

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗБИРАТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ЗЕРНА И НАСЕКОМЫХ В СВЧ-ПОЛЕ

**Д.В. Осинцева**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Представлены результаты исследования избирательности нагрева СВЧ-полем за счет различной восприимчивости материала зерна и насекомых к диэлектрическому нагреву. Применение избирательности СВЧ-нагрева открывает перспективу по использованию электротехнологии в биотехнологиях, агропромышленном производстве, медицине и других отраслях народного хозяйства. На стыке наук открываются перспективные направления новых научных исследований с огромными возможностями применения в производстве.

В ходе предварительных исследований была выявлена необходимость определения эффективности избирательного нагрева. Автором выявлено, что эффективность избирательного нагрева определяется диэлектрическими параметрами зерна и насекомых, что говорит о возможности такого нагрева, который будет губительным для клеток насекомых и безопасным для клеток зерна.

Наши работы проводятся по контракту «Разработка технологической линии получения высококлассных семян из неликвидного зернового материала», заключенного в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», организованной Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

*Ключевые слова:* избирательный нагрев, насекомые, зерно, диэлектрическая проницаемость, СВЧ-энергия, теплоемкость, разность температур.

В последнее время уделяется большое внимание контролю качества продовольственного сырья и пищевой продукции и одним из основных показателей качества является экологичность – отсутствие химикатов. Внедрение новых технологий, появление новых технологических линий, разработка новых типов машин приводит к новому взгляду на требования к продовольствию и новому качеству жизни.

С целью внедрения новых технологий, гарантирующих экологическую чистоту продовольственного сырья и пищевой продукции, нами поставлена задача разработки нового направления электротехнологии – технологического процесса избирательного нагрева, в основе которого заложены следующие параметры:

- высокая степень летального нагрева насекомых;
- простота исполнения и низкая стоимость технологической установки;
- использование установки в «Технологической линии получения высококлассных семян из неликвидного зернового материала».

В ходе предварительных исследований [1] была выявлена необходимость определения эффективности избирательного нагрева, летального для насекомых и безопасного для зерна.

Степень избирательности нагрева насекомых в зерне зависит от разницы преобразования электромагнитной энергии в тепловую и скорости теп-

лопередачи от насекомых к зерну. Для более детального анализа следует особо рассмотреть оба варианта.

При нахождении насекомых внутри зерна выделение тепла происходит равномерно по объему насекомого и зерна, но с разными скоростями.

Физика процесса диэлектрических потерь определяется уравнением [2]

$$P = 55,63fE^2\varepsilon \cdot 10^{-12}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота электромагнитного поля;  $E$  – вектор напряженности электромагнитного поля;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon'$  – действительная часть диэлектрической проницаемости, представляет собой запас энергии, при воздействии на материал электрическим полем;  $\varepsilon''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости, представляет собой поглощение и затухание электромагнитной энергии, по-другому еще называют тангенсом угла диэлектрических потерь; в свою очередь  $\varepsilon''$  определяется уравнением [3]

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_{\sigma} + \varepsilon''_d = \varepsilon''_{\sigma} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega},$$

где  $\varepsilon''_d$  – диэлектрическая проницаемость за счет вращения диполя;  $\varepsilon''_{\sigma}$  – диэлектрическая проницаемость ионной проводимости;  $\sigma$  – ионная проводимость, См/м;  $\omega$  – угловая частота, рад/с.

В диэлектрических материалах напряженность электрического поля убывает с расстоянием  $z$

от поверхности раздела двух сред и записывается уравнением [4]

$$E = E_0 e^{-\alpha z}. \quad (2)$$

Коэффициент затухания электромагнитной волны зависит от диэлектрических свойств материала и задается уравнением [4]

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{2} \varepsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  – длина электромагнитной волны в воздухе.

