

Научная статья

УДК 663.97.051.1

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-1-25-33

## Микроплазменная обработка для сушки табачных листьев

И.А. Шорсткий<sup>1</sup>, М.Д. Соснин<sup>1\*</sup>, Е.В. Гнучих<sup>2</sup>, Е.Е. Ульянченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Кубанский государственный технологический университет<sup>2</sup>ВНИИ табака, махорки и табачных изделий

Краснодар, Россия, \*maksim-sosnin7@mail.ru

**Аннотация.** Испытывали технологии предварительной электрофизической обработки с помощью нитевидной микроплазмы применительно к процессу сушки табачных листьев. Объектом исследования являлись листья табака сорта Вирджиния 202. Высушенные с помощью естественной сушки листья табака анализировали на предмет микроструктурных изменений, физико-механических свойств и химического состава. Обработку нитевидной микроплазмой проводили при напряженности электрического поля  $E = 600$  кВ/м длительностью одного импульса 40 мкс и частотой следования импульсов 100 Гц. Установлено, что предварительная обработка нитевидной микроплазмой сокращает длительность процесса естественной сушки табачных листьев на 32 и 12% для достижения равновесного влагосодержания при обработке жилки и всей пластины соответственно. Наряду с этим показано положительное влияние на увеличение выхода волокна при оценке физико-механических свойств на 7,3 и 13,3% при обработке жилки и всей пластины табачного листа соответственно. Химический анализ определил, что предварительная обработка нитевидной микроплазмой улучшила углеводно-белковое соотношение, увеличила число Шмука с 0,8 до 1,3 при обработке жилки табачного листа, однако снизила число Шмука до 0,3 при обработке всей пластины табачного листа. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения в промышленности технологии предварительной микроплазменной обработки, в частности, при обработке средней жилки табачного листа, что может существенно снизить срок сушки листьев и влиять на качественный состав получаемого конечного продукта.

**Ключевые слова:** первичная обработка листового табака; электрофизические методы; нитевидная микроплазма; электропорация; естественная сушка; интенсификация процесса сушки; табачный лист

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2188.2021.4.

Original article

## Microplasma treatment for tobacco leaves drying

Ivan A. Shorstkii<sup>1</sup>, Maxim D. Sosnin<sup>1\*</sup>, Evgeniya V. Gnuchikh<sup>2</sup>, Elena E. Ulyanchenko<sup>2</sup><sup>1</sup>Kuban State Technological University<sup>2</sup>All - Russian scientific research institute of tobacco, makhorka and tobacco products

Krasnodar, Russia, \*maksim-sosnin7@mail.ru

**Abstract.** The aim of this work is to develop a new technology of preliminary electrical treatment using filamentary microplasma for drying tobacco leaves. Virginia 202 tobacco leaves are used as an object of research. Tobacco leaves were dried naturally and analyzed for their microstructural changes, physical, and mechanical properties as well as chemical composition. Filamentary microplasma treatment was carried out at an electric field of the strength  $E = 600$  kV/m, a single pulse duration of 40 microseconds, and a pulse repetition rate of 100 Hz. It was found that filamentary microplasma pretreatment allowed to reduce the duration of tobacco leaves drying by 32% and 12% to achieve an equilibrium moisture content when treating the vein and the whole leaf surface, respectively. Treatment with filamentary microplasma showed a positive effect on the increase in fiber yield, when evaluating physical and mechanical properties, by 7.3 and 13.3% when treating the vein and the entire plate of the tobacco leaf, respectively. Chemical analysis showed that pretreatment with filamentous microplasma improved the carbohydrate-protein ratio, increased the Schmuck ratio from 0.8 to 1.3 when processing the tobacco leaf vein, but reduced the Schmuck ratio to 0.3 when processing the entire tobacco leaf. From the obtained data, it can be concluded that the technology of preliminary filamentary microplasma treatment is promising for industrial applications, in particular when middle vein of a tobacco leaf is treated and can significantly reduce the drying time and affect the qualitative composition of final product.

**Keywords:** primary processing of leaf tobacco; electrophysical methods; filamentary microplasma; electroporation; drying; intensification of the drying process; tobacco (leaf)

**Financial Support.** The work was funded by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists МК-2188.2021.4.

## Введение

Темпы производства табака в мире, при действующем международном соглашении о борьбе против табака [1] снижаются из года в год. Для производителей табачной продукции данное соглашение является главным стимулом конкурентоспособности на рынке, что способствует поиску новых технологий переработки табачного сырья и производства табачных изделий. В этой области процесс сушки выделяется как наиболее важный не только с точки зрения качества получаемого сырья, но и величины необходимых трудозатрат.

Известно, что в период сушки происходит не только удаление влаги до требуемого технологического уровня влагосодержания, но и сохранение, и закрепление качественных показателей табака, накопленных в полевой период [2]. Проведение качественного процесса сушки требует подхода, учитывающего существующие традиционные и инновационные методы [3, 4]. Наряду с развивающимися интеллектуальными способами управления процессом сушки [5] и комбинации существующих [6], наибольший интерес представляет предварительная подготовка материала к последующей сушке.

