

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.522:631.352.5

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-4-10>

Исследование стойкости стеблей лубяных культур к абразивному истиранию

А.С. Свиридов^{1✉}, М.Е. Чаплыгин² Р.А. Попов³^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия³ Федеральный научный центр лубяных культур; г. Тверь, Россия¹ sviridov.vim@ya.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>² misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>³ r.popov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9400-3530>

Аннотация. Разработка технических средств с оптимальными конструктивными параметрами для уборки лубяных культур тесно связана с механико-технологическими свойствами растительного материала, характеризующими строение стебля, сопротивление воздействию на него нагрузкам, поведение при различных деформациях и разрушении, трение о рабочие поверхности и т.д. Лубяные культуры – такие, как техническая конопля, содержат в стеблях лубяные волокна, обладающие абразивными свойствами и являющиеся причиной быстрого износа режущих кромок ножей. Однако стойкость стеблей к абразивному истиранию не изучена. С целью определения стойкости волокнистого слоя стеблей конопли к абразивному истиранию проведены исследования физико-механических и прочностных свойств стеблей технической конопли трех сортов: Людмила, Надежда и Сурская. Исследование микрорельефа поверхности лубоволокнистого слоя технической конопли проводилось методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе. Эксперимент по истиранию реализовывался на ротационном абразиметре АТ-100 в соответствии с ГОСТ Р 17076-1-2014. Исследование микрорельефа показало более развитую внешнюю поверхность с ярко выраженной волокнистой структурой. Наибольшие различия микронеровностей наблюдались между нижней и верхушечной частью стебля. Показатели, характеризующие механические свойства лубяных волокон – такие, как эластичность, твердость и модуль упругости, отличались в разных частях стебля. Наибольшее значение модуля упругости и твердости волокон выявлено в средней части стебля. Экспериментальные данные объемного износа лубоволокнистого слоя стеблей технической конопли показали, что наибольшей стойкостью к истиранию обладают стебли сорта Надежда (индекс истирания – 1,67), наименьшей – сорт Людмила (индекс истирания – 3,71). Результаты исследований необходимо учитывать при проектировании и разработке инновационных уборочных машин и выборе материалов режущих кромок ножей, устойчивых к абразивному истиранию.

Ключевые слова: лубяные культуры, техническая конопля, лубяные волокна, стебли, индекс истирания, механические свойства лубяных волокон, стойкость стеблей к абразивному истиранию

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственных заданий: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ № FGUN-2022-0007 и № FGUN-2022-0009, а также ФГБНУ ФНЦ ЛК № FGSS-2022-0005.

Для цитирования: Свиридов А.С., Чаплыгин М.Е., Попов Р.А. Исследование стойкости стеблей лубяных культур к абразивному истиранию // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-4-10>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the resistance of bast fiber crop stems to abrasive wear**A.S. Sviridov¹, M.E. Chaplygin² R.A. Popov³**^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia³ Federal Research Center for Bast Fiber Crops; Tver, Russia¹sviridov.vim@ya.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>²misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>³r.popov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9400-3530>

Abstract. The development of technical means with optimal design parameters for harvesting bast fiber crops is closely related to the mechanical and technological properties of plant material. These properties characterize the structure of the stem, resistance to loads acting on it, behavior under various deformations and destruction, friction on working surfaces, etc. The stems of bast fiber crops, such as industrial hemp, contain fibers that have abrasive properties and cause rapid wear of the cutting edges of knives. However, there are still no studies of the resistance of the stems to abrasive wear. In order to determine the resistance of the fibrous layer of hemp stems to abrasive wear, the authors studied the physico-mechanical and strength properties of the stems of industrial hemp of three varieties – Lyudmila, Nadezhda, and Surskaya. The authors studied the micro-relief of the surface of the bast fiber layer of industrial hemp using atomic force microscopy with a scanning probe microscope. The abrasion experiment was carried out on the AT-100 rotary abrasion tester in accordance with GOST R17076-1-2014. The study of the microrelief showed a more developed outer surface with a brightly colored fibrous structure. The greatest differences in microroughnesses were observed between the lower and apical parts of the stem. Indicators characterizing the mechanical properties of bast fibers, such as elasticity, hardness and modulus of elasticity, differed in various parts of the stem. The greatest value of the modulus of elasticity and hardness of the fibers was found in the middle part of the stem. Experimental data on the volumetric wear of the bast fiber layer of industrial hemp stems showed that the stems of the Nadezhda variety have the highest abrasion resistance (an abrasion index of 1.67), the Lyudmila variety has the lowest (an abrasion index of 3.71). The research results should be taken into account when designing and developing innovative harvesting machines and choosing abrasive wear-resistant materials to manufacture the cutting edges of knives.

