

Комплексная переработка сельскохозяйственных масличных культур: потенциал использования электромагнитного поля СВЧ-диапазона

А.И. Шагеева^a, К.Г. Анিকেева^b, Р.Р. Сафин^c

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан

^a sham.adilya@yandex.ru, ^b doomksen@mail.ru, ^c cfaby@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4617-1820>, ^b <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Статья поступила 16.09.2024, принята 03.10.2024

Одной из ценных сельскохозяйственных культур, обладающих большим потенциалом использования в различных отраслях агропромышленного комплекса, является рапс. Интерес к рапсовому маслу и его побочным продуктам переработки, особенно в условиях импортозамещения, обусловлен высоким содержанием витаминов группы E, протеина и аминокислот при оптимальном соотношении олеиновой кислоты. Статья посвящена исследованию существующих тенденций в области обработки масличных культур при производстве продуктов сельского хозяйства. Перспектива развития переработки маслосемян в условиях малых и средних производственных предприятий связана с оптимизацией процессов сушки для сохранения и улучшения качественных показателей получаемой рапсовой продукции. Исследования показали, что наиболее перспективным направлением энергетического воздействия на растительные организмы в сельском хозяйстве является применение электромагнитного поля сверхвысокой частоты (СВЧ). Для этого в работе проведена апробация математической модели вакуумной СВЧ-сушки растительного сырья на ядрах рапса, в ходе которой были получены рациональные режимные параметры предлагаемого осциллирующего режима сушки. Выявили, что при чередовании стадий СВЧ-нагрева и вакуумирования происходит равномерное распределение влажности по всему объему семенного материала, что позволяет сохранить качественные характеристики продукта. Установлено, что воздействие СВЧ-полей позволяет произвести шелушение оболочки недообрушенных зерен от рапсового ядра благодаря единомысленным градиентам температуры и влажности. В работе предложены новые решения в области переработки семян рапса с применением ресурсосберегающих технологий, представлена схема энергоэффективной линии комплексной переработки рапсового сырья с использованием на этапах сушки осциллирующих СВЧ-режимов, в которой предусмотрена реализация вторичных сырьевых продуктов после процесса отжима масла.

Ключевые слова: семена рапса; СВЧ-сушка; осциллирующий режим; моделирование процесса СВЧ-сушки; комплексная переработка.

Integrated processing of agricultural oilseeds: the potential of using an electromagnetic field in the microwave range

A.I. Shageeva^a, K.G. Anikeeva^b, R.R. Safin^c

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marx St., Kazan, Republic of Tatarstan

^a sham.adilya@yandex.ru, ^b doomksen@mail.ru, ^c cfaby@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4617-1820>, ^b <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Received 16.09.2024, accepted 03.10.2024

One of the valuable agricultural crops with great potential for use in various sectors of the agro-industrial complex is rapeseed. Interest in rapeseed oil and its processing by-products, especially in conditions of import substitution, is due to the high content of vitamins E, protein and amino acids with an optimal ratio of oleic acid. The article is devoted to the study of existing trends in the field of processing of oilseeds in the production of agricultural products. The prospect for the development of oilseed processing in small and medium-sized production enterprises is associated with the optimization of drying processes to preserve and improve the quality indicators of the resulting rapeseed products. Research has shown that the most promising direction of energy impact on plant organisms in agriculture is the use of a super-high-frequency electromagnetic field (EMF SHF). For this purpose, the work tested a mathematical model of vacuum microwave drying of plant raw materials on rapeseed kernels, during which rational operating parameters of the proposed oscillating drying mode are obtained. It is revealed that when alternating the stages of microwave heating and vacuuming, a uniform distribution of moisture occurs throughout the entire volume of the seed material, which allows maintaining the quality characteristics of the product. It is established that the influence of microwave fields makes it possible to peel the shell of under-hulled grains from the rapeseed kernel due to uniformly directed gradients of temperature and humidity. The work proposes new solutions in the field of processing rapeseed seeds using resource-saving technologies, presents a diagram of an energy-efficient line for the integrated processing of rapeseed raw materials using oscillating microwave modes at the drying stages, which provides for the sale of secondary raw materials after the oil extraction process.

Keywords: rapeseeds; super-high-frequency drying; oscillating mode; modeling of the microwave drying process; complex processing.

Введение. В современном мире наблюдается постоянный рост потребности в белках и продуктах на их основе. В этой связи особую важность приобретают вопросы разработки новых технологий, обеспечивающих эффективную переработку вторичного растительного сырья в продукты с высоким содержанием белка, которые составляют значительную часть современных научных исследований отечественных и зарубежных ученых [3; 5; 12]. Рапс — одна из наиболее быстро развивающихся масличных культур в России. Благодаря своей неприхотливости к составу почвы, а также невосприимчивости к перепаду температур рапс обладает высокой урожайностью.