В литературе известно большое количество разнообразных методов предварительного воздействия на табачное сырье. К ним можно отнести метод механического воздействия, как например механический надрез жилки табачных изделий перед процессами сушки [7]. Авторы отмечают существенное влияние такого метода на эффективность процесса сушки и качественных характеристик. Существуют и такие физические методы воздействия на табачное сырье, как обработка электромагнитными полями, обработка лазером [8] и электрофизическая обработка [9].

При воздействии на биологический объект важным является фактор температуры, отвечающий за качество получаемого продукта [10]. Обработка низкотемпературной нитевидной микроплазмой представляет собой новый тип электрофизического воздействия, осуществляемого без значимого роста температуры продукта ( $<3^{\circ}\text{C}$ ) и способствующего изменению анатомической целостности мембран растительных клеток [11].

Целью данной работы является развитие нового вектора предварительной электрофизической обработки с помощью нитевидной микроплазмы применительно к процессу сушки табачных листьев.

## Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований использовали листья табака сорта Вирджиния 202 (селекционный сорт ВНИИТИ, Краснодар, включенный в Госреестр допущенных к использованию), убранные в стадии технической зрелости. Листья были собраны с поля на этапе третьей ломки. Средняя длина листьев составляла 45 см.

*Обработка микроплазмой.* Обработку нитевидной микроплазмой (НМ) проводили с использованием высоковольтной установки на базе высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20 (Matsusada Precision Inc, Япония). Установка, представленная на рисунке 1, обеспечивала формирование устойчивого микроплазменного разряда при поддержке термоэлектронной эмиссии (ТЭ). Параметры импульса на аноде: длительность импульса 40 мкс, частота следования импульсов 100 Гц, амплитуда импульсов 600 кВ/м. Общее количество импульсов при обработке одного листа составляло 3 тысячи единиц. Измерение высоковольтного сигнала осуществляли с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 (Tektronix, США). Ячейка для обработки листьев табака представляет собой систему из плоского анода, на котором располагают исследуемый материал и катода с ТЭ, установленного на шасси для осуществления сканирующего принципа обработки.

Для сравнения технологии рассмотрены следующие протоколы обработки (рисунок 1):

- протокол А: сушка + химический анализ листа (контрольный образец);
- протокол Б: обработка НМ жилки листа табака + сушка + химический анализ;
- протокол В: обработка НМ всей пластины листа табака + сушка + химический анализ.

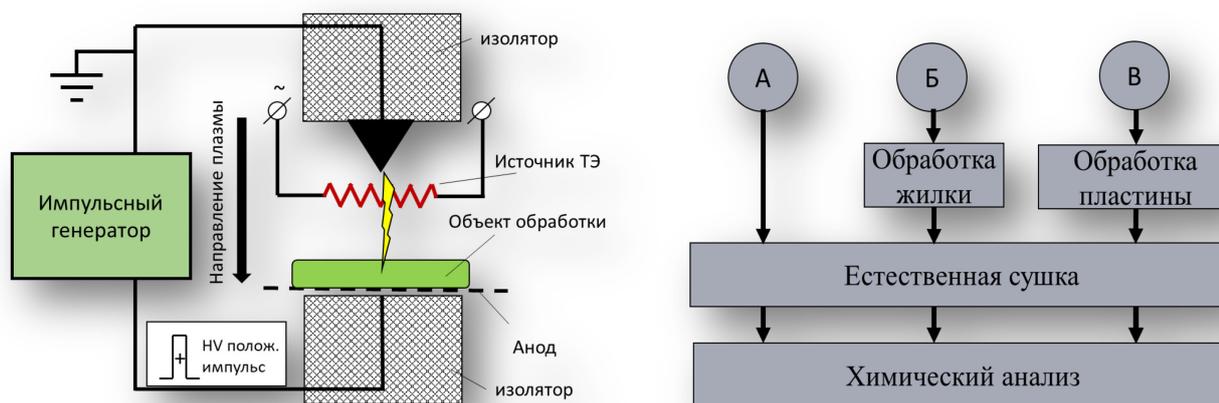


Рисунок 1 – Схема обработки нитевидной микроплазмой листового материала (слева) и протоколы обработки листьев табака (справа)

Figure 1. Tobacco leaves treatment by filamentary microplasma (left) and protocols for tobacco leaves treatment (right)

**Сушка табачных листьев.** Сушку табачных листьев по всем протоколам проводили в естественных условиях при средней температуре 23°C и относительной влажности воздуха 50%. В процессе естественной сушки табачных листьев определяли влажность исходную, после обработки и в конце сушки всего листа. В качестве метода определения влажности использовали гравиметрический метод сушки в сушильном шкафу (Binder FD53, Германия) при температуре 103°C.

Величину безразмерной влажности материала определяли по уравнению

$$E = \frac{M_i - M_R}{M_0 - M_R},$$

где  $M_i$  – масса в любой момент времени, кг/кг;

$M_R$  – равновесная влажность, кг/кг;

$M_0$  – начальная влажность материала, кг/кг.