Keywords: bast fiber crops, industrial hemp, bast fibers, stems, abrasion index, mechanical properties of bast fibers, resistance of stems to abrasive wear

Funding: The research was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of State assignments: Federal Scientific Agroengineering Center VIM No. FGUN-2022-0007 and No. FGUN-2022-0009, as well Federal Scientific Center for Bast Crops No. FGSS-2022-0005.

For citation: Sviridov A.S., Chaplygin M.E., Popov R.A. Study of the resistance of bast fiber crop stems to abrasive wear. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-4-10>

Введение

Для эффективного выполнения технологических операций в сельскохозяйственном производстве важно знать механико-технологические свойства и агро-биологические особенности возделываемых культур, проявляемые при воздействии на них нагрузок и при механической обработке. Эти данные необходимо учитывать при разработке и проектировании рабочих органов уборочных машин [1].

В процессе уборки лубяных культур происходит взаимодействие стеблей между собой и с рабочими органами сельскохозяйственных машин. При этом возникают силы трения, обеспечивающие захват

и удержание стеблей при их срезе и транспортировке, оказывающие влияние на траекторию движения растительного материала, вызывающие непроизвольные энергозатраты и повреждение самих стеблей и т.д. Характер контактной деформации является неодинаковым, поскольку различные материалы различаются своей структурой, шероховатостью поверхности и величиной модуля упругости [2, 3].

Лубяные культуры, такие, как техническая конопля (безнаркотическая), в фазе биологического созревания содержат в своих стеблях длинные и прочные лубяные волокна, обладающие абразивными свойствами, что является причиной быстрого износа

режущих кромок ножей срезающих и измельчающих аппаратов, других деталей и узлов, а также забивок, намоток на вращающиеся элементы и преждевременного выхода их из строя [4, 5].

Научно обоснованное проектирование сельскохозяйственных машин требует глубокого изучения свойств и особенностей возделываемых культур, которые нужно учитывать при силовых расчетах, выборе формы и материалов для изготовления деталей и т.д. Изучению свойств лубяных культур посвящен ряд работ [1, 5-7], однако стойкость стеблей к абразивному истиранию недостаточно исследована.

Цель исследований: определение стойкости волокнистого слоя стеблей технической конопли к абразивному истиранию.

Материалы и методы

Методика включала в себя исследование микрорельефа поверхности стебля (лубоволокнистого слоя) технической конопли методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе для построения трехмерных изображений [2], а также лабораторные исследования стойкости лубоволокнистого слоя к абразивному истиранию.

Эксперимент по истиранию проводился на ротационном абразиметре марки АТ-100 (рис. 1) в лаборатории инновационных конструкционных полимерных, композитных и биокompозитных материалов деталей сельскохозяйственных машин ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по методу Табера в соответствии с ГОСТ Р 17076-1-2014 «Кожа. Определение сопротивления истиранию. Часть 1. Метод Табера»¹. Абразиметр АТ-100 состоит из горизонтальной платформы с приводом от электродвигателя, вращающейся

со скоростью 60 об/мин, съемного плоского держателя в форме круга, пары поворотных консолей для удерживания абразивных кругов, вакуумной насадки, счетчика числа оборотов платформы, абразивных кругов и дополнительных грузов для увеличения силы их прижатия к образцу.

Испытуемый образец вращается вокруг вертикальной оси против направления движения двух абразивных кругов, прижатых к образцу с определенным усилием и скользящих по нему. Один абразивный круг истирает образец в направлении его границы, другой – внутри, по направлению к центру.

В качестве исследуемого материала использовалась техническая конопля селекции Федерального научного центра лубяных культур (ОП Пензенский НИИСХ). Образцы стеблей отбирались в Пензенской области согласно методике² в полевых условиях в период уборки. Исследовались перспективные сорта технической конопли среднерусского экотипа зеленцового и двустороннего (семена + волокно) направления возделывания: Людмила, Надежда, Сурская. Данные сорта характеризуются высоким содержанием волокна в стеблях, пригодны для механизированной уборки и рекомендованы к возделыванию в Центральном, Центрально-Черноземном и Средневолжском регионах.