Семена рапса используются в качестве сырья для переработки на растительное масло, а побочные продукты в виде жмыхов и экстракционных шротов применяются в кормовых добавках для животноводства и при производстве биодизеля. В процессе комплексной переработки семян рапса наряду с очищенным зерном остается обрубленная семенная оболочка, которая может применяться также в производстве жидких и сухих субстратов для микробиологической промышленности [8]. В работе T.D. Panaite, R.P. Turcu и др. исследовалось влияние применения предварительно обработанного рапсового шрота на продуктивность и питательную ценность куриных яиц [9]. Авторами было установлено, что использование комбикормов, содержащих рапсовый жмых, благоприятно влияет на питательную ценность яиц в отношении снижения содержания насыщенных жирных кислот, а также увеличивает содержание полиненасыщенных жирных кислот в желтке, что доказывает положительное влияние на здоровье человека.

Однако при использовании продуктов переработки рапса в первую очередь необходимо обращать внимание на содержание в их составе глюкозинолатов, которые напрямую влияют на вкус и качество конечного продукта. Глюкозинолаты представляют собой сернистые или азотистые вторичные метаболиты, присутствующие практически во всех растениях порядка *Brassicaceae* (*Капустоцветы*), необходимые для их защиты от вредителей и патогенов. Присутствие в семенах рапса большого содержания глюкозинолатов может оказывать негативное влияние на здоровье человека и животных, так как при попадании в организм данные соединения гидролизуются и образуют различные продукты распада. Поэтому в целях противодействия таким негативным явлениям особую важность

представляют совершенствование и поиск новых оптимальных решений в технологических процессах обработки рапса, в частности в процессах предварительной сушки, позволяющих за счет правильной тепловой обработки уменьшить содержание в рапсовом сырье таких антипитательных веществ.

В настоящее время в процессах сушки сельскохозяйственных культур в основном широко применяются зерносушилки с конвективным подводом тепла, обладающие, с одной стороны, небольшими капитальными затратами, а с другой стороны, имеющие недостатки в виде неконтролируемой и высокой температуры агента сушки. В процессе обработки семян рапса конвективными методами при воздействии на них постоянной повышенной температуры наблюдается интенсивное обезвоживание периферийной части, что приводит к значительному перегреву семенного материала, вследствие чего может происходить биодеградация содержащихся в растительном сырье ферментов, прямым образом влияющих на качество рапсовой продукции [4]. Считается, что наиболее перспективным способом сушки сырья растительного происхождения является применение энергии, создаваемой электромагнитным полем СВЧ-излучения. Этот метод обеспечивает быстрое проникновение электромагнитных волн непосредственно к центру зернового материала, за счет чего наблюдается поглощение молекул воды и их перемещение к поверхностному слою зерна в течение всего процесса сушки.

Авторами [10] были проведены исследования влияния предварительного СВЧ-нагрева на разложение в семенах рапса глюкозинолатов и содержание в масле резких запахов. Для сравнительного анализа, получаемого в процессе прессования рапсового масла, было подготовлено по 200 г сырых и разогретых в микроволновой печи образцов семян. С помощью комплексной двумерной газовой хроматографии и спектроскопии было установлено, что 7-минутное воздействие СВЧ-полей на образцы семян рапса позволяет снизить общее содержание глюкозинолатов до 48,65 % путем инактивации фермента мирозиназы.

С целью реализации биопотенциала вторичных сырьевых ресурсов была представлена блок-схема комплексной переработки масличных культур, предусматривающая получение пищевой продукции и органического удобрения для растениеводства (рис. 1).

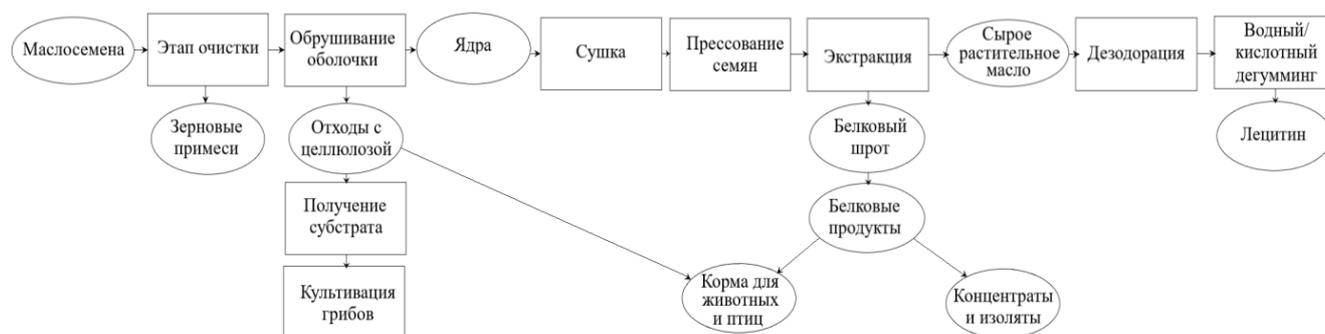


Рис. 1. Блок-схема комплексной переработки сельскохозяйственных масличных культур

