

Определение фактора диэлектрических потерь зерново-воздушной смеси пшеницы

Дмитрий Александрович Будников,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: dimm13@inbox.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что энергоёмкость процессов тепловой обработки зерна после уборки зависит как от стоимости энергоносителей, так и от связи влаги в зерне. Выявили, что снизить себестоимость указанных процессов можно, используя электротехнологии, в частности электромагнитные поля. При разработке режимов обработки необходимо учитывать виды применяемых электротехнологий, таких как инфракрасные поля, поля сверхвысокой частоты. (*Цель исследования*) Определить зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерново-воздушной смеси от влажности пшеницы (в диапазоне 11-30 процентов) при плотности слоя 220-660 килограммов на кубический метр. (*Материалы и методы*) Привели схему лабораторной установки. Выполнили экспериментальные исследования по определению фактора диэлектрических потерь псевдооживленного слоя зерна пшеницы. (*Результаты и обсуждение*) Провели двухфакторный эксперимент по определению влияния влажности и плотности зерновой насыпи на фактор диэлектрических потерь, который позволяет установить поглощаемую от микроволнового источника мощность. Получили искомые зависимости. (*Выводы*) Выявили, что коэффициент диэлектрических потерь при влажности зерна 11-30 процентов находится в диапазоне 0,18-0,42 для плотного зернового слоя 660 килограммов на кубический метр; 0,06-0,15 – для псевдооживленного слоя (440 килограммов на кубический метр); 0,1-0,3 – для взвешенного (220 килограммов на кубический метр). Установили зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушного слоя пшеницы от влажности зерна и плотности слоя, описали ее полиномиальной моделью второй степени. Показали, что псевдооживление зернового слоя повышает эффективность воздействия микроволнового поля, так как вследствие снижения коэффициента диэлектрических потерь увеличивается глубина проникновения поля в слой. Рекомендовали применять микроволновое поле в плотном слое зерна при досушивании пшеницы, уменьшая влажность с 16 до 14 процентов.

Ключевые слова: микроволновое поле, тепловая обработка зерна, коэффициент диэлектрических потерь, напряженность поля, моделирование электромагнитных полей, псевдооживленный слой зерна.

■ **Для цитирования:** Будников Д.А. Определение фактора диэлектрических потерь зерново-воздушной смеси пшеницы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 10-14. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-10-14.

Determination of the Dielectric Loss Factor of a Grain-Air Mixture of Wheat

Dmitriy A. Budnikov,
Ph.D.(Eng), key research engineer,
e-mail: dimm13@inbox.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents the data on the energy intensity of the heat treatment of grain during post-harvest processing caused by both the cost of energy and the grain moisture content. The development of processing modes using electrical technologies, in general, and electromagnetic fields, in particular, can make it possible to reduce the cost of these processes. Heat treatment is applied to the grain of various crops at the stages of drying, disinfection, preparation for feeding, etc. When developing them, it is necessary to take into account the types of applied electrical technologies, such as, for example, infrared fields, microwave fields, etc. (*Research purpose*) To determine the dielectric properties (dielectric loss coefficient) of a wheat grain-air mixture with a moisture content of 11-30 percents with a layer density of 220-660 kilogram per cubic meter. (*Materials and methods*) The authors present a diagram of a laboratory installation, carried out experimental studies to determine the dielectric loss coefficient of a fluidized bed of wheat grain. (*Results and discussion*) The authors conducted



a two-factor experiment to determine the effect of moisture and density of a grain bulk on the dielectric loss factor, which determines the power absorbed from the microwave source. As a result, they obtained the studied relationships. (Conclusions) It was found that the dielectric loss coefficient at a grain moisture content of 11-30 percents is in the range of 0.18-0.42 for a dense grain bed of 660 kilogram per cubic meter, 0.06-0.15 for a fluidized bed (440 kilogram per cubic meter); and for a weighted bed (220 kilogram per cubic meter) 0.1-0.3. The authors calculated a dependence of the dielectric loss coefficient of a wheat grain-and-air layer on the grain moisture content and the layer density, which can be described by a polynomial model of a second power. The study showed that fluidization of the grain bed increases the efficiency of the microwave field, as due to a decrease in the dielectric loss coefficient, the depth of field penetration into the layer increases. It is recommended to use the microwave field in a dense bed of grain when drying wheat, thus reducing moisture from 16 to 14 percent.

