

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.11>

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ БИОРАЗЛАГАЕМОГО ПЛАСТИКА БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ НА ОСНОВЕ ФИТОМАССЫ ЛИСТЬЕВ ФИНИКОВОЙ ПАЛЬМЫ**

Научная статья

**Артемов А.В.<sup>1,\*</sup>, Власов Н.Г.<sup>2</sup>, Ершова А.С.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6900-3435;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-3417-088X;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6248-0028;

<sup>1,2,3</sup> Уральский Государственный Лесотехнический Университет, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (artemovav[at]mail.ru)

**Аннотация**

Ранее выполненными исследованиями была установлена возможность получения материалов на основе лигнин-целлюлозосодержащего сырья в виде фитомассы листьев финиковой пальмы. Результаты исследований показали, что данные материалы – пластики без связующих веществ (ПБС) – на основе фитомассы финиковой пальмы обладают требуемыми физико-механическими показателями. Целью данной работы было определение оптимальных условий получения ПБС с использованием программного комплекса MS Excel, а также оценка ПБС полученных при оптимальных условиях на физико-механические свойства и оценка биоразлагаемости. Выполненные исследования показали, что полученные экспериментально-статистические модели высоко согласуются с полученными экспериментальными данными. Выполненная оценка биоразлагаемости ПБС по отношению к почво-грунту показала, что данные материалы подвержены деградации в естественных условиях.

**Ключевые слова:** пластики, финиковая пальма, растительное сырье, оптимизация, свойства, биоразлагаемость.

**OPTIMISATION OF BINDER-FREE BIODEGRADABLE PLASTIC PRODUCTION MODES BASED ON DATE PALM LEAF PHYTOMASS**

Research article

**Artemov A.V.<sup>1,\*</sup>, Vlasov N.G.<sup>2</sup>, Yershova A.S.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6900-3435;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-3417-088X;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6248-0028;

<sup>1,2,3</sup> Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (artemovav[at]mail.ru)

**Abstract**

Earlier studies have established the possibility of obtaining materials based on lignin-cellulose-containing raw materials in the form of date palm leaf phytomass. The results of the research showed that these materials – binder-free plastics (BPs) – based on date palm leaf phytomass have the required physical and mechanical properties. The aim of this work was to determine the optimum conditions for production of BPs using MS Excel software, as well as to evaluate those obtained under optimum conditions for physical and mechanical properties and biodegradability evaluation. The performed research showed that the received experimental and statistical models are highly consistent with the obtained experimental data. The assessment of BPs biodegradability in relation to soil has shown that these materials are subject to degradation in natural conditions.

**Keywords:** plastics, date palm, plant raw materials, optimization, properties, biodegradability.

**Введение**

В настоящее время в различных сферах народного хозяйства широкое применение получили композиционные материалы, в первую очередь на основе синтетических полимеров или полимеров природного происхождения с применением синтетических матриц и смол. Большой объем применения данных композитов не позволяет проводить их полноценную переработку, потому что отсутствуют действующие технологические линии, либо условия для их переработки. Кроме того, сама переработка является потенциально опасной для окружающей среды [1].

Существующая экологическая ситуация обязывает проводить поиск альтернативных путей в решении данного острого вопроса.

Альтернативой могут выступать пластики без использования связующих веществ (ПБС) на основе лигнинцеллюлозосодержащего сырья (в первую очередь древесного), то есть сырья, в составе которого имеется относительно высокое содержание целлюлозы и лигнина [2].

В исследовательских работах зарубежных и отечественных ученых, посвященных разработке и изучению композиционных материалов на основе лигниноцеллюлозосодержащего сырья, большое внимание уделяется вопросам, связанным с использованием не востребуемых отходов в виде различных растительных остатков [3], [4]. Основные доводы о применении такого рода сырья – это природный ресурс возобновляемой сырьевой базы, экологическая чистота самого изделия, а также экологическая безопасность его производства и утилизации при утрате потребительских свойств (высокий потенциал к биоразложению в природных условиях).

В нашей стране наибольшее распространение получило растительное сырье в виде сельскохозяйственных и аграрных отходов (шелуха пшеницы, плодовые оболочки риса и проч.). Недостатками такого сырья можно определить как концентрацию в местах его произрастания и переработки (преимущественно в районах с благоприятными условиями сельского хозяйства), невысокую долю выхода в результате подготовки, а также высокую степень загрязнённости минеральными составляющими [5].

