

## ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ИК-СУШКИ СЕМЯН РАПСА

**Загоруйко Михаил Геннадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
**Павлов Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5; e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru

**Ключевые слова:** ИК-сушка, длительность, плотность потока, температура, постоянный и переменный теплоподводы.

В статье рассматриваются результаты сушки семян рапса, которые осуществляли конвективным методом на шахтных, колонковых, бункерных, а также рециркуляционных сушилках, предназначенных для сушки зерна. Импульсная ИК-сушка позволяла интенсифицировать процесс при сохранении качества семян. Более эффективным является комбинированный метод ИК-сушки, в частности, в псевдооживленном слое при малой интенсивности ИК-потока, когда облучение сочетают с подогревом воздуха, в том числе с осциллированием, чередуя подачу нагретого и наружного воздуха при непрерывном ИК-облучении. Рассчитана длительность ИК-сушки как при постоянном, так и при осциллирующем подводах теплоты. Экспериментально определены режимы комбинированной ИК-сушки. Объектом исследования являлся технологический процесс сушки семян рапса в псевдооживленном слое с интенсивным перемешиванием материала. Суммарная мощность ИК-потока и конвективно нагретого теплоносителя не превышала предельно допустимой температуры семян. Расчёт длительности комбинированной сушки проводили по аналогии с конвективной сушкой, а влияние ИК-излучения оценивали эквивалентной температурой агента сушки. Проведены серии опытов с воздействием ИК-потока на увлажнённые семена рапса при продувке наружным и подогретым воздухом с образованием псевдооживленного слоя. Толщину слоя рапса меняли от 0,05 м до 0,1 м, скорость агента сушки составляла 0,65 м/с. Мощность ИК-лампы изменяли от 400 Вт/м<sup>2</sup> до 900 Вт/м<sup>2</sup>. Всхожесть семян определяли до и после опытов. Рассчитана длительность комбинированной ИК-сушки семян рапса в псевдооживленном слое. Использовали известные расчетные выражения для конвективной сушки, которые включали коэффициент теплоотдачи, влажесъем, удельную теплоту испарения влаги, разность температур агента сушки и средней материала, а так же долю теплоты, пошедшей на испарение влаги, но при эквивалентной температуре агента сушки. Длительность ИК-сушки рассчитывали так же, как и конвективной с учётом эквивалентной мощности ИК-потока 0,65 кВт/м<sup>2</sup>, с переменной 5 - минутной продувкой слоя рапса высотой 0,1 м подогретым на 25 °С и наружным воздухом с температурой 15...20 °С.

### Введение

Рапс – одна из важнейших масличных культур в общемировом производстве масла. В настоящее время наблюдается усиление спроса на семена рапса, рапсовый жмых и шрот на фоне роста животноводческой отрасли при устойчивом увеличении производства мяса в России.

Обычно семена рапса сушат преимущественно конвективным методом на шахтных, колонковых, бункерных, а также рециркуляционных сушилках, предназначенных для сушки

зерна. Как правило, такие сушилки малоэффективны для этой культуры вследствие значительного снижения производительности и роста удельных затрат теплоты на сушку.

Современные исследования направлены на совершенствование методов ИК-сушки, обеспечивающих сохранение качественных показателей готового продукта [1- 4]. В математических моделях, применяемых при исследованиях кинетики и расчете длительности сушки, как правило, используют принцип независимо-

сти конвективного и лучистого потоков друг от друга при условии, что один из них значительно меньше другого [5, 6]. При учете теплоотдачи излучением к коэффициенту теплоотдачи конвекцией рекомендуется прибавлять коэффициент теплоотдачи излучением или использовать эквивалентную температуру агента сушки, учитывая лучистую составляющую [7 - 9].

Быстрое повышение температуры и длительное воздействие высокой температуры снижают качественные показатели материала, для семян рапса - это, в первую очередь, всхожесть. В ряде работ предложен способ, заключающийся в прерываемом облучении семян ИК-лучами с охлаждением его воздухом [3, 5, 10]. При облучении происходит нагрев зерновки с последующим испарением влаги, а в период обдува зерно охлаждается в результате испарения влаги аккумулятивной теплотой с более существенным влагоусъемом.

Однако прерывистое ИК-облучение семян рапса в аппарате непрерывного действия, например, в псевдооживленном слое экономически не целесообразно, так как теряется значительная доля теплоты с уходящим агентом сушки. Более эффективны комбинированные методы ИК-сушки, в частности, использование псевдооживленного слоя при малой интенсивности ИК-потока, когда облучение зерна сочетают с его продувкой подогретым воздухом, в том числе с осцилляцией, чередуя подачу нагретого и наружного воздуха при непрерывном ИК-облучении [11,12].

