

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕМЯН СОИ КАК ОБЪЕКТА ПРОИЗВОДСТВА БЕЛОКСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ

В.В. Ткач¹, *tkachbalian@yandex.ru*
И.В. Кузнецова², *kuznetsovaiv@mail.ru*
А.А. Шевцов¹, *shevalol@rambler.ru*

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

Аннотация. На сегодняшний день на мировом рынке семена сои являются одной из преобладающих масличных культур. Как правило, семена сои составляют более половины рынка оборота всех масличных семян. Данное положение обусловлено целым рядом особенностей, таких как: благоприятные агрономические показатели; белковый шрот, который идет на корм, обладает высоким качеством; пищевые соевые жировые продукты также имеют отличное качество. Соевые белки имеют большое количество областей применения, потому что они характеризуются функциональными свойствами, необходимыми для комбинированных продуктов питания и меньшей стоимостью по сравнению с альтернативными добавками животного происхождения. Важное функциональное свойство белков – термопластичность, т. е. способность к повторному отверждению или плавлению в зависимости от температуры. Количество белкового шрота, которое можно получить на единицу возделываемой площади – 2 т/га, и данный показатель гораздо выше по сравнению с другими масличными культурами. Сушка, тепловая обработка семян сои делают актуальной задачу по исследованию ее свойств и дальнейшего использования полученных данных в проектировании сушильных установок, математического моделирования процессов сушки семян сои, разработке способов управления процесса. В рамках лабораторных исследований выполнен термогравиметрический анализ семян сои сорта «Аннушка», который позволил определить температурные зоны, соответствующие формам и энергии связи влаги с материалом. Методом нестационарного теплового режима определены теплофизические и электрофизические характеристики семян сои. Установлен характер зависимостей коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоёмкости от температуры и влажности. Получены уравнения, описывающие теплофизические и электрофизические характеристики семян при влажности в интервале 12–20 %, в диапазоне температур 20–100 °С.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ, семена сои, теплофизические свойства, коэффициент диэлектрических потерь, сушка

Для цитирования: Ткач В.В., Кузнецова И.В., Шевцов А.А. Комплексные исследования семян сои как объекта производства белоксодержащих продуктов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 4. С. 36–44. DOI: 10.14529/food220404

Original article
DOI: 10.14529/food220404

INTEGRATED STUDIES OF SOYBEAN SEEDS AS AN OBJECT OF PRODUCTION OF PROTEIN-CONTAINING PRODUCTS

V.V. Tkach¹, tkachbalian@yandex.ru
I.W. Kuznetcova², kuznetsovaiv@mail.ru
A.A. Shevtsov¹, shevalol@rambler.ru

¹ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y A. Gagarin
Air Force Academy, Voronezh, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Abstract. Today, soybean seeds are one of the leading oilseed crops in the global market. As a rule, soybean seeds account for more than a half of the market for the turnover of all oilseeds. This is due to a number of reasons such as: favourable agronomic performance, the protein meal intended for use as feeds being of high quality; soy fat foods being also of superior quality. Soy proteins have a large number of applications, because they are characterized by functional properties necessary for combined foods and lower cost compared to alternative additives of animal origin. An important functional property of proteins is thermoplasticity, i. e. the ability to re-solidify or melt depending on temperature. The amount of protein meal that can be obtained per unit of cultivated area is 2 t/ha which is much higher than that of other oilseed crops. Drying, heat treatment of soybean seeds make it urgent to study soybean properties and to make further use of the obtained data for developing drying units, mathematical modelling of soybean seeds drying processes, as well as for developing methods of the process control. Thermogravimetric analysis was performed as part of laboratory studies of soybean seeds of 'Annushka' variety was carried out, which made it possible to determine the temperature zones corresponding to the forms and energy of moisture binding to the material. The thermophysical and electrophysical characteristics of soybean seeds were determined by the method of non-stationary thermal regime. The nature of the dependence of the coefficients of thermal diffusivity, thermal conductivity and specific heat capacity on the temperature and moisture was established. The equations were obtained that describe the thermophysical and electrophysical characteristics of seeds at the moisture content in the range of 12–20 %, at the temperature range of 20–100 °C.

