Аграрный научный журнал. 2022. № 5. С. 86–89 Agrarian Scientific Journal. 2022;(5): 86–89

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья УДК 633.522:631.352.5 doi: 10.28983/asj.y2022i5pp86-89

Исследование микрорельефа поверхности стебля конопли для проектирования рабочих органов коноплеуборочных машин

Роман Андреевич Попов¹, Алексей Александрович Уткин¹, Екатерина Владимировна Барабанова²

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», г. Тверь, Россия ²ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» г. Тверь, Россия e-mail: r.popov@fnclk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты фундаментальных научных исследований по сканированию поверхности стебля технической конопли методами атомно-силовой микроскопии с применением высокоточного нанометрового оборудования. Выявлены особенности микроструктуры лубяных волокон, определены параметры их шероховатости для использования в сельскохозяйственном машиностроении для подотрасли коноплеводства.

Ключевые слова: техническая конопля; лубоволокнистый слой; атомно-силовая микроскопия; сканирующий зондовый микроскоп; шероховатость поверхности; микрорельеф; параметры.

Для цитирования: 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. http://dx.doi. org/10.28983/asj.y2022i5pp86-89.

Original article

AGRICULTURAL ENGINEERING

The hemp stalk surface microrelief research for the hemp harversting working tools design

Roman A. Popov¹, Alexey A. Utkin¹, Ekaterina V. Barabanova²

¹FSBSI «Federal Research Center of Fiber Crops», Tver, Russia ²Tver State University, Tver, Russia

r.popov@fnclk.ru

Abstract. The article presents the results of fundamental scientific research on scanning the surface of the stem of technical hemp by atomic force microscopy using high-precision nanometer equipment. The features of the microstructure of bast fibers are revealed, the parameters of their roughness for use in agricultural machinery for the sub-branch of hemp farming are determined.

Keywords: technical hemp; bast fiber layer; atomic force microscopy; scanning probe microscope; surface roughness; microrelief; parameters.

For citation: Popov R. A., Utkin A. A., Barabanova E. V. The hemp stalk surface microrelief research for the hemp harversting working tools design // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal;(5):86–89 (In Russ.). http://dx.doi.org/10.28983/asj. y2022i5pp86-89.

Введение. Для научно обоснованного проектирования технических средств сельскохозяйственного назначения важно знать механико-технологические свойства и особенности растительных материалов, с которыми контактируют рабочие органы уборочных машин. Так, в процессе уборки посевной конопли ее стебли взаимодействуют с различными материалами, из которых изготовлены рабочие элементы коноплеуборочной техники, а также между собой. При этом характер контактной деформации поверхностей неодинаков, так как разного рода материалы отличаются своей структурой, шероховатостью и величиной модуля упругости. В этом плане вопрос контактного взаимодействия стеблей конопли с рабочими органами машин и оборудования остается малоизученным. В связи с использованием в сельскохозяйственном машиностроении современных материалов при производстве уборочной техники, возникает необходимость проведения такого рода исследований, для чего нужно учитывать параметры микрорельефа.

Стебли посевной конопли содержат в своей структуре лубоволокнистый слой, имеющий значительную длину и обладающий высокой прочностью, шероховатостью и абразивными свойствами, что обуславливает известные трудности при уборке культуры – образование намоток, забивки агрегатов, износ режущих кромок и др. [4-6]. Поэтому при проектировании рабочих органов уборочных машин, силовых расчетах, выборе формы и материала деталей необходимо учитывать физикомеханические и технологические свойства поверхностных слоев материалов и процессы, происходящие при контакте [7].

В современных научных исследованиях особый интерес представляет получение информации о микрорельефе поверхности таких структур и параметрах шероховатости, что может быть реализовано с высокой точностью и нанометровым разрешением при использовании сканирующих зондовых микроскопов методами атомно-силовой микроскопии [2]. Зная параметры шероховатости в различных частях стебля технической конопли, можно с достаточной точностью оценить характер контактного взаимодействия поверхностей и учитывать эти особенности при проектировании рабочих органов коноплеуборочной техники.