#### Материалы и методы исследований

Физические основы расчета длительности ИК-сушки: применяется псевдооживленный слой с равномерным и интенсивным перемешиванием материала, суммарная мощность ИК-потока и конвективно нагретого воздуха не превышает допустимого теплосодержания семян, теплота наружного воздуха не учитывается, поглощением ИК-энергии воздухом и отражателем ИК-лампы пренебрегаем.

Тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>, при ИК-сушке

$$Q_{л} = \varepsilon_{пр} \sigma \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_k}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент черноты;  $\sigma$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) ( $\sigma = 5,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>));  $T$ ,  $\theta_k$  – температура излучающей поверхности и конечная температура семян соответственно, К.

Поток теплоты, Вт/м<sup>2</sup>, подводимый к элементарному слою семян

$$Q_i = \frac{G \Delta U r}{F \tau \eta}, \quad (2)$$

где  $G$  – масса материала, кг;  $\Delta U$  – влагоусъем, кг влаги/(кг сухого материала);  $r$  – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;  $F$  – поверхность частиц материала, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – длительность сушки, ч;  $\eta$  – доля теплоты, расходуемой на испарение влаги.

Поток теплоты, Вт/м<sup>2</sup>, для рабочего слоя высушиваемых семян

$$Q_2 = \frac{\Delta U r H}{f \tau \eta h_i}, \quad (3)$$

где  $f$  – удельная теплообменная поверхность материала (семян), м<sup>2</sup>/кг;  $H$ ,  $h_i$  – соответственно высота слоя высушиваемого материала и элементарного слоя (глубина проникновения ИК-лучей), м.

Приравняв  $Q_{л}$  из (1),  $Q_2$  из (3), получим длительность комбинированной ИК-сушки в псевдооживленном слое, ч, при его продувке наружным воздухом:

$$\tau = \frac{\Delta U r H}{Q_{л} \eta h_i f}, \quad (4)$$

Далее рассчитаем длительность ИК-сушки с подогретым агентом сушки.

Для расчета длительности конвективной сушки, ч, используют выражение:

$$\tau = \frac{\Delta U r H}{\alpha f (t - \theta_k) h_s \eta}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t$ ,  $\theta_{cp}$  – температура агента сушки и конечная температура семян соответственно, °C.

Для учета ИК-потока величину  $t$ , входящую в скобки в (5), заменим на эквивалентную температуру агента сушки  $t_3$ , для чего составим тепловой баланс комбинированной ИК-сушки:

$$Q_{л} + Q_2 = Q_3,$$

где  $Q_{л}$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – соответственно составляющие потоки теплоты ИК, конвективной и комбинированной сушки, Вт, причем:

$$Q_{л} = \varepsilon_{пр} \sigma \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_k}{100} \right)^4 \right] F_0; \quad (6)$$

$$Q_2 = \alpha (t - \theta_k) F;$$

$$Q_3 = \alpha_1 (t_3 - \theta_k) F;$$

где  $T$ ,  $\theta_k$  – температура поверхности нагрева и конечная семян, К,  $F_0$  – поверхность из-

лучения,  $m^2$ ;  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно при конвективной и комбинированной сушке,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , ( $\alpha \approx \alpha_1$ ).

После раскрытия скобок для  $Q_2$  и  $Q_3$  получим:

$$t_3 = \frac{\alpha(t - \theta_k)F + Q_{пл}F_0 + \theta_k F}{\alpha F} \quad (7)$$

Непосредственному воздействию ИК-лучей подвергается поверхность свободного слоя, тогда  $F \approx F_0$  и для псевдооживленного слоя с интенсивным перемешиванием можно выражение (7) записать в виде:

$$t_3 = \frac{\alpha(t - \theta_k) + Q_{пл} + \theta_k \alpha}{\alpha} \quad (8)$$

При осциллирующем режиме слой семян продувают периодически нагретым и наружным воздухом (при постоянном ИК-облучении) таким образом, чтобы средняя температура воздуха  $t_{cp}$  была близка к нормативной, но при этом температура подогретого воздуха на  $10...15^\circ C$  превышала нормативную [13]. Такой режим позволяет осуществить безопасную сушку и существенно снизить затраты теплоты. Подвод ИК-энергии в слой семян при осциллирующем режиме позволяет снизить тепловые затраты на сушку, в частности, вследствие сокращения периода нагрева семян.