Одной из альтернатив растительного сырья можно рассматривать отходы на основе фитомассы финиковой пальмы, которая на сегодняшний день широко культивируется на побережье Крыма и ряда мест побережья Черного моря Краснодарского края [6].

В работах [7], [8], [9], выполненных зарубежными исследователями установлено, что использование листьев и древесины финиковой пальмы, позволяет получать различные композиционные материалы с высокими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами.

Выполненные исследования [10], [11], [12] показали, что в листьях финиковой пальмы содержится 40-55% целлюлозы, 13-20% гемицеллюлоз и 15-37% лигнина, а в стебле 38-45% целлюлозы, 28-33% гемицеллюлоз и 12-27% лигнина.

На основании высоких показателей лигноцеллюлозосодержащих соединений, в поисковой работе [13] была выполнена оценка возможности получения ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы путем компрессионного горячего прессования. В вышеуказанной работе [13], с использованием метода математического планирования было изучено влияние технологических факторов прессования на физико-механические свойства получаемого материала и получены экспериментально-статистические модели, которые являются исходными данными для выполнения оптимизации данного технологического процесса.

На основании полученных ранее данных, в данной работе была поставлена цель – проведение оптимизации процесса получения ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы с целью установления рациональных физико-механических свойств, а также предварительная оценка их потенциала к деградации в естественных условиях по отношению к почво-грунту.

#### Методы и принципы исследования

В качестве исходного сырья использовалась фитомасса листьев финиковой пальмы (Phoenix). Исходное сырье было предварительно очищено (промыто) от минеральных веществ и примесей, фракционировано и пропущено через сито с диаметром отверстия 1,2 мм. Определение компонентного состава исходного пресс-сырья осуществлялось согласно ГОСТ 16932, ГОСТ 11960 и метода Кюршнера-Хоффера.

Из пресс-сырья влажностью 6-18% ( $Z_1$ ) была изготовлена [13] серия образцов методом горячего компрессионного прессования при давлении 40 МПа, температуре 155-185 °С ( $Z_2$ ), продолжительностью прессования и охлаждения в течение 10 минут. Кондиционирование осуществлялось в комнатных условиях в течение 24 ч.

У полученных образцов были исследованы физико-механические свойства [13]:

- $y_1$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;
- $y_2$  – модуль упругости при изгибе, МПа;
- $y_3$  – прочность при изгибе, МПа;
- $y_4$  – твёрдость по Бринеллю, МПа;
- $y_5$  – число упругости, %;
- $y_6$  – водопоглощение за 24 часа, %;
- $y_7$  – разбухание по толщине за 24 часа, %;
- $y_8$  – ударная вязкость, кДж/м<sup>2</sup>.

Экспериментально-статистические модели были получены [13] с использованием метода математического планирования. Адекватность полученных зависимостей варьируемых параметров оптимизации для применения уравнений для описания изучаемых процессов влияния переменных факторов на параметры оптимизации осуществлялась по коэффициенту детерминации, который был принят  $R^2 \geq 0,92$ :

$$y_2 = 19371,93 - 2373,63 \cdot Z_1 + 69,23775 \cdot Z_2 - 16,77507 \cdot Z_1^2 - 0,892901 \cdot Z_2^2 + 16,06875 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=0,96);$$

$$y_3 = 113,8045 + 7,261705 \cdot Z_1 - 1,85837 \cdot Z_2 - 0,14522 \cdot Z_1^2 + 0,006765 \cdot Z_2^2 - 0,0225 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=0,96);$$

$$y_6 = -55,501 - 3,56023 \cdot Z_1 + 1,804655 \cdot Z_2 + 0,295861 \cdot Z_1^2 - 0,006 \cdot Z_2^2 - 0,01875 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=0,93);$$

$$y_7 = 927,127 - 10,2988 \cdot Z_1 - 9,36077 \cdot Z_2 + 0,286456 \cdot Z_1^2 + 0,025389 \cdot Z_2^2 + 0,018125 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=0,92);$$

Оптимальный режим прессования получения ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы определялся исходя из условий максимальной прочности при изгибе ( $y_3 \rightarrow \max$ ) и минимального водопоглощения ( $y_6 \rightarrow \min$ ) с использованием средств ПП "Microsoft Excel".

