

Оценка эффективности использования импульсного электрического поля в процессах сушки биомассы насекомых

Канд. техн. наук **И.А. Шорсткий**, i-shorstky@mail

*Кубанский государственный технологический университет
350072, Россия, Краснодар, ул. Московская, 2*

О.С. Парняков, o.parniakov@elea-technology.com

Elea, D-49610, Квакенбрюк, Германия

С.Н. Сметана, s.smetana@dil-ev.de

*Немецкий институт пищевых технологий
D-49610, Квакенбрюк, Германия*

Исследовали эффективность использования импульсного электрического поля (ИЭП) в процессе сушки биомассы насекомых с оптимизацией технологических параметров. Оптимизацию процесса сушки проводили с использованием двухфакторного дисперсионного анализа в диапазоне прикладываемой удельной энергии обработки от 0 до 20 кДж/кг и температуре сушки 50–90°C. Установлено значительное влияние предварительной обработки ИЭП на процесс сушки биомассы с сокращением длительности сушки со 183 до 124 мин при обработке напряженностью электрического поля $E = 2$ кВ/см и удельной затрачиваемой энергией 20 кДж/кг. На основе полученных экспериментальных данных установлены оптимальные параметры процесса сушки биомассы насекомых в диапазоне температуры сушки 82–85°C и диапазоне затрачиваемой удельной энергии обработки ИЭП 4,1–6,6 кДж/кг.

Ключевые слова: импульсное электрическое поле; сушка; массообменный процесс; биомасса насекомых; оптимизация.

DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-4-12-21

Perspectives of pulsed electric field application for larvae biomass drying

Ph.D. **Ivan A. Shorstky**, i-shorstky@mail

*Kuban State University of Technology
2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russia*

Dr. Sc. **Oleksii Parniakov**, o.parniakov@elea-technology.com

Elea, D-49610, Quakenbruck, Germany

Dr. Sc. **Sergii Smetana**, s.smetana@dil-ev.de

*German Institute of Food Technologies
D-49610, Quakenbruck, Germany*

The perspectives of pulsed electric field (PEF) application for larvae biomass drying are considered. Drying process optimization was carried out using two-way analysis of variance in the range of applied specific energy input of from 0 up to 20 kJ/kg and drying temperature of from 50 up to 90°C. It was found out that application of pulsed electric field treatment allowed marked decreasing of larvae biomass drying time from 183 to 124 minutes for the samples treated with electric field intensity of $E = 2$ kV/cm and specific energy of 20 kJ/kg. Based on the obtained experimental data the optimal drying and PEF treatment parameters for larvae biomass were determined for the ranges of drying temperature – 82–85°C and specific energy input – 4.1–6.6 kJ/kg.

Keywords: pulsed electric field; drying; mass transfer process; larvae biomass; optimization.

Введение

Тренды и технологии в производстве и использовании альтернативных источников белка находятся в центре внимания исследователей по всему миру [1, 2]. Биомасса насекомых в данной задаче представляет одну из наиболее перспективных и многообещающих стратегий развития. Ежегодно увеличиваются объемы производства биомассы насекомых в странах Европы и Азии [3, 4], создаются новые технологические компании по ее переработке [5]. Столь импульсивное развитие данного направления связано с высоким содержанием сырого белка (от 40 до 70%) и липидов (до 36%), которые могут быть извлечены и использованы для различных целей [5]. Кроме того, большое значение имеет переваримость

белка, этот показатель для белка насекомых составляет 86–89%, что значительно выше многих растительных белков. Отдельные аминокислоты, масло и хитозан могут быть получены из биомассы домашней мухи; кроме того, альтернативный кормовой белок может выступать в качестве корма для сельскохозяйственных животных [5, 6]. Разработка нетрадиционных методов получения кормового белка с использованием личинок насекомых с применением органических отходов животноводства представляется весьма перспективным направлением. Исследования показывают, что синантропные виды мух наиболее пригодны для этой цели [7–9]. Например, селен из *Hermetia illucens* является неотъемлемым компонентом более чем 30 жизненно важных биологически активных соединений, присутствующих у животных, и входит в состав активных центров ферментов. У животных кобальт также активизирует ряд ферментов, что, в свою очередь, улучшает использование белка, кальция и фосфора, усиливает рост молодняка и повышает естественную сопротивляемость организма различным заболеваниям. Микроэлементы селен и кобальт оказывают существенное влияние на физиологические и продуктивные показатели сельскохозяйственных животных. Кроме того, большое значение имеет оптимальное обеспечение животных этими микроэлементами.

Основным способом получения масла личинок является шнековое прессование с предварительной сушкой до низкой влажности (около 5 мас.%) [10]. Вспомогательные технологии такие, как обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) могут ускорить процесс сушки [11]. Учитывая, что технологии обработки ИЭП относятся к разряду «зеленых», их использование к новым видам белкового сырья представляет передовую задачу.