Keywords: microwave field, heat treatment of grain, dielectric loss coefficient, field strength, electromagnetic field modeling, fluidized bed of grain

For citation: Budnikov D.A. Opredelenie faktora dielektricheskikh poter' zernovozdushnoy smesi pshenitsy [Determination Of The Dielectric Loss Factor Of A Grain-Air Mixture Of Wheat]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 10-14. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-10-14 (In Russian).

Классические тепловые способы сушки зерна отличаются высокой энергоемкостью (3,5-9,0 МДж/кг_{исп.вл.}), а установки для сушки зерна зачастую физически изношены и не отвечают современным требованиям энергосбережения [1-4]. Способы усовершенствования конструкций зерносушилок исчерпаны, требуется разработка технологий и оборудования, обеспечивающего высокотехнологичную, энергосберегающую сушку. При расходе теплоты в зерносушилке учитываются следующие затраты и потери теплоты: на испарение влаги; на нагрев зерна; с отходящими газами (с отработавшим агентом сушки); в окружающую среду (через нагретые поверхности); на нагрев транспортных средств; вследствие неполного сгорания топлива (от механического и химического недожога).

Затраты теплоты на испарение влаги определяют по формуле:

$$Q_1 = W(r + \Delta r), \quad (1)$$

где W – влажность, о.е.;

r – скрытая теплота парообразования воды, кДж/кг_{вл.}:

$$r = 2500 - (2,3 + 0,0014 \cdot \theta)\theta; \quad (2)$$

θ – температура зерна, °С.

Основные способы снижения энергоемкости сушки следующие:

- повышение температуры сушильного агента и увеличение его расхода (интенсификация);
- сушка неподогретым воздухом в бункерах-зернохранилищах;
- герметизация и термоизоляция сушилки, каналов и воздухопроводов;
- регенерация тепла из отработанного теплоносителя (существенное снижение энергоемкости; снижение скорости сушки);

- наложение неоднородных электрических полей (снижение производительности);
- исключение охладительных устройств из сушильных агрегатов (драйарация);
- предварительный подогрев зерна (увеличение энергоемкости установки);
- рециркуляция отработанного теплоносителя (усложнение конструкции);
- применение электромагнитных ВЧ- и СВЧ-полей (повышение требований безопасности персонала; увеличение энергоемкости установки; усложнение конструкции);
- сушка озоновоздушной смесью (повышение требований безопасности персонала; усложнение конструкции; повышенный износ из-за окисления металлических частей).

Для увеличения производительности сушильного оборудования часто используют разрыхление обрабатываемого слоя тем или иным способом (заторможенный, падающий, псевдооживленный, восходящий слой и т.д.). Одним из вариантов интенсификации тепломассопереноса в псевдооживленном слое может быть применение электромагнитного поля микроволнового диапазона. Экспериментальные исследования позволяют судить об эффективности подобной комбинации [4, 5]. Например, энергоэффективность сушки сои зависит от толщины обрабатываемого слоя, скорости агента сушки, его температуры и удельной мощности воздействующего электромагнитного поля (рис. 1) [5]. Энергоэффективность сушки представляет собой отношение полезной мощности, идущей на испарение влаги, к общей затраченной мощности. Анализ приведенных графиков позволяет сравнить влияние различных факторов: температуры агента сушки (рис. 1а), скорости агента сушки (рис. 1б), толщины слоя (рис. 1с) с применением микроволнового поля при различной удельной мощности (рис. 1д).