Глубина проникновения СВЧ-энергии определяется уравнением [4]

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \left[ \frac{1}{2} \varepsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]}, \quad (4)$$

где  $C$  – скорость света в вакууме,  $C = 3 \cdot 10^8$ , м/с.

$$P = P_0 e^{-\alpha z}. \quad (5)$$

После подстановки уравнения (2) в (1) получили уравнение, описывающее изменение мощности СВЧ-излучения, в зависимости от параметров электромагнитного поля и параметров материала, с учетом глубины проникновения и степени затухания электромагнитной волны в материале:

$$P = 5,563 f E_0^2 e^{-\alpha z} \cdot 10^{-12} \varepsilon''. \quad (6)$$

Если нагревать поток зерна толщиной большей глубины проникновения, то коэффициент затухания электромагнитной волны играет решающую роль. В нашем случае планируется нагревать зерно толщиной меньше глубины проникновения, в этом случае коэффициентом затухания пренебрегаем и считаем, что величина вектора напряженности электрического поля одинакова по всей толщине слоя зерна.

В уравнении теплового баланса процесса нагрева необходимо учитывать передачу теплоты от одного тела к другому. Пренебрегая незначительной потерей тепла от зерна в окружающую среду,

уравнение энергетического баланса будет иметь вид [5]

$$\begin{cases} \rho_n C_{pn} V_n \frac{dT_n}{dt} = P_n V_n - h S_n (T_n - T_3); \\ \rho_3 C_{p3} \frac{dT_3}{dt} = P_3, \end{cases} \quad (7)$$

где  $S_n$  – площадь теплоотдающей поверхности насекомого,  $m^2$ ;  $V_n$  – объем тела насекомого,  $m^3$ ;  $C_{pn}$  – удельная теплоемкость насекомого,  $Дж/кг \cdot ^\circ C$ ;  $C_{p3}$  – удельная теплоемкость зерна,  $Дж/кг \cdot ^\circ C$ ;  $h$  – коэффициент теплообмена между насекомым и зерном,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;  $\rho_n$  – плотность насекомого,  $кг/м^3$ ;  $\rho_3$  – плотность зерна,  $кг/м^3$ ;  $P_n$  – удельная мощность ЭМ-излучения, поглощаемая насекомым,  $Вт/м^3$ ;  $P_3$  – удельная мощность ЭМ-излучения, поглощаемая зерном,  $Вт/м^3$ ;  $t$  – время нагрева, с.

В результате решения системы уравнений (7) получили уравнение разности температур между зерном и насекомым [5]:

$$T_n - T_3 = \frac{P_3}{S_n h} \left( \frac{\varepsilon''_n}{\varepsilon''_3} - \frac{\rho_n C_{pn}}{\rho_3 C_{p3}} \right) \left( 1 - e^{-\frac{4ht}{D \rho_n C_{pn}}} \right). \quad (8)$$

Данное уравнение подтверждает возможность создания процесса избирательного нагрева насекомых и зерна. На рис. 1 представлены зависимости увеличения разности температур от увеличения диэлектрической проницаемости насекомых.

Из рис. 1 видно, что с увеличением диэлектрической проницаемости увеличивается разность между температурами насекомых и зерна. Так, например, для диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''_n$ , равной 10, при времени нагрева 35 с разность температур составляет 5,5  $^\circ C$ , а при диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''_n$ , равной 30, при времени нагрева 35 с разность температур составляет 20  $^\circ C$ .

Для анализа процесса нагрева введем величину, с помощью которой получим значение эффек-

