

УДК 664.8.03:635.25/26

ББК 36.912

Д-30

*Демидов Сергей Федорович*, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования факультета пищевых биотехнологий и инженерии Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9; e-mail: [demidovserg@mail.ru](mailto:demidovserg@mail.ru);

*Петров Сергей Александрович*, магистр кафедры технологических машин и оборудования факультета пищевых биотехнологий и инженерии Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9;

*Филиппов Валерий Иванович*, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии мясных, рыбных продуктов и консервирования холодом Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9;

*Схаляхов Анзаур Адамович*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ  
В РЕПЧАТОМ ЛУКЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ  
ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**  
(рецензирована)

*Проведено экспериментальное исследование распределения температурных полей в репчатом луке в зависимости от параметров термической обработки инфракрасным излучением перед закладкой его в камеры холодильного хранения.*

**Ключевые слова:** исследование, репчатый лук, хранение, термическая обработка, инфракрасное излучение, температура, плотность теплового потока.

*Demidov Sergey Fedorovich*, Candidate of Technical sciences, assistant professor of the Department of Technological machinery and equipment of the Faculty of Biotechnologies and Engineering of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; 191002, St. Petersburg, 9 Lomonosov Str.; e-mail: [demidovserg@mail.ru](mailto:demidovserg@mail.ru);

*Petrov Sergey Alexandrovich*, Master of the Department of Technological machinery and equipment of the Faculty of Biotechnologies and Engineering of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; 191002, St. Petersburg, 9 Lomonosov Str.;

*Filippov Valery Ivanovich*, Candidate of Technical sciences, professor of the Department of Technology of meat and fish products, and cold preservation of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; 191002, St. Petersburg, 9 Lomonosov Str.;

*Skhalyakhov Anzaur Adamovich*, Doctor of Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology, Machinery and Equipment for Food production, dean of the Technological Faculty of FSBEI HE "Maikop State Technological University"; 385000, Maikop, 191 Pervomayskaya Str.

**PATTERNS OF DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELDS  
IN BULB ONIONS AT THERMAL INFRARED RADIATION**  
(Reviewed)

*An experimental study of the distribution of temperature fields in bulb onions, depending on the thermal infrared radiation processing parameters before placing it in cold storage chambers.*

**Keywords:** *research, bulb onion, storage, heat treatment, infrared radiation, temperature, heat flux density.*

Важной составляющей решения задачи импортозамещения и обеспечения потребительского рынка страны отечественной пищевой продукцией широкого ассортимента и высокого качества является совершенствование технологии подготовки пищевого сырья растительного происхождения перед закладкой в холодильные камеры длительное хранение, способствующее повышению качества и снижению потерь хранимой продукции.

Известно, что для повышения эффективности хранения репчатого лука перед закладкой в камеру хранения проводится предварительная технологическая обработка его, включающая удаление капельно-жидкой влаги с поверхности лука путем осушки и уничтожения возбудителей шейковой гнили и ложномучнистой росы путем термической обработки, получившего название прокалка. При подсушивании влажность кроющих чешуй лука уменьшается с величин приблизительно равных от 50-55% до 15-16%.

Известно, что предварительная обработка лука, включающая нагревание и подсушивание поверхности, ускоряет созревание и вызывает состояние покоя его, а это в свою очередь повышает лежкоспособность этого вида растительной продукции. Хорошо вызревший лук имеет высокое содержание сухих веществ и повышенную влагоудерживающую способность, поэтому при хранении он выдерживает температуру минус 5-6<sup>0</sup>С [1].

На практике применяют несколько способов осушки лука, но с точки зрения организационной целесообразности и технологической эффективности наиболее совершенным является конвективный способ обработки продукции воздухом при температуре 30-35<sup>0</sup>С и кратности воздухообмена равном 300-350 м<sup>3</sup>/(т.ч.) [2]. Такая обработка осуществляется на стационарных сушильных пунктах в бункерах с решетчатым дном вместимостью 7-8 тонн и высоте загрузки около 2 метров. В зависимости от начальной влажности кроющих чешуй лука продолжительность сушки составляет от 15 до 20 часов. Для нейтрализации возбудителей болезни лука за 8-10 часов до окончания сушки проводят прокалку продукта путем повышения температуры воздуха в сушильном агрегате до 45<sup>0</sup>С. При использовании лукохранилища-сушилки продолжительность предварительной термической обработки лука может достигать 6-8 суток [3].