Для более глубокого понимания процесса сушки насекомых, предварительно обработанных импульсным электрическим полем, важно изучить степень влияния обработки как на внутреннюю структуру, так и на процессы тепломассопереноса.

Цель данной работы – изучение и оптимизация влияния параметров процесса сушки с предварительной обработкой ИЭП с применением двухфакторного анализа 3². Кроме того, было изучено влияние различных параметров, включая температуру сушки и входную энергию импульсного электрического поля, на эффективность сушки и конечную температуру биомассы насекомых.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследования была выбрана биомасса насекомых в виде живых личинок мух Черная львинка (*Hermetia Illucens*), приобретенных у производителя Greenleaf (Ахаус, Германия). Все образцы хранились в защищенном от солнца месте при температуре 4°C до последующего использования.

Предварительная обработка ИЭП. Предварительно очищенная от сора и примесей биомасса насекомых массой 300 г сначала промывалась водой и далее помещалась в камеру обработки ИЭП. К биомассе добавляли водопроводную воду в объеме 500 мл для заполнения камеры обработки.

Обработку ИЭП проводили с использованием системы оборудования PEF-Cellcrack II (Elea Vertriebs-und Vermarktungsgesellschaft mbH, Германия). Система обеспечивала высоковольтный экспоненциальный спад, монополярные импульсы с интервалом 0,5 с (2 Гц) и длительностью импульса 40 мс. Импульсы подавались на продукт в камере периодической обработки, состоящей из двух параллельных электродов из нержавеющей стали, расположенных на расстоянии 100 мм.

Величину затрачиваемой энергии на обработку (кДж/кг), регулировали с помощью количества направляемых импульсов. Удельный расход энергии ИЭП $W_{\text{иэп}}$ (кДж/кг) и напряженность электрического поля E (кВ/см) рассчитывались по следующим уравнениям

$$W_{\text{иэп}} = \frac{U^2 C_n}{2m};$$

$$E = \frac{U}{d},$$

где n – число импульсов (–);

m – масса обрабатываемых образцов, кг;

U – напряжение, кВ;

d – расстояние между электродами, см;

C – емкость (1 мкФ). После обработки образцы помещали в сито для уменьшения избытка воды.

В данном исследовании были применены напряженности электрического поля 2 и 3 кВ/см. Удельная энергия варьировалась от 0 (без обработки) до 20 кДж/кг.

Сушка биомассы. После первоначальной подготовки, включающей обработку ИЭП и удаления избыточной влаги с поверхности биомассы, 10 г личинок от каждой обработки измельчали и использовали для определения исходного содержания влаги M_0 . Измерение содержания влаги производилось дважды с помощью влагомера (VPB-10, Allscales Europe, Нидерланды). Перед процессом сушки образцы были равномерно распределены по контейнерам, структура которых обеспечивала равномерную сушку, и идентифицированы в зависимости от применяемых обработок (рисунок 1).



Рисунок 1 – Образцы биомассы в контейнерах для сушки
 Figure 1. Biomass samples in drying containers

Сушильные контейнеры взвешивались с помощью электронных весов (Kern 440-49A, Kern & Sohn GmbH, Германия). Процесс сушки проводили в предварительно нагретой сушильной камере (FP 240, Binder GmbH, Германия) при постоянной температуре 90°C и скорости воздуха 0,2 м/с. Для получения кривой сушки все контейнеры взвешивали с интервалами 10; 20; 30 и 60 мин до достижения равновесного содержания влаги.

Расчет влажностной нагрузки M_t в момент времени t процесса сушки, выражающей влажность образца в пересчете на сухую массу, производили с помощью уравнения [12]

$$M_t = \frac{m_t - m_s}{m_s},$$

где m_t – масса образца в момент времени t ;

m_s – масса полностью высушенного образца, г.

Расчетные значения M_t для каждого параметра ИЭП были усреднены, и были рассчитаны стандартные отклонения.

Скорость сушки (DR) биомассы личинок рассчитывали из данных потери влаги в единицу времени, которая была рассчитана с использованием уравнения

$$DR = \frac{m_t^1 - m_t^2}{t_1 - t_2},$$

где t_1 и t_2 представляют время сушки;

m_t^1 и m_t^2 – содержание влаги в момент времени t_1 и t_2 соответственно.

Удельный расход энергии на процедуру сушки W_{spec_drying} рассчитывался как отношение потребляемой энергии к общей массе воды, удаляемой из личинок при конвективной сушке

$$W_{spec_drying} = \frac{N_{dr} \cdot \tau}{m_{water}},$$

где N_{dr} – потребляемая мощность сушилки, кВт,

τ – время сушки, ч;

m_{water} – масса удаленной влаги, кг.

Коэффициент диффузии. Расчет коэффициента диффузии выполнен с целью получения информации о влиянии обработки ИЭП на массообменные процессы в тканях личинок при сушке.

