

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ СЛОЯ СЕМЯН

С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.М., Дмитриев

Станислав Павлович Рудобашта

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru

Галина Альбертовна Зуева \*

Кафедра высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: zueva\_galina15@mail.ru \*

Вячеслав Михайлович Дмитриев

Кафедра Безопасность и правопорядок, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

*Получены данные по коэффициенту массопроводности при сушке семян лука репчатого в плотном обдуваемом по поверхности слое толщиной 5 мм, рассчитанные зональным методом из опытных кривых сушки и нагрева. Эти данные описаны зависимостью от температуры и влагосодержания материала. Дано сопоставление значений коэффициента массопроводности для слоя и для единичных семян, показавшее что: 1) коэффициент массопроводности в слое в ходе сушки существенно изменяется, поэтому требуется учет этого изменения, 2) изменение коэффициента массопроводности обусловлено его зависимостью как от влагосодержания, так и от температуры, но влияние температуры превалирует над влиянием влагосодержания, поэтому коэффициент массопроводности в ходе сушки увеличивается, 3) коэффициент массопроводности в слое на два порядка выше, чем для единичных семян. Выполнен расчет кривой сушки семян в слое толщиной 5 мм с использованием полученных данных по коэффициенту массопроводности применительно к процессу осциллирующей инфракрасной сушки семян, проводимой при колебании температуры материала в интервале от  $t_{min} = 34$  °С до  $t_{max} = 40$  °С, показавший удовлетворительное согласование результатов расчета и эксперимента. Опытные и расчетные кривые осциллирующей инфракрасной сушки семян в слое толщиной 5 мм сопоставлены с аналогичными кривыми сушки семян в монослое, показавшее, что, несмотря на то, что коэффициент массопроводности семян в слое толщиной 5 мм на два порядка больше, чем в монослое, сушка семян в первом случае идет медленнее из-за большей толщины слоя. Для расчета кинетики процесса осциллирующей инфракрасной сушки семян в плотном слое, когда температура его поверхности осциллирует в интервале от  $t_{min} = 34$  °С до  $t_{max} = 40$  °С, рекомендован зональный метод с использованием полученных данных по коэффициенту массопроводности, учитывающий изменение коэффициента массопроводности в ходе процесса.*

**Ключевые слова:** инфракрасная сушка, термодиффузия, массопроводность

## STUDY OF MASS CONDUCTIVITY PROPERTIES OF SEEDS LAYER

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, V.M. Dmitriev

Stanislav P. Rudobashta

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Energy Supply Companies, Russian State Agrarian University, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127550, Russia

E-mail: rudobashta@mail.ru

Galina A. Zueva \*

Department of High and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shernetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: zueva\_galina15@mail.ru \*

Vyacheslav M. Dmitriev

Department of Security and Legal Order, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

*Data on the mass conductivity coefficient have been obtained during drying the onion seeds in a thick layer of 5 mm thick ventilated on the surface, which were calculated by the zonal method on the basis of experimental curves of drying and heating. These data are described by the dependence of the mass conductivity coefficient on temperature and moisture content of the material. The comparison of the mass conductivity coefficient values for a layer and for single seeds is given, which shows that: 1) the mass conductivity coefficient in the layer changes significantly during drying, therefore, this change must be taken into account; 2) the change in the mass conductivity coefficient is due to its dependence on both moisture content and temperature, but the influence of temperature prevails over the influence of moisture content, therefore, the mass conductivity coefficient increases during drying, 3) the mass conductivity coefficient in the layer is two orders of magnitude higher than for single seeds. The curve of seeds drying in a layer of 5 mm thick have been calculated using the obtained data on the mass conductivity coefficient for the process of oscillating infrared seeds drying carried out at a material temperature fluctuation in the range from  $t_{min} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $t_{max} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which showed satisfactory agreement of the results of calculation and experiment. Experimental and calculated curves of oscillating infrared seeds drying in a layer of 5 mm thick are compared with analogous curves of drying the seeds in a monolayer, which showed that, despite the fact that the mass conductivity coefficient of seeds in a layer of 5 mm thick is two orders of magnitude greater than in a monolayer, the drying of seeds in the first case is slower because of the greater thickness of the layer. To calculate the kinetics of the process of oscillating infrared seeds drying in a dense layer, when its surface temperature oscillates in the range from  $t_{min} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $t_{max} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the zonal method is recommended using the obtained data on the mass conductivity coefficient, taking into account the change in the mass conductivity during the process.*

**Key words:** infrared drying, seeds, thermal diffusion, mass conductivity

### Для цитирования:

Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М. Исследование массопроводных свойств слоя семян. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 72–77.