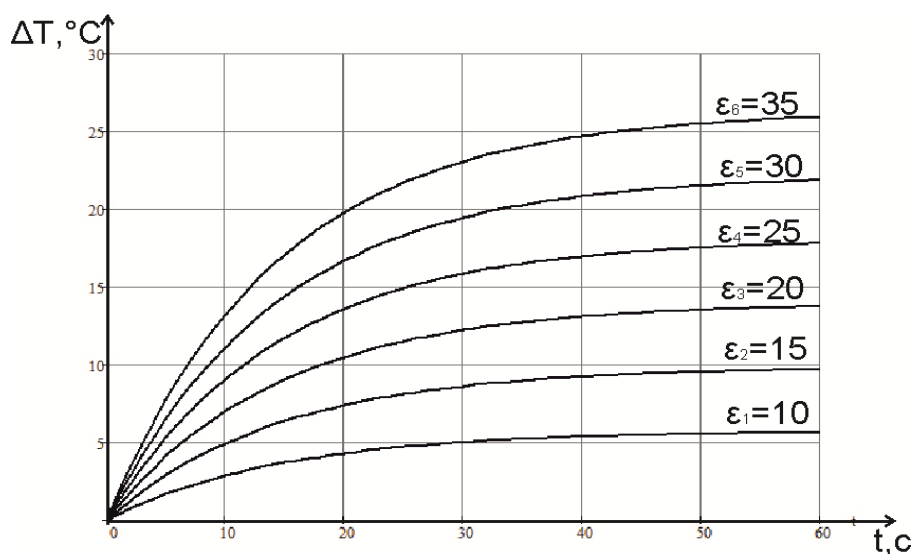


Рис. 1. Графики зависимости разности температур насекомых и зерна от времени нагрева при различных значениях диэлектрической проницаемости насекомых

тивности избирательного нагрева. Критерий избирательного диэлектрического нагрева насекомых и зерна с различными теплофизическими, диэлектрическими, биологическими и физическими параметрами; с одинаковыми параметрами электромагнитного поля определится величиной

$$\mathcal{E}_{\text{и.н}} = \frac{dT}{dt}. \quad (9)$$

Необходимо стремиться к тому, чтобы максимальное различие между температурами насекомого и зерна было за минимальное время, только в этом случае величина  $\mathcal{E}_{\text{и.н}}$  будет максимальной. После дифференцирования получили формулу

$$\mathcal{E}_{\text{и.н}} = \frac{4 \cdot 55,63 f \varepsilon''_3 E^2 \cdot 10^{-12} \left( \frac{\varepsilon''_n}{\varepsilon''_3} - \frac{\rho_n C_{pн}}{\rho_3 C_{p3}} \right) e^{-\frac{4ht}{D \rho_n C_{pн}}}}{D S_n \rho_n C_{pн}}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлена зависимость критерия избирательного нагрева для различных значений диэлектрической проницаемости насекомых.

Как видно из рис. 2 при значении диэлектрической проницаемости насекомых  $\varepsilon''_n$ , равной 10, при длительности нагрева 35 с, критерий избирательности нагрева в относительных единицах составляет 0,7, при значении диэлектрической проницаемости насекомых  $\varepsilon''_n$ , равной 30, при длительности нагрева 35 с, критерий избирательности нагрева в относительных единицах составляет 2,8. Данные показатели позволяют говорить о том, что с увеличением диэлектрической проницаемости насекомых эффективность избирательного нагрева увеличивается.

Таким образом, диэлектрические параметры клеток одной ткани, значительно отличаясь от диэлектрических параметров клеток другой ткани, будут иметь разное время разрушения.

Технологический процесс избирательного нагрева необходимо выполнить таким образом, чтобы нагреть внутренние органы насекомых до большей температуры (до разрушения клеточных

мембран), оставив при этом целыми клетки зерна (не разрушая клеточные мембраны зерна).

Для подтверждения представленной выше математической модели были проведены опыты по нагреву зерна, зараженного насекомыми. На рис. 3 представлены зависимости увеличения температуры зерна и вредителей от времени СВЧ-воздействия.

До СВЧ-воздействия зерна имели одинаковую температуру, равную 10 °С. Продолжительность нагревания ограничили 60 с. Чем продолжительней время нагрева, тем выше различия температур целых зерен и зерен, содержащих вредителей. Зерна, содержащие вредителей были разделены на 4 категории в зависимости от вида, содержащихся в них насекомых: амбарный долгоносик, рисовый долгоносик, зерновой точильщик, зерновая моль. Зависимость увеличения температуры целых зерна и зерен с вредителями от времени СВЧ-нагрева приведена на рис. 3.

Увеличение температуры более интенсивно идет у зерен с вредителями. Например, при времени нагрева 30 с температура целых зерен увеличилась на 17 °С, а для зерен, содержащих амбарного долгоносика – 22 °С, для зерен, содержащих рисового долгоносика – 23 °С, зернового точильщика и зерновую моль – 25 °С. При дальнейшем СВЧ-нагреве скорость изменения температуры целых зерен и зерен, содержащих вредителей, становится еще более различной. Так, при 60 с температура целых зерен увеличилась на 25 °С, зерна с амбарным долгоносиком – на 34 °С, зерна с рисовым долгоносиком – на 43 °С, зерна с зерновым точильщиком и зерновой молью – на 47 и 49 °С соответственно.