Эффективные коэффициенты диффузии воды и ионов D_w и D_i для каждого образца вычислялись с помощью средств MS Excel в соответствии с упрощенным вторым законом Фика для бесконечной пластины толщиной h [13]

$$y_{w,i} = y_{w,i}^{\infty} \left(1 - \sum_{n=0}^{n_m} (2n + 1)^{-2} \exp[-(2n + 1)^2 t / \tau_{w,i}] / \sum_{n=1}^{n_m} (2n + 1)^{-2} \right),$$

где $y_{w,i}^{\infty}$ – максимальный уровень переменной в пределе $t \rightarrow \infty$;

$\tau_{w,i} = (h/\pi) \cdot 2/D_{w,i}$, характерное времени диффузии;

h – толщина пластины, м;

$D_{w,i}$ – эффективный коэффициент диффузии, м²/с;

индексы w и i относятся к временным зависимостям диффузии воды и ионов соответственно;

n_m – максимальное число членов в ряду.

Факторный эксперимент. Исходные данные для определения влияния факторов температуры сушки ($X_1 = 50; 70$ и 90°C) и удельных затрат энергии на обработку ИЭП ($X_2 = 0; 10$ и 20 кДж/кг) на критерии оценки: удельное энергопотребление процесса сушки Y_1 (до достижения целевого содержания влаги 5%) и максимальная температура биомассы личинок Y_2 представлены в таблице 1. Известно, что при извлечении масла из биомассы насекомых необходим предварительный нагрев [10]. Для минимизации стадии нагрева для дальнейшей обработки средняя температура биомассы была установлена в качестве второго критерия с использованием ранее полученных данных [10]. Последующий отбор критериев проводился в соответствии с работами [14–16], а также для получения наибольшего положительного эффекта на процесс сушки.

Таблица 1. Исходные данные факторного эксперимента

Table 1. Initial data for the factorial experiment

Условия планирования	Кодированное значение	Значения факторов в точках плана	
		X_1	X_2
		температура сушки, T_{DR} [°C]	удельный расход энергии ИЭП, $W_{spec\ drying}$ [кДж/кг]
основной уровень	0	70	10
интервал	Δ	20	10
верхний уровень	+1	90	20
нижний уровень	-1	50	0

Все факторы совместимы и не коррелируют друг с другом. Математическая модель изучаемого процесса представляет с помощью полинома второй степени [17]

$$Y = \mu_0 + \sum_{i=1}^z \mu_i X_i + \sum_{i=1}^z \mu_{ii} X_i^2 + \sum_{i \leq j} \mu_{ij} X_i X_j,$$

где μ_0 – свободный член уравнения (общая средняя величина отклика);

X – масштабированные значения факторов, определяющих функцию отклика;

μ_{ij} – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов;

i, j – индексы факторов;

z – число факторов.

Задача оптимизации сушки была сформулирована следующим образом: найти диапазон параметров из факторной конфигурации, обеспечивающий минимальное энергопотребление процесса сушки и максимальную температуру нагрева материала, ограниченную температурой денатурации белка ($T_{lim} = 95^\circ\text{C}$), которую можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 q &= q(Y_1, Y_2) \xrightarrow{x \in D} opt; \\
 D: Y_1(X_1, X_2) &\xrightarrow{x \in D} min; \\
 Y_2(X_1, X_2) &\xrightarrow{x \in D, T_{lim} \leq 95^\circ C} max; \\
 Y_i &\geq 0, i = \overline{1,2}; X_j \leq [-1; 1], j = \overline{1,2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Электронная микроскопия. Для оценки влияния ИЭП на структурные изменения материала насекомых применяли средства электронной микроскопии. Для этого образцы замораживали в переохлажденном жидком азоте и вводили в криогенную систему подготовки (Emitech K 1250) для удаления свободной воды путем сублимации. Затем образцы фиксировались в держателе для образцов SEM специальным клеем (OCT compound). Подготовленные образцы переносили в сканирующий электронный микроскоп (Jeol JSM 6460 LV) и анализировали при напряжении 15 кВ.

Статистическая обработка данных. Программа Expert design (версия 10.0.2, США) использована для анализа экспериментальных результатов. Для сопоставления модели и экспериментальных данных был использован множественный регрессионный анализ. Адекватность разработанных моделей оценивалась с помощью F-критерия и коэффициента корреляции (R^2). Для получения данных сушки использовалось программное обеспечение MagicPlot v. 2.9. Все эксперименты и измерения характеристик были повторены с использованием, по крайней мере, пяти повторов.

Результаты и их обсуждение

Поперечный срез образцов личинок мух до и после процесса сушки показан на рисунке 2. Структура кожицы насекомого после сушки стала более плотной. Кроме того, расстояние между кожицей и внутренним ядром насекомого уменьшилось, что связано с наличием усадки биоматериала.