Представленные способы предварительной тепловой обработки репчатого лука имеют ряд осуществимых недостатков. Так при достаточно большой высоте слоя обрабатываемого продукта в сушильном агрегате в условиях применяемой в нем циркуляции греющего воздуха и конвективного теплообмена возникает существенная неравномерность температурно-влажностного поля по объему загруженной в бункер агрегата продукции. Устранение этого недостатка потребует дополнительных материальных и энергетических расходов за счет использования вентиляторов повышенной мощности для подачи воздушного осушительного агента в бункер сушильного агрегата. Большая продолжительность процесса и циклический режим работы сушильного агрегата не создают условий для организации поточного процесса термической обработки лука. В дополнение к этому значительная конструктивная металлоемкость сушильного комплекса и сравнительно непродолжительный период его эксплуатации в течение года снижают технико-экономические показатели данного способа предварительной обработки лука. Большая продолжительность проведения такого

процесса в лукохранилищах-сушилках еще в большей степени подтверждает недостатки существующей технологии обработки лука перед закладкой его на длительное хранение.

Исходя из вышеизложенного, поиск наиболее технологического и экономически эффективного способа предварительной обработки репчатого лука перед закладкой на хранение является весьма актуальной задачей, решающей вопросы сохранения качества и снижения потерь пользующейся высоким потребительским спросом растительной продукции.

Целью данного этапа работы является исследование зависимости распределения температурного поля от поверхности до центра репчатого лука от плотности теплового потока, создаваемого инфракрасным излучением выделенной длинной волны в процессе его термической обработки.

Знание кинетики поглощения тепловых потоков инфракрасного излучения внутри продукта позволит прогнозировать наиболее эффективные с технологической точки зрения режимы нагревания и одновременного подсушивания внешней оболочки репчатого лука перед закладкой на хранение. Задача первого этапа исследования заключалась в изучении характера проникновения и влияния лучистой энергии на температурное поле создаваемого внутри продукта в зависимости от мощности теплового потока инфракрасного (ИК) излучения.

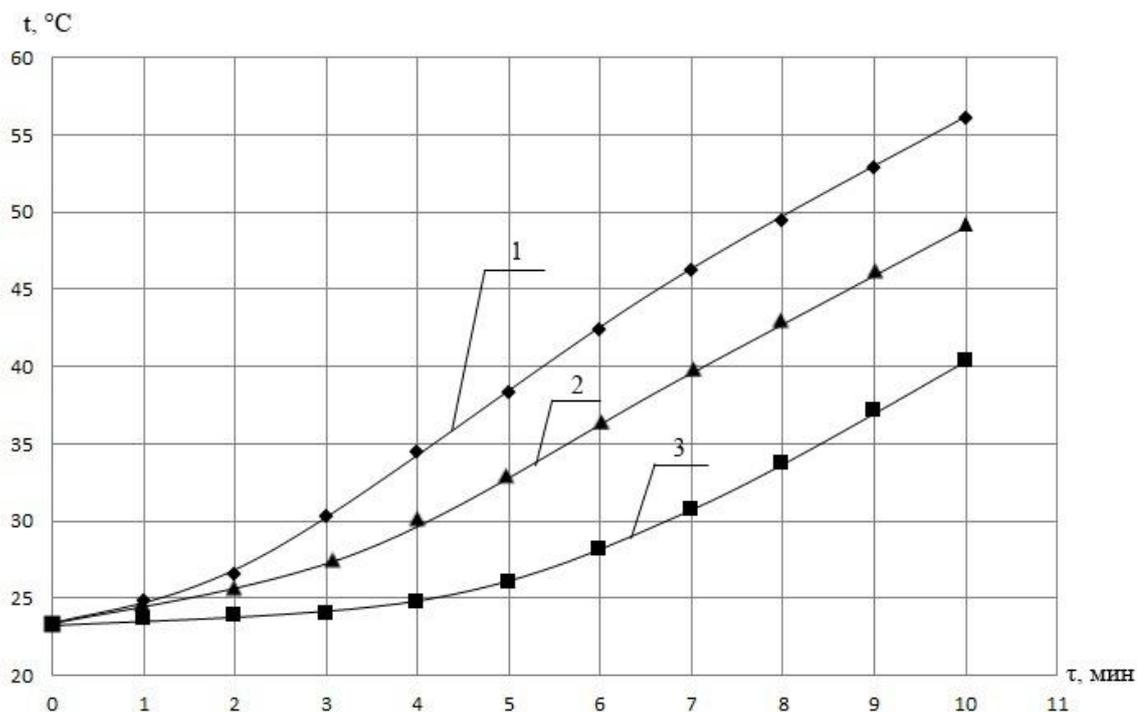
Исследования проводились на экспериментальном стенде, представляющем камеру, оснащенную инфракрасным (ИК) излучателем и отражателями [4]. В сушильной камере установлены инфракрасные излучатели с отражателями. В качестве генераторов ИК-излучения применены линейные кварцевые излучатели диаметром 0.012 м с функциональной керамической оболочкой. ИК-излучатели направляют тепловой поток сверху и снизу на исследуемый продукт, установленный на изготовленном из нержавеющей стали сетчатом поддоне с шагом ячейки равном 2 мм. Конструкция стенда позволяет регулировать плотность теплового потока ИК-излучателей и расстояние от них до поверхности нагреваемого продукта [5-9].

