



Научная статья  
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)  
УДК664.723

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.017



## МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ ПО СУШКЕ СЕМЯН РАПСА

Михаил Павлович Щетинин <sup>1</sup>, Артур Ильдарович Урманов <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Международная промышленная Академия, Москва, Россия

<sup>1</sup> m\_p\_sh1953@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9229-9251>

<sup>2</sup> artur.urmanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3242-4588>

**Аннотация.** Статья описывает проведенные исследования по определению оптимальных режимов сушки семян рапса. В рамках данных исследований был проведен анализ современного состояния и проблем, связанных с уборкой и последующим размещением на хранение семян рапса. Изучено современное состояние зерносушильной техники, применяемой для сушки семян рапса, а также перспективные технологии сушки семян рапса и других масличных культур. В статье представлены результаты лабораторных исследований и производственных испытаний по моделированию процесса сушки семян рапса при квазиизотермических режимах. Изучено влияние данных режимов на качественные показатели высушиваемых семян. Результаты исследования показали, что температура сушки семян рапса не должна превышать 60 °С, при этом скорость потока воздуха оказывает меньшее влияние на процесс сушки. По результатам математической обработки данных, полученных в ходе экспериментов, сформирована модель, применение которой позволит спрогнозировать протекающие процессы сушки семян рапса при заданных параметрах, а также подобрать оптимальные параметры процесса сушки для получения ожидаемого результата. Статья может быть полезна специалистам в области сельского хозяйства и пищевой промышленности, а также научно-исследовательским институтам, занимающимся исследованием процессов сушки растительного сырья.

**Ключевые слова:** сушка зерна; зерносушилка; рапс; семена; квазиизотермический; режим сушки; рециркуляция; математическая модель.

**Для цитирования:** Щетинин М. П., Урманов А. И. Моделирование и математическая обработка результатов опытов по сушке семян рапса // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 131–135. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.017. EDN: <https://elibrary.ru/JCZLSZ>.

Original article

## MODELING AND MATHEMATICAL PROCESSING OF THE RESULTS OF EXPERIMENTS ON DRYING RAPESEED

Mikhail P. Shchetinin <sup>1</sup>, Artur I. Urmanov <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> International Industrial Academy, Moscow, Russia

<sup>1</sup> m\_p\_sh1953@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9229-9251>

<sup>2</sup> artur.urmanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3242-4588>

**Abstract.** The article describes the studies carried out to determine the optimal drying modes of rapeseed seeds. Within the framework of these studies, an analysis of the current state and problems associated with harvesting and subsequent storage of rapeseed seeds was carried out. The current state of grain drying equipment used for drying rapeseed seeds, as well as promising technologies for drying rapeseed seeds and other oilseeds, has been studied. The article presents the results of laboratory studies and production tests on modeling the drying process of rapeseed seeds under quasi-

*isothermal conditions. The influence of these modes on the quality indicators of dried seeds has been studied. The results of the study showed that the drying temperature of rapeseed seeds should not exceed 60 °C, while the air flow rate has less influence on the drying process. Based on the results of mathematical processing of the data obtained during the experiments, a model has been formed, the use of which will allow to predict the course of the drying processes of rapeseed seeds at the specified parameters, as well as to select the optimal parameters of the drying process to obtain the expected result. The article may be useful to specialists in the field of agriculture and the food industry, as well as to research institutes engaged in the study of the processes of drying plant raw materials.*

**Keywords:** *drying; graindryer; rapeseed; seeds; quasi-isothermal; drying mode; recycling; mathematical model.*

---

**For citation:** Shchetinin, M.P. & Urmanov, A.I. (2023). Modeling and mathematical processing of the results of experiments on drying rapeseed. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 131-135. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.017. EDN: <https://elibrary.ru/JCZLSZ>.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Семена рапса являются одним из основных источников масла, используемого в пищевой и нефтеперерабатывающей промышленности. При этом хранение и сушка семян рапса имеют большое значение для сохранения их качества и продуктивности.

В 2022 г. в России был собран рекордный урожай рапса валовым объёмом 4,5 млн тонн [1]. В России в сушке нуждается около 80 % от валового сбора зерновых и масличных культур [2]. Своевременно и правильно организованная сушка способна существенно увеличить срок хранения семян рапса, предотвратить развитие вредителей семенной массы, а также сохранить товарные и семенные достоинства высушиваемых семян рапса [3–5].