### For citation:

Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M. Study of mass conductivity properties of seeds layer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 7. P. 72–77.

## ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасная сушка (ИК сушка) различных материалов достаточно широко используется на практике [1-4]. ИК сушку термолабильных материалов следует проводить в осциллирующем температурном режиме, позволяющем избежать перегрева материала. В [5] было установлено, что осциллирующая ИК сушка семян овощных культур, проводимая при условии, что их температура в процессе колеблется от  $t_{\min} = 34$  °С до  $t_{\max} = 40$  °С, вызывает значительную стимуляцию семян. В [6] было изучено влияние начальной влажности семян, длительности осциллирующей ИК сушки на стимулирующий эффект, длительности сохранения эффекта стимуляции во времени. В [7] разработана математическая модель, описывающая динамику нагрева слоя материала, облучаемого осциллирующим электромагнитным полем, с учетом испарения из него влаги. В [8, 9] представлены результаты численного эксперимента по изучению влияния технологических параметров на динамику нагрева слоя на основе этой модели, показавшие возможность ее использования при организации процесса сушки. Расчеты в [8, 9] выполнены для монослоя семян с использованием данных по массопроводности единичных семян. Однако, для уменьшения габаритов сушилки, используемой для осциллирующей ИК сушки семян, необходимо высушивать семена в слое. Данные по массопроводности семян в слое отсутствуют, поэтому целью данной работы являлось получение экспериментальных данных по массопроводности семян в слое, описание их функцией от влагосодержания и температуры материала, сопоставление с данными по массопроводности единичных семян, разработка инженерной методики расчета кинетики осциллирующей инфракрасной сушки семян с использованием этих данных и расчета промышленного аппарата на ее основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МАССОПРОВОДНОСТИ СЛОЯ СЕМЯН

Массопроводность слоя исследовали зондальным методом: снимали кривые сушки в условиях, исключающих внешнее диффузионное сопротивление; далее обрабатывали их методом разбиения на ряд концентрационных зон и нахождения для каждой из них значения коэффициента массопроводности из решения линейного дифференциального уравнения массопроводности в регулярном режиме процесса. Кривые сушки получали при скорости сушильного агента (воздуха) 5 м/мин

при трех его температурах: 40; 50 и 60 °С. В качестве объекта исследования были выбраны семена лука репчатого сорта «Штутгартер ризен», поскольку для них имеются данные по массопроводности единичных семян, с которыми можно было бы сравнить результаты исследований.

Измерительная ячейка была выполнена в виде кюветы, заполненной семенами, высотой 5 мм и диаметром 50 мм, расположенной в подложке из пенополиуретана. Сверху слой был прикрыт тонкой латунной сеткой (толщина проволоки 0,12 мм, размер ячейки 1,5 мм), предотвращавшей сдвиг семян потоком воздуха. Единичное семя лука сорта «Штутгартер ризен» представляет собой ограниченный цилиндр диаметром  $d = 1,7$  мм и длиной  $l = 0,9$  мм (эквивалентный диаметр  $d_3 = 1,57$  мм). В три семени помещали термопары ХК с диаметром электродов 0,08 мм, с помощью которых измеряли изменение температуры семян в процессе сушки. Для исключения теплопритока через термопару ее продевали через два промежуточных семени, а затем уже помещали в центр измеряемой. Семена с размещенными в них термопарами располагали в трех элементарных слоях: верхнем, среднем и нижнем (придонном).