Keywords: thermogravimetric analysis, soybean, thermophysical properties, dielectric loss factor, drying

For citation: Tkach V.V., Kuznetcova I.W., Shevtsov A.A. Integrated studies of soybean seeds as an object of production of protein-containing products. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 36–44. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220404

Введение

Белки представляют собой важнейшую составляющую часть пищи. Белки входят в состав структурных элементов клеток, без них невозможен рост и обновление любой ткани. В них много меди, фосфора, калия, магния, кальция, натрия, цинка, марганца и железа, а также витаминов В9, В5, В1, РР и Е. Мировое потребление белковой пищи с каждым годом увеличивается.

Одной из важнейших предпосылок увеличения производства сои является устойчивый рост спроса на соевое масло, являющееся

продуктом питания [1]. Продукты, приготовленные из семян сои, имеют высокую питательную ценность, поскольку белок, входящий в их состав, отличается повышенным содержанием незаменимых аминокислот, не уступает зерну пшеницы по содержанию макро- и микроэлементов. Дополнительное стимулирование наращивание объемов производства семян сои связано с их использованием в качестве сырья для различных отраслей пищевой промышленности [2–5]. В работах [6, 7] предложена технология переработки семян сои в белоксодержащие продукты, которая

предусматривает получение суспензии после размола семян сои, и ее разделение на растворимую и нерастворимую фракции. Наиболее энергоемким процессом этой технологии является сушка исходных семян, от режима которой зависят показатели качества получаемых фракций в результате биохимических и физико-химических изменений. Для правильной организации процесса сушки необходимо изучить характер связи влаги в семенах сои и определить температурные участки, на которых происходит удаление влаги с различной формой связи, определить теплофизические и электрофизические характеристики сои.

Цель работы – исследование термогравиметрических, теплофизических, электрофизических свойств семян сои.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследованию был выбран сорт семян сои «Аннушка», произрастающий в Павловском районе Воронежской области, включенный в Госреестр по Центрально-Чернозёмному региону. «Аннушка» признан лучшим сортом сои в странах СНГ. Обладает высоким потенциалом продуктивности, не имеет аналогов по скороспелости.

Термогравиметрический анализ позволяет получить информацию о формах связи влаги в материале, дает возможность установления областей, в которых с увеличением температуры преобразуются элементы, входящие в

его состав, определить температурные участки, на границе которых удаление одной формы связи влаги сменяется другой.

Данное исследование проводили на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter с держателем образца типа S в алюминиевой тигле. Используемый термоанализатор состоит из весовой системы, держателя образца, находящегося в камере печи, и подъемного устройства печи. Запуск измерения, регистрация и контроль показаний массы, температуры и времени производились с помощью программного обеспечения, установленного на ЭВМ [8–10]. Измерения проводились в среде азота, расход продувочного газа 60 мл/мин. Масса навески – 12 мг, давление – атмосферное, верхний порог температуры 300 °С. Газовой средой для исследования выбран азот.

Результаты и обсуждения

Зависимости изменения массы образца ТГ и скорости изменения массы ДТГ, полученные при помощи термогравиметрического анализа (рис. 1), позволяют дать количественную оценку форм связи влаги.

Вид построенных кривых говорит о нелинейном типе взаимосвязи сухого вещества и влаги в материале, что определяет различные участки кривой с разными скоростями обезвоживания.