При этом увеличение удельной мощности электромагнитного поля ограничивается технологически параметрами процесса тепловой обработки.

В общем же случае энергетические затраты на сушку зерна в зависимости от состояния слоя или технологии для наглядности сравнения принято выражать через критерий сушки, или критерий эффективности влагосъема. Он учитывает взаимосвязь исходной и текущей влажности в расчете на массу сухого вещества зерна, а также количество удаляемой из зерна влаги. Критерий эффективности влагосъема в соответствии с технологией сушки зависит от многих факторов, в том числе от температуры и скорости агента сушки, его массовой доли, продолжительности сушки, влажности обрабатываемого материала, удельной мощности, рассеиваемой в материале, концентрации и полярности аэроионов, напряженности электрического поля и т.д. При этом степень влияния указанных факторов различна для разных видов технологии сушки. Так, в случае сушки в шахтной сушилке определяющим критерием будет продолжительность сушки (за счет изменения формы связи влаги), в случае же сушки в элементарном слое усиливается влияние изменения массовой доли агента сушки и в диапазоне $0,36-1,35 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ изменяется от 0 до 0,11 [5]. При этом коэффициент сушки практически не зависит от температуры агента сушки и массовой доли агента сушки при сушке в кипящем слое. Это связано с большой площадью соприкосновения агента сушки и обрабатываемого материала, а также с тем, что агент сушки не успевает насытиться парами влаги, содержащейся в обрабатываемом материале.

Для разработки энергоэффективного оборудования и алгоритмов управления зерносушильным оборудованием необходимо знать диэлектрические характеристики материала, находящегося в разном состоянии слоя (плотный, псевдооживленный, взвешенный) [7-9]. Определение таких характеристик, как фактор диэлектрических потерь, сопряжено со сложностями, обусловленными неравномерностью распределения влаги по материалу, наличием воздушных промежутков, а также необходимостью обеспечения требуемой плотности слоя.

Цель исследования – определить зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушной смеси от влажности пшеницы в слоях различной плотности.

Материалы и методы. Исследование тепловой обработки зерновой массы, в том числе находящейся в псевдооживленном и кипящем состоянии, проводили на лабораторной установке (рис. 2).

Для экспериментального определения напряженности электромагнитного поля в зерновом слое применяли устройство, которое работает по прин-

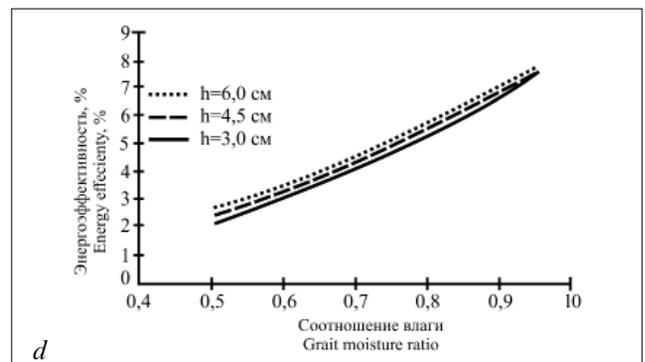
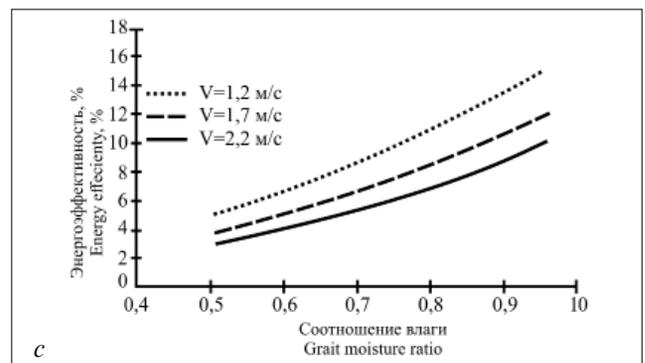
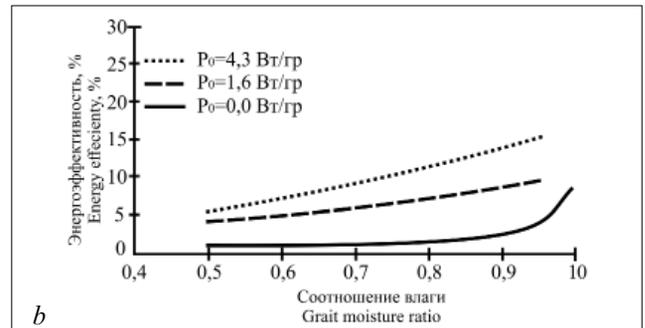
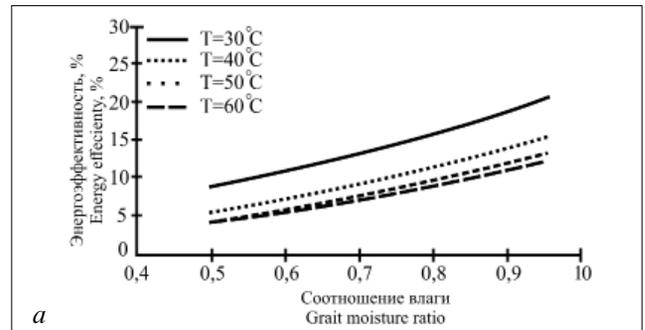