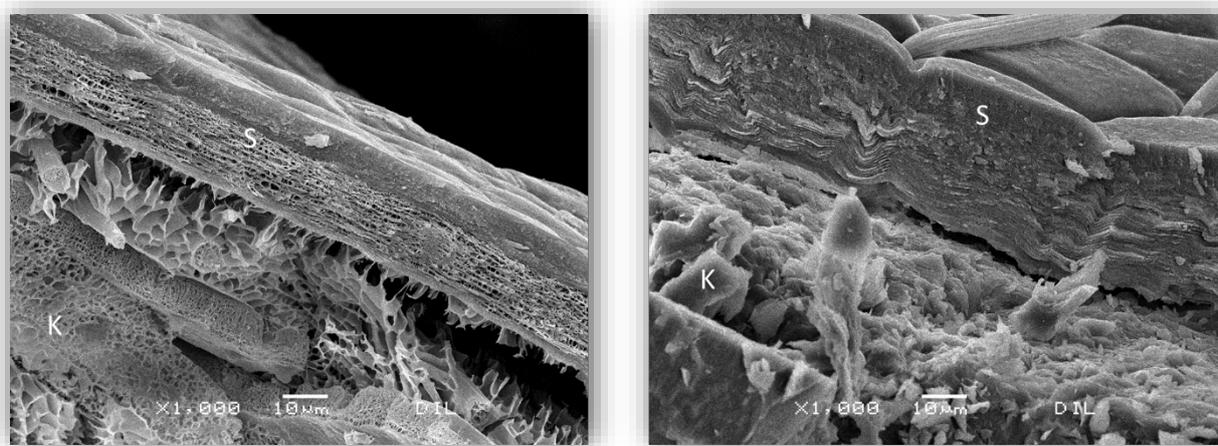


Рисунок 2 – Изображение сканирующего электронного микроскопа среза единичной личинки до (слева) и после сушки (справа) при увеличении $\times 1000$: S – поверхностная оболочка, K – ядро личинки
 Figure 2. Scanning electronic microscopy of a single larva before (left) and after (right) drying at 1000 x magnification: S – larva surface K – larva nucleus

Экспериментальные результаты показали, что обработка ИЭП позволяет значительно сократить время сушки. Типичные кривые сушки для образцов без обработки (линия 3) и обработанных технологией ИЭП образцов насекомых (линия 1 и 2) представлены на рисунке 3. Характеристика полученных кривых сушки указывает на то, что как обработанные, так и необработанные ИЭП образцы соответствуют типичному диффузионно-управляемому механизму сушки. Кривая сушки проходит через стадию нагрева, стадию постоянной скорости сушки и стадию первой падающей скорости.

Общее время сушки всех образцов составило 4 ч. Потребовалось 183 мин, чтобы достичь величины влажности 0,02 для образца без обработки ИЭП и 124 мин для образца, обработанного ИЭП при параметрах обработки $E = 2$ кВ/см и $W = 20$ кДж/кг. Конечное содержание влаги $1,5 \pm 0,2\%$ было получено с помощью анализатора влажности. Наиболее значительное влияние обработки ИЭП на скорость сушки наблюдалось для протокола № 3 ($E = 2$ кВ/см и $W = 20$ кДж/кг).

Влияние обработки ИЭП с напряженностью электрического поля 3 кВ/см на массоперенос было меньше, чем при напряженности электрического поля 2 кВ/см. Важно отметить, что этот эффект не был монотонным в зависимости от напряженности электрического поля. В частности, при напряженности электрического поля 2 кВ/см и приложенной энергии 5; 10 и 20 кДж/кг отмечалось резкое увеличение скорости сушки. При напряженности электрического поля 3 кВ/см и приложенной энергии 5; 10 и 20 кДж/кг скорость сушки стала очень близкой к протоколу № 1 ($E = 2$ кВ/см и 5 кДж/кг). Это может быть связано с негативным влиянием электрического поля высокой интенсивности на степень разрушения клеточной структуры, о котором сообщают некоторые авторы [18–20].