Для расчета длительности сушки при этом режиме целесообразно использовать выражения (5) и (8). Действительно, если в выражении (5) заменить величину  $t$ , входящую в скобки, на  $t_{cp}$ , которая вычисляется как средняя из температур нагретого  $t_b$  и наружного воздуха, то можно рассчитать длительность осциллирующей сушки, а затем рассчитать вклад в теплообмен ИК-потока путем определения  $t_3$  по формуле (8).

Величину  $t_b$ ,  $^\circ C$  можно записать в виде [14]:

$$t_b = \frac{\theta_{нд} \frac{T_H/A}{e} - \theta_{ок}}{T_H/A - 1} \quad (9)$$

где  $\theta_{нд}$ ,  $\theta_{ок}$  – температура нагретого и охлажденного рапса соответственно,  $^\circ C$ ;  $T_H$  – длительность воздействия подогретого агента сушки на семена, ч;

$$A = \frac{CH}{\alpha \eta f h_i}$$

где  $C$  – коэффициент теплоемкости,  $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$ .

Рассмотрим случай симметричного ос-

циллированной, когда длительности нагрева и охлаждения семян равны, наружный воздух имеет с температурой  $t_o$ , тогда  $t_{cp} = (t_b + t_o)/2$  и

$$t_{3.ос} = \frac{\alpha(t_{cp} + \theta_k) + Q_{пл} + \theta_k \alpha}{\alpha} \quad (10)$$

Для расчета длительности ИК-сушки с осциллированием  $t_{3.ос}$  подставим в выражение (5).

Программа методики экспериментальных исследований предусматривала сушку увлажненных семян рапса в лабораторной установке, оснащенной ИК-лампой, цилиндрической касетой с решетчатым днищем, вентилятором и калорифером. Расход и температуру агента сушки регулировали. Толщину слоя рапса изменяли от  $0,05$  м до  $0,1$  м. Скорость агента сушки составляла  $0,65$  м/с.

Провели три серии опытов с воздействия ИК-потока на семена рапса: при продувке наружным воздухом, при продувке подогретым воздухом и при попеременном воздействии на слой семян наружного и подогретого воздуха. Удельную мощность ИК-лампы изменяли от  $400$   $Вт/м^2$  до  $900$   $Вт/м^2$ , в конце опыта отбирали навески семян для определения их всхожести.

#### Результаты исследований

Установлено, что при комбинированной ИК-сушке с продувкой слоя семян наружным воздухом, подогретым воздухом и при осциллированном режиме:

- кривые сушки практически не отличаются от классических, характеризуются как первым, так и вторым периодами;
- происходит быстрый прогрев семян и их температура с небольшим колебанием постоянно до конца сушки (рис. 1).

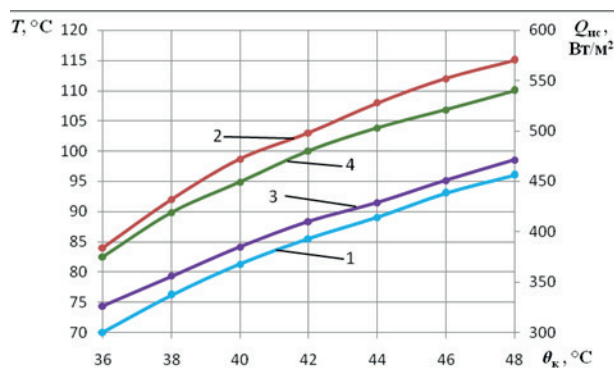
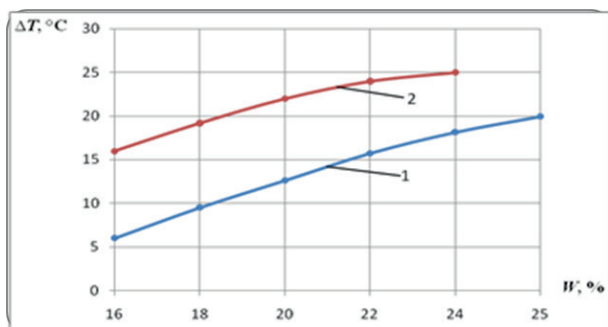


Рис. 1 – Зависимость температуры  $T$  (1, 2) и мощности ИК-излучателя  $Q$  (3, 4) от конечной температуры семян  $\theta_k$