Рассмотрим более подробно технологию переработки масличных культур на примере переработки семян рапса. Первым этапом обработки является очистка семян рапса от посторонних загрязнителей для разделения на фракции путем просеивания засоренных семян через сито с различной величиной и формой отверстий. После интенсивной очистки семена рапса подвергаются шелушению для разделения на две фракции, шелуху и очищенное ядро зерна (рис. 2). Полученная шелуха может использоваться в кормлении жвачных животных или применяться для получения субстрата, необходимого при производстве культивируемых грибов. Семена рапса могут быть подвергнуты окислительным процессам, что приводит к увеличению температуры зерновой массы. При высоком содержании в семенах рапса концентрации свободных жирных кислот наблюдается снижение выхода масла и ухудшение вкусовых показателей, появляется прогоркание. Поэтому в целях исключения возникновения в семенах грибов и других негативных факторов необходимо проводить своевременную и качественную сушку ядер при оптимальных режимных параметрах, так как перегрев семян также может повредить белок. После этапа шелушения оболочки от ядра рапса остаются недообрушенные зерна, которые хорошо отделяются при воздействии на них СВЧ-поля за счет направления градиентов температуры и влажности из центра ядра к периферии [2]. Следующим этапом является прессование, которое зависит от масличности семян и температуры отжима. Шелушенные семена рапса обладают значительным преимуществом в процессе прессования по сравнению с нешелушенным сырьем, так как снижается риск поступления в масло загрязняющих компонентов, таких как свободные жирные кислоты, дубильные и горькие вещества. При высоком содержании масла и протеина в семенах необходимо проводить операцию двукратного прессования. Сперва очищенные ядра проходят первую ступень прессования, при которой методом холодного отжима добывается рапсовое масло.

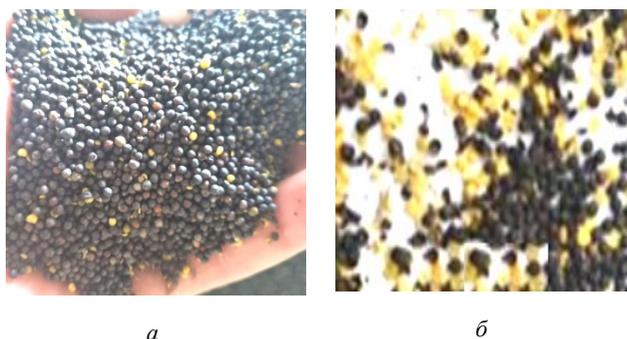


Рис. 2. Семена рапса до шелушения (а); после шелушения (б)

Анализ исследований [5] показал, что большое количество лигнина в пищевых волокнах негативно влияет на пищеварение жвачных животных и птиц, что, в свою очередь, снижает энергоценность такого вида кормовых добавок. Авторами было установлено, что технологический процесс шелушения обеспечивает снижение в полножирном рапсе долю клетчатки до 7,7 %, что позволяет извлекать масло из сырья с наивысшей эффективностью. Холоднопрессованный

рапсовый жмых улучшает проникновение гексана. Шрот из рапса, полученный методом экстракции, обладает содержанием более 47,2 % белка, что делает его идеальным высокопитательным источником для домашнего скота [1].

Многочисленные исследования ученых доказывают, что значимым фактором в обеспечении сельскохозяйственной и пищевой промышленности качественной сырьевой базой из вторичного рапсового сырья прежде всего является процесс сушки. В сельскохозяйственном производстве известны сушильные устройства, работающие при постоянном непрерывном воздействии СВЧ-энергии на зерновую продукцию. В результате такого воздействия на растительное сырье, с одной стороны, наблюдается активная влагоотдача, что способствует большей эффективности процесса, однако при этом нет возможности осуществлять оптимальный контроль сушки, что приводит к таким нежелательным явлениям, как перегрев центральных слоев зерна и, в некоторых случаях, возгорание семенного слоя [7]. На основании проведенного анализа исследований в этой области для обеспечения равномерного распределения влаги внутри зерновых культур было предложено осуществлять воздействие СВЧ-излучения с применением осциллирующего режима сушки, состоящего из последовательно чередующихся стадий нагрева и охлаждения.

Целью данной работы является исследование способов оптимизации этапа предварительной обработки семян рапса перед процессом прессования для сохранения в высушенном продукте пищевой ценности, а также методов комплексного использования компонентов вторичных сырьевых ресурсов. В этой связи в работе была поставлена задача провести моделирование процесса осциллирующей СВЧ-сушки на ядрах рапса для дальнейшей разработки энергоэффективной схемы линии переработки масличных культур.

Объекты и методы исследования. Научные исследования по разработке эффективных методов комплексной переработки сельскохозяйственных отходов с применением высокобелковых жмыхов, шротов, а также побочных продуктов гидратации масла проводились на базе Казанского национального исследовательского технологического университета. Методика исследований предполагала проведение моделирования процесса осциллирующей СВЧ-сушки семян рапса, а также экспериментальных исследований с применением основ планирования эксперимента.