Абразивный износ V_i образцов стеблей определяли по формуле:

$$V_i = M - M_i, \quad (1)$$

где M – масса образцов растительного материала до испытаний, г; M_i – масса образцов после испытаний, г.

Исходные данные и характеристика исследуемого материала приведены в таблице 1.



Рис. 1. Общий вид абразиметра АТ-100 и образцы технической конопли

Fig. 1. General view of the AT-100 abrasive meter and samples of plant material

¹ГОСТ Р 17076-1-2014 «Кожа. Определение сопротивления истиранию. Часть 1. Метод Табера». М.: Стандартинформ, 2015. 6 с.

²Методические указания по селекции конопли и производственной проверке законченных научно-исследовательских работ / ВАСХНИЛ, Отделение растениеводства и селекции, ВНИИ лубяных культур. М.: ВАСХНИЛ, 1980. 30 с.

Таблица 1

Исходные данные для проведения исследований

Table 1

Initial data for conducting research

Показатель <i>Parameter</i>	Сорт технической конопли / <i>Industrial hemp variety</i>		
	Людмила <i>Lyudmila</i>	Надежда <i>Nadezhda</i>	Сурская <i>Surskaya</i>
Влажность стеблей, % / <i>Humidity of stems, %</i>	55	55	55
Урожайность стеблей, т/га / <i>Yield of stems, t/ha</i>	12,3	9,0	8,4
Высота растения, м / <i>Plant height, m</i>	2,2...2,7	2,0...2,2	2,0...2,5
Содержание волокна в стеблях, % / <i>Fiber content in stems, %</i>	30...33	26...29	28...30
Диаметр образцов стеблей, мм / <i>Diameter of the stem samples, mm</i>	23	22	21
Длина образцов стеблей, мм / <i>Length of stem samples, mm</i>	150	150	150
Число циклов испытаний, шт. / <i>Number of test cycles, no.</i>	1000	1000	1000

В ходе подготовки опытных образцов стебли разрезали вдоль оси, снимали с них лубоволокнистый слой, который разворачивали и наклеивали на круг из плотной бумаги. В качестве клея использовался поливинилацетат (ПВА). Для лучшего прилегания стеблей к бумаге все образцы перед испытаниями помещали под пресс и выдерживали в течение 24 ч. От каждого сорта исследовалось по два комплекта образцов.

Результаты и их обсуждение

Среди лубяных культур лен и техническая конопля выделяются высоким содержанием волокна, целлюлозы и наименьшим содержанием лигнина в структуре стеблей. Лубоволокнистый слой конопли состоит из длинных элементарных волокон, имеющих высокую прочность на разрыв и обладающих низкими биоразлагаемыми свойствами, поэтому техническая конопля является идеальным источником для армирования композитов [8].

Результаты исследований физико-механических и технологических свойств волокон конопли [8] показывают, что их механические свойства (эластичность, твердость и модуль упругости) в разных

частях стебля различаются. Наибольшие значения модуля упругости и твердости волокон наблюдаются в средней части стебля (табл. 2).

Результаты углубленных исследований микро-рельефа поверхности стебля (лубоволокнистого слоя) технической конопли методом атомно-силовой микроскопии [2] представлены на рисунке 2.

Анализ рельефа поверхности лубоволокнистого слоя на микрометровом уровне в разных частях стебля показал заметные различия в структуре волокон. Микрорельеф внешней поверхности более развит и характеризуется ярко выраженной волокнистой структурой. Наибольшие различия микронеровностей наблюдаются в комлевой (нижней) и верхушечной частях стебля. Результаты обработки профилограмм свидетельствуют об уменьшении размера элементарных волокон в верхушечной части.

Рабочие органы уборочных машин и других технических средств, воздействуя на стебли лубяных культур, подвергают их определенным деформациям. Надежность рабочих органов зависит от свойств материала, его сопротивления воздействию нагрузкам, плотности, жесткости и т.д. [1]. Для надежной работы техники важно рассчитать нагрузки,

Таблица 2

Физико-механические свойства лубяных волокон технической конопли

Table 2

Physical and mechanical properties of bast fibers

Часть стебля / <i>Hemp stem</i>	Модуль упругости, ГПа / <i>Elastic modulus, GPa</i>	Твердость, ГПа / <i>Hardness, GPa</i>
Комлевая / <i>Main part</i>	14,0	0,45
Средняя / <i>Middle part</i>	16,9	0,52
Верхушечная / <i>Apical part</i>	8,1	0,37

используя данные параметры, а также учитывать поведение растительного материала при деформации.