Измерительную ячейку помещали в рабочую камеру сушильной установки, которая представляла собой воздушный термостат с циркулирующим внутри нее воздухом, приводимым в движение вентилятором. Воздух в термостате осушался с помощью силикагеля, что позволяло поддерживать его низкую влажность, близкую к нулевой. Установка была оснащена электрическим нагревателем воздуха, измерителем-регулятором температуры ТРМ202, работающим в комплекте с термопарой ХК. Температура воздуха измерялась и поддерживалась с погрешностью  $\pm 0,1$  °С. Вес слоя в процессе сушки измеряли с помощью электронных весов ОКБ ВСТА АВ 210-01 с точностью 1 мг без извлечения ячейки с семенами из сушильной камеры, время замера не превышало 10 с.

Анализ кривых сушки слоя семян лука, полученных при различных скоростях воздуха, показал, что при скорости 5 м/с внешнее диффузионное сопротивление полностью снимается и процесс сушки лимитируется внутренним диффузионным сопротивлением, что дает возможность определять зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания семян из кривой сушки – зональным методом [10].

На рис. 1 показаны кривые сушки, полученные при скорости сушильного агента 5 м/с, а на рис. 4 приведены опытные термограммы нагрева

элементарных слоев семян, полученные при температуре сушильного агента 50 °С (при других температурах сушильного агента они имеют аналогичный вид). Рассмотрение термограмм позволяет сделать два вывода: 1) температура в каждом слое изменяется на протяжении всего процесса сушки, и сушка, таким образом, характеризуется неизотермичностью внутреннего массопереноса; 2) кривые нагрева для различных элементарных слоев материала, несмотря на небольшую толщину всего слоя (5 мм), существенно разнятся.

Из кривых сушки, показанных на рис. 1, были рассчитаны значения коэффициента массопроводности по зонам влагосодержаний материала [10] (результаты расчета приведены в табл. 1). Во второй колонке таблицы показаны диапазоны влагосодержаний материала, для которых рассчитывали коэффициент массопроводности, в третьей – средние значения влагосодержаний в них (к этим значениям относили рассчитанные значения коэффициента массопроводности). В последующих колонках представлены для трех температурных режимов (40 °С, 50 °С и 60 °С) результаты измерений длительности сушки в каждом из расчетных кон-

центрационных интервалов, средние значения температур материала в них и рассчитанные значения коэффициентов массопроводности. По данным таблицы построены графики, приведенные на рис. 2, показывающие изменение в ходе процесса значений коэффициента массопроводности.

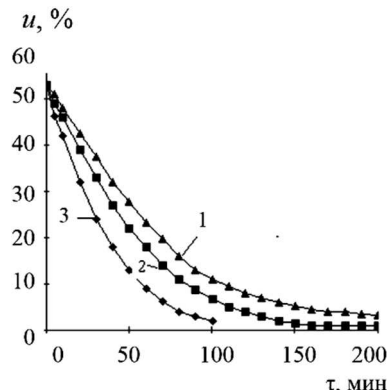


Рис. 1. Кривые конвективной сушки плотного слоя влажных семян лука сорта «Штутгартер ризен» (скорость воздуха 5 м/с; 1 –  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$ )  
 Fig. 1. The convective drying curves of wet dense layer of "Stuttgarter Risen" onion seeds (air velocity - 5 m/s): 1 –  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$

**Таблица**

**Расчетные значения коэффициента массопроводности из кривых сушки по зонам при различных температурах среды  $t_c$ , °С**

**Table. The calculated values of mass conductivity coefficient from drying curves at different air temperatures  $t_c$ , °С**