Математически процесс вакуумной СВЧ-сушки семян рапса в осциллирующем режиме нами подразделен на две последовательные стадии, нагрев и вакуумирование, и был представлен в следующем виде. Изменение полей влажности, температуры и давления в семенном материале на стадии СВЧ-нагрева основывается на дифференциальных уравнениях теплопереноса академика А.В. Лыкова, представленных относительно нашей технологии в следующей форме:

$$c_{cm} \rho_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{cm} \cdot \left(\frac{\partial T_{cm}}{\partial x} \right) \right) + q_{свч}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{cm}}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 U_{cm}}{\partial x^2} + a \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T_{cm}}{\partial x^2} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p_{cm}}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_{cm}}{\partial \tau} = \frac{RT_{cm}}{P_0 \mu} \left[k_p \frac{\partial^2 p_{cm}}{\partial x^2} + \xi \cdot \rho_0 \frac{\partial U_{cm}}{\partial \tau} \right] + \frac{p_{cm}}{T_{cm}} \left(\frac{\partial T_{cm}}{\partial \tau} \right), \quad (3)$$

где c_{cm} — удельная теплоемкость семенного материала, Дж/(кг·°C); ρ_{cm} — плотность семенного материала, кг/м³; τ — время; λ'_{cm} — эффективный коэффициент теплопроводности; $q_{свч}$ — удельная мощность СВЧ излучения, Дж/(с·м³); T_{cm} — температура семенного материала; U_{cm} — влагосодержание семенного материала; P_m — давление, Па; ρ_0 — плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; k_p — коэффициент фильтрационного массопереноса, с; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); ξ — критерий парообразования; δ — относительный термоградиентный коэффициент, 1/°C; μ — молярная масса, кг/кмоль; P_0 — пористость рапса, %.

Начальные условия применительно к стадии СВЧ-нагрева имеют следующий вид:

$$T_m(0; x) = \text{const} \quad (4)$$

$$U_m(0; x) = \text{const} \quad (5)$$

$$p_m(0; x) = \text{const} \quad (6)$$

Граничные условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (3) нами представлены в следующем виде:

$$\alpha(T - T_{пов.см}) = -\lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} - r \cdot j_{пов.см} + q_{свч}, \quad (7)$$

$$j_{пов.см} = \beta(U_{cm} - U_{пов.см}), \quad (8)$$

$$p_{cm}(\tau; 0) = P_{кам}. \quad (9)$$

где $T_{пов.см}$ — температура поверхности семенного материала, °C; r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг; $j_{пов.см}$ — поток массы семенного материала, кг/(м²·с); β — коэффициент массоотдачи, м/с.

Поток массы семенного материала определяется выражением:

$$j_{пов.см} = \rho_0 \cdot \left(a_m \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \cdot \delta \cdot \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_{cm}}{\partial x} \Big|_{x=0} \right). \quad (10)$$

Согласно закону Джоуля – Ленца, удельная мощность СВЧ-нагрева в единице объема высушиваемого рапсового сырья рассчитывается как:

$$q_{свч} = 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot tg\sigma \cdot f \cdot E^2, \quad (11)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость, Ф/м; $tg\sigma$ — тангенс угла диэлектрических потерь; f — частота, Гц; E — напряженность электрического поля, В/м.

Напряженность электрического поля, которое создает точечный заряд, в уравнении (11) определяется законом Кулона:

$$E = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q_3}{r^2}, \quad (12)$$

при этом заряд:

$$q_3 = C_0 \cdot U, \quad (13)$$

где q_3 — заряд, Кл; r — расстояние от заряда, создающего поле, до точки, в которой ищем поле.

Емкость конденсатора в этом случае может быть определена выражением:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}, \quad (14)$$

где ε_0 — электрическая постоянная (8,86 · 10⁻¹² Ф/м); S — площадь обкладки конденсатора, м²; h — размер образца в направлении действия диэлектрического поля, м.

Для описания доли подведенной мощности, которая поглощается древесиной и превращается в теплоту, применяют тангенс угла диэлектрических потерь:

$$tg\sigma = \frac{\sigma_f}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (15)$$

где σ_f — полная удельная активная проводимость на данной частоте, См/м; ω — угловая частота, рад/с.