Исходные данные и ограничения принятые для выполнения оптимизации с учетом данных полученных в работе [13]:

- $6 \leq Z_1 \leq 18$  (%);
- $155 \leq Z_2 \leq 185$  (°С);
- $4713 \leq y_2 \leq 8750$  (МПа);
- $5,7 \leq y_3 \leq 18,1$  (МПа);
- $31 \leq y_6 \leq 60$  (% масс.);
- $22,2 \leq y_7 \leq 51,6$  (%).

Испытание на биоразложение осуществлялось по потере массы образца при экспозиции в почво-грунте. В качестве почво-грунта был принят грунт для рассады (ТУ 0392-001-59264059-03). Продолжительность выдержки образцов в почво-грунте при комнатной температуре ( $20 \pm 2$  °С) и влажности грунта  $60 \pm 2\%$  составила 30 и 60 суток.

Оценка биоразлагаемости выполнялась путем микроскопирования лицевой поверхности образцов. Микроскопирование проводилось с помощью микроскопа «Микромед 3» (увеличение  $\times 400$ ).

**Основные результаты**

Результаты анализа исходного сырья по компонентному составу:

- вода (ГОСТ 16932) – 6%;
- целлюлоза (Кюршнера-Хоффера) – 25,3%;
- лигнин (ГОСТ 11960) – 33,8%.

Компонентный состав фитомассы листьев финиковой пальмы обеспечивает необходимое содержание требуемых соединений для получения материалов на основе ПБС [2]. Наличие данных компонентов в различных соотношениях обуславливают либо прочностные свойства, либо свойства по водостойкости материала.

Результаты проведенной оптимизации получения ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы с учетом принятых ограничений и заданной целевой функции:

- $y_3 \rightarrow \max$ :  $Z_1=11$  %;  $Z_2=185$  °С;
- $y_6 \rightarrow \min$ :  $Z_1=12$  %;  $Z_2=185$  °С.

Оптимальными условиями для получения ПБС из фитомассы листьев финиковой пальмы установлены в интервале влажности исходного пресс-сырья 11-12% и температурой прессования 185 °С. Это может свидетельствовать о том, что при максимальной температуре и средней влажности, образование пластика находятся на завершающей стадии протекания физико-химических процессов с компонентами исходного пресс-сырья.

Результаты определения расчетных и экспериментальных значений физико-механических свойств образцов ПБС при оптимальных условиях представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные и экспериментальные значения физико-механических свойств ПБС при оптимальной рецептуре при заданной целевой функции

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.11.1>

Физико-механические свойства	Расчетные значения при заданной целевой функции		Экспериментальные значения ( $Z_1=12$ %; $Z_2=185$ °С)
	$y_3 \rightarrow \max$	$y_6 \rightarrow \min$	
$Y_2$ – модуль упругости при изгибе, МПа	6140	6371	6397
$Y_3$ – прочность при изгибе, МПа	18,1	17,9	18,2
$Y_6$ – водопоглощение за 24 часа, %	32	31	29
$Y_7$ – разбухание по толщине за 24 часа, %	22,8	22,2	19,3

Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными (расхождение не превышает 15%), что говорит о высокой достоверности полученных экспериментально-статистических моделей. Наличие несколько целевых функций не позволяют достигать в изучаемых интервалах одновременно высоких прочностных и водостойких показателей образцов ПБС.

Результаты изменения массы образцов ПБС при их экспозиции в почво-грунте:

- за 30 сут изменения массы составило  $\Delta+13$  %;
- за 60 сут изменения массы составило  $\Delta-28$  %.

Для образцов ПБС наблюдается первичное увеличение массы на 13% в первые 30 сут выдержки в почво-грунте. Первоначальное увеличение массы можно объяснить впитыванием материалом избыточной влаги из влажной среды. За 60 сут пребывания пластика в грунте происходит деструкция материала, что подтверждается снижением массы на 28%.

Результаты микроскопирования лицевой поверхности образцов ПБС представлено на рис. 1.