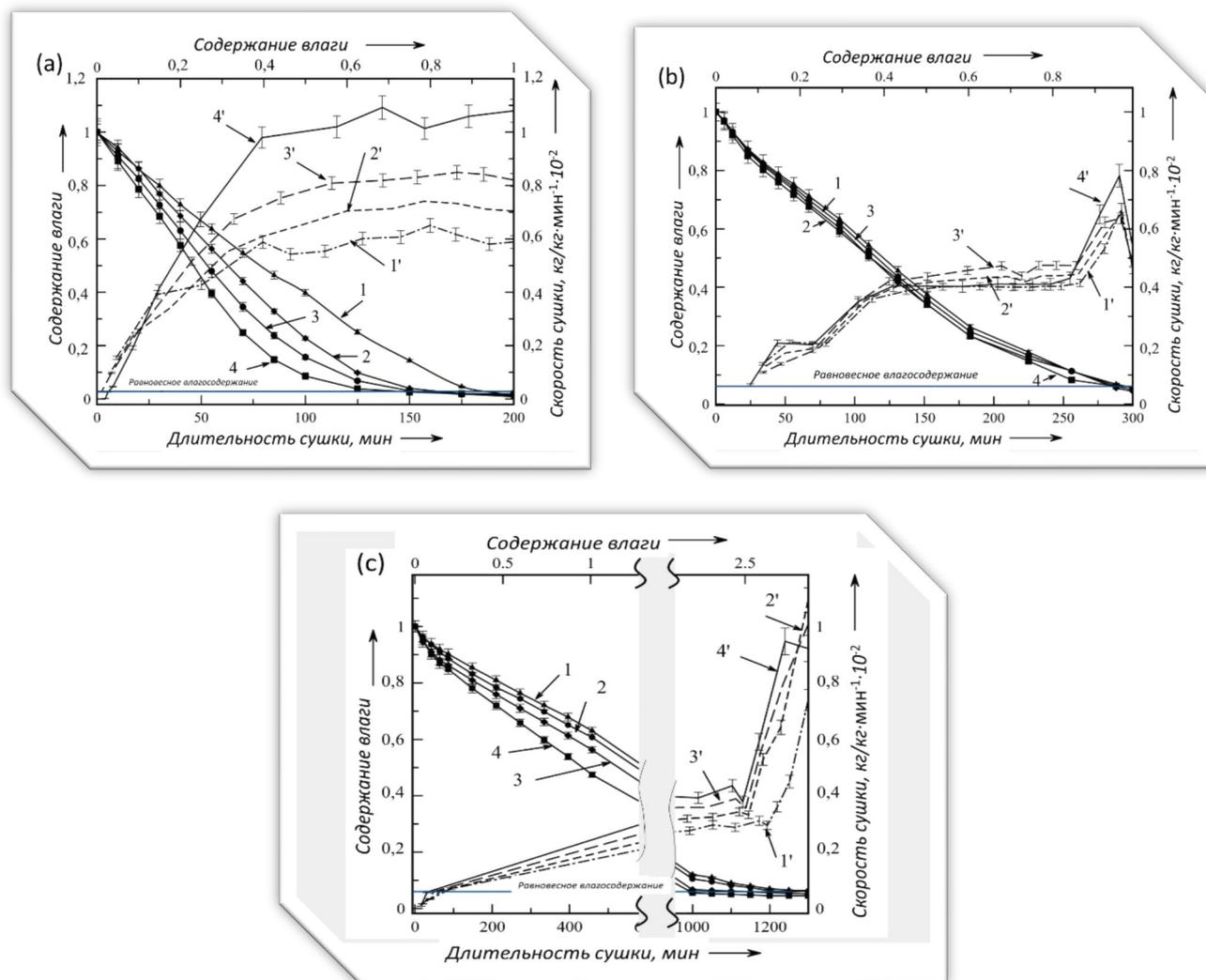


Рисунок 3 – Кривая сушки и кривая скорости сушки ('), полученные при температуре сушки 90°C (а), 70°C (б) и 50°C (с): 1 – обработка ИЭП при параметрах $E = 2$ кВ/см, 5 кДж/кг; 2 – обработка ИЭП при параметрах $E = 2$ кВ/см, 20 кДж/кг; 3 – образец без обработки

Figure 3. The curves for drying and drying rate (') at the drying temperatures of 90°C (a), 70°C (b), and 50°C (c): 1 – PEF treatment at $E = 2$ kV/cm, 5 kJ/kg; 2 – PEF treatment at $E = 2$ kV/cm, 20 kJ/kg; 3 – a sample without treatment

Кривые скорости сушки показывают, что предварительная обработка ИЭП привела к увеличению скорости сушки (рисунок 3 кривые 1'; 2'; 3'). В начальный момент сушки величина скорости сушки проходит через максимум, в момент удаления избыточной поверхностной влаги и далее монотонно падает.

Явление разрушения клеточной структуры биоматериала насекомых, с одной стороны, приводит к ускорению процесса сушки, а с другой стороны, может привести к снижению скорости сушки при более высокой напряженности приложенного электрического поля. Наибольшая скорость сушки устанавливается при постоянном периоде сушки в диапазоне $0,4 < M_t < 1$ и в период падающей скорости $0,1 < M_t < 0,4$. В диапазоне скорости сушки $0,02 < M_t < 0,1$ скорость сушки для всех образцов становится одинаковой. Максимальная скорость сушки для образца без обработки ИЭП составляла $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, в то время как максимальная скорость сушки для образца с обработкой ИЭП была установлена на уровне $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$.