Изменение температуры среды в СВЧ-камере определяется выражением:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha F_{cm} (T_{пов.см} - T) + c_{п} F_{cm} j T_{пов.см}}{\rho_{cm} c_{cm} V_{св}}. \quad (16)$$

Рассмотрим следующую стадию осциллирующей сушки — вакуумирование. Тепломассоперенос для парогазовой фазы в условиях непрерывного понижения давления среды, а также при отсутствии полей скорости, температуры, плотности пара во внешней среде, определяется уравнениями (17), (18) материального и теплового баланса (19):

$$V_{св} d\rho_{п} = dm_{п} - dm_{с.п}, \quad (17)$$

$$V_{св} d\rho_{г} = -dm_{с.г}, \quad (18)$$

$$\rho_{св} c_{св} V_{св} dT = \alpha(T_{пов.см} - T)F_{св} d\tau - Q_{с.п} \rho_{св} c_{св} T d\tau + c_{п} F_{св} j_{пов.см} T_{пов.см} d\tau. \quad (19)$$

где $F_{св}$ — площадь поверхности семенного материала, м²; $V_{св}$ — свободный объем камеры, м³; $Q_{с.п}$ — производительность системы удаления пара, м³/с; $c_{п}$, $c_{св}$ — теплоемкость пара и парогазовой среды, Дж/(кг·°C); $m_{п}$, $m_{с.п}$ — масса пара и системы удаления пара, кг.

Плотность компонента идеальной парогазовой смеси находится с помощью уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$\rho_{г(п)} = \frac{p_{г(п)} \cdot \mu_{п} p_{п}}{R \cdot T}. \quad (20)$$

При этом температура пара в состоянии насыщения определяется уравнением Антуана:

$$T_{нас} = \frac{B}{A - \ln p_{нас}}. \quad (21)$$

После подстановки в уравнения (16) и (17) значений плотности в виде соотношений (19) и некоторых преобразований, а также при наличии в камере воздуха скорость изменения парциальных давлений пара и газа определяется уравнениями (21) и (22), а изменение температуры паровой среды — с помощью уравнения (23):

$$\frac{dp_r}{d\tau} = p_r \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{с.г}}{V_{св}} \right), \quad (22)$$

$$\frac{dp_n}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{св} \mu_n} j_n - p_n \left(\frac{Q_{с.г}}{V_{св}} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} \right), \quad (23)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{(\alpha F_{св} (T_{пов.св} - T) + c_{пн} F_{св} jT_{пов.св}) R}{(\mu_n p_n + \mu_r p_r) c_{св} V_{св}} - \frac{Q_{с.г}}{V_{св}} \right] T. \quad (24)$$

где p_n, p_r — давление пара и газа, Па; μ_n, μ_r — молярная масса пара и газа, кг/моль; $Q_{с.г}$ — производительность системы удаления газа, м³/с.

Объемная производительность системы удаления пара, вакуумного насоса и конденсатора определяется уравнениями (25) – (27):

$$Q_{с.п} = Q_{вн} + Q_{кон}, \quad (25)$$

$$Q_{вн} = \frac{V_{св}}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}}. \quad (26)$$

$$Q_{кон} = \frac{K_{кон} \Delta t_{кон} F_{кон}}{\rho_n [c_{н.пер} (T - T_{нас}) + c_n T_{нас} + r_n]}. \quad (27)$$

На стадии вакуумирования изменения полей температуры, давления и влажности в семенном материале описываются уравнениями (1) – (3) без учета коэффициента $q_{свч}$, характеризующего внутренний источник тепловой энергии. В таком случае граничные условия будут также аналогичны уравнениям (7) – (9) без учета коэффициента $q_{свч}$. Система дифференциальных уравнений (1) – (3) с учетом краевых условий (4) – (10), выражений, учитывающих изменение мощности ЭМП СВЧ (11) – (15) и изменение температуры среды в СВЧ камере, позволяют полностью описать процессы, протекающие на стадии СВЧ-нагрева.

Для проверки адекватности модели процесса вакуумной СВЧ-сушки на семенах рапса была разработана экспериментальная СВЧ сушильная установка, реализующая осциллирующие режимы (рис. 3). Для контроля равномерности нагрева диэлектрического материала необходимо измерение распределения полей температуры в семенном материале. Для этого применяли тепловизор *SDS HotFind* и инфракрасный термометр (пирометр) СЕМ (рис. 4). Экспериментальные исследования проводились при мощности СВЧ-генератора 700 Вт и частоте ЭМП 2 450 МГц.

Сушилка содержит герметичную камеру 1, которая разделена на зону охлаждения, состоящую из блока конденсации и вакуумирования, а также зону нагрева,

содержащую блок генерации СВЧ-энергии 2. Первая зона состоит из вакуумного насоса 3, вакуумметра 4, вентиля для отключения блока вакуумирования, а также из холодильника 5 с конденсаторосборником и водяным насосом 6. Вторая зона состоит из СВЧ-генератора, магнетронов с волноводами, высоковольтного конденсатора и системы водяного охлаждения. Контроль над работой сушилки осуществляется через щиток управления 7. В данном процессе работа СВЧ-генератора и вакуумного насоса происходит на разных этапах: СВЧ-генератор включается во время нагрева, тогда как вакуумный насос активизируется при вакуумировании, что исключает одновременную работу обоих устройств.