По результатам абразивного истирания образцов стеблей конопли получены данные объемного износа в результате воздействия абразивных кругов (табл. 3). Предложен новый показатель, характеризующий степень разрушения лубоволокнистого слоя в результате воздействия абразивного материала, обозначенный как индекс истирания.

В процессе истирания происходит постепенное разрушение волокон и падение прочности волокна и луба. Характер изменений индекса истирания у каждого сорта различен, что, вероятнее всего, объясняется совокупностью свойств растительного

материала. Наибольшую стойкость к объемному износу имеют образцы конопли сорта Надежда (индекс истирания – порядка 1,67), наименьшую – сорт Людмила (индекс истирания – порядка 3,71). Разница в износе исследуемых образцов может быть обусловлена различной структурой и механическими свойствами лубяных волокон, а также процентным содержанием волокна в стеблях растений (сорт Надежда – 26...29%, сорт Людмила – 30...33%).

Полученные результаты исследований будут использованы в дальнейшей работе, связанной с повышением износостойкости и упрочнением трущихся поверхностей рабочих органов сельскохозяйственных машин для уборки лубяных культур.

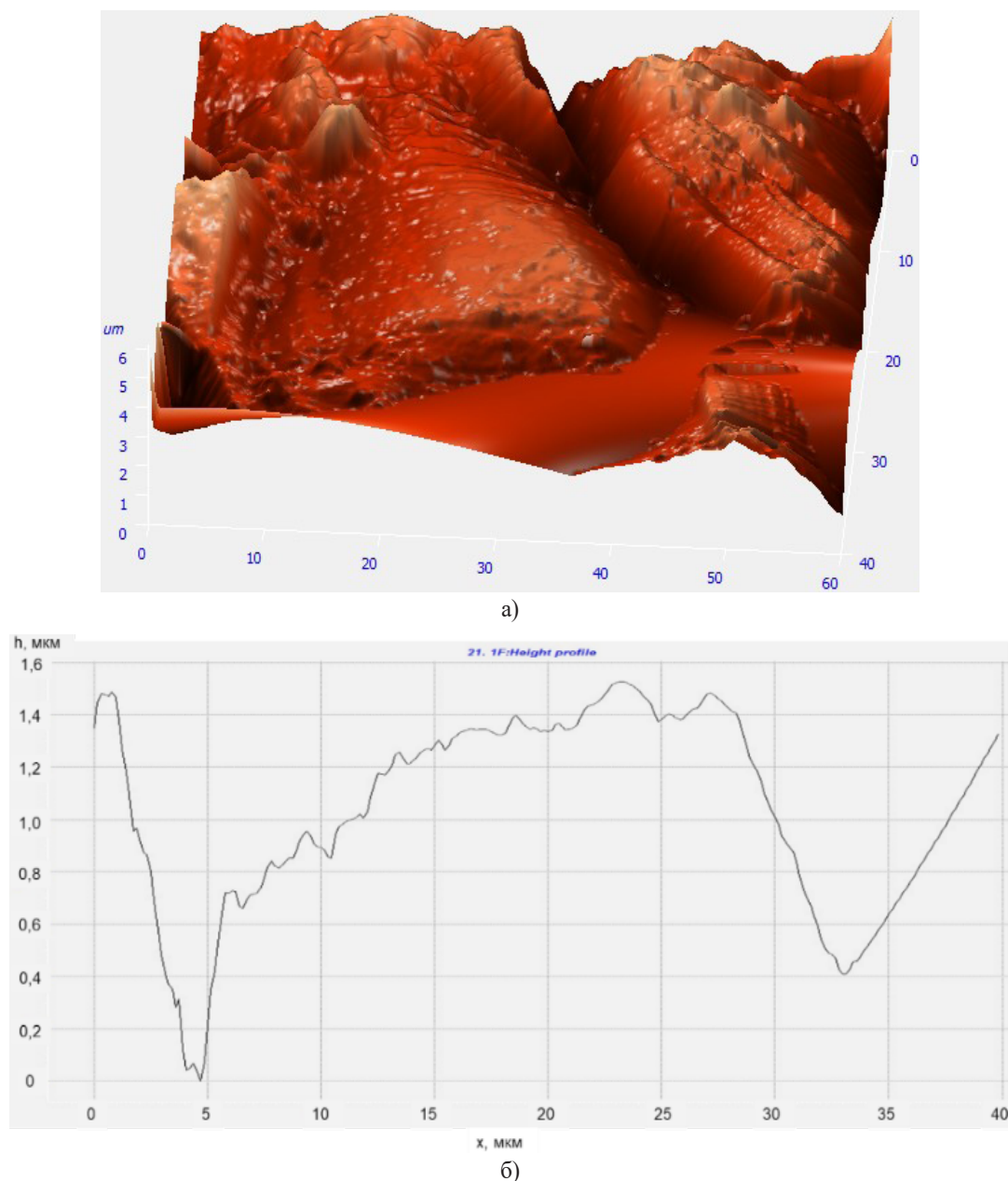


Рис. 2. 3D-изображение (а) и характерная профилограмма рельефа поверхности (б) стебля конопли (разрешение 40×60 мкм)

Fig. 2. 3-D image (a) and characteristic profile of the relief (b) of hemp stem surface (resolution of 40×60 microns)

Таблица 3

Результаты испытаний

Table 3

Research results

Сорт технической конопли <i>Industrial hemp variety</i>	Масса, г / <i>Weight, g</i>		Индекс истирания <i>Abrasion index</i>
	до испытания / <i>before testing</i>	после испытания / <i>after testing</i>	
Людмила 1 / <i>Lyudmila 1</i>	7,4980	4,0026	3,4954
Людмила 2 / <i>Lyudmila 2</i>	7,2537	3,5400	3,7137
Надежда 1 / <i>Nadezhda 1</i>	9,3642	5,8060	3,5582
Надежда 2 / <i>Nadezhda 2</i>	9,3808	7,7207	1,6601
Сурская 1 / <i>Surskaya 1</i>	6,9729	4,4360	2,5369
Сурская 2 / <i>Surskaya 2</i>	6,9427	4,0228	2,9199

Выводы