Уборка рапса, как правило, производится методом прямого комбайнирования, вследствие чего на хлебоприёмные предприятия семена рапса часто поступают с неравномерной и высокой начальной влажностью, в отдельных случаях превышающей 30 % [6, 7]. Сушка семян рапса усложняется тем, что ввиду высокого содержания гидрофобных липидов (около 42 %), критическая влажность для семян рапса составляет не более 7 % [8].

Используемые на большинстве элеваторов и хлебоприёмных предприятий России шахтные прямоточные сушилки не позволяют снизить влажность семян рапса за один пропуск через сушилку более чем на 5–7 %. Данное обстоятельство вынуждает формировать партии зерна по влажности и осуществлять сушку зерна на несколько этапов.

Ситуация усугубляется тем, что на текущий момент 60 % зерносушильного парка страны морально и физически устарело, а 20 % требует замены [9].

В условиях ежегодного увеличения объёмов выращиваемого рапса, нехватки зерносушильных мощностей и сокращения уборочного

периода вопрос сушки высоковлажных семян рапса становится всё более актуальным.

В последнее время было опубликовано значительное количество работ, нацеленных на повышение эффективности сушки семян рапса и других масличных культур [10–12]. Предложенные способы совершенствования сушки имеют существенный научно-практический потенциал, однако маловероятно, что в ближайшее время они получат широкое промышленное применение.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были выбраны семена ярового рапса сорта «Ратник». Экспериментальные исследования были выполнены в лаборатории Российского биотехнологического университета на экспериментальной установке, предназначенной для моделирования отдельных этапов сушки и охлаждения семян, протекающих в промышленных зерносушильных установках.

В последующем была выполнена производственная апробация на модернизированной шахтной рециркуляционной зерносушильной установке Набережночелнинского элеватора.

Увлажнение семян (ГОСТ Р 8.581-2001), последующее измерение их влажности (ГОСТ 13586.5-93), всхожести и энергии прорастания (ГОСТ 12038-84), кислотного (ГОСТ 10858-77) и перекисного (ГОСТ Р 51487-99) чисел масла, полученного путём отжима из просушенных семян, осуществляли в соответствии с методическими рекомендациями, описанными в действующих стандартах.

Параметры процесса, такие как скорость воздуха, толщина зернового слоя, температура агента сушки, продолжительность контактного теплообмена соответствовали параметрам действующих шахтных рециркуляционных зерносушилок типа ДСП.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов была выполнена оценка влияния следующих параметров на кинетику сушки и охлаждения предварительно нагретых се-

мян рапса: температуры и скорости сушильного агента и охлаждающего воздуха, начальной влажности семян рапса и продолжительности контактного теплообмена.

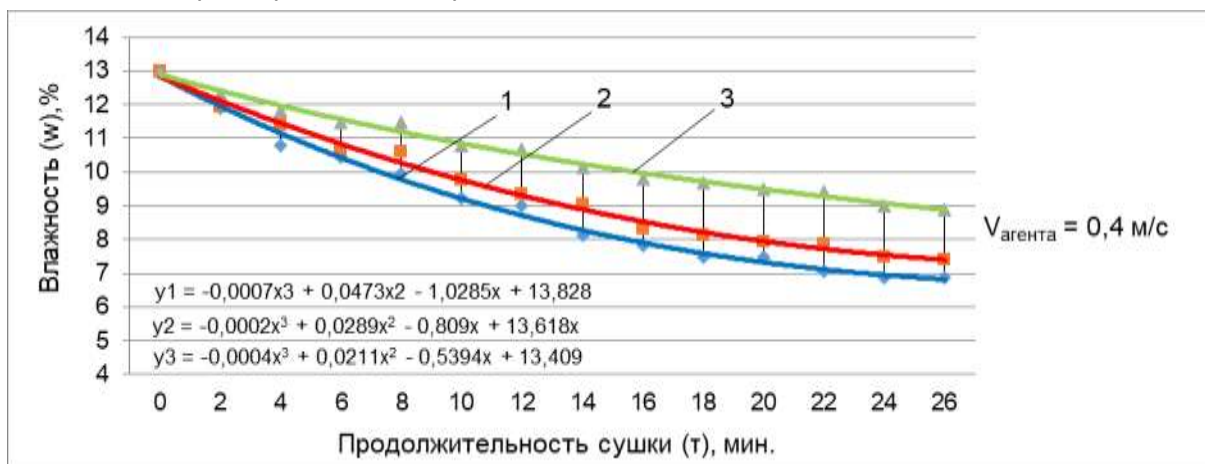


Рисунок 1 – Кривые сушки семян рапса: 1 – при сушке агентом температурой 120 °С; 2 – при сушке агентом температурой 100 °С; 3 – при сушке агентом температурой 80 °С