На кривой ДСК наблюдаются четыре эн-

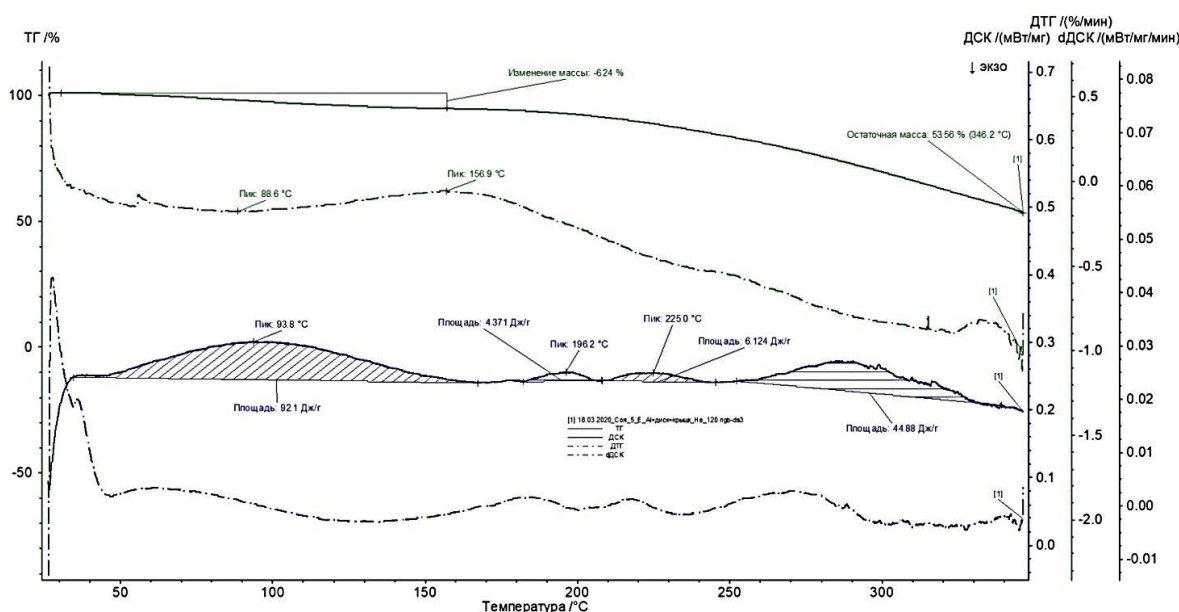


Рис. 1. Экспериментальные зависимости изменения массы образца ТГ и скорости изменения массы ДТГ

дотермических пика (см. таблицу). Для определения кинетических параметров выхода влаги использовали температурный интервал до 100 °С, так как с выходом влаги возможны денатурация и деструкция белков сои.

Чтобы получить связь убыли массы материала α и температуры T для каждого эндотермического пика, были проанализированы участки кривой убыли массы ТГ, которые показывают процесс обезвоживания материала. Степень превращения α может быть рассчитана по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_{\text{общ}}},$$

где Δm_i – отношение массы; $\Delta m_{\text{общ}}$ – общее количество влаги, содержащейся в образце.

С целью выявления детального механизма влаговыведения в интервале 25–94 °С а также количества влаги, теряемой материалом вследствие нагрева, используется кривая зависимости ($-\lg \alpha$) от величины $1000/T$.

Представлены зависимости α от T и ($-\lg \alpha$) от величины $1000/T$ для первого эндотермического пика. Температурные интервалы определяют формы связи влаги в материале (рис. 2, 3).

На I этапе в температурном интервале 35–75 °С возрастает температура, материал прогревается, удаляется капиллярно-связанная влага, обладающая самой слабой энергией связи с материалом.

На II этапе, которому соответствует температурный интервал 75–96 °С, продолжается удаление капиллярно-связанной влаги, а также происходит десорбция осмотической влаги.

Получены графические зависимости α от T , соответствующие второму, третьему и четвертому эндотермическому пику соответственно (рис. 4–6).