Результаты измерений обрабатывались в соответствии с методикой, изложенной в [6, 7]. Изменение температуры зерна с учетом разброса

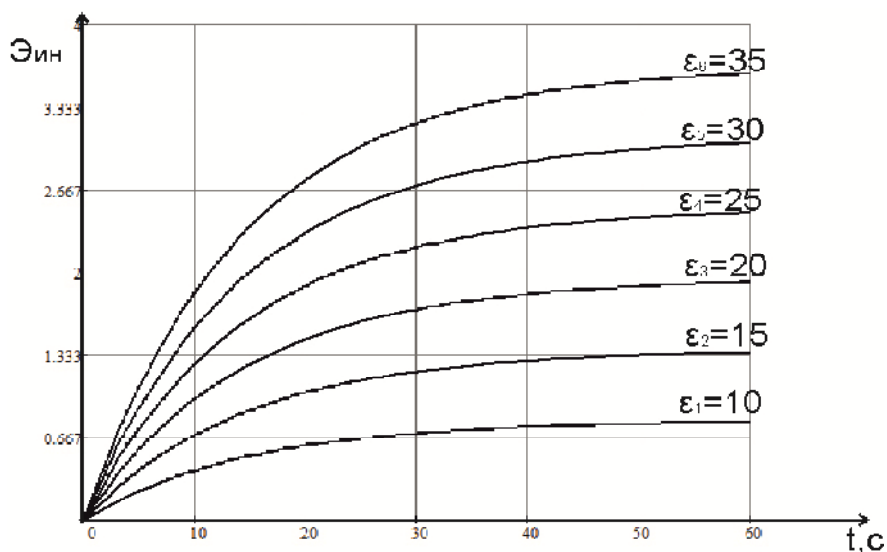
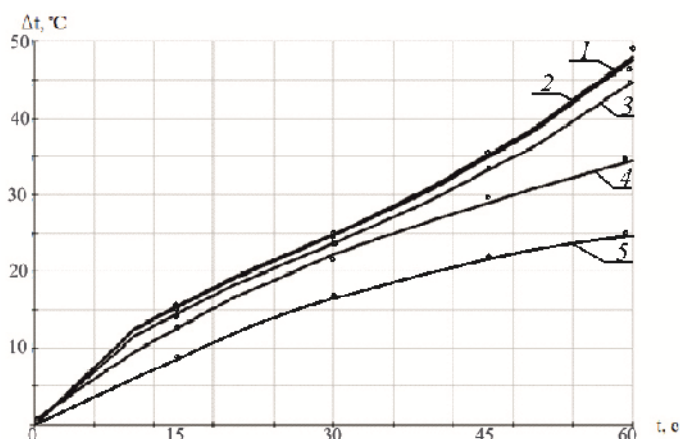


Рис. 2. Зависимость избирательного нагрева от диэлектрических параметров насекомых и зерна



**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований зависимости увеличения температуры целых зерен и зерен с вредителями от времени СВЧ-воздействия: 1 – зерна с зерновой молью; 2 – зерна с зерновым точильщиком; 3 – зерна с рисовым долгоносиком; 4 – зерна с амбарным долгоносиком; 5 – целые зерна