Figure 1 – Rapeseed drying curves: 1 - when dried by an agent with a temperature of 120°C, 2 - when dried by an agent with a temperature of 100°C, 3 - when dried by an agent with a temperature of 80°C

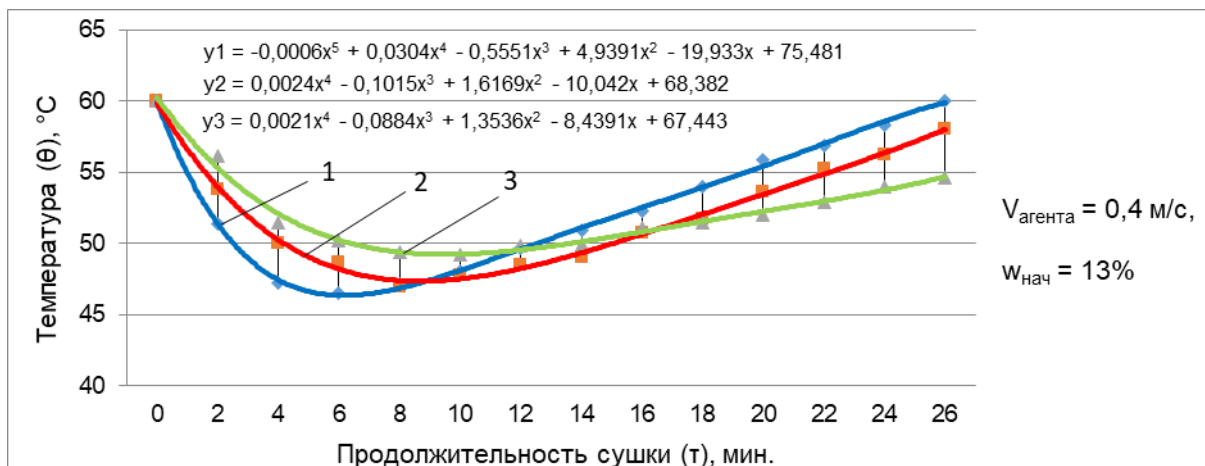


Рисунок 2 – Кривые температуры семян рапса: 1 – при сушке агентом температурой 120 °С; 2 – при сушке агентом температурой 100 °С; 3 – при сушке агентом температурой 80 °С

Figure 2 – Rapeseed temperature curves: 1 - when dried by an agent with a temperature of 120°C, 2 - when dried by an agent with a temperature of 100°C, 3 - when dried by an agent with a temperature of 80°C

На графиках, представленных на рисунках 1 и 2, отражены результаты влияния температуры сушильного агента на влажность и температуру высушиваемых семян.

Как следует из данных, представленных на рисунке 1, в начальный период скорость сушки максимальна. За первые 10 минут сушки снижение влажности составило от 2,2 до 3,8 %, в то время как за последующие 10 минут она снизилась лишь на 1,3–1,8 %.

Непрекращающееся интенсивное испарение влаги в процессе сушки ведёт к тому, что на начальных этапах сушки семян их температура снижается на 11–13,5 °С, достигая первоначальных значений только в опыте по сушке семян агентом температурой 120 °С. Этот эффект условно назван квазиизотермическим и обусловлен непропорциональным расходом энергии семян на испарение влаги, полученными семенами в ходе пред-

варительного нагрева и входе их сушки сушильным агентом.

Сушка семян при данных режимах характеризуется повышенной эффективностью в сравнении с сушкой семян, не подвергшихся предварительному нагреву. Данный эф-

фект объясняется совпадением направлений влагонепроводности и термовлагонепроводности.