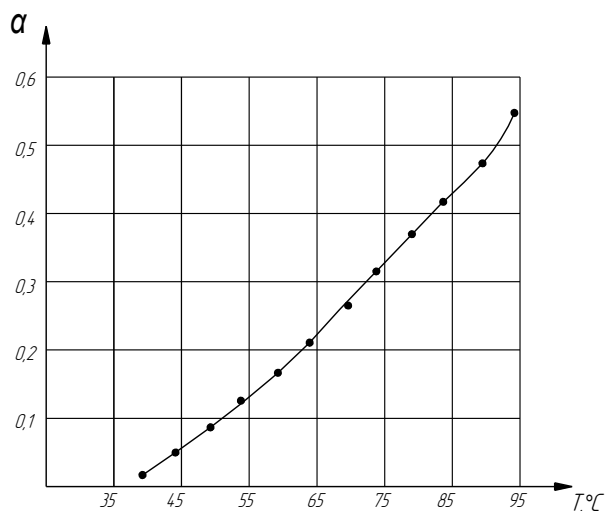


Рис. 2. Зависимость α от T для первого эндотермического пика

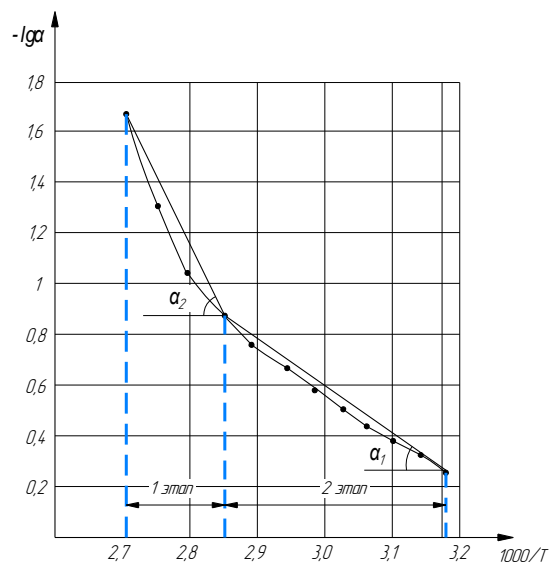


Рис. 3. Зависимость ($-\lg \alpha$) от величины $1000/T$ для первого эндотермического пика

Эндотермические пики кривой ДСК

№	Температурный интервал, °С	Изменение массы, %	Теплота, Дж/г (площадь каждого пика)	Вид пика	Процесс
1	25–170 пик 93,8	6,24	92,1	Эндотермический	Выделение влаги, разложение белков
2	182–210 пик 196,2	8,87	4,371	Эндотермический	Выделение влаги, разложение белков
3	210–245 пик 225	15,09	6,124	Эндотермический	Выделение влаги, разложение белков
4	245–350 пик 286	46,44	44,88	Эндотермический	Разложение белков, аминокислот

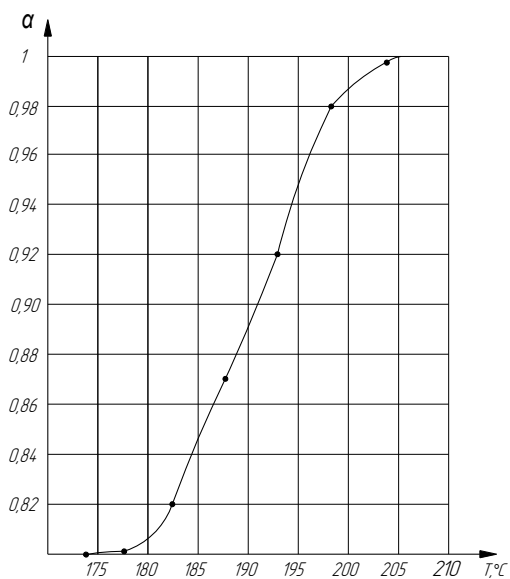


Рис. 4. Зависимость α от T , соответствующая второму эндотермическому пику

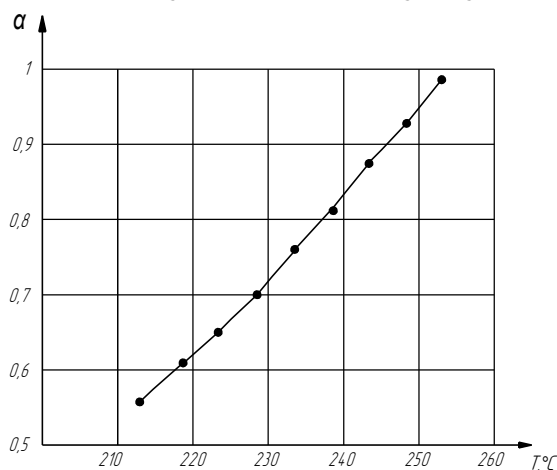


Рис. 5. Зависимость α от T , соответствующая третьему эндотермическому пику

В четвертом эндотермическом пике происходит деструкция с выделением летучих продуктов. Второй и третий эндотермические пики характеризуются активным разложением антипитательных веществ (трипсин, уреаз), денатурацией белков.