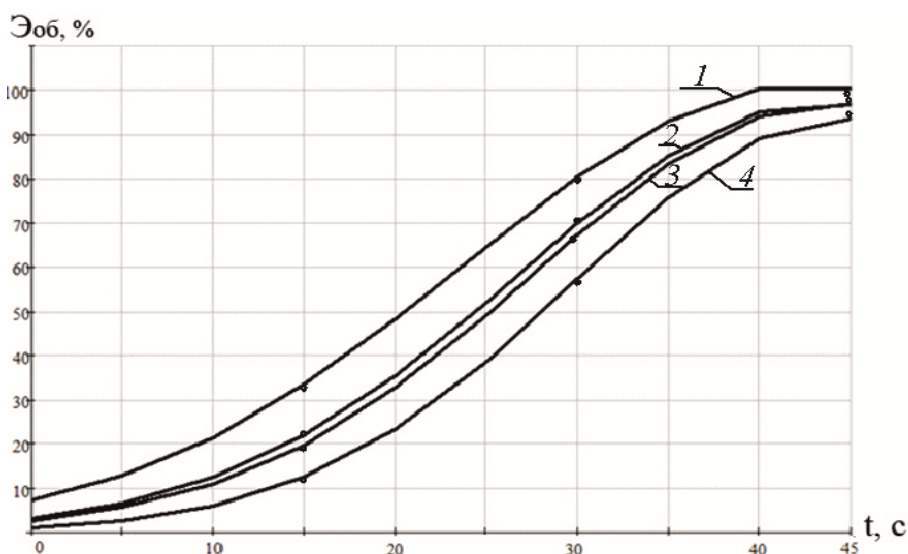
параметров достоверное. Разброс значений температуры для целых зерен и зерен, содержащих вредителей не перекрывает друг друга, что позволяет говорить о достоверности результатов. Таким образом, получается, что целые зерна в меньшей степени нагреваются, а наибольшее изменение температуры присутствует у тех зерен, внутри которых содержатся вредители с большими диэлектрическими параметрами.

На основании этого факта подтверждается возможность избирательного нагрева зерна и вредителей для обеззараживания.

На рис. 4 приведены зависимости эффективности обеззараживания зерна от вредителей для разного времени СВЧ-нагрева. Чем продолжительнее время воздействия, тем выше эффективность обеззараживания. Время нагрева нельзя уве-

личивать до бесконечности, оно имеет предел, который основывается на сохранении жизнеспособности зерна.

Данная зависимость показывает эффективность обеззараживания от времени СВЧ-нагрева. Например, для времени нагрева 30 с эффективность обеззараживания для зерен, содержащих зерновую моль равно 80 %, для зерен, содержащих амбарного и зернового долгоносиков – 55 и 50 % соответственно, для зерен, содержащих зернового точильщика – 40 %. При увеличении времени нагрева увеличивается и эффективность обеззараживания. Для времени 45 с эффективность обеззараживания для зерен, содержащих зерновую моль, равно 100 %, для зерен, содержащих амбарного и зернового долгоносиков – 95 %, для зерен, содержащих зернового точильщика – 90 %.



**Рис. 4.** Результаты экспериментальных исследований зависимости эффективности уничтожения вредителей в зерне от времени СВЧ-нагрева: 1 – зерна с зерновой молью; 2 – зерна с зерновым точильщиком; 3 – зерна с рисовым долгоносиком; 4 – зерна с амбарным долгоносиком

На основании проведенных опытов можно говорить о том, что существует прямая зависимость между диэлектрическими параметрами насекомых, температурой нагрева и эффективностью обеззараживания.

Полученные экспериментальные данные подтверждают математическую модель. Разработанная модель позволяет разработать конструкцию и технологические параметры процесса избирательного нагрева для применения в технологической линии получения высококачественных семян из неликвидного зернового материала. Разработанная математическая модель может быть использована для разработки подобных технологических линий по обеззараживанию других продуктов питания или в медицине.

Наши работы проводятся по контракту «Разработка технологической линии получения высококачественных семян из неликвидного зернового материала», заключенного в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», организованной Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

#### Литература

1. Подгорбунских, Д.В. СВЧ сушка как способ подготовки семян зерновых культур к электросепарации / Д.В. Подгорбунских // *Материалы XLVIII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству»*. Челябинск: ЧГАУ, 2009. – С. 171–175.

2. Nelson, S.O. *Electromagnetic Energy* / S.O. Nelson // *Chapter 3: Pest Control-Biological, Physical and Selected Chemical Methods* / eds. W.W. Kilgore and R.L. Doutt. – New York: Academic Press Publ, 1996. – 217 p.

3. Ryyänänen, S. *The Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic Principles* / S. Ryyänänen // *J. Food Eng.* – 1995. – Vol. 26, no. 4. – P. 409–429.

4. Von Hippel, A. *Dielectrics and Waves* / A. von Hippel. – New York: Publ. Wiley, 1954.

5. Nelson, S.O. *Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control* / S.O. Nelson // *Trans. ASAE.* – 1996. – Vol. 39, no. 4. – P. 1475–1484.