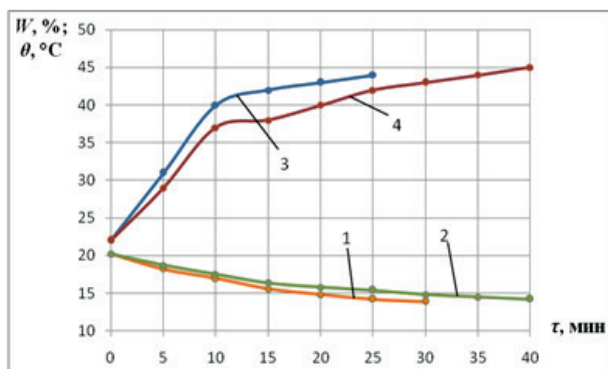
В отличие от конвективной сушки установлено, что:

- происходит быстрое снижение относительной влажности отходящего агента сушки и его низкая влажность сохраняется на протяжении всего процесса;

- температура отходящего агента сушки резко повышается и не изменяется до конца процесса (рис. 2 и 3).



**Рис. 2 - Зависимость степени подогрева воздуха  $\Delta T$  от влажности  $W$  семян: 1 –  $H = 0,1$  м; 2 –  $H = 0,18$  м**

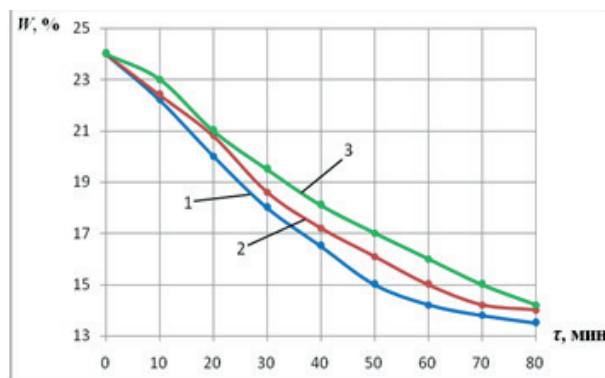


**Рис. 3 - Зависимость влажности  $W$  (1, 2) и температуры семян  $\theta_k$  (3, 4) от времени  $\tau$  при комбинированной сушке: 1, 3 –  $H = 0,1$  м; 2, 4 –  $H = 1,8$  м**

При осциллирующей ИК-сушке установлено, что:

- незначительные колебания влажности семян по периодам нагрева и охлаждения обусловлены влиянием ИК-лучей;

- наблюдаются большие колебания температуры семян, относительной влажности и температуры отходящего агента сушки по периодам нагрева и охлаждения (рис. 4).



**Рис. 4 - Зависимость влажности семян  $W$  от времени  $\tau$  для различных режимов сушки:**

1 – комбинированная (ИК-подогрев); 2 – конвективная,  $t = 60^\circ\text{C}$ ; 3 – ИК-сушка; (наружный воздух)  $h = 0,18$  м

ИК-сушка семян в псевдооживленном слое позволяет высушить семена до кондиционной влажности без потери всхожести, однако при низкой температуре семян ( $\theta \leq 35^\circ\text{C}$ ) процесс затягивается. Увеличение температуры агента сушки на  $20 \dots 25^\circ\text{C}$  по сравнению с температурой наружного воздуха ( $15 \dots 20^\circ\text{C}$ ) ускоряет процесс, но при этом температура семян может достигать  $46^\circ\text{C}$ , что снижает их посевные качества. Осциллирующий режим сушки характеризуется пониженной интенсивностью, но позволяет сохранить всхожесть семян при снижении затрат теплоты на сушку на  $15 \dots 20\%$ .

#### Обсуждение

На основании проведенных исследований было установлено, что при осциллирующей ИК-сушке семян в зависимости от влажности и времени воздействия для различных режимов сушки также наблюдались значительные колебания температуры семян.

В сравнении с конвективной сушкой было отмечено быстрое снижение влажности сушки и, как следствие, - низкая влажность на протяжении всего процесса. Соответственно температура сушки резко повышалась и не изменялась до конца процесса.

#### Заключение

Длительность ИК-сушки можно рассчитать по аналогии с расчетом, применяемым для конвективной сушки, но при использовании эквивалентной температуры агента сушки. Рациональным является режим ИК-сушки семян в псевдооживленном слое при следующих параметрах и режимах: попеременная продувка слоя семян подогретым и наружным воздухом длительностью по 5 минут, подогрев наружного воздуха до  $50^\circ\text{C}$ , толщина слоя семян рапса -  $0,1$  м, требуемая мощность источника ИК-излучения -  $0,65$  кВт/м<sup>2</sup>.