Измерение температуры в репчатом луке проводилось с помощью хромель-алюмелевых ТХА 9419-23 термопар градуировки ХА<sub>94</sub> с диаметром проволоки  $6 \cdot 10^{-4}$  м в комплекте с измерителем теплопроводности ИТ-2.

В качестве объектов исследования был выбран репчатый лук острых сортов с наружным диаметром луковицы равном 58 мм, с влагосодержанием кроющих чешуй лука 20-21 кг/кг исп. вл.

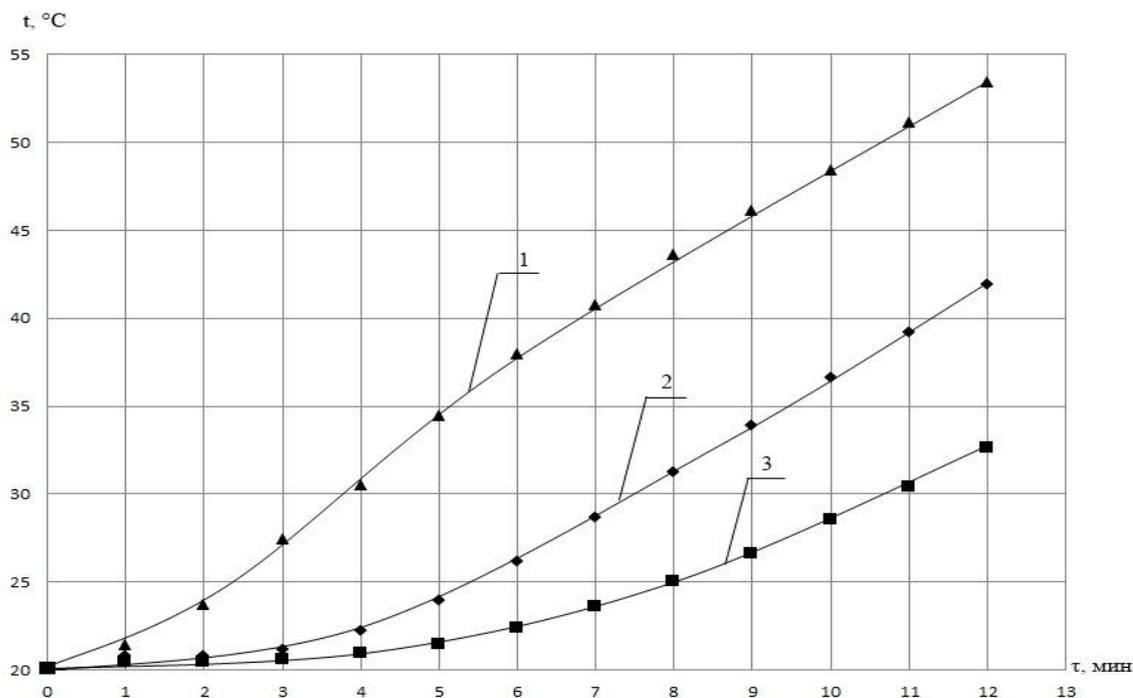
По геометрическим характеристикам луковицы такого диаметра по размеру относятся к разряду репчатого лука крупного калибра. В процессе термической обработки измерение температуры проводилось в точке близкой к поверхности, а также в полуцентре и центре луковицы с интервалом по времени равном 30 сек. Расстояние от инфракрасных излучателей до поверхности продукта составляло 75 мм.