Таблица 2. Параметры сушки для различных протоколов обработки ИЭП

Table 2. Drying parameters for various protocols of PEF treatment

Параметры	№ протокола						Контрольный образец
	1	2	3	4	5	6	
	E = 2 кВ/см, W = 5 кДж/кг	E = 2 кВ/см, W = 10 кДж/кг	E = 2 кВ/см, W = 20 кДж/кг	E = 3 кВ/см, W = 5 кДж/кг	E = 3 кВ/см, W = 10 кДж/кг	E = 3 кВ/см, W = 20 кДж/кг	
начальное влагосодержание, %	68,94	69,23	69,76	69,11	68,99	69,24	69,54
скорость сушки при постоянном периоде, кг/кг·с ⁻¹	1,37·10 ⁻⁴	1,65·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴	1,52·10 ⁻⁴	1,34·10 ⁻⁴	1,57·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁴
критическое влагосодержание, %	31,2	39,8	37,5	40,1	40,0	43,1	41,2
равновесная влажность, %	1,73	1,69	1,72	1,77	1,82	1,84	1,91
время достижения равновесного влагосодержания, мин	159	128	124	152	153	149	183

Из полученных данных, представленных в таблице 2, можно сделать вывод, что температура сушки и величина затрачиваемой энергии ИЭП продемонстрировали наиболее значительное влияние на скорость и продолжительность процесса сушки. При повышении температуры сушки с 50 до 90°C длительность сушки сокращается более чем в 9 раз.

Эффективный коэффициент диффузии. На рисунке 4 представлена зависимость эффективного коэффициента диффузии влаги D_{eff} для необработанного и обработанных ИЭП образцов насекомых при различных удельных энергозатратах и напряженностях электрического поля. Обнаружена положительная тенденция увеличения коэффициента диффузии при увеличении как напряженности электрического поля, так и удельного расхода энергии с 5 до 20 кДж/кг. Значение коэффициента диффузии увеличилось на $4,49E^{-10}$ м²/с (70,3%) и $1,92E^{-10}$ м²/с (38,7%) для $E = 2$ кВ/см при 20 кДж/кг и $E = 3$ кВ/см при 20 кДж/кг соответственно по сравнению с необработанным ИЭП образцом.

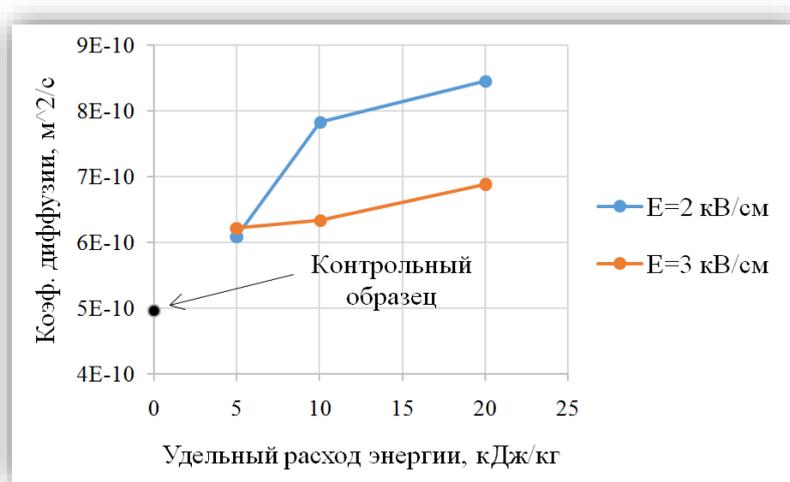


Рисунок 4. Зависимость эффективного коэффициента диффузии от удельного расхода энергии при различной величине напряженности электрического поля

Figure 4. The dependence of diffusion effective coefficient on specific energy consumption at various values of electric field intensity

Оптимизация сушки. В качестве данных параметра Y_2 для поставленной задачи были использованы данные, полученные авторами в предыдущей работе [10]. С помощью регрессионного анализа при использовании программного обеспечения Design Expert были получены уравнения регрессии для Y_1 и Y_2

$$Y_1 = 165,11 - 3,89X_1 - 0,708X_2 + 0,0072X_1X_2 + 0,023X_1^2 + 0,0029X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 56,79 - 1,29X_1 + 0,529X_2 - 0,008X_1X_2 + 0,012X_1^2 - 0,0066X_2^2 \quad (3)$$

Из полученных регрессионных уравнений определен наиболее значимый фактор – температура сушки (X_2). Минус перед коэффициентом с линейными членами уравнения указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра уменьшается. Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (2) – $\mu_1/\mu_2 = 5,49$ и уравнении (3) – $\mu_1/\mu_2 = 2,43$. Полученные уравнения (2) и (3) нелинейные.

Полученные в девяти экспериментах данные процесса сушки и математическая модель оптимизации процесса сушки позволяют рассчитать величины энергозатрат сушки и максимальную температуру материала в пределах выбранных интервалов изменения входных факторов (рисунок 5). Оптимальные условия были определены на основе минимизации величины энергопотребления процесса сушки при максимальном повышении температуры материала (ограниченным 95°C).