Информация о теплофизических характеристиках как функциях температуры и влагосодержания играет ключевую роль в инженерных расчетах и математическом моделировании процессов сушки и тепловой обработки семян сои. При исследовании теплофизических характеристик использован метод нестационарного теплового режима. Выявлен характер зависимостей коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоёмкости от температуры. По-

лучены уравнения, описывающие теплофизические характеристики зерна при влажности 10–20 % в диапазоне температур 20–100 °С.

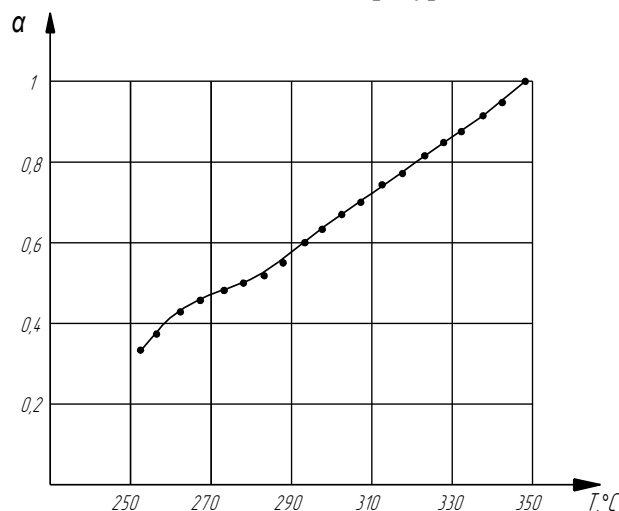


Рис. 6. Зависимость α от T , соответствующая четвертому эндотермическому пику

Получена зависимость изменения теплофизических характеристик семян сои при температуре 20 °С от влагосодержания (рис. 7).

Как видно из рис. 7, в интервале массовой доли влаги от 10 до 20 % величины λ , α и c возрастают. Также установлена зависимость теплофизических характеристик семян сои влажностью 14 % от температуры. С увеличением температуры λ , α и c семян сои возрастают (рис. 8).

В результате математической обработки экспериментальных данных в среде Mathcad [11, 12] получены эмпирические уравнения для определения теплофизических характеристик семян сои в зависимости от влагосодержания и температуры:

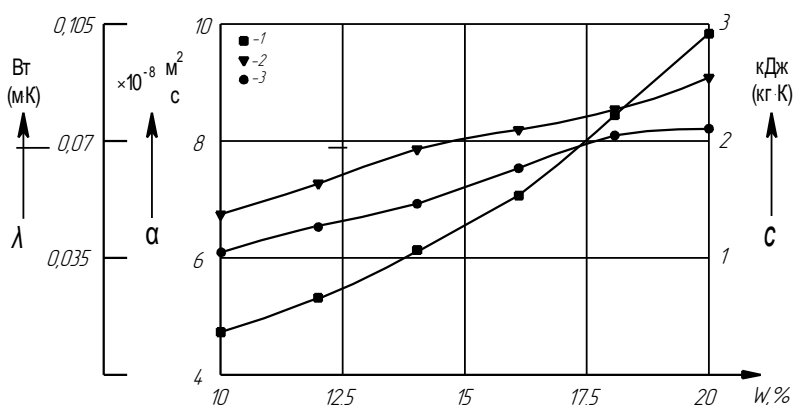
$$\lambda = 7,269 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,012 \cdot W + 6,714 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,221 \cdot 10^{-4} \cdot W^2 - 0,031; \quad (1)$$

$$\alpha = (4 - 0,98 \cdot W + 0,023 \cdot T + 0,031 \cdot W^2 - 1,465 \cdot 10^{-3} \cdot T^2) \cdot 10^{-8}; \quad (2)$$

$$c = 2 - 0,5 \cdot W + 0,044 \cdot T - 1,953 \cdot 10^{-3} \cdot W \cdot T - 0,018 \cdot W^2. \quad (3)$$