По экспериментальным данным построены графики изменения температур в трех точках (на поверхности, в полуцентре, в центре) репчатого лука во времени при его термической обработке для различных величин плотности теплового потока инфракрасного излучения до достижения на поверхности продукта температуры 45-56<sup>0</sup>С (рис. 1, 2, 3).

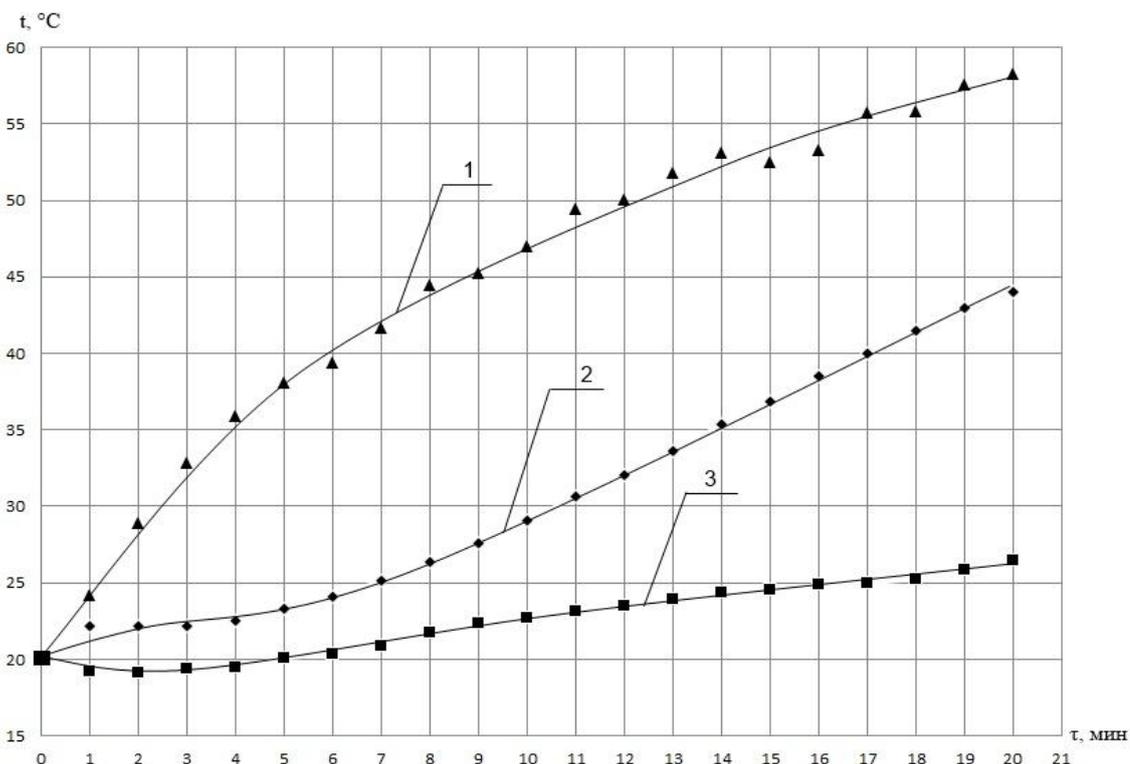


**Рис. 1.** Изменение температуры на поверхности (кривая 1), в полуцентре (кривая 2) и центре (кривая 3) репчатого лука во времени для плотности теплового потока инфракрасного излучения  $10,7 \text{ кВт/м}^2$