Рис. 1. Энергоэффективность сушки зерна сои в псевдооживленном слое с применением электромагнитного поля СВЧ
 Fig. 1. Energy efficiency of grain drying in the fluidized bed using microwave electromagnetic field

ципу калориметрического измерительного оборудования [8, 9]. Калориметрический метод измерения основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в тепловую. Поглощение энергии поглотителем, составляющим основной элемент прибора, можно зарегистрировать либо

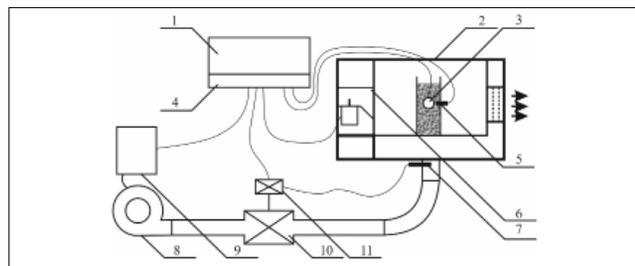


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования тепловой обработки зерновой массы:

1 – ПК; 2 – зона СВЧ-конвективной обработки; 3 – калориметрический датчик; 4 – плата ввода/вывода; 5 – датчик температуры зернового слоя; 6 – источник СВЧ (магнетрон, блок питания, волновод); 7 – датчик температуры воздуха; 8 – вентилятор; 9 – векторный преобразователь частоты; 10 – нагреватель; 11 – терморегулятор

Fig.2. Laboratory installation for the study of heat treatment of a grain mass: 1 – PC; 2 – microwave convection processing zone; 3 – calorimetric sensor; 4 – input/output board; 5 – grain layer temperature sensor; 6 – microwave source (magnetron, power supply, waveguide); 7 – air temperature sensor; 8 – fan; 9 – vector frequency converter; 10 – heater; 11 – thermostat

непосредственно по динамике его температуры, либо косвенно – по изменению объема, давления или других характеристик. В данном случае происходит контроль температуры [6].

Возможна реализация нагрузки (зернового слоя) как при полном, так и при частичном заполнении объема зоны СВЧ-конвективной обработки [10]. Обеспечение состояния псевдооживленного либо взвешенного слоя осуществляется посредством продувания через слой воздуха с требуемой скоростью от вентилятора. Скорость потока воздуха регулируется через векторный преобразователь частоты.