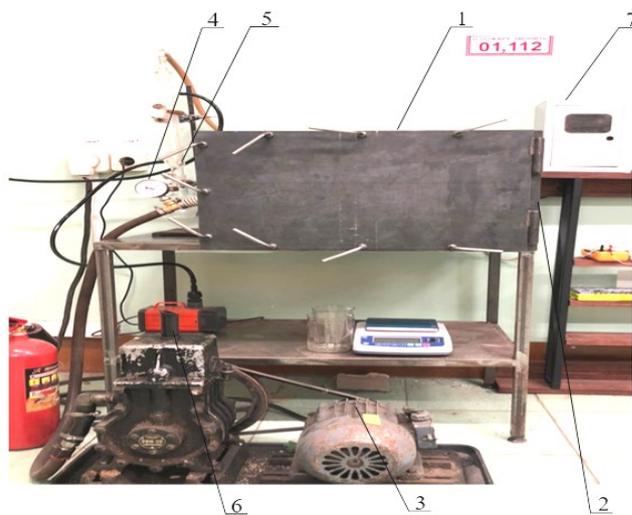


Рис. 3. Экспериментальная СВЧ-сушилка растительно-го сырья



Рис. 4. Тепловизор *SDS HotFind* и ИК термометр СЕМ

Результаты исследования. В результате проведенного математического моделирования процесса осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки семенного материала были получены кривые, характеризующие изменения полей температуры, давления и влагосодержания в рапсовом ядре (рис. 5). Определение содержания влаги в образцах производилось по ГОСТ 134896.3-80.

Как видно на рис. 5, один цикл процесса СВЧ-сушки подразделяется на две стадии, нагрев и вакуумирование. Стадия нагрева проводится при атмосферном давлении среды, с целью минимизации удаления влаги с поверхности семян, в течение 4 мин при включенных СВЧ-магнетронах и считается завершенной при достижении в материале средней температуры 60 °С. После чего путем вакуумирования сырье подвергается охлаждению при постоянном давлении, равном 10 кПа. Стадия вакуумирования осуществляется в течение 8 мин до достижения в центре рапсовых семян заданной температуры, равной 50 °С. Тепловизионные исследования показали, что при чередовании стадий СВЧ-нагрева и вакуумирования наблюдается разогрев во всем объеме сырья, что благоприятно сказывается на распределении влаги внутри семени, происходит выравнивание влажности в объеме продукта.

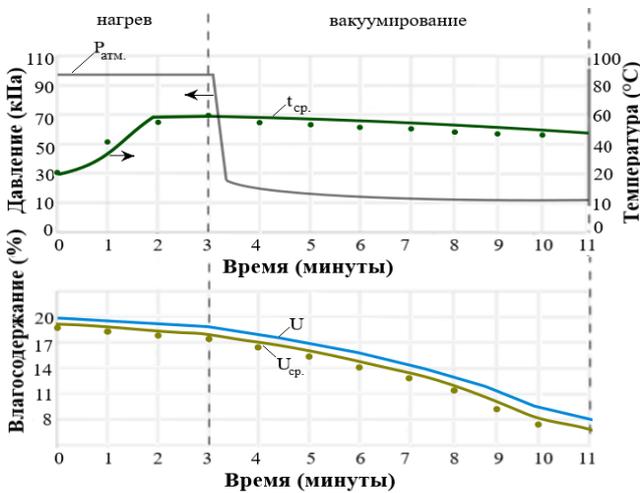


Рис. 5. Процесс вакуумно-осциллирующей сушки рапсовых семян в СВЧ-среде

Таким образом, за цикл осциллирующей сушки рапсовых семян с начальной влажностью 20 % продолжительностью в среднем 11 мин достигается конечная влажность сырья в диапазоне 7–8 %. Рассмотрев представленную выше зависимость, установили, что при температуре нагрева семян 58–60 °С достигается наиболее оптимальная мощность СВЧ-излучателя — 160 Вт, что ускоряет процесс влагосъема.

На основе исследовательских работ по реализации энергоэффективной линии переработки семян рапса [11] была доработана конструкция автономного конденсационного сушильного комплекса, подтвержденная патентом РФ 2732325C1 (рис. 6) [6].

Действие установки, применяемой для комплексной переработки семян рапса, заключается в следующем: семена рапса направляются в бункер-накопитель 15, откуда питателем поступают в блок предварительной очистки и шелушения 16. Удаленные в процессе очистки и обрушения зерновые примеси, пыль и шелуха собираются в приемной емкости 17. После этого очищенные ядра подаются в промежуточный накопитель 18 и далее укладываются на перфорированные поддоны и загружаются в СВЧ-сушильную камеру, которая реализует осциллирующие режимы при максимальной температуре нагрева 70 °С для сохранения в рапсовом сырье питательной ценности и снижения содержания глюкозинолатов. Высушенные до влажности 8 % и охлажденные до 30 °С семена рапса проходят через циклон 19 в пресс отжима масла 21. Шелуха, появившаяся при воздействии СВЧ волн на недообрушенные семена рапса, осаждается в приемной емкости 20. Извлеченное в процессе прессования масло поступает в емкость для сырого масла 22, а рапсовый жмых или шрот остается в сборнике 23 откуда направляется на дальнейшую безотходную переработку.