Величину скорости сушки определяли по уравнению

$$\omega = \frac{M_{i+\Delta i} - M_i}{\Delta i},$$

где  $M_{i+\Delta i}$  и  $M_i$  – масса в любой момент времени  $i$  и  $\Delta i$ , кг/кг.

#### Качество табачного листа

**Фракционный состав.** Нарезку предварительно увлажненных до влажности 23% табачных листьев осуществляли на ротационном резательном станке, шириной нарезки волокна 1 мм. Далее разрыхляли склейки резаного табака, просушивали в открытой емкости до влажности 17–20% и фракционировали. Фракционный состав табачных листьев определяли методом просеивания в течение 60 с на приборе ЗЛТ с частотой кругового поступательного движения рабочего стола (180 ± 5) об/мин на ситах диаметром 200 мм, верхнее сито (для волокна) с диаметром ячеек 3 мм [14].

**Химический состав.** Химический анализ измельченных в пыль листьев табака проводили на определение таких основных показателей, как содержание никотина, углеводов и белков. В качестве метода определения содержания никотина использовали метод газовой хроматографии [13]. Количественный состав белков и углеводов определяли в соответствии с методикой [12].

**Структура материала.** Листья табака после обработки нитевидной плазмой исследовали на предмет изменения анатомической целостности с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 (Россия) совмещенного с цифровой камерой (HD 5MP USB Cmos Camera).

## Результаты и их обсуждение

*Влияние обработки нитевидной микроплазмы на анатомическую структуру материала.* Анатомическая структура табачных листьев наряду с морфологическими признакам и степенью зрелости существенно влияют на эффективность сушки. На рисунке 2 представлена оценка поверхности и внутренней структуры листьев табака после обработки нитевидной микроплазмой. Основным визуальным отличием поверхности листа является потемнение обработанной зоны. Снаружи ткань табачного листа покрыта слоем сравнительно однородных клеток эпидермиса (Э), расположенных в один ряд. Снаружи эпидермис покрыт сплошной, но не расчлененной на клетки пленкой – кутикулой, которая играет роль защитной ткани. Покровная ткань (эпидермис и кутикула) являются преградой для влагоотдачи в процессе сушки. При обработке нитевидной микроплазмой на поверхности листа образуются отверстия, напоминающие устьичные отверстия, через которые осуществляется интенсивный массообмен (О). В зависимости от величины напряженности электрического поля формируемые отверстия могут иметь обратимую и необратимую структуру, по аналогии с процессом электропорации [15, 16].

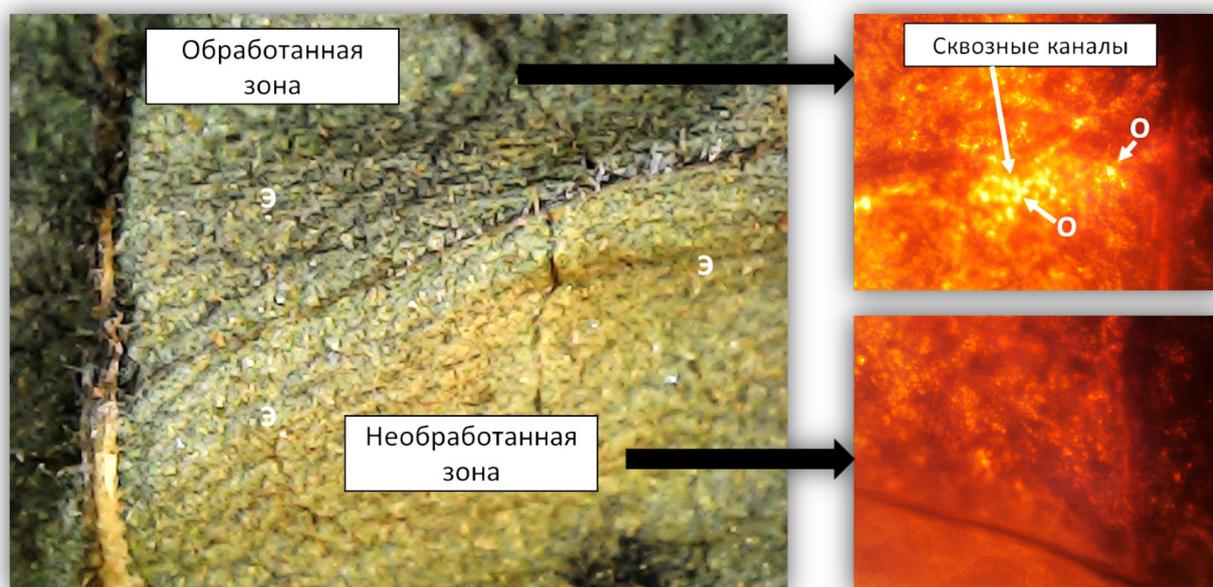


Рисунок 2 – Поверхность табачного листа: обработанная и необработанная нитевидной микроплазмой зона и фотографии с оптического микроскопа с наличием наружного эпидермиса (Э) и сквозных каналов (О)

