{излучение}, & \tau = 10k, k = 1, 2, \dots, \\ \text{пауза}, & \tau = 2k, k = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (9)$$

Постоянная времени нагрева это и есть время, в течение которого превышение температуры корнеклубнеплода достигло бы конечного, установившегося уровня, если бы не было отдачи тепла в окружающую среду. Поскольку процесс сушки протекает в изолированной камере и практически нет отдачи тепла в окружающую среду, то значение постоянной времени нагрева становится определяющим при выборе режима ИК-энергоподвода. Она не зависит от подводимой мощности и численно равна отношению теплоемкости тела к его теплоотдаче [2]

$$T_n = \frac{C}{Q_{\text{пр}}}, \quad (10)$$

где C – теплоемкость продукта, Дж/°С; $Q_{\text{пр}}$ – теплоотдача продукта, Дж/°С·с.

При наличии теплоотдачи за время, равное постоянной времени нагрева, превышение температуры продукта достигает значения, равного 0,632 от установившегося [2]. Теплоемкость материала зависит от теплоемкости сухого вещества и воды. Удельная теплоемкость сухих веществ растительного сырья лежит в пределах 0,733–1,55 Дж/(кг·°С).

В связи с тем, что теплоемкость воды $C = 4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С) намного выше теплоемкости сухих веществ, теплоемкость томатов при сушке значительно уменьшается.

Теплоемкость влажных материалов определяем из выражения:

$$C_M = \frac{C_{\text{с.в.}} \cdot (100 - \omega) + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \omega}{100} = \frac{C_{\text{с.в.}} \cdot 100 + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot U}{100 + U}, \quad (11)$$

где $C_{с.в.}$ – теплоемкость сухих веществ материала; C_{H_2O} – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); ω – влажность материала, %; U – влагосодержание материала, %.

Уравнение для определения постоянной нагрева можно представить следующим образом:

$$T_n = \frac{C}{Q_{np}} = \frac{c \cdot M}{\alpha \cdot F}, \quad (12)$$

где c – удельная теплоёмкость томатов, Дж/кг·°C; M – масса томатов, кг; α – коэффициент теплоотдачи, Дж/м²·°C·с; F – площадь внешней поверхности продукта, м².

Или записать в следующем виде:

$$T_H = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot F}. \quad (13)$$

Обозначив отношение $\frac{V}{F}$ параметром σ , получим выражение для постоянной времени нагрева, которое примет вид

$$T_H = \frac{c \cdot \rho}{\alpha} \cdot \sigma. \quad (14)$$

Используя представленные выражения, произвели расчет постоянной времени нагрева для томатов в зависимости от их влажности и геометрических параметров (табл.).

Постоянная времени нагрева томатов

Исходное сырье	Содержание влаги w , %	Обобщенный показатель $\frac{V}{F} \cdot 10^{-3}$, м	Постоянная времени нагрева T , с
Томаты	10	1 - 5,6	78 - 262
	20		91 - 381
	30		98 - 345
	40		104 - 364
	50		122 - 408
	60		139 - 452
	70		144 - 492
	80		158 - 568

Выводы. Применение представленной технологии определения постоянной времени нагрева дает возможность обнаружить эффективные режимы для обработки и сушки томатов на основании теплофизических свойств и геометрических параметров продуктов. Определенный режим со снижающимся уровнем энергоподвода позволяет реализовывать биотехнические условия нагрева и получать продукты с высококачественными показателями. Изучение режимов импульсной инфракрасной обработки и сушки томатов показало, что зависимость изменения влагосодержания и температуры продукта от уровня энергоподвода полностью отражает условия биотехнического нагрева при снижении уровня энергоподвода, а длительность сушки занимает меньше времени.

Литература

1. Постоянная времени нагрева корнеплодов моркови / И.В. Алтухов, В.Д. Очи-

- ров, С.М. Быкова [и др.] // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2013. – № 2. – С. 10–11.
2. Шлягун Г.В. Кинетика нагрева томатов в процессе конвективной сушки в плотном слое // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 9. – С. 11–14.
3. Попов В.М., Афонькина В.А., Левинский В.Н. К вопросу об инфракрасной сушке томатов // Достижения науки – агропромышленному производству: мат-лы LV Междунар. науч.-техн. конф. – Челябинск: Ю-УГАУ, 2016. – С. 267–274.
4. Касьянов Г.И., Гринченко В.С., Мазуренко Е.А. Теоретические разработки и практическая реализация способов переработки томатов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2014. – № 4. – С. 183–193.
5. Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р. Особенности сушки биообъектов с использованием функциональной керамики, синте-