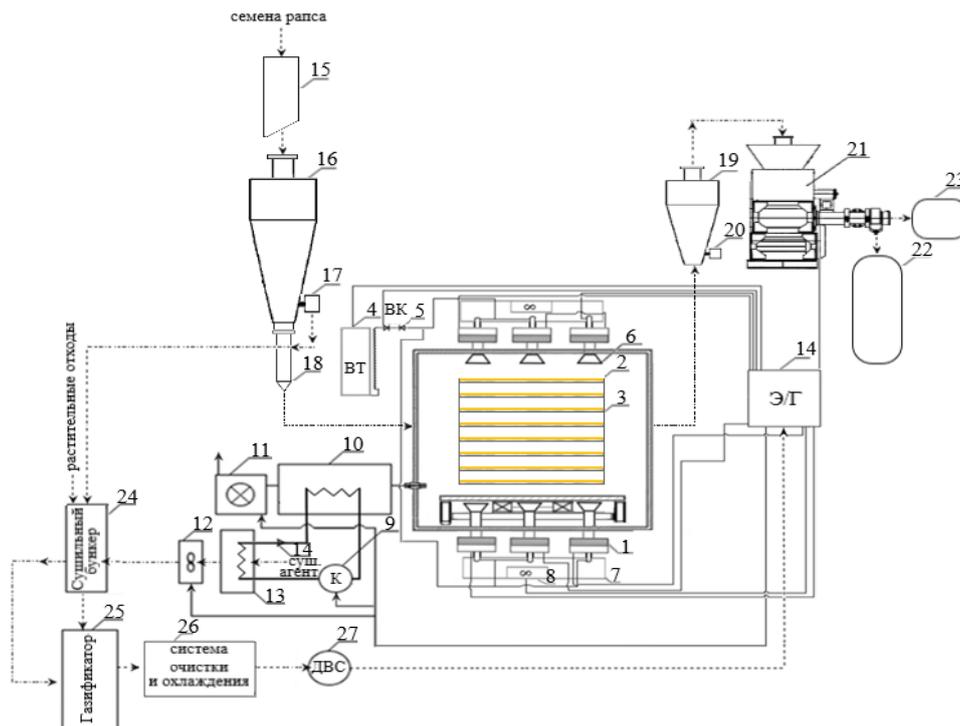


Рис. 6. Автономная линия комплексной переработки семян рапса

Измельченные влажные растительные отходы из бункера хранения, а также рапсовая шелуха из приемной емкости 17 поступают в сушильный бункер 24, куда вентилятором 12 нагнетается горячий воздух для предварительной подсушки с помощью тепловой энергии, отведенной тепловым насосом от испаренной в камере сушки влаги. Далее подсушенные растительные отходы подаются питателем из бункера 24 в газификатор 25, в котором происходит термохимическая конверсия отходов растительного сырья с последующим получением генераторного газа. Полученный генераторный газ после очистки от пылевидных частиц и остаточных смол в системе очистки 26, состоящей из циклона и фильтра тонкой очистки, и охлаждения с помощью теплообменников и конденсатора поступает в двигатель внутреннего сгорания 27, приводя в движение ротор электрогенератора 14 для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия обеспечивает работу компрессора 9 теплового насоса, вакуумного насоса 11, вентилятора 12 на стадии вакуумирования и СВЧ-генератора с магнетронами 1, вентилятором 8 и высоковольтным трансформатором на стадии нагрева, а также работу маслопресса 21.

Литература

1. Зверев С.В., Скуданова Н.А., Размочаев Е.А., Миневич И.Э. Влияние обрушения семян рапса на качество продуктов их переработки // Комбикорма. 2023. № 11. С. 30-33.
2. Исаев А.В., Бастрон А.В., Яхонтова В.С. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты на их энергию произрастания и всхожесть // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2016. № 4. С. 131-137.
3. Кондратенко Е.П., Соболева О.М., Егорова И.В. Изменение качества зерна пшеницы под воздействием поля сверхвысокой частоты // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2015. № 5 (127). С. 30-37.
4. Линдебек М. Оптимизация обработки семян рапса // Комбикорма. 2015. № 9. С. 47-50.
5. Шевцов А.А., Тертычная Т.Н., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Разработка алгоритма управления процессами переработки масличных семян в белоксодержащие продукты // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. 2019. № 4. С. 61-65.
6. Mukhametzyanov S.R., Safin R.R., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R., Shageeva A.I. Alternative energy in vegetable and crushed wood raw materials drying processes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 507. P. 1-4.
7. Ganeev I., Karimov K., Fayzrakhmanov S., Masalimov I., Permyakov V. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation // Acta agriculturae slovenica. 2020. Vol. 115. P. 261-271.
8. Nan Wu, Fenghua Tian, Odeshnee Moodley, Bing Song, Chuanwen Jia, Jianqiang Ye, Ruina Lv, Zhi Qin, Changtian Li. Optimization of agro-residues as substrates for *Pleurotus pulmonarius* // AMB Express. 2019. Vol. 9 (1). P. 184.
9. Panaite T.D., Turcu R.P., Soica C., Visinescu P. Nutritional parameters of eggs from laying hens fed with flaxseed meal or mixture with rapeseed meal or rice bran // Journal of Applied Animal Research. 2020. Vol. 48, iss. 1. P. 566-574.