Цель исследований – высокоточное изучение поверхности стебля технической конопли и определение параметров микрогеометрии.



Методика исследований. Исследования проводили методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе (C3M) NanoEducator II (мод. NT-MDT). Микроскоп NanoEducator II состоит из измерительной головки, базового блока, C3M-контроллера, соединительных кабелей и управляющего компьютера (рис. 1, *a*). Принцип работы микроскопа основан на взаимодействии между частицами твердотельного зонда (Tip) и исследуемой поверхности посредством сил Ван-дер-Ваальса. Зонд крепится к упругой консоли (cantilever), которая изгибается под действием сил притяжения и отталкивания со стороны поверхности образца. В конструкции микроскопа NanoEducator II упругая консоль (cantilever) закрепляется неподвижно, а образец может перемещаться относительно зонда по трем пространствен-

© Попов Р. А., Уткин А. А., Барабанова Е. В., 2022

86

ным координатам X, Y, Z (рис. 1, δ). Сканирование происходит в плоскости XY посредством построчного считывания информации с поверхности. Из-за присутствия микронеровностей на поверхности постоянно изменяются расстояние зонд-образец и величина сил межатомного взаимодействия. Микроскоп NanoEducator II регистрирует перемещение образца по осям, при этом на экране компьютера синхронно с перемещением образца строится изображение рельефа.

Для проведения исследований отбирали образцы стеблей конопли посевной из Курской области в период уборки урожая, после чего в лабораторных условиях определяли их размерно-массовые характеристики. В качестве исследуемого материала использовали сорт «Родник» южного экотипа, средняя высота стеблей 2,2 м, средний диаметр 15 мм, влажность стеблей 65 %, стадия спелости 90 %, урожайность соломки 90 ц/га. В ходе подготовки опытных образцов стебель делили на 3 части – комлевую, среднюю и верхушечную (до начала семенных метелок). Полученные образцы разрезали вдоль оси стебля, снимали с них лубоволокнистый слой, разворачивали и фиксировали на твердом основании. Исследовалась внутренняя и внешняя поверхности лубоволокнистого слоя.

Результаты исследований. Как известно, поверхность любого тела имеет свои макро-, микро- и нанонеровности, которые в совокупности с механическими свойствами контактирующих поверхностей определяют характер их взаимодействия. Так, при постоянном контакте, выступы более твердой поверхности цепляют и деформируют неровности сопряженной более мягкой. На свойства контакта влияют микрорельеф и механические свойства твердой поверхности и более мягкого тела [3].

При воздействии рабочих органов коноплеуборочных машин на стебли технической конопли в первую очередь проявляются физико-механические свойства и особенности строения растений. В процессе уборки конопли стебли совершают сложное движение от момента разделения стеблестоя на полосы до последующей укладки срезанной массы в валок. При этом между ними возникают силы трения, зависящие от микрорельефа поверхности стебля, которые, с одной стороны, обеспечивают захват и удерживание стеблей в процессе срезания и дальнейшего перемещения, а с другой эти силы оказывают влияние на траекторию их движения, вызывают непроизвольные энергозатраты, износ рабочих элементов, повреждение самих стеблей и т.п.

Исследуя взаимодействие лубоволокнистых культур с различными материалами важно рассчитать и коэффициенты трения [8]. Но моделирование этих факторов является весьма обширной задачей и в данное исследование не входит. Однако оценить характер взаимодействия поверхностей при физических и механических процессах, происходящих в зоне трения, можно с учетом их микрогеометрии.

Наиболее высокоточным исследованием микрорельефа поверхности растительных материалов является метод атомно-силовой микроскопии (ACM), который позволяет определить характер перепадов высот и рельеф структуры с высоким пространственным разрешением [1, 9]. Нами проведено исследование поверхности стебля технической конопли (волокнистого слоя) методом ACM для визуализации микроструктуры внутри отдельных лубяных волокон. Ниже представлено ACM-изображение с камеры атомно-силового микроскопа (рис. 2).