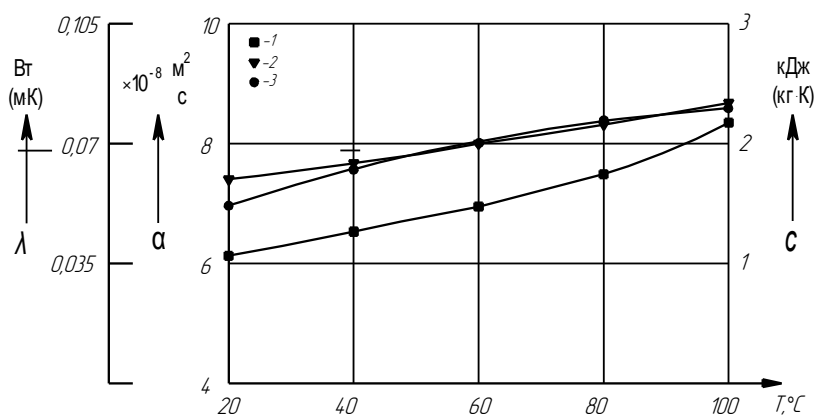
Для определения коэффициента диэлектрических потерь был использован метод сравнения. Метод основан на сравнении скорости нагрева исследуемого материала и эталона за определенный период времени с учетом массы и теплоемкости материала, а также СВЧ-мощности, вводимой в рабочую камеру.

Исследование проводилось в лабораторной СВЧ-установке с частотой 2450 МГц и



1 – коэффициент теплопроводности λ ; 2 – коэффициент температуропроводности α ;
3 – удельная теплоемкость c

Рис. 7. Зависимость изменения теплофизических характеристик семян сои при температуре 20 °С от влагосодержания



1 – коэффициент теплопроводности λ ; 2 – коэффициент температуропроводности α ;
3 – удельная теплоемкость c

Рис. 8. Зависимость теплофизических характеристик семян сои влажностью 14 % от температуры

мощностью 2,4 кВт. В качестве эталона использовалась дистиллированная вода. СВЧ-нагреву подверглись семена сои и вода, равного объема, за установленное время.

Средняя за некоторый промежуток времени удельная активная мощность, рассеянная в единице объема данного материала в виде теплоты, определяется согласно закону Джоуля–Ленца

$$P_{уд} = 0,556 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot E^2, \quad (4)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность, Вт/м³; ε'' – коэффициент диэлектрических потерь; f – частота колебаний электромагнитного поля, Гц; E – напряженность электромагнитного поля, В/см.

Тепловая энергия, генерируемая в материале, также определяется по формуле:

$$Q = ct\Delta T, \quad (5)$$

где Q – количество теплоты, генерируемой в материале, Дж; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); t – масса материала, кг; ΔT – разность температур между конечной T_k и начальной T_n .

Сравнение скорости нагрева dT/dt эталона и образца, а также совместное решение уравнений (2) и (3) дает возможность найти значения коэффициента диэлектрических потерь семян сои.

На рис. 9 представлены значения коэффициента диэлектрических потерь в зависимости от влагосодержания и температуры. Влагосодержания и температуры.