№ зоны, $i$	$u$ , кг вл/кг сух., %	$u_{cp, i}$	$t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$			$t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$			$t_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$		
			$\tau$ , мин	$t_{cp, i}$	$k \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	$\tau$ , мин	$t_{cp, i}$	$k \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	$\tau$ , мин	$t_{cp, i}$	$k \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с
1	[53;42]	47,5	21	24,5	0,31	15	27,0	0,31	10	27,0	0,44
2	[42;32]	37,0	40	30,5	2,63	32	36,5	3,50	20	37,0	4,70
3	[32;24]	28,0	58	32,8	3,03	45	40,0	3,70	30	42,0	5,00
4	[24;18]	21,0	75	34,0	3,55	59	42,0	3,76	40	45,8	5,00
5	[18;13]	15,5	90	34,7	3,60	73	43,6	4,03	50	48,8	5,80
6	[13;9]	11,0	100	35,2	3,92	87	44,6	4,80	60	51,0	6,60
7	[9;6]	7,5				103	45,8	4,88	70	52,8	7,60
8	[6;4]	5,0				120	45,2	4,95	80	53,8	8,00
9	[4;3]	3,5							110	54,8	7,98

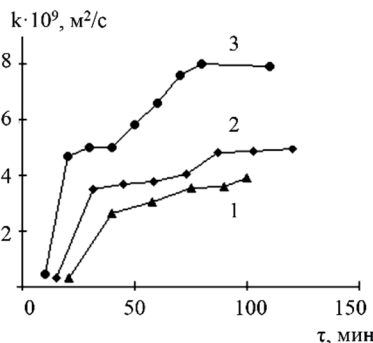


Рис. 2. Изменение коэффициента массопроводности в процессе сушки: 1 –  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$   
 Fig. 2. Changing over the time the mass conductivity coefficient during drying: 1 –  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$

**АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ**

Из рассмотрения рис. 2 можно заключить следующее: 1) коэффициент массопроводности  $k$  в ходе сушки существенно изменяется, поэтому расчет кинетики сушки при постоянном его значении будет приводить к значительной погрешности в определении времени сушки (оценка возникающей погрешности от неучета этого изменения дана в [10]); 2) изменение коэффициента  $k$  в исследованном процессе сушки обусловлено его зависимостью как от влагосодержания, так и от температуры, но влияние температуры на коэффициент  $k$

превалирует над влиянием влагосодержания, поэтому, коэффициент массопроводности в ходе сушки увеличивается, поскольку температура семян при их сушке возрастает; 3) коэффициент  $k$  имеет порядок  $10^{-9}$ , тогда как при сушке единичных семян его порядок равен  $10^{-11}$  [11]. Различие в порядках коэффициента массопроводности при сушке единичного семени и семян в слое обусловлено тем, что при сушке в слое большую роль играет диффузия пара в промежутках между отдельными семенами, тогда как при сушке единичного семени диффузия пара в промежутках между отдельными семенами как вид массопереноса отсутствует.

Поскольку коэффициент массопроводности  $k$ , как физический параметр, является функцией влагосодержания и температуры материала  $k = f(u, t)$ , то целесообразно в полученных экспериментальных данных по этому коэффициенту «развязать» влияющие на него параметры, что дает возможность представить его как физическую величину, а не как режимный параметр, и использовать в инженерных расчетах. Эта задача решалась с использованием процедуры аппроксимации многомерной (двумерной) функции с использованием модели Кобба-Дугласа в системе MATHCAD [12]. В результате была получена функциональная зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания и температуры материала, которая может быть использована при расчете кинетики конвективной сушки плотного слоя семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен», обдуваемого по поверхности:

$$k = a_0 u^{a_1} t^{a_2} f(t_c / 50), \quad (1)$$

где  $a_0 = 4,12 \cdot 10^{-15}$ ,  $a_1 = 6,19 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_2 = 3,73$ ,  $f(t_c/50) = 9,59 - 15,15(t_c/50) + 6,50(t_c/50)^2$ ,  $t$  – температура материала, °C;  $t_c$  – температура сушильного агента, °C.

В уравнении (1) основным параметром (наряду с влагосодержанием) является температура материала  $t$ , но в уравнение введен поправочный параметр  $f(t_c/50)$ , повышающий точность аппроксимации опытных данных, в котором фигурирует температура сушильного агента (воздуха)  $t_c$ , обдувающего семени. В условиях осциллирующей инфракрасной сушки – это температура атмосферного воздуха, обдувающего семени с целью отвода из сушильной камеры паров воды, удаляемых из семян.