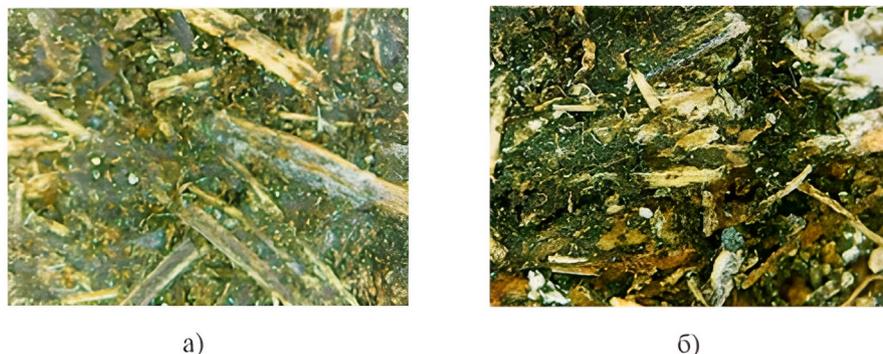


Рисунок 1 - Микрофотографии лицевой поверхности образцов ПБС: а) — до испытаний; б) — после испытаний на биоразлагаемость

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.11.2>

При экспозиции в течение 60 сут в почво-грунте наблюдаются внешние изменения образцов ПБС. По визуальному наблюдению большинство образцов были подвержены частичному или полному разрушению.

#### Заключение

Методом математического планирования эксперимента были установлены закономерности влияния технологических факторов на физико-механические свойства ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы. Оптимальные режимы технологических факторов в изучаемых интервалах составили: влажность пресс-сырья – 12%, температура прессования – 185 °С. Полученные ПБС при рациональных режимах были изучены на биоразлагаемость по отношению к почво-грунту в течение 60 сут. За продолжительность выдержки в течение 60 сут в почво-грунте происходит снижение массы материала практически на 30%.

Таким образом, по результатам выполненных исследований установлено, что ПБС на основе фитомассы листьев финиковой пальмы обладают относительно высоким потенциалом к биоразложению по сравнению с ПБС и композитами на основе иного лигноцеллюлозосодержащего сырья [3], [12], что позволяет расширить номенклатуру получаемых материалов с регулируемым сроком эксплуатации.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

#### Список литературы / References

1. Nassar M.M.A. Progress and Challenges in Sustainability, Compatibility, and Production of Eco-Composites: A state-of-art review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebdeh, T. Pervez [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. — 2021. — 51284. — p. 1. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.51284> (accessed: 12.04.2023). — DOI: 10.1002/app.51284
2. Buryndin V.G. Mathematical Modeling of Bioactivation Process for Wood Raw Materials / V.G. Buryndin, A.V. Artemov, A.V. Savinovskih // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — 2131. — p. 13.
3. Zakharov P.S. Studying the Properties of Composites with a Polyvinylchloride Matrix and Meadow-Grass-Hay Filler / P.S. Zakharov, A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh [et al.] // Polymer Science, Series D. — 2022. — 2. — p. 306-310. — DOI: 10.1134/S1995421222020320
4. Musin I. Wood-Polymer Composites Assessment Using Microtomography / I. Musin, I. Fayzullin, S. Volfson et al. // Key Engineering Materials. — 2019. — 822. — p. 350-354. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.350
5. Vachnina T.N. Unused Plant Waste and Thermal Insulation Composition Boards on Their Basis / T.N. Vachnina, I.V. Susoeva, A.A. Titunin [et al.] // Key Engineering Materials. — 2021. — 887 KEM. — p. 480-486. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.480
6. Плугатарь Ю.В. Результаты интродукции финика Канарского (*Phoenix canariensis* Chab.) на Южном берегу Крыма / Ю.В. Плугатарь, А.П. Максимов, Н.Н. Трикоз // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2018. — 2. — с. 221-229.
7. Nassar M.M.A. Machinability of Natural Fiber Reinforced Composites: a review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebdeh, R. Arunachalam // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — 88. — p. 2985–3004. — DOI: 10.1007/s00170-016-9010-9
8. Nassar M.M.A. Preparation of High-Performance Fiber from Natural Fiber (Date Palm) / M.M.A. Nassar, K. Alzebdeh, A. Munam [et al.] // World Intellectual Property Organization (WIPO). — 2020. — WO/2020/139088. — p. 1.
9. Asim M. Thermal Stability of Natural Fibers and Their Polymer Composites / M. Asim, M.T. Paridah, M. Chandrasekar [et al.] // Iranian Polymer Journal. — 2020. — 29. — p. 625–648. — DOI: /10.1007/s13726-020-00824-6