Мощность, поглощенную в единице объема диэлектрика, определим по формуле:

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2, \tag{3}$$

где P – поглощенная мощность, Вт/м³;
 f – частота электромагнитного поля, Гц;
 ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума (8,854·10⁻¹² Ф/м);
 ϵ'' – фактор диэлектрических потерь;
 E – напряженность электрического поля, В/м.

Измерение напряженности электромагнитного поля в слое материала контролируется устройством, разработанным и представленным ранее [6]. Коэффициент диэлектрических потерь определяют аналитически по зависимости:

$$\epsilon'' = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta T}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E_2 \cdot f \cdot \tau}, \tag{4}$$

где c_m – теплоемкость материала, кДж/кг·°С;
 ρ_m – плотность сухого вещества образца, кг/м³;
 ΔT – нагрев материала в процессе измерения, °С.

Контроль температуры в зерновке осуществляется встроенной термопарой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Напряженность электромагнитного поля в зерно-воздушной смеси пшеницы измерили в слоях различной плотности: 220 кг/м³, что характерно для взвешенного слоя; 440 кг/м³ – для псевдооживленного и 660 кг/м³ – для обычного плотного слоя (рис. 3). Зависимость коэффициента диэлектрических потерь для зерна при влажности 11-30% может быть описана полиномиальной моделью.

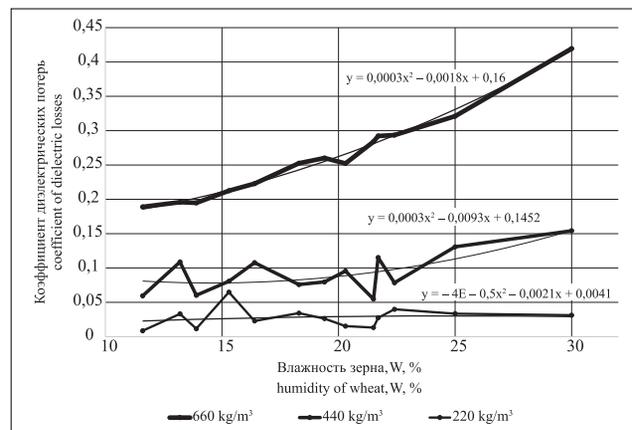


Рис. 3. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь от плотности слоя и влажности зерна пшеницы

Fig.3. Dependence of the dielectric loss coefficient on the wheat grain bed density and moisture content

Общая динамика фактора диэлектрических потерь для зерна пшеницы, на которое воздействует электромагнитное поле СВЧ частотой 2,45 Гц, сохраняется для разных значений плотности материала. Но уровни этого коэффициента заметно различаются. Так, для плотного слоя коэффициент диэлектрических потерь изменяется в диапазоне 0,18-0,42; для псевдооживленного слоя – 0,06-0,15; для взвешенного – 0,1-0,3. Зависимость диэлектрических свойств может быть описана полиномиальной моделью.

Достоверность данных для разных уровней плотности существенно отличается, так как в плотном слое погрешность обусловлена применяемыми датчиками, а также наличием воздушных промежутков в слое; для псевдооживленного и взвешенного слоев, помимо указанных, добавляются потери, обусловленные тепловым взаимодействием воздуха с зерновым слоем и датчиком. Качество измерений можно повысить, если использовать датчики, на которые не действует микроволновое поле, например, оптоволоконные, или механически воздействуя на слой. В дальнейшем необходимо составить уравнение энергетического баланса и провести оценку энергоёмкости влагоёма с учетом энергии, идущей на создание соответствующей плотности слоя, расходуемой на электромагнитное воздействие, перемещение материала и т.д.

Выводы

1. Коэффициент диэлектрических потерь при влажности зерна 11-30% находится в диапазоне 0,18-0,42 для плотного зернового слоя (660 кг/м^3); 0,06-0,15 – для псевдооживленного слоя (440 кг/м^3); 0,1-0,3 – для взвешенного (220 кг/м^3).
2. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушного слоя пшеницы может быть описана полиномиальной моделью второй степени.
3. При выборе путей интенсификации и обеспечения энергосбережения следует руководствоваться

ключевыми требованиями технологических процессов и экономическими критериями эффективности производства.