6. Осинцев, Е.Г. Анализ двухступенчатого предпроектного исследования / Е.Г. Осинцев, Д.В. Осинцева, Т.И. Рудакова // *Подготовка профессиональных управленческих кадров: опыт, проблемы, инновационные образовательные технологии: материалы V междунар. науч.-практ. конф.* – Челябинск: Челябинский филиал РАНХиГС, 2014. – С. 68–71.

7. Рудакова, Т.И. Обработка научных данных в MATLAB / Т.И. Рудакова, Д.В. Осинцева, Е.Г. Осинцев // *Подготовка профессиональных управленческих кадров: опыт, проблемы, инновационные образовательные технологии: материалы V междунар. науч.-практ. конф.* – Челябинск: Челябинский филиал РАНХиГС, 2014. – С. 92–98.

Осинцева Дарья Владимировна, преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dashabfly@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 марта 2015 г.

DOI: 10.14529/power150201

## STUDY OF SELECTIVE HEATING OF GRAIN AND INSECTS IN A MICROWAVE FIELD

D.V. Osintseva, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dashabfly@mail.ru

The paper presents the results of study dedicated to selectivity of microwave field heating due to different material sensitivity of grain and insects to dielectric heating. Microwave heating selectivity is prospective for using the electrical technology in biological technologies, agricultural industry, medicine and other branches of national economy. The interface of several sciences opens promising trends of new researches that have vast potential for manufacturing application.

Preliminary research revealed the necessity to analyze the efficiency of selective heating. The author found out that the efficiency of selective heating is associated with dielectric parameters of grain and insects that implies that the heating is possible which would be fatal for insect cells, but safe for grain cells.

Our work is carried out under the contract “Development of the process line producing high-quality seeds from illiquid grain material” concluded within the framework of the program “The Youth Research and Innovation Competition” organized by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology.

*Keywords: selective heating, insects, grain, dielectric permittivity, microwave energy, heat capacity, temperature difference.*

### References

1. Podgorbunskich D.V. [Microwave Drying as a Method of Preparation of Cereal Seeds to Elektroseparate]. *Materialy XLVIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. “Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu”* [Materials XLVIII Intern. Scientific and Engineering. Conf. “Advances in science – the agro-industrial production”], 2009, Chelyabinsk, pp. 171–175. (in Russ.)
2. Nelson S.O. Electromagnetic Energy. *Chapter 3: Pest Control-Biological, Physical and Selected Chemical Methods*, eds. W.W. Kilgore and R.L. Doust. New York, Academic Press Publ., 1996. 217 p.
3. Ryyänänen S. The Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic Principles. *J. Food Eng.*, 1995, vol. 26, no. 4, pp. 409–429. DOI: 10.1016/0260-8774(94)00063-F
4. Von Hippel A. Dielectrics and Waves. New York, Wiley, 1954.
5. Nelson S.O. Review and Assessment of Radio-Frequency and Microwave Energy for Stored-Grain Insect Control. *Trans. ASAE*, 1996, vol. 39, no. 4, pp. 1475–1484. DOI: 10.13031/2013.27641
6. Osintsev E.G., Osintseva D. V., Rudakova T.I. [Analysis of Two-Level Predesign Research]. *Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Podgotovka professional'nykh upravlencheskikh kadrov: opyt, problemy, innovatsionnye obrazovatel'nye tekhnologii”* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference Preparation of Professional Administrative Shots: Experience, Problems, Innovative Educational Technologies], 2014, Chelyabinsk, pp. 68–71. (in Russ.)
7. Rudakova T.I., Osintseva D. V., Osintsev E.G. [Processing of Scientific Data in MATLAB]. *Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Podgotovka professional'nykh upravlencheskikh kadrov: opyt, problemy, innovatsionnye obrazovatel'nye tekhnologii”* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference Preparation of Professional Administrative Shots: Experience, Problems, Innovative Educational Technologies], 2014, Chelyabinsk, pp. 92–98. (in Russ.)

*Received 2 March 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осинцева, Д.В. Исследование процесса избирательного нагрева зерна и насекомых в СВЧ-поле / Д.В. Осинцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 5–10. DOI: 10.14529/power150201

### REFERENCE TO ARTICLE

Osintseva D.V. Study of Selective Heating of Grain and Insects in a Microwave Field. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 5–10. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150201