10. Bashah M. Date Variety in the Kingdom of Saudi Arabia. King Abdulaziz University Guidance booklet palms and dates / M. Bashah // King Abdulaziz University Press; — 1996: Riyadh, Saudi Arabia, 1996. — p. 1225-1319.
11. Mirmehdi S.M. Date Palm Wood Floor as Filler of Linear Low-Density Polyethylene / S.M. Mirmehdi, F. Zeinaly, F. Dabbagh // Composites Part B: Engineering. — 2014. — 56. — p. 137-141.
12. Sbiai A. Short Date Palm Tree Fibers/Polyepoxy Composites Prepared Using RTM Process: Effect of Tempo Mediated Oxidation of the Fibers / A. Sbiai, A. Maazouz, E. Fleury [et al.] // BioResources. — 2010. — 5(2). — p. 672-689.
13. Артемов А.В. Изучение возможности получения пластиков без связующих веществ на основе листьев финиковой пальмы / А.В. Артемов, А.С. Ершова, А.Б. Якимова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — 3(129). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.129.17

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Nassar M.M.A. Progress and Challenges in Sustainability, Compatibility, and Production of Eco-Composites: A state-of-art review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebdeh, T. Pervez [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. — 2021. — 51284. — p. 1. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.51284> (accessed: 12.04.2023). — DOI: 10.1002/app.51284
2. Buryndin V.G. Mathematical Modeling of Bioactivation Process for Wood Raw Materials / V.G. Buryndin, A.V. Artemov, A.V. Savinovskih // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — 2131. — p. 13.
3. Zakharov P.S. Studying the Properties of Composites with a Polyvinylchloride Matrix and Meadow-Grass-Hay Filler / P.S. Zakharov, A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh [et al.] // Polymer Science, Series D. — 2022. — 2. — p. 306-310. — DOI: 10.1134/S1995421222020320
4. Musin I. Wood-Polymer Composites Assessment Using Microtomography / I. Musin, I. Fayzullin, S. Volfson et al. // Key Engineering Materials. — 2019. — 822. — p. 350-354. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.350
5. Vachnina T.N. Unused Plant Waste and Thermal Insulation Composition Boards on Their Basis / T.N. Vachnina, I.V. Susoeva, A.A. Titunin [et al.] // Key Engineering Materials. — 2021. — 887 KEM. — p. 480-486. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.480
6. Plugatar' Yu.V. Rezul'taty' introdukcii finika Kanarskogo (Phoenix canariensis Chab.) na Yuzhnom beregu Kry'ma [The Results of the Introduction of the Canary Date (Phoenix canariensis Chab.) on the Southern Coast of Crimea] / Yu.V. Plugatar', A.P. Maksimov, N.N. Trikoz // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ximiya. Biologiya. Farmaciya. [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy]. — 2018. — 2. — p. 221-229. [in Russian]
7. Nassar M.M.A. Machinability of Natural Fiber Reinforced Composites: a review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebdeh, R. Arunachalam // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — 88. — p. 2985–3004. — DOI: 10.1007/s00170-016-9010-9
8. Nassar M.M.A. Preparation of High-Performance Fiber from Natural Fiber (Date Palm) / M.M.A. Nassar, K. Alzebdeh, A. Munam [et al.] // World Intellectual Property Organization (WIPO). — 2020. — WO/2020/139088. — p. 1.
9. Asim M. Thermal Stability of Natural Fibers and Their Polymer Composites / M. Asim, M.T. Paridah, M. Chandrasekar [et al.] // Iranian Polymer Journal. — 2020. — 29. — p. 625–648. — DOI: /10.1007/s13726-020-00824-6
10. Bashah M. Date Variety in the Kingdom of Saudi Arabia. King Abdulaziz University Guidance booklet palms and dates / M. Bashah // King Abdulaziz University Press; — 1996: Riyadh, Saudi Arabia, 1996. — p. 1225-1319.
11. Mirmehdi S.M. Date Palm Wood Floor as Filler of Linear Low-Density Polyethylene / S.M. Mirmehdi, F. Zeinaly, F. Dabbagh // Composites Part B: Engineering. — 2014. — 56. — p. 137-141.
12. Sbiai A. Short Date Palm Tree Fibers/Polyepoxy Composites Prepared Using RTM Process: Effect of Tempo Mediated Oxidation of the Fibers / A. Sbiai, A. Maazouz, E. Fleury [et al.] // BioResources. — 2010. — 5(2). — p. 672-689.
13. Artemov A.V. Izuchenie vozmozhnosti polucheniya plastikov bez svyazuyushhix veshhestv na osnove list'ev finikovoij pal'my' [Studying the Possibility of Obtaining Plastics without Resins Based on Date Palm Leaves] / A.V. Artemov, A.S. Ershova, A.B. Yakimova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — 3(129). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.129.17 [in Russian]