Данные по режимам сушки семян с увязкой оценки их влияния на качественные характеристики, полученные в ходе производственных испытаний, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние режимов сушки на основные показатели качества семян рапса и извлекаемого из него масла

Table 1 – The influence of drying modes on the main indicators of the quality of rapeseed seeds and the oil extracted from it

Показатель	Сушка с частичной рециркуляцией просушенных семян	Сушка при квазиизотермических режимах
Максимальная температура нагрева семян, °С	60	60
Кратность смешивания сырых и рециркулирующих семян	6,1	1,8
Температура сушильного агента, °С: на входе в камеру нагрева на входе в верхнюю зону сушки	300 –	260 80
Кислотное число, мг КОН/г на АСВ до сушки после сушки	3,51 2,94	3,54 2,87
Перекисное число масла, ммоль/кг <sup>1/2</sup> O <sub>2</sub> : до сушки после сушки после сушки	6,6 7,93	6,86 7,85
Всхожесть, % до сушки после сушки	56 39	54 44
Энергия прорастания, % до сушки после сушки	49 34	46 37

По полученным данным, дополнительный подвод тепла в верхнюю зону сушки обеспечил протекание сушки семян рапса при квазиизотермических режимах. Это, в свою очередь, способствовало повышенной сохранности качественных показателей высушиваемых семян: всхожести – на 7 %, энергии прорастания – на 6 %, кислотного числа

масла – на 0,1 мг КОН/г на АСВ и перекисного числа масла – на 0,34 ммоль/кг <sup>1/2</sup> O<sub>2</sub>.

Также по результатам математической обработки данных, полученных в ходе лабораторных исследований и производственных испытаний сушки высоковлажных семян рапса, была разработана математическая модель, представленная в виде многочлена:

$$y = a_5(\theta, w, V, T)x^5 + a_4(\theta, w, V, T)x^4 + \dots + a_0(\theta, w, V, T),$$

где:  $y$  – искомое значение по оси ординат, которое в зависимости от исследуемых параметров отражают либо температуру высушиваемых семян (°С), либо их влажность (%);

$x$  – продолжительность сушки / охлаждения, мин.;

$\theta$  – температура сушильного агента / охлаждающего воздуха, °С;

$w$  – начальная влажность высушиваемых семян, %;

$V$  – скорость сушильного агента / охлаждающего воздуха, м/с;

$T$  – продолжительность теплообмена, мин.;

$a$  – коэффициент, определяемый в виде полинома второй степени.

При заданных параметрах сушки и охлаждения семян данная математическая модель позволяет спрогнозировать протекание процессов. Тем самым, используя данную методику расчёта, можно подобрать оптимальные режимы сушки и охлаждения семян для шахтных зерносушилок.

## ВЫВОДЫ

В статье кратко изложены результаты лабораторных исследований и производственных испытаний сушки семян рапса, в том числе при квазиизотермических режимах.

Доказано, что сушка семян рапса при рассматриваемых режимах обеспечивает ин-

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ ПО СУШКЕ СЕМЯН РАПСА

тенсификацию процесса и способствует повышенной сохранности основных технологических и семенных качественных показателей высушиваемых семян.

Разработана математическая модель, применение которой позволит обеспечить выбор оптимальных режимов сушки и охлаждения семян рапса, а также повысить прогнозируемость качественных и технологических показателей семян после сушки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулистикова Т. Росстат уточнил данные по урожаю в 2022 году // Агроинвестор: Интернет-портал. URL : <https://www.agroinvestor.ru/analytics/news/39916-rosstat-utochnil-dannye-po-urozhayu-v-2022-godu>. (дата обращения: 31.05.2023).
2. Кулагин Я.В. Возможность применения микрогазотурбинных установок для мобильных зерносушилок // Инновации в сельском хозяйстве. 2013. № 2(4). С. 4–8.
3. Рекомендации по возделыванию ярового рапса в Западно-Казахстанской области / Абуова А.Б. [и др.]. Уральск: Западно-казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, 2014. 43 с.
4. Обзор существующих методов сбора урожая, сушки и хранения масличного рапса / Армитедж Д.М. [и др.]. Йорк : Центральная научная лаборатория Сэнд Хаттон, 2005. 49 с.
5. Качель-Якубовска М., Шпрингель М. Влияние условий сушки на качественные свойства семян рапса // Агрофизика. 2008. № 22. С. 327–331.
6. Гольяпин В.Я. Современные технологии и комплекс машин для возделывания и уборки рапса: Научный аналитический обзор. Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 96 с.
7. Урманов А.И., Щетинин М.П. Перспективы выращивания и переработки семян рапса // Стратегия современного научно-технологического развития: проблемы и перспективы реализации : сборник статей всероссийской научно-практической конференции. Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2021. С. 44–50.
8. ГОСТ 10583-76 – Рапс для промышленной переработки. Технические условия. Москва, 1976, 9 с.
9. Сорочинский В.Ф. Проблемы хранения и сушки зерна на элеваторах / Инновационные процессы в пищевых технологиях : наука и практика : сборник статей международной научно-практической конференции. Москва : ВНИИЗ, 2019. С. 347–356.
10. Ганеев И.Р. Повышение эффективности сушки семян рапса с применением электромагнитного излучения : автореф. дисс. к-та техн. наук. Уфа, 2011. 19 с.
11. Ширяева Т.В., Андрианов Е.А. Совершенствование процесса сушки масличных семян / Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 71 научной студенческой конференции. Часть 2. Воронеж : Воронежский ГАУ, 2020. С. 239–243.
12. Моделирование диэлектрических свойств семян для улучшения математического моделирования сушки горячим воздухом с помощью микроволн / М. Хемис [и др.] // Журнал микроволновой энергии и электромагнитной энергии. 2021. № 2 (53). С. 94–114. doi 10.1080/08327823.2019.1607491.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 19.12.2022; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.*