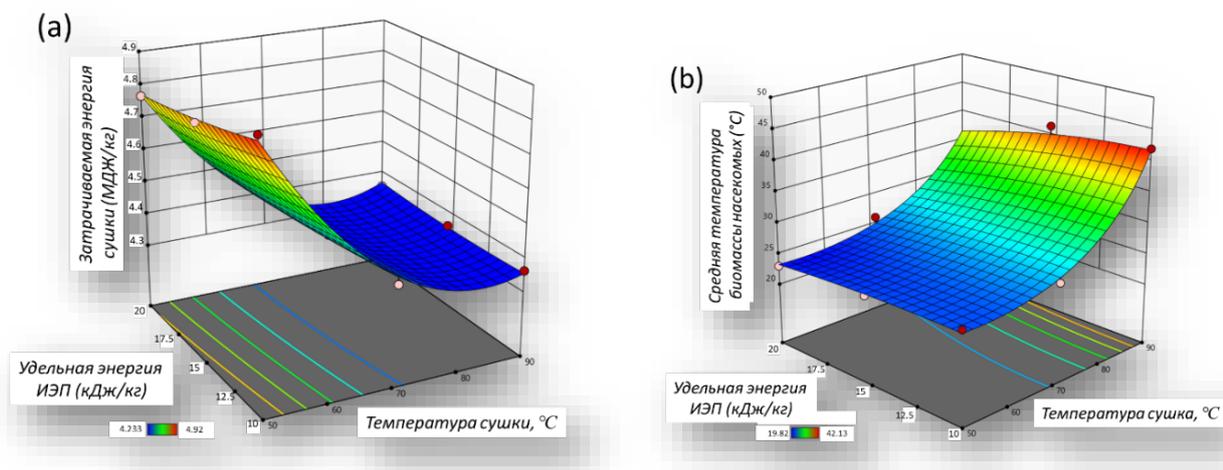


Рисунок 5 – Графики поверхности отклика затрачиваемой энергии ИЭП и температуры сушки на потребление энергии сушки (а) и температуру материала (б)

Figure 5. The curves of PEF energy response surface and drying temperature to the drying energy consumption (a) and the temperature of the material (b)

Для всех входных факторов (X_1 и X_2) различия в критериях оптимизации значительны. С помощью методологии поверхности отклика и задачи оптимизации по уравнению (1) был получен оптимальный диапазон коэффициентов: $X_1 = 4.1...6,6$ кДж/кг; $X_2 = 82...85^\circ\text{C}$. Стандартное отклонение не превышало 4% (таблица 3 и 4).

Таким образом, решена задача оптимизации, позволившая с помощью компромиссного решения выделить рациональный диапазон изменения входных факторов по двум критериям.

Таблица 3. Анализ ANOVA для функции отклика Y_1

Table 3. ANOVA analysis for response function Y_1

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	964,78	5	192,96	183,85	0,0006
A-Drying temperature	769,91*	1	769,91	733,56	0,0001*
B-PEF energy	13,30*	1	13,30	12,67	0,0378*
AB	8,22	1	8,22	7,83	0,0680
A ²	173,19*	1	173,19	165,01	0,0010*
B ²	0,1669	1	0,1669	0,1590	0,7167
Residual	3,15	3	1,05		
Cor Total	967,93	8			
C.V.			9,25		
R²			0,9967		

* $p \leq 0,05$

Таблица 4. Анализ ANOVA для функции отклика Y_2 Table 4. ANOVA analysis for response function Y_2

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	485,03	5	97,01	49,65	0,0044
A-Drying temperature	392,04*	1	392,04	200,67	0,0008*
B-PEF energy	28,17*	1	28,17	14,42	0,0321*
AB	12,25	1	12,25	6,27	0,0874
A ²	51,68*	1	51,68	26,45	0,0142*
B ²	0,8889	1	0,8889	0,4550	0,5483
Residual	5,86	3	1,95		
Cor Total	490,89	8			
C.V.			4,60		
R²			0,9881		

*p ≤ 0,05

Заклучение

В работе представлены данные об эффективности влияния предварительной обработки ИЭП на процесс сушки биомассы насекомых. В ходе исследования определено влияние обработки ИЭП на структурные особенности биомассы насекомых с использованием средств электронной микроскопии. Обработка импульсным электрическим полем влияет на эффективность сушки и позволяет снизить длительность процесса на 32% при параметрах обработки $E = 2$ кВ/см и $W = 20$ кДж/кг. Решена задача оптимизации процесса сушки биомассы насекомых методом поверхности отклика с использованием фактора температуры сушки и затрачиваемой удельной энергии обработки ИЭП. Установлено, что диапазон температуры сушки 82–85°C и диапазон удельной энергии ИЭП 4,1–6,6 кДж/кг является оптимальным для сушки личинок с предварительной ИЭП обработкой.