Представленные на рис. 1 результаты измерения температуры в различных точках репчатого лука в процессе термической обработки тепловым потоком мощностью  $10,7 \text{ кВт/м}^2$  свидетельствуют о достаточно быстром повышении температуры как на поверхности, так и в центральных слоях луковиц за счет достаточно эффективного проникновения лучистой энергии внутрь продукта. Так, через 7 минут после начала термической обработки температура на поверхности лука достигла  $46^\circ\text{C}$ , в полуцентре на расстоянии от поверхности 14 мм составила  $39^\circ\text{C}$  и в центре соответственно на расстоянии 29 мм составила  $31^\circ\text{C}$ . Разница температур между близлежащими слоями в продукте составляла  $7-8^\circ\text{C}$ . Максимальное различие величин температуры по объему продукта за указанный промежуток времени составляет  $14^\circ\text{C}$ . Через 10 мин. температура на поверхности луковицы достигала  $56^\circ\text{C}$ , в полуцентре  $49^\circ\text{C}$  и в центре  $41^\circ\text{C}$ , при этом максимальная разница температур по объему продукта составила  $15^\circ\text{C}$ . Анализ полученных результатов исследования температурного поля при термической обработке репчатого лука инфракрасным излучением мощностью теплового потока  $10,7 \text{ кВт/м}^2$  показывает, что температура поверхности продукта равная  $45^\circ\text{C}$  будет достигнута через 6,5 минут после начала термической обработки, при этом в центре и полуцентре она соответственно составляет 30 и  $37^\circ\text{C}$ , что соответствует требуемым технологическим параметрам первого этапа термической обработки репчатого лука при температуре  $30-35^\circ\text{C}$  и последующей обработке (прокалке) при температуре  $45^\circ\text{C}$  на втором этапе.



**Рис. 2.** Изменение температуры во времени на поверхности (кривая 1), в полуцентре (кривая 2) и центре (кривая 3) репчатого лука диаметром 58 мм при плотности теплового потока инфракрасного излучения  $9,6 \text{ кВт/м}^2$



**Рис. 3.** Изменение температуры во времени на поверхности (кривая 1), в полуцентре (кривая 2) и центре (кривая 3) репчатого лука диаметром 58 мм при плотности теплового потока инфракрасного излучения  $7,9 \text{ кВт/м}^2$

При мощности теплового потока  $9,6 \text{ кВт/м}^2$  (рис. 2) проникновение инфракрасного излучения в репчатый лук и распределение температур по объему в нем происходило по характеру аналогично, воздействию на лук теплового потока мощностью равной  $10,7 \text{ кВт/м}^2$  (рис. 1), но со значительным отставанием по времени. Так необходимая температура в центре луковицы равная  $30^\circ\text{C}$  достигала через 11 мин. после начала нагрева, при этом температура в полуцентре и на поверхности продукта соответственно составляли  $39^\circ\text{C}$  и  $51^\circ\text{C}$ , что на  $4-6^\circ\text{C}$

превышает установленные технологией условия термической обработки лука. Требуемая по технологии температура поверхности продукта равная  $45^{\circ}\text{C}$  достигает через 8,7 мин., при этом температура в центре составляет  $33^{\circ}\text{C}$ , что соответствует требуемым по технологии условиям теплообмена. Что касается центрального слоя луковицы, то на указанный момент времени температура его равная  $26^{\circ}\text{C}$  на  $4^{\circ}\text{C}$  требуемой. Максимальное различие величин температур по объему продукта достигало  $25^{\circ}\text{C}$ , что значительно больше чем при нагревании тепловым потоком по мощности равным  $10,7 \text{ кВт/м}^2$ .

Зависимости изменения среднеобъемных температур (рис. 1 и рис. 2) объясняются интенсивным объемным прогревом репчатого лука.

Представленные на рис. 3 данные, характеризующие закономерности изменения температурного поля во времени при термической обработке его источником инфракрасного излучения мощностью теплового потока равного  $7,9 \text{ кВт/м}^2$ , показывают достаточно интенсивное нагревания поверхностных слоев и незначительное нагревание центральных слоев лука, что создает существенную неравномерность температурного поля продукта. Температура поверхности лука равная  $45^{\circ}\text{C}$  достигала через 9 мин. после начала нагревания, в тоже время температуры в полуцентре и центре продукта соответственно составляли  $27^{\circ}\text{C}$  и  $22^{\circ}\text{C}$ , что на  $3-8^{\circ}\text{C}$  ниже требуемой, при этом различие величин температуры по объему продукта составило  $23^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что при данной мощности инфракрасного излучения требуемая по технологии минимальная температура  $30^{\circ}\text{C}$  центральных слоев лука, имеющего диаметр 58 мм, не будет достигнута даже через 20 мин. после начала нагревания. Проведенный анализ температурных полей, создаваемых при термической обработке репчатого лука инфракрасным излучением различной мощности, показывает, что требуемые по технологии условия нагревания обеспечиваются мощностью теплового потока  $10,7 \text{ кВт/м}^2$  за промежуток времени от начала нагревания равный 6,5 мин.