*The article was received by the editorial board on 19 Dec 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.*

### Информация об авторах

*М. П. Щетинин – доктор технических наук, профессор, Вице-президент Международной промышленной Академии.*

*А. И. Урманов – аспирант.*

### REFERENCES

1. Kulistikova, T. (2023). *Rosstat clarified the data on the harvest in 2022*. Retrieved from <https://www.agroinvestor.ru/analytics/news/39916-rosstat-utochnil-dannye-po-urozhayu-v-2022-godu> (In Russ.).
2. Kulagin, Ya.V. (2013). The possibility of using micro-gas turbine installations for mobile grain dryers. *Innovations in agriculture*, (2), 4-8. (In Russ.).
3. Abuova, A.B., Vyurkov, V.V., Baibaturov, T.A., Tulkubaeva, S.A., Isimov, A.M. & Satkalieva, A.A. (2014). Recommendations for the cultivation of spring rape in the West Kazakhstan region: Scientific publication. Uralsk : West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan.
4. Armitage, D.M., Prickett, A.J., Norman, K. & Wildey, K.B. (2005). Survey of current harvesting, drying and storage practices with oilseed rape. York.
5. Kachel-Jakubowska, M. & Szpryngiel, M. (2008). Influence on drying condition on quality properties of rapeseed. *Agrophysics*, (22), 327-331.
6. Golyapin, V.Ya. (2008). Modern technologies and a complex of machines for the cultivation and harvesting of rapeseed: A scientific analytical review. Moscow: FGNU "Rosinformagrotech". (In Russ.).
7. Urmanov, A.I. & Shchetinin, M.P. Prospects for the cultivation and processing of rapeseed. *Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference «Strategy of modern scientific and technological development: problems and prospects of implementation»*. Petrozavodsk: ICNP "New Science." (In Russ.).
8. Rapeseed for industrial processing. Technical conditions. (1976). HOST 10583-76. Moscow. (In Russ.).
9. Sorochinsky, V.F. Problems of grain storage and drying in elevators. *Collection of articles of the international scientific and practical conference «Innovative processes in food technologies: science and practice»*. Moscow: VNIIZ. (In Russ.).
10. Ganeev, I.R. (2011). Improving the efficiency of drying rapeseeds using electromagnetic radiation. Extended abstract of candidate's thesis. Ufa. (In Russ.).
11. Shiryayeva, T.V. & Andrianov, E.A. Improving the drying process of oilseeds. *Materials of the 71 st scientific student conference «Youth vector of agricultural science development. Part 2»*. Voronezh : Voronezh State University.
12. Hemis, M., Watson, D., Gariépy, Y., Lyew, D. & Raghavan, V. (2021). Modelling study of dielectric properties of seed to improve mathematical modelling for microwave-assisted hot-air drying. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, (53), 94-114. doi 10.1080/08327823.2019.1607491.

### Information about the authors

*M.P. Shchetinin - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-President International Industrial Academy.*

*A.I. Urmanov - is a post-graduate student.*