Результаты исследований показывают, что в разрезе волокнистый слой технической конопли состоит из отдельных элементарных волокон. Они достаточно крупные, при этом размеры волокон в каждой части стебля различны. Имеет место наличие микропористых образований и наноразмерных канальцев, которые удалось зафиксировать методом ACM, предположительно отвечающих за питание растения влагой в процессе роста.

На рис. 3, 4 представлены 3-D изображения рельефа внутренней и внешней поверхностей волокнистого слоя





Рис. 1. Сканирующее оборудование: а – общий вид сканирующего зондового микроскопа; б – схема сканирования



Рис. 2. Общий вид лубяных волокон (a) и изображение внутри одного волокна (б) (20-кратное увеличение микроскопа)

технической конопли и профили их сечений (характерные профилограммы).

Анализ микрорельефа данных поверхностей и их трехмерных сечений свидетельствует о заметных различиях структуры волокон. Внешняя поверхность слоя более развита, имеет ярко выраженную волокнистую структуру. При этом ширина волокон уменьшается от комлевой части к верхушечной. Наибольшие различия микронеровностей наблюдаются в комлевой и верхушечной частях стебля. Если при визуальном осмотре внутренняя поверхность представляется более ровной и отдельные волокна менее выражены, то исследование на АСМ показало, что внутреннее строение волокон имеет также ярко выраженный рельеф.

Наиболее полная характеристика микроструктуры лубяных волокон и шероховатость поверхности определяются в результате обработки профилограмм. Параметры шерохо-



8

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ





Рис. 3. 3-D изображения рельефа внутренней поверхности волокнистого слоя (а) и характерные профилограммы (б) в разных частях стебля

Рис. 4. 3-D изображения рельефа внешней поверхности волокнистого слоя (а) и характерные профилограммы (б) в разных частях стебля

ватости поверхностей определены при помощи специализированной программы обработки полученных изображений, входящей в обеспечение прибора, в соответствии с ГОСТ-25142-82. Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов также свидетельствуют о заметных различиях параметров шероховатости в исследуемых частях стебля. Как видно из представленных данных, на внешней поверхности волокнистого слоя явно выражена тенденция к уменьшению параметров *Ra*, *Rq* от комлевой части к верхушечной. На внутренней поверхности заметно уменьшается в основном наибольшая высота профиля *R_{max}*. Это свидетельствует о том, что снижается высота/глубина отдельных выступов/впадин. Но при этом средние отклонения от базовой линии практически не меняются по всей длине стебля.

Комплексная характеристика, учитывающая распределение выступов по высоте профиля и их остроту, определяется по формуле [3]:

$$\delta = \frac{R_{\max}}{r_{p}b^{\frac{1}{p}}},\tag{1}$$

где R_{max} – наибольшая высота профиля, мкм; $r_{\text{в}}$ – радиус кривизны микронеровности, мкм; *b*, *v* – параметры степенной аппроксимации опорной кривой.

По полученным параметрам шероховатости построены гистограммы микрогеометрии внешней поверхности стебля конопли в комлевой, средней и верхушечной частях, характеризующие распределение абсолютных высот по частоте их встречаемости на площади заданного размера (рис. 5). Анализ гистограмм свидетельствует о том, что от комлевой части стебля к верхушечной происходит уменьшение абсолютных высот поверхности. Это объясняется тем, что в поверхность стебля имеет разнообразный рельеф в разных его частях, при относительно небольшой высоте отдельных пиков.