Литература/References

- Charlton A.J., Dickinson M., Wakefield M.E., Fitches E., Kenis M., Han R., Zhu F., Kone N., Grant M., Devic E., et al. Exploring the chemical safety of fly larvae as a source of protein for animal feed. *J. Insects as Food Feed.* 2015, V. 1, pp. 7–16.
- Rehman K. ur; Liu X., Wang H., Zheng L., Rehman, R. ur; Cheng X., Li Q., Li W., Cai M., Zhang J., et al. Effects of black soldier fly biodiesel blended with diesel fuel on combustion, performance and emission characteristics of diesel engine. *Energy Convers. Manag.*, 2018, V. 173, pp. 489–498.
- Wang H., Rehman K.U., Liu X., Yang Q., Zheng L., Li W., Cai M., Li Q., Zhang J., Yu Z. Insect biorefinery: A green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein. *Biotechnol. Biofuels.* 2017, 10, 304.
- Diener S., Zurbrugg C., Gutierrez F.R., Nguyen D.H., Morel A., Koottatep T., Tockner K. Black soldier fly larvae for organic waste treatment prospects and constraints. *Proceedings of the 2nd International Conference on Solid Waste Management in Developing Countries* (13–15 February 2011, Bangladesh). Khulna, 2011, pp. 52–59.
- Makkar H.P.S., Tran G., Heuzé V., Ankers P. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2014, V. 197, pp. 1–33.
- Belluco S., Losasso C., Maggioletti M., Alonzi C.C., Paoletti M.G., Ricci A. Edible insects in a food safety and nutritional perspective: A critical review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2013, V. 12, Is. 3, pp. 296–313.
- Smith R., Pryor R.E. PROteINSECT- do European citizens accept the use of insects for animal feed & human food? *Abstract book Conference "Insects to Feed the World"* (14–17 May 2014, Netherlands). Wageningen, 2014, p. 31.
- Adesulu E.A. Use of housefly maggots as a fishmeal replaces in tilapia culture: A recent vogue in Nigeria. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Tilapia Aquaculture*; Rio de Janeiro, 2000; pp 138–143.
- Adeniji A. Effect of replacing groundnut cake with maggot meal in the diet of broilers. *Int. J. Poult. Sci.* 2007, V. 6, pp. 822–825.
- Shorstkii I., Comiotto Alles M., Parniakov O., Smetana S., Aganovic K., Sosnin M., Heinz V. Optimization of pulsed electric field assisted drying process of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Drying Technology.* 2020, pp. 1–9.
- Barba F.J., Parniakov O., Pereira S.A., Wiktor A., Grimi N., Boussetta N., Saraiva J.A., Raso J., Martin-Belloso O., Witrowa-Rajchert D., Lebovka N., Vorobiev E. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Res. Int.* 2015, V. 77, Part 4, pp. 773–798.
- Gehrmann D., Esper G., Schuchmann H. *Trocknungstechnik in Der Lebensmittelindustrie.* Behrs Verlag, Hamburg, 2009, 583 p.

13. Rastogi N.K., Raghavarao K., Niranjan K., Knorr D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends Food Sci. Technol.* 2002, V. 13, Is. 2, pp. 48–59.
14. Bußler S., Rumpold B.A., Jander E., Rawel H.M., Schlüter O.K. Recovery and techno-functionality of flours and proteins from two edible insect species: Meal worm (*Tenebrio Molitor*) and black soldier fly (*Hermetia Illucens*) larvae. *Heliyon.* 2016, V. 2, Is. 12, e00218.
15. De Marco M., Martínez S., Hernandez F., Madrid J., Gai F., Rotolo L., Belforti M., Bergero D., Katz H., Dabbou S., et al. Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio Molitor* and *Hermetia Illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2015, V. 209, pp. 211–218.
16. Matthäus B., Piofczyk T., Katz H., Pudel F. Renewable resources from insects: Exploitation, properties, and refining of fat obtained by cold-pressing from *Hermetia Illucens* (black soldier fly) larvae. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2019, V. 121, Is. 7, 1800376.
17. Ambler G., Royston P. Fractional polynomial model selection procedures: Investigation of type i error rate. *J. Stat. Comput. Simul.* 2001, V. 69, Is. 1, pp. 89–108.
18. Ostermeier R., Giersemehl P., Siemer C., Töpfl S., Jäger H. Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering.* 2018, V. 237, pp. 110–117.
19. Barba F., Parniakov O., Wiktor A. (Eds). *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow.* Academic Press. 2020, 352 p.
20. Shorstkii I., Koshevoi E. Drying technology assisted by nonthermal pulsed filamentary microplasma treatment: Theory and practice. *ChemEngineering.* 2019, V. 3, no. 4, pp. 91–103.

Статья поступила в редакцию 06.10.2020