- зированной на Большой Солнечной Печи // Гелиотехника. – 2011. – № 1. – С. 67–72.
6. *Гаджиева А.М., Тагирова Ф.В.* Теоретические основы производства томатопродуктов с использованием биотехнологических процессов // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: мат-лы III Всерос. науч.-техн. конф. – Махачкала: ИПЦ «Ле-лек», 2013. – С. 9–11.
 7. *Алтухов И.В.* Технология получения концентрированных сахаросодержащих продуктов с использованием импульсной инфракрасной обработки и сушки корнеклубнеплодов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.01. – Иркутск, 2016. – 440 с.
 8. *Ахмедова П.М.* Сорты томата для безрассадной культуры в Дагестане // Картофель и овощи. – 2010. – № 1. – С. 10–11.
 9. *Чернышев С.В.* Исследование эндоизотермической сушки томатов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14. – № 3. – С. 636–367.
 10. *Рахимов Р.Х., Ермаков В.П.* Основы проектирования сушильных установок с использованием функциональной керамики. Ч. I. О критериях выбора функциональной керамики для процессов сушки // Гелиотехника. – 2010. – № 4. – С. 70–77.
 11. *Афонькина В.А., Попов В.М., Левинский В.Н.* Результаты исследований качественных показателей процесса ИК-сушки томатов с установкой сроков хранения // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 4. – С. 174–181.
 12. *Счисленко Д.М., Бастрон А.В.* Мобильная гелиосушительная установка для сушки плодов ягодных культур // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 6 (141). – С. 131–135.
- Dostizhenija nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: mat-ly LV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. – Cheljabinsk: Ju-UGAU, 2016. – S. 267–274.
4. *Kas'janov G.I., Grinchenko V.S., Mazurenko E.A.* Teoreticheskie razrabotki i prakticheskaja realizacija sposobov pererabotki tomatov // Nauka. Tehnika. Tehnologii (politehnicheskij vestnik). – 2014. – № 4. – S. 183–193.
 5. *Rahimov R.H., Ermakov V.P., Rahimov M.R.* Osobennosti sushki bioob'ektov s ispol'zovaniem funkcional'noj keramiki, sintezirovannoj na Bol'shoj Solnechnoj Pечи // Geliotehnika. – 2011. – № 1. – S. 67–72.
 6. *Gadzhieva A.M., Tagirova F.V.* Teoreticheskie osnovy proizvodstva tomatoproduktov s ispol'zovaniem biotehnologicheskikh processov // Povyshenie kachestva i bezopasnosti pishhevych produktov: mat-ly III Vseros. nauch.-tehn. konf. – Mahachkala: IPC «Lelek», 2013. – S. 9–11.
 7. *Altuhov I.V.* Tehnologija poluchenija koncentrirovannyh saharosoderzhashhih produktov s ispol'zovaniem impul'snoj infrakrasnoj obrabotki i sushki korneklubneplodov: dis. ... d-ra teh. nauk: 05.18.01. – Irkutsk, 2016. – 440 s.
 8. *Ahmedova P.M.* Sorta tomata dlja bezrassadnoj kul'tury v Dagestane // Kartofel' i ovoshhi. – 2010. – № 1. – S. 10–11.
 9. *Chernyshev C.V.* Issledovanie jendoizotermicheskoj sushki tomatov // Vestnik TGTU. – 2008. – T. 14. – № 3. – S. 636–367.
 10. *Rahimov R.H., Ermakov V.P.* Osnovy proektirovanija sushil'nyh ustanovok s ispol'zovaniem funkcional'noj keramiki. Ch. I. O kriterijah vybora funkcional'noj keramiki dlja processov sushki // Geliotehnika. – 2010. – № 4. – S. 70–77.
 11. *Afon'kina V.A., Popov V.M., Levinskij V.N.* Rezul'taty issledovanij kachestvennyh pokazatelej processa IK-sushki tomatov s ustanovkoj srokov hranenija // Vestnik KrasGAU. – 2018. – № 4. – S. 174–181.
 12. *Schislenko D.M., Bastron A.V.* Mobil'naja geliosushil'naja ustanovka dlja sushki plodov jagodnyh kul'tur // Vestnik KrasGAU. – 2018. – № 6 (141). – S. 131–135.

Literatura

1. Postojannaja vremeni nagreva korneplodov morkovi / *I.V. Altuhov, V.D. Ochirov, S.M. Vykova* [i dr.] // Vestnik FGOU VPO MGAU. – 2013. – № 2. – S. 10–11.
2. *Shljagun G.V.* Kinetika nagreva tomatov v processe konvektivnoj sushki v plotnom sloe // Hranenie i pererabotka sel'hozsy'r'ja. – 2010. – № 9. – S. 11–14.
3. *Popov V.M., Afon'kina V.A., Levinskij V.N.* K voprosu ob infrakrasnoj sushke tomatov //