Заключение. Методом АСМ исследована структура рельефа лубоволокнистого слоя стебля технической конопли с высокой точностью на наноразмерном уровне, получены данные о перепадах высот и общей шероховатости, что невозможно реализовать при использовании иных методов диагностики поверхности. Выявлены особенности

Параметры шероховатости поверхности волокнистого слоя технической кон-
--

	Комлевая часть стебля		Средняя часть стебля		Верхушечная часть стебля		
Параметр	внутренняя	внешняя	внутренняя	внешняя	внутренняя	внешняя	
	поверхность	поверхность	поверхность	поверхность	поверхность	поверхность	
Среднеарифметичес- кое отклонение <i>Ra</i> , мкм	0.63	1.12	0.61	0.69	0.53	0.54	
Среднеквадратичное отклонение R_q , мкм	0.81	1.37	0.79	0.86	0.69	0.66	
Наибольшая высота профиля R _{max} , мкм	4.05	5.47	3.63	3.49	2.90	2.75	
Средний шаг неров- ностей <i>S_m</i> , мкм	27.51	28.21	20.06	14.42	15.30	8.99	
Средний шаг местных выступов <i>S</i> , мкм	2.37	2.97	3.03	2.39	3.11	1.95	

© Попов Р. А., Уткин А. А., Барабанова Е. В., 2022

88



Рис. 5. Гистограммы микрогеометрии внешней поверхности волокнистого слоя конопли на площади 50×50 мкм²: а – комлевая часть стебля; б – средняя; в – верхушечная

микрорельефа поверхности технической конопли, а также заметные различия структуры волокон по длине растения. Определены параметры шероховатости поверхности комлевой, средней и верхушечной частях стебля, по которым можно рассчитать коэффициенты трения при взаимодействии с различными материалами.

Показано, что метод ACM позволяет визуализировать микро- и наноструктуру лубоволокнистых поверхностей растений. Данные, полученные в результате исследований, будут использоваться при проектировании рабочих органов для уборки конопли, выборе материал для их изготовления.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М. В. Исследование микро- и наноструктуры гидрофобной поверхности растений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 86–92.

2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. 114 с.

Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общ. ред. А.В. Чичиназде. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2001. 664 с., ил.
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. 5. Попов Р. А., Перов Г. А. Анализ работы режущего аппарата для бесподпорного среза стеблей технической конопли // Вес-

тник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3. С. 149–21. 6. Попов Р. А., Черников В. Г. Расчет параметров и режимов работы режущего аппарата для уборки технической конопли //

6. попов Р. А., черников Б. 1. Расчет параметров и режимов расоты режущего аппарата для усорки технической конопли // Аграрный научный журнал. 2021. № 3. С. 829–85.

7. Хайлис Г. А., Ковалёв М. М. О свойствах с.-х. материалов, учитываемых при создании новой техники // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 8. С. 3–4.

8. 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.

9. 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. P. 344–348.

REFERENCES

1. Zhukov M. V. Investigation of the micro- and nanostructure of the hydrophobic surface of plants. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics.* 2014; 2 (90): 86–92. (In Russ.).

2. Mironov V. L. Fundamentals of scanning probe microscopy. Nizhny Novgorod, 2004. 114 p. (In Russ.).

3. Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication): Textbook for technical universities / ed. A.V. Chichinazde. 2nd ed. Moscow, 2001. 664 p. (In Russ.).

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. *Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology*. 2010; 4 (325): 21–24. (In Russ.).

5. Popov R. A., Perov G. A. Analysis of the cutting machine operation for free-standing cutting of stems industrial hemp. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020; 3: 14–21. (In Russ.).

6. Popov R. A., Chernikov V.G. Calculation of parameters and operating modes of the cutting apparatus for harvesting technical hemp. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021; 3: 82–85. (In Russ.).

7. Khailis G. A., Kovalev M. M. On the properties of agricultural materials taken into account when creating a new technique. *Tractors and agricultural machines*. 2013; 8: 3–4. (In Russ.).

8. 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 machines and technologies*. 2019; 13; 1: 41–47. (In Russ.).

9. 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: 344–348.

Статья поступила в редакцию 14.01.2022; одобрена после рецензирования 12.02.2022; принята к публикации 22.02.2022.

The article was submitted 14.01.2022; approved after reviewing 12.02.2022; accepted for publication 22.02.2022.

89