Заключение. Была установлена целесообразность и эффективность применения на этапах предварительной обработки семян рапса технологии вакуумной СВЧ-сушки растительного сырья с реализацией предлагаемых осциллирующих режимов. Результаты апробации математической модели осциллирующей СВЧ-сушки на ядрах рапса доказали удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных значений, что позволяет рекомендовать данную модель для выбора рациональных и эффективных режимных параметров процесса сушки масличных культур. В ходе проведенных научных исследований была разработана энергоэффективная схема линии переработки сельскохозяйственной продукции в частности семян рапса с реализацией автономного режима работы на основе отходов растительного сельскохозяйственного сырья.

Следующим этапом планируется проведение исследований по глубокой переработке вторичного растительного сырья с целью оптимизации технологий получения отечественных рапсовых лецитинов, имеющих широкое применение в различных отраслях промышленности за счет значительного содержания функциональных групп фосфолипидов.

10. Qi Zhou, Hu Tang, Xiao Jia, Chang Zheng, Fenghong Huang, Min Zhang. Distribution of glucosinolate and pungent odors in rapeseed oils from raw and microwaved seeds // International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, iss. 1. P. 2296-2308.
11. Safiullina A.Kh., Kainov P.A., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Shageeva A.I. Self-contained energy-saving plant for drying vegetable raw materials // 20th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM, 2020. P. 253-260.
12. Shageeva A.I., Safin R.R., Kaynov P.A. Formation of mathematical model for the use of SHF technology in the drying of agricultural plant raw materials // International Conference on Digital Transformation: Informatics, Economics, and Education (DTIEE2023). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Washington, 2023. P. 1263717.

References

1. Zverev S.V., Skudanova N.A., Razmochaev E.A., Minevich I.E. The influence of rapeseed dehulling on the quality of their processed products // Compound feeds. 2023. № 11. P. 30-33.
2. Isaev A.V., Bastron A.V., Yahontova V.S. Study of the influence of the degree of uneven heating of rapeseed seeds in an ultrahigh frequency electromagnetic field on their growth energy and germination // The Bulletin of KrasGAU. 2016. № 4. P. 131-137.
3. Kondratenko E.P., Soboлева O.M., Egorova I.V. Change in the quality of wheat grain under the influence of an ultrahigh frequency field // Bulletin of Altai state agricultural university. 2015. № 5 (127). P. 30-37.
4. Lindebek M. Optimization of rapeseed seed treatment // Compound feeds. 2015. № 9. P. 47-50.
5. Shevcov A.A., Tertychnaya T.N., Tkach V.V., Serdyukova N.A. Development of an algorithm for controlling the pro-

- cesses of processing oil seeds into protein-containing products // News of universities. Food Technology. 2019. № 4. P. 61-65.
6. Mukhametzyanov S.R., Safin R.R., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R., Shageeva A.I. Alternative energy in vegetable and crushed wood raw materials drying processes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 507. P. 1-4.
 7. Ganeev I., Karimov K., Fayzrakhmanov S., Masalimov I., Permyakov V. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation // Acta agriculturae slovenica. 2020. Vol. 115. P. 261-271.
 8. Nan Wu, Fenghua Tian, Odeshnee Moodley, Bing Song, Chuanwen Jia, Jianqiang Ye, Ruina Lv, Zhi Qin, Changtian Li. Optimization of agro-residues as substrates for *Pleurotus pulmonarius* // AMB Express. 2019. Vol. 9 (1). P. 184.
 9. Panaite T.D., Turcu R.P., Soica C., Visinescu P. Nutritional parameters of eggs from laying hens fed with flaxseed meal or mixture with rapeseed meal or rice bran // Journal of Applied Animal Research. 2020. Vol. 48, iss. 1. P. 566-574.
 10. Qi Zhou, Hu Tang, Xiao Jia, Chang Zheng, Fenghong Huang, Min Zhang. Distribution of glucosinolate and pungent odors in rapeseed oils from raw and microwaved seeds // International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, iss. 1. P. 2296-2308.
 11. Safiullina A.Kh., Kainov P.A., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Shageeva A.I. Self-contained energy-saving plant for drying vegetable raw materials // 20th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM, 2020. P. 253-260.
 12. Shageeva A.I., Safin R.R., Kaynov P.A. Formation of mathematical model for the use of SHF technology in the drying of agricultural plant raw materials // International Conference on Digital Transformation: Informatics, Economics, and Education (DTIEE2023). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Washington, 2023. P. 1263717.