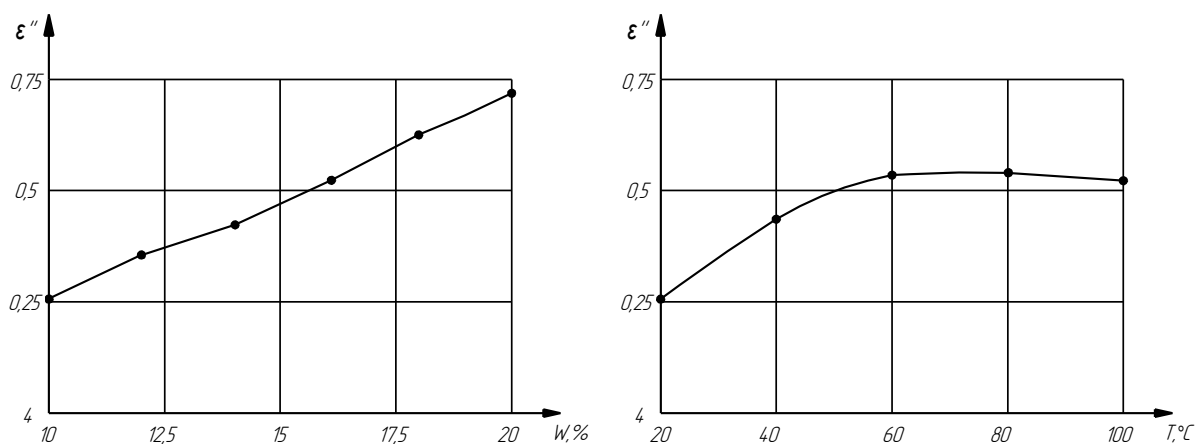


Рис. 9. Значения коэффициента диэлектрических потерь в зависимости от влагосодержания и температуры

держание оказывает значительное влияние на коэффициент диэлектрических потерь, т. е. влажная составляющая в материале поглощает большую часть подводимой СВЧ-энергии (см. рис. 9). Уменьшение значения коэффициента диэлектрических потерь с повышением температуры объясняется уменьшением ϵ'' воды при повышении температуры.

Получено эмпирическое уравнение для определения коэффициента диэлектрических потерь:

$$\epsilon'' = 8 \cdot W - 7,92 \cdot T + 0,109 \cdot W \cdot T + 3,734 \cdot W^2 - 0,049 \cdot T^2 - 336. \quad (6)$$

Заключение

В процессе нагревания сои обнаруживается 4 эндотермических эффекта, связанных с выделением влаги, разложением белков. Использование кинетических зависимостей в

интервале температур 25–96 °С позволило выделить 2 этапа выделения влаги: капиллярно-связанной и осмотической. Получены зависимости изменения теплофизических и электрофизических характеристик семян сои при различных значениях температуры и влажности.

Проведенные исследования позволили получить экспериментальную информацию, необходимую для выбора оптимальных видов и режимов сушки, которые позволят максимально сохранить качество и количество белка, входящего в состав семян сои, для его дальнейшего выделения в белоксодержащую суспензию. Результаты исследований могут быть использованы для моделирования процессов сушки семян сои, а также проектирования конвективных и СВЧ-сушилок нового поколения.

Список литературы

1. Эсбридж Д.Д., Перкинс Э.Г., Уорфел Д.Б., Эриксон Д.Р. и др. Сборник статей по переработке сои. 2002. 662 с.
2. Использование сои в производстве продуктов питания и перспективы развития применения соевых полуфабрикатов в производстве хлебобулочных изделий / Н.Н. Типсина, Н.Г. Батура, Е.Л. Демидов, М.С. Белошапкин // Вестник КрасГАУ. 2021. № 1. С. 163–168. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-1-163-168.
3. Kumar R. Functional and Edible Uses of Soy Protein Products // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 7(1). 2008. P. 14–28. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2007.00025
4. Watson C., Stoddard F.L. Agro-economic prospects for expanding soybean production beyond its current northerly limit in Europe // European Journal of Agronomy 133 (3/4):126415. 2022. P. 2–9. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126415.
5. Kuan-I Chen, Mei-Hui Erh. Soyfoods and soybean products: From traditional use to modern applications // Applied Microbiology and Biotechnology 96 (1): 2012. P. 9–22. DOI:10.1007/s00253-012-4330-7.

6. Пат. № 2689672 РФ, МПК А23L 5/00. Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций / И.В. Четверикова, А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (RU). № 2018107149; заявл. 26.02.2018; опубл. 28.05.2019. Бюл. № 16.

7. Энергосберегающая технология выделения белоксодержащих фракций из масличных семян с применением парожеткаторного теплового насоса / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Вестник ВГУИТ. 2019. № 2. С. 35–40. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-2-35-40

8. Определение параметров кинетики разложения сложных веществ по данным термогравиметрии / В.А. Каминский, С.А. Эпштейн, Д.Л. Широкин, С.Ф. Тимашев // Журнал физической химии. 2011. Т. 85, № 4. С. 637–643.

9. Галимуллин И.Н., Башкирцева Н.Ю., Лебедев Н.А. Анализ морфологической структуры и термогравиметрия стабилизирующей добавки // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 13. С. 14–16.