### Библиографический список

1. Алтухов, И. В. Определение скорости нагрева топинамбура при сушке инфракрасным излучением / И. В. Алтухов, В. Д. Огиров, В. А. Федотов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2013. - № 1. - С. 14-15.
2. Голубкович, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования инфракрасной сушки термолабильных материалов / А. В. Голубкович, С. А. Павлов, Н. С. Левина // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 8. - С. 35-37.
3. Алтухов, И. В. Импульсные инфракрасные излучатели для сушки растительного сырья / И. В. Алтухов, Н. В. Цугленок // Актуальные вопросы аграрной науки. - 2018. - № 27. - С. 5-12.
4. Загоруйко, М. Г. Исследование кинетики досушки зерна на складе / М. Г. Загоруйко, С. А. Павлов // Аграрный научный журнал. - 2020. - № 12. - С. 87-89. - DOI: 10.28983/asj.y2020i12pp87-89.
5. Дорохов, А. С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей / А. С. Дорохов // Вестник ФГБОУ ВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2015. - № 1(65). - С. 31-35.
6. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation [Pospeševanje sušenja majhnih semen oljnih poljščin z mikrovalovnim elektromagnetnim sevanjem] / I. Ganeev, K. Karimov, S. Fayzrakhmanov, I. Masalimov, V. Permyakov // Acta Agriculturae Slovenica. - 2020. - 115(2). - P. 261-271.
7. Голубкович, А. В. Новые технологии и установка для инфракрасной сушки семян и зерна / А. В. Голубкович, С. А. Павлов // Сборник научных докладов ГНУ ВИМ. - 2011. - Т. 1. - С. 385-392.
8. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer / S. Charmingkolpradit, T. Somboon, R. Phatchana, W. Sang-Aroon, B. Tanwanichkul // Case Studies in Thermal Engineering. - 2021. - 25. - P.100886.
9. Factors determining the surface oil concentration of encapsulated lipid particles - impact of the spray drying conditions / A. Linke, T. Linke, J. Hinrichs, R. Kohlus // Drying Technology. - 2021. - 39(2). - P. 173-186.
10. Mangeh, F. C. Influence of drying parameters on drying efficiency of a rapeseed hot air cyclone dryer / F. C. Mangeh, M. L. Wu, G. A. Looch // Applied Engineering in Agriculture. - 2020. - 36(3). - P. 411-421.
11. Ivanov, A. Parameters of the heat-generating installation on biofuel for grain drying / A. Ivanov, N. Ustinov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - 403(1). - P. 012179.
12. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger / B. Li, Z. Zeng, X. Zhang, Y. Zhang // Applied Sciences (Switzerland). - 2021. - 11(6). - P. 2772.
13. Сушка семян рапса в карусельной сушилке при осциллирующем режиме / А. В. Голубкович, С. А. Павлов, А. П. Орехов, В. И. Козлов // Техника в сельском хозяйстве. - 2011. - № 4. - С. 25-28.
14. Сушка зерна с переменным теплопроводом в колонковой зерносушилке / В. П. Елизаров, С. А. Павлов, Р. А. Марин, А. Н. Дадыко // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. - № 2. - С. 24-25.

## RESEARCH ON KINETICS OF IR-DRYING OF RAPE SEEDS

Zagoruyko M.G., Pavlov S.A.

FSBSI Federal Scientific Agroengineering Center VIM

109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy dr., 5; e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru

**Key words:** IR-drying, duration, flow density, temperature, constant and variable heat supply.

The article considers the results of rapeseed drying, which was carried out by convective method on mine, mounted, bunker, as well as recirculation dryers designed for grain drying. Impulse IR drying allowed to intensify the process while preserving the seed quality. Combined method of IR-drying is more effective, in particular, in a fluidized layer at low intensity of the IR-flow, when irradiation is combined with air heating, including oscillation, alternating the supply of heated and outside air in case of continuous IR-irradiation. The duration of IR-drying is calculated for both constant and oscillating heat supplies. The modes of combined IR-drying are experimentally defined. The object of the study was the technological process of drying of rape seeds in a fluidized layer with intensive mixing of the material. The total power of the IR flow and convectively heated heat-transfer agent did not exceed the limiting seed temperature. The calculation of the combined drying duration was carried out similarly to convective drying, and the effect of IR radiation was estimated by the equivalent temperature of the drying agent. A range of experiments was carried out with the IR flow impact on damped rapeseeds when blowing with external and heated air with formation of a fluidized layer. The thickness of the rapeseed layer was changed from 0.05 m to 0.1 m, the speed of the drying agent was 0.65 m/s. The power of the IR lamp varied from 400 W/m<sup>2</sup> to 900 W/m<sup>2</sup>. Seed germination was determined before and after the experiments. The combined IR-drying duration of rape seeds in a fluidized layer was calculated. Well-known calculation expressions for convective drying were used, which included the heat transfer coefficient, moisture removal, specific heat of moisture evaporation, the temperature difference between the drying agent and the mean of the material, as well as the proportion of heat that was used for moisture evaporation, but with an equivalent temperature of the drying agent. The duration of IR drying was calculated in the same way as for convective drying, taking into account the equivalent temperature of the drying agent. It was established that a rational mode of rapeseed IR-drying requires the power of the IR-flow of 0.65 kW/m<sup>2</sup>, with a variable 5-minute blowing of a rapeseed layer with a height of 0.1 m heated by 25 °C and outside air with a temperature of 15... 20 °C.

### Bibliography:

1. Altukhov, I.V. Specification of girasole topinambur heating rate when drying with infrared radiation / I.V. Altukhov, V.D. Ogirov, V.A. Fedotov // *Mechanization and electrification of agriculture*. - 2013. - № 1. - P. 14-15.
2. Golubkovich, A. V. Theoretical and experimental studies of infrared drying of thermolabile materials / A. V. Golubkovich, S. A. Pavlov, N. S. Levina // *Tractors and agricultural machines*. - 2015. - № 8. - P. 35-37.
3. Altukhov, I.V. Pulse infrared sources for drying vegetable raw materials / I.V. Altukhov, N.V. Tsuglenok // *Current problems of agricultural science*. - 2018. - № 27. - P. 5-12.
4. Zagoruiko, M.G. Study of the kinetics of grain drying in a warehouse / M.G. Zagoruiko, S.A. Pavlov // *Agrarian scientific journal*. - 2020. - № 12. - P. 87-89. - DOI: 10.28983/asj.y2020i12pp87-89.
5. Dorokhov, A.S. Efficiency of assessing the quality of agricultural machinery and spare parts / A.S. Dorokhov // *Vestnik of FSBEI HPE Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin*. - 2015. - № 1 (65). - P. 31-35.
6. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation [Pospeševanje sušenja majhnih semen oljnih poljščin z mikrovvalovnim elektromagn etnim sevanjem] / I. Ganeev, K. Karimov, S. Fayzakhmanov, I. Masalimov, V. Permyakov // *Acta Agriculturae Slovenica*. - 2020. - 115 (2). - P. 261-271.
7. Golubkovich, A. V. New technologies and device for infrared drying of seeds and grain / A. V. Golubkovich, S. A. Pavlov // *Collection of scientific reports of SSI VIM*. - 2011. - V. 1. - P. 385-392.
8. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer / S. Charmingkolpradit, T. Somboon, R. Phatchana, W. Sang-Aroon, B. Tanwanichkul // *Case Studies in Thermal Engineering*. - 2021. - 25. - P.100886.
9. Factors determining the surface oil concentration of encapsulated lipid particles -impact of the spray drying conditions / A. Linke, T. Linke, J. Hinrichs, R. Kohlus // *Drying Technology*. - 2021. - 39 (2). - P. 173-186.
10. Mangeh, F. C. Influence of drying parameters on drying efficiency of a rapeseed hot air cyclone dryer / F. C. Mangeh, M. L. Wu, G. A. Looh // *Applied Engineering in Agriculture*. - 2020. - 36 (3). - P. 411-421.
11. Ivanov, A. Parameters of the heat-generating installation on biofuel for grain drying / A. Ivanov, N. Ustinov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. - 2019. - 403 (1). - P. 012179.
12. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger / B. Li, Z. Zeng, X. Zhang, Y. Zhang // *Applied Sciences (Switzerland)*. - 2021. - 11 (6). - P. 2772.
13. Drying of rape seeds in a rotary dryer at an oscillating mode / A. V. Golubkovich, S. A. Pavlov, A. P. Orekhov, V. I. Kozlov // *Machinery in agriculture*. - 2011. - № 4. - P. 25-28.
14. Grain drying with a variable heat conductor in a column dryer / V. P. Elizarov, S. A. Pavlov, R. A. Marin, A. N. Dadyko // *Tractors and agricultural machines*. - 2014. - № 2. - P. 24-25.