1. Исследования физико-механических и прочностных свойств стеблей технической конопли трех сортов (Людмила, Надежда и Сурская) показали особенности микрорельефа поверхности разных частей стебля. Внешняя поверхность более развита и имеет ярко выраженную волокнистую структуру. Наибольшие различия микронеровностей наблюдаются между нижней и верхушечной частями стебля. Также отличаются и показатели, характеризующие механические свойства лубяных волокон, такие, как эластичность, твердость и модуль упругости. Наибольшее

значение модуля упругости и твердости волокон выявлено в средней части стебля.

2. По результатам истирания растительного материала установлено, что наибольшей стойкостью к объемному износу обладают стебли конопли сорта Надежда (индекс истирания – 1,67), наименьшей – сорт Людмила (индекс истирания – 3,71). Это необходимо учитывать при проектировании и разработке инновационных технических средств, выборе материалов для изготовления деталей, которые будут устойчивыми к воздействию убираемых культур.

Список источников

1. Ковалев М.М., Просолов С.В., Перов М.Г., Шишин Д.А. Результаты исследований сопротивления растительных материалов изгибу при взаимодействии с рабочими органами уборочных машин // Наука в Центральной России. 2021. № 2 (50). С. 5-12. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-2-5-12>
2. Попов Р.А., Уткин А.А., Барабанова Е.В. Исследование микрорельефа поверхности стебля конопли для проектирования рабочих органов коноплеуборочных машин // Аграрный научный журнал. 2022. № 5. С. 86-89. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i5pp86-89>
3. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Попов Р.А., Романенко В.Ю., Ростовцев А.А. Определение коэффициентов трения стеблей льна по характеристикам шероховатости // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 1. С. 41-47. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47>
4. Пашин Е.Л., Жукова С.В., Пашина Л.В., Степанов Г.С. Исследование морфологических и технологических свойств стеблей новых сортов конопли // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2010. № 4 (325). С. 21-24. EDN: OTWWXJ
5. Хайлис Г.А., Ковалёв М.М. О свойствах с.-х. материалов, учитываемых при создании новой техники // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2013. № 8. С. 3-4. EDN: QZZAHV
6. Бойко Г.А., Тихосова А.А., Кутасов А.В. Исследование физико-механических свойств конопляного котонина // Материалы и технологии. 2018. № 2 (2). С. 14-17. <https://doi.org/10.24411/2617-149X-2018-12002>