Зависимость (1) была использована для расчета кинетики сушки слоя семян лука репчатого в процессе осциллирующей инфракрасной сушки при толщине слоя  $h = 5$  мм, при колебании температуры поверхности семян в интервале от  $t_{\min} = 34$  °C до  $t_{\max} = 40$  °C, непрерывном обдуве поверхности семян атмосферным воздухом с температурой  $t_c =$

20 °C. Результаты расчета и ее сопоставление с экспериментальной кривой сушки показаны на рис. 3.

Как видно из рисунка, расчет кривой сушки с использованием данных по массопроводности, описанных уравнением (1), дает удовлетворительное согласование с экспериментом. На этом же рисунке приведены для сравнения опытная и расчетная кривые сушки монослоя семян лука, полученные в [13], в этом расчете использованы данные по массопроводности единичных семян, приведенные в [11]. В этом случае расчетная и опытная кривые сушки также удовлетворительно согласуются, а кривая сушки для монослоя семян проходит, как и следовало ожидать, более круто, чем для слоя.

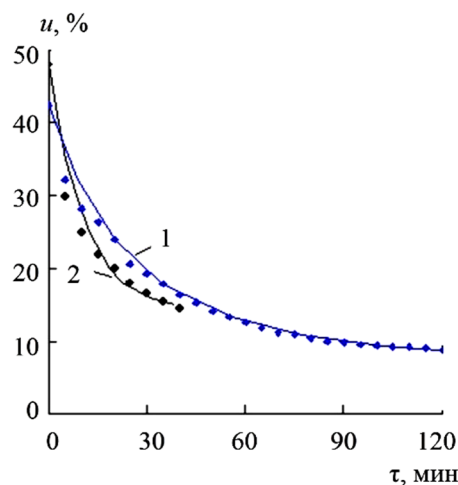


Рис. 3. Сопоставление опытной и расчетной кривых сушки семян лука репчатого сорта «Штутгартер ризен» при осциллирующем инфракрасном энергоподводе (линии – расчет, точки – эксперимент): 1 – плотный обдуваемый слой; 2 – монослоем [13];  $t_{\min} = 34$  °C;  $t_{\max} = 40$  °C,  $t_c = 20$  °C

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated drying curves of "Shtutgarer Risen" onion seeds at oscillating infrared energy supply (the line – calculation, points - experiment): 1 - dense blown layer; 2 – monolayer [13];  $t_{\min} = 34$  °C;  $t_{\max} = 40$  °C,  $t_c = 20$  °C

#### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АППАРАТУРНОМУ ОФОРМЛЕНИЮ ПРОЦЕССА ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ СЕМЯН И КИНЕТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА

Проведенные исследования показали, что полученные данные по массопроводности семян в слое достоверны и могут быть использованы для расчета кинетики их сушки. Отсутствие колебаний влагосодержания семян на кривой сушки в процессе осциллирующей инфракрасной сушки слоя семян, проводимой в интервале температур материала  $t_{\min} = 34$  °C ...  $t_{\max} = 40$  °C (рис. 3), показывает возможность расчета кинетики этого процесса на основе решения дифференциального уравнения массопроводности, записанного для обдуваемого

по поверхности слоя, при соответствующих крайних условиях задачи – с использованием данных по коэффициенту массопроводности слоя. Методика такого расчета описана в [10]. Для реализации данного метода на практике необходимо получение данных по массопроводности высушиваемых семян, которые могут быть получены аналогично тому, как это было сделано в данной работе для семян лука репчатого.

Аппаратурно процесс непрерывной осциллирующей инфракрасной сушки может быть выполнен на основе конвейерной сушилки с установленными над высушиваемым материалом излучателями, (промышленностью выпускаются такие