Полученные данные кинетики процесса термической обработки репчатого лука инфракрасным излучением выделенной длины перед закладкой на длительное хранение позволяют разработать технологически рациональную и экономически эффективную конструкцию термического агрегата сушильной установки.

#### *Литература:*

1. Филиппов В.Е., Кременевская М.И., Куцакова В.Е. Технологические основы холодильной технологии пищевых продуктов. СПб.: ГИОРД, 2014. 576 с.
2. Манжесов В.И., Попов И.А., Шедрин Д.С. Технология хранения растениеводческой продукции. М.: Колос С, 2005. 392 с.
3. Шираков Е.П., Полегаев В.И. Хранение и переработка продукции растениеводства с основами стандартизации и сертификации. М.: Космос, 2000. 302 с.
4. Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Схляхов А.А. Исследование процесса шинкованного репчатого лука инфракрасным излучением // Новые технологии. 2015. Вып. 4. С. 11-16.
5. Ободов Д.А., Демидов С.Ф., Вороненко Б.А. Источники инфракрасного излучения с электроподводом для термообработки пищевых продуктов [Электронный ресурс] / Электронный журнал СПбГУНиП. 2011. №1. URL: <http://www.open-mechanics.com/journals>.
6. Исследование температурного поля инфракрасной нагревательной системы для сушки зародышей зерна пшеницы и ржаных отрубей / С.Ф. Демидов [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. №1.

7. Некоторые закономерности процесса инфракрасной сушки семян подсолнечника для семенного фонда / С.Ф. Демидов [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. №2.

8. Демидов А.С., Вороненко Б.А., Демидов С.Ф. Сушка семян подсолнечника инфракрасным излучением // Новые технологии. 2011. Вып. 3. С. 25-30.

9. Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Ободов Д.А. Сушка морских водорослей инфракрасным излучением // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. №2.

#### **References:**

1. Filippov V.E., Kremenevskaya M.I., Kutsakova V.E. *Technological bases of cold technology of foodstuff*. St. Petersburg: GIORД, 2014. 576 p.

2. Manzhesov V.I., Popov I.A., Shedrin D.S. *Storage technology of plant products*. M.: Kolos S, 2005. 392 p.

3. Shiracov E.P., Polegaev V.I. *Storage and processing of plant production with the basics of standardization and certification*. M.: Space, 2000. 302 p.

4. Demidov S.F., Voronenko B.A., Skhalyakhov A.A. *Investigation of the process of onion shredding with infrared radiation*// *New technologies*. 2015. №4. P. 11-16.

5. Obodov D.A., Demidov S.F., Voronenko B.A. *Sources of infrared radiation with electric drive for heat treatment of foodstuff*. *Electronic Journal of SPbGUNiPT*, 2011. №1. Access Mode.: <http://www.open-mechanics.com/journals>.

6. *Investigation of the temperature field of infrared heating system for drying wheat germ and rye bran*/ Demidov S.F., Voronenko B.A., Belyaeva S.S., Marchenko V.I. // *Scientific Journal of SRI ITMO. Series Processes and devices of food production*. №1. 2013.

7. *Some patterns of infrared drying process of sunflower seeds for the seed fund* / Demidov S.F. [and oth.]// *Scientific Journal of SRI ITMO. Series: Processes and devices of food production*. №2. 2013.

8. Demidov A.S., Voronenko B.A., Demidov S.F. *Drying of sunflower seeds by infrared radiation* // *New Technologies*. 2011. №3. P. 25-30.

9. Demidov S.F., Voronenko B.A., Obodov D.A. *Drying algae by infrared radiation* // *Scientific Journal of SRI ITMO. Series "Processes and devices for food production"*. 2014. №2.