References

1. Kovalev M.M., Prosolov S.V., Perov M.G., Shishin D.A. Study results on the resistance of plant materials to bending when interacting with the working elements of harvesting machines. *Science in the Central Russia*. 2021;2(50):5-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-2-5-12>
2. Popov R.A., Utkin A.A., Barabanova E.V. The hemp stalk surface microrelief research for the hemp harvesting working tools design. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2022;5:86-89. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i5pp86-89>
3. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Popov R.A., Romanenko V.Yu., Rostovtsev A.A. Calculation of the friction coefficients of flax stems according to their roughness characteristics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(1):41-47. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-41-47>
4. Pashin E.L., Zhukova S.V., Pashina L.V., Stepanov G.S. Research of morphological and technological properties of stalks of the small hemp new cultivars. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2010;4(325):21-24. (In Russ.)
5. Khailis G.A., Kovalev M.M. On agricultural materials' properties taken into consideration during new machinery development. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2013;8:3-4. (In Russ.)
6. Boyko G.A., Tikhosova A.A., Kutasov A.V. Investigation of physical and- mechanical properties of hemp cottonine. *Materials and Technologies*. 2018;2(2):14-17. (In Russ.)

7. Клевцов К.Н., Соболев О.А. Исследование новых механических воздействий в процессе декорткаций растительного сырья // Вестник Херсонского национального технического университета. 2014. № 2 (49). С. 73-79. EDN: SFRBIZ

8. Xiaoping Li, Siqun Wang, Guanben Du, Zhangkang Wu, Yujie Meng. Variation in physical and mechanical properties of hemp stalk fibers along height of stem. *Industrial Crops and Products*. 2013;42(1):344-348. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.043>

Информация об авторах

Алексей Сергеевич Свиридов^{1✉}, младший научный сотрудник; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Михаил Евгеньевич Чаплыгин², канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>

Роман Андреевич Попов³, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; r.popov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9400-3530>

^{1,2} Федеральний научний агроінженерний центр ВІМ; 109428, Російська Федерація, г. Москва,

1-й Інститутський проїзд, 5

³ Федеральний науковий центр луб'яних культур; 170041, Російська Федерація, г. Тверь, Комсомольський пр-т, 17/56

Вклад авторов

А.С. Свиридов – проведение лабораторных исследований, лабораторное обеспечение, подготовка начального текста статьи;

М.Е. Чаплыгин – разработка концепции исследований, общее руководство, постановка цели, верификация исследований; Р.А. Попов – подготовка образцов, анализ результатов исследований, доработка, редактирование и визуализация рукописи, утверждение финальной версии

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; поступила после рецензирования и доработки 15.10.2024; принята к публикации 16.10.2024

7. Klevtsov K.N., Sobolev O.A. Investigation of new mechanical influences during decortication plant materials. *Vestnik KHNTU*. 2014;2(49):73-79. (In Russ.)

8. Xiaoping Li, Siqun Wang, Guanben Du, Zhangkang Wu, Yujie Meng. Variation in physical and mechanical properties of hemp stalk fibers along height of stem. *Industrial Crops and Products*. 2013;42(1):344-348. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.043>

Author Information

Aleksey S. Sviridov^{1✉}, Junior Research Engineer; sviridov.vim@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9396-2281>

Mikhail E. Chaplygin², CSc (Eng), Lead Research Engineer; misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>

Roman A. Popov³, CSc (Eng), Lead Research Engineer; r.popov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9400-3530>

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

³ Federal Research Center for Bast Fiber Crops; Komsomolsky Ave., 17/56, Tver, 170041, Russian Federation

Author Contribution

A.S. Sviridov – laboratory investigation and support, writing – original draft preparation;

M.E. Chaplygin – research conceptualization, research supervision, goal setting, research data verification;

R.A. Popov – writing – original draft preparation, analysis of research results, editing, visualization, writing – manuscript review and finalizing

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 12.04.2024; Revised 15.10.2024; Accepted 16.10.2024.