10. Шахов С.В., Вострикова А.Г., Ефременко Д.О. Дериватографический способ анализа видов связи влаги с материалом // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2014. № 6-3 (6). С. 114–116.

11. Алексеев Г.В. Математические методы в инженерии: учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 68 с.

12. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Основы работы в математическом пакете MathCAD: учеб. пособие для всех специальностей. Ростов н/Д: ДонНТУ, 2012. 187 с.

References

1. Asbridge D.D., Perkins Э.G., Whorfel D.B., Erickson D.R. and others. Collection of articles on soybean processing. 2002. 662 p.

2. Tipsina N.N., Batura N.G., Demidov E.L., Beloshapkin M.S. The use of soy in food production and prospects for the development of the use of soy semi-finished products in the production of bakery products. *Vestnik KrasSAU*, 2021, no. 1, pp. 163–168. (In Russ.) DOI: 10.36718/1819-4036-2021-1-163-168.

3. Kumar R. Functional and Edible Uses of Soy Protein Products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 2008, pp. 14–28. DOI:10.1111/j.1541-4337.2007.00025.

4. Watson C, Stoddard F.L. Agro-economic prospects for expanding soybean production beyond its current northerly limit in Europe. *European Journal of Agronomy*, 133 (3/4):126415. 2022. P. 2–9. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126415.

5. Kuan-I Chen, Mei-Hui Erh. Soyfoods and soybean products: From traditional use to modern applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96 (1): 2012. P. 9–22. DOI: 10.1007/s00253-012-4330-7

6. Четверикова И.В., Шевцов А.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Пат. № 2689672 РФ, МПК А23L 5/00. Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций [Pat. № 2689672 РФ, IPC А23L 5/00. Method for complex processing of soybean seeds with isolation of protein-containing fractions]. Applicant and patent holder Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I (RU). № 2018107149; application. 26.02.2018; publ. 28.05.2019. Byul. № 16.

7. Шевцов А.А., Тертычная Т.Н., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Energy-saving technology for the extraction of protein-containing fractions from oilseeds using a steam jet heat pump. *Vestnik VSUET*, 2019, no. 2, pp. 35–40. (In Russ.) DOI: 10.20914/2310-1202-2019-2-35-40

8. Kaminskii V.A., Epstein S.A., Sirotin D.L., Timashev S.F. Determination of the parameters of the kinetics of decomposition of complex substances according to thermogravimetry. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Journal of physical chemistry], 2011, vol. 85, no. 4, pp. 637–643. (In Russ.)

9. Galimullin I.N., Bashkirtseva N.Yu., Lebedev N.A. Analysis of the morphological structure and thermogravimetry stabilizing additives. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of technological university], 2015, vol. 18, no. 13, pp. 14–16. (In Russ.)

10. Shakhov S.V., Vostricova A.G., Efremenko D.O. Derivatographic method for analyzing the types of moisture bond with the material. *Eurasian Union of Scientists (EUS)*, 2014, no. 6-3 (6), pp. 114–116. (In Russ.)

11. Alekseev G.V. *Matematicheskie metody v inzhenerii* [Mathematical Methods in Engineering]. St. Petersburg, 2014. 68 p.
12. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. *Osnovy raboty v matematicheskom pakete MathCAD* [Basics of working in a mathematical package MathCAD]. Rostov-na-Donu, 2012. 187 p.

Информация об авторах

Ткач Владимир Владимирович, к.т.н., Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия, tkachbalian@yandex.ru

Кузнецова Ирина Владимировна, к.х.н., доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия, kuznetsovaiv@mail.ru

Шевцов Александр Анатольевич, д.т.н., профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия, shevalol@rambler.ru

Information about the authors

Vladimir V. Tkach, Cand. Sci. (Engin.), Assoc. Prof., Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, tkachbalian@yandex.ru

Irina W. Kuznetsova, Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia, kuznetsovaiv@mail.ru

Alexander A. Shevtsov, Dr. Sci. (Engin.), Prof., Prof, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, shevalol@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2022

The article was submitted 16.08.2022