аппараты, например, сушилка российского производства УТЗ-4). Оснащение такой сушилки соответствующей системой автоматического управления позволит реализовать осциллирующий режим инфракрасной сушки. Применительно к аппарату этого типа была разработана методика его инженерного кинетического расчета на основе указанной выше математической модели процесса с использованием данных по коэффициенту массопроводности слоя. Целью расчета являлось определение необходимого времени пребывания семян в аппарате, обеспечивающего заданную его производительность, а вместе с этим и нахождение габаритов аппарата на стадии его проектирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ratti C., Mujumdar A.S.** Infrared drying. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton, FL: CRC Press. 2007. P. 423-438.
2. **Mujumdar A.S.** Drying'92. Proceedings of 8-th International Drying Symposium. Amsterdam: Elsevier. 1992. 729 p.
3. **Sumoon N., Noomhorm A.** Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technology*. 2013. V. 31. N 1. P. 24-31. DOI: 10.1080/07373937.2012.711792.
4. **Bon J., Kudra T.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying. *Drying Technology*. 2007. V. 25 N 4. P. 523-532. DOI: 10.1080/0737393701226880.
5. **Рудобашта С.П., Григорьев И.В.** Импульсная инфракрасная сушка семян овощных, нетрадиционных и редких растений. *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
6. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Стимуляция семян путем осциллирующей инфракрасной термообработки. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т. 35. № 7. С. 218-222.
7. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A.** Heat-and Mass Transfer in Drying in an Oscillating Electromagnetic Field. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2011. V. 45. N 6. P. 830-837.
8. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modelling and numerical analysis of oscillating infrared seeds drying process. XIII Polish Drying Symposium. Kołobrzeg. 2013. P. 1-6.
9. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modeling and numerical simulation of seeds drying under oscillating infrared irradiation. *Drying Technology*. 2014. V. 32. N 11. P. 1352-1359. DOI: 10.1080/07373937.2014.892508.
10. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
11. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А.** Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых Материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103-107.
12. **Охорзин В.А.** Прикладная математика в системе MATHCAD. СПб.: Лань. 2009. 352 с.
13. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Кинетика осциллирующей инфракрасной сушки семян. Сб. трудов XXVIII междунар. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28». Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А. 2015. Т. 8. С.127-132.

#### REFERENCES

1. **Ratti C., Mujumdar A.S.** Infrared drying. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton, FL: CRC Press. 2007. P. 423-438.
2. **Mujumdar A.S.** Drying'92. Proceedings of 8-th International Drying Symposium. Amsterdam: Elsevier. 1992. 729 p.
3. **Sumoon N., Noomhorm A.** Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technology*. 2013. V. 31. N 1. P. 24-31. DOI: 10.1080/07373937.2012.711792.
4. **Bon J., Kudra T.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying. *Drying Technology*. 2007. V. 25 N 4. P. 523-532. DOI: 10.1080/0737393701226880.
5. **Rudobashta S.P., Grigoriev I.V.** Impulse infrared drying the seeds of vegetables, nontraditional and rare plants. *Promysh. Teploenergetika*. 2011. V. 33. N 8. P. 85-90 (in Russian).
6. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** Stimulation of seeds by oscillating infrared heat treatment. *Promysh. Teploenergetika*. 2011. V. 35. N 7. P. 218-222 (in Russian).
7. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A.** Heat-and Mass Transfer in Drying in an Oscillating Electromagnetic Field. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2011. V. 45. N 6. P. 830-837. DOI: 10.1134/S0040579511050344.
8. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modelling and numerical analysis of oscillating infrared seeds drying process. XIII Polish Drying Symposium. Kołobrzeg. 2013. P. 1-6.
9. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modeling and numerical simulation of seeds drying under oscillating infrared irradiation. *Drying Technology*. 2014. V. 32. N 11. P. 1352-1359. DOI: 10.1080/07373937.2014.892508.
10. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in the solid phase systems. М.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
11. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M., Zuev N.A.** Mass conductivity by drying colloidal capillary-porous materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 57. N 1. P. 103-107 (in Russian).
12. **Okhorzin V.A.** Applied mathematics in MATHCAD system. SPb.: Lan. 352 p. (in Russian).
13. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A.** Kinetics of oscillating infrared seeds drying. Proceedings of XXVIII Int.Sci. Conf. "Mathematic methods in engineering and technology – ММТТ-28". Saratov: SGTU im. Gagarina Yu.A. 2015. V. 8. P. 127-132 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 19.12.2016

Принята к опубликованию (Accepted) 24.04.2017