4. Псевдооживление зернового слоя повышает эффективность применения микроволнового поля, при этом вследствие снижения коэффициента диэлектрических потерь увеличивается глубина проникновения поля в слой.

5. Микроволновое поле следует применять в плотном слое зерна при досушивании пшеницы, уменьшая влажность с 16 до 14%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. М.: Колос. 2004. 240 с.
2. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press. 2015. 229.
3. Малин Н.И. Технология хранения зерна. М.: Колос. 2005. 280 с.
4. Vasilev A.N., Budnikov D.A., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Karmanova G.K., Shalginbaev D.B., Vasilev A.A. Controlling reactions of biological objects of agricultural production with the use of electrotechnology. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue N4. 26855-26869.
5. Ranjbaran M., Zare D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*. 2013. Vol. 59. 484-493.
6. Будников Д.А. Определение коэффициента диэлек-

трических потерь псевдооживленного слоя зерна // *Инженерный вестник Дона*. 2017. N3. С. 1-9.

7. Budnikov D.A., Vasilev A.N., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Dautkanova D.R. Changing parameters of the microwave field in the grain layer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. N11 (Special Issue 1). 2915-2919.

8. Pallai-Varsányi E., Neményi M., Kovács A.J., Szijjártó E. Selective Heating of Different Grain Parts of Wheat by Microwave Energy. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. 2007. 312-320.

9. Будников Д.А. Измерение напряженности СВЧ поля в зерновом слое // *Вестник ВИЭСХ*. 2015. N4(21). С. 40-44.

10. Будников Д.А. Промежуточные результаты численного эксперимента по СВЧ нагреву пшеницы разной плотности // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. N2(23). С. 22-28.

REFERENCES

1. Malin N.I. Energy-saving drying of grain [Energoberegayushchaya sushka zerna]. Moscow: Kolos. 2004. 240 (In Russian).
2. Stuart Nelson Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications Academic Press. 2015. 229 (In English).
3. Malin N.I. Technology of grain storage [Tehnologiya khraneniya zerna]. Moscow: Kolos. 2005. 280 (In Russian).
4. Vasilev A.N., Budnikov D.A., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Karmanova G.K., Shalginbaev D.B., Vasilev A.A. Controlling reactions of biological objects of agricultural production with the use of electrotechnology. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue N4. 26855-26869 (In English).
5. Ranjbaran M., Zare D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*. 2013. Vol. 59. 484-493 (In English).
6. Budnikov D.A. Determination of the coefficient of dielectric losses of the fluidized grain layer [Opredelenie koeffitsienta dielektricheskikh poter' psevdoozhizhennogo sloya zerna].

Inzhenerniy vestnik Dona. 2017. N3. 1-9 (In Russian).

7. Budnikov D.A., Vasilev A.N., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Dautkanova D.R. Changing parameters of the microwave field in the grain layer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. N11 (Special Issue 1). 2915-2919 (In English).

8. Pallai-Varsányi E., Neményi M., Kovács A.J., Szijjártó E. Selective Heating of Different Grain Parts of Wheat by Microwave Energy. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. 2007. 312-320 (In English).

9. Budnikov D.A. Measurement of the microwave field strength in the grain layer [Izmereniye napryazhennosti SVCh polya v zernovom sloye]. *Vestnik VIESH*. 2015. N4(21). 40-44 (In Russian).

10. Budnikov D.A. Intermediate results of a numerical experiment on microwave heating of variable-density wheat [Promezhutochnye rezul'taty chislenogo eksperimenta po SVCh nagrevu pshenitsy raznoy plotnosti]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2017. N2(23). 22-28 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.02.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 07.02.2019

Статья принята к публикации 11.04.2019
The paper was accepted
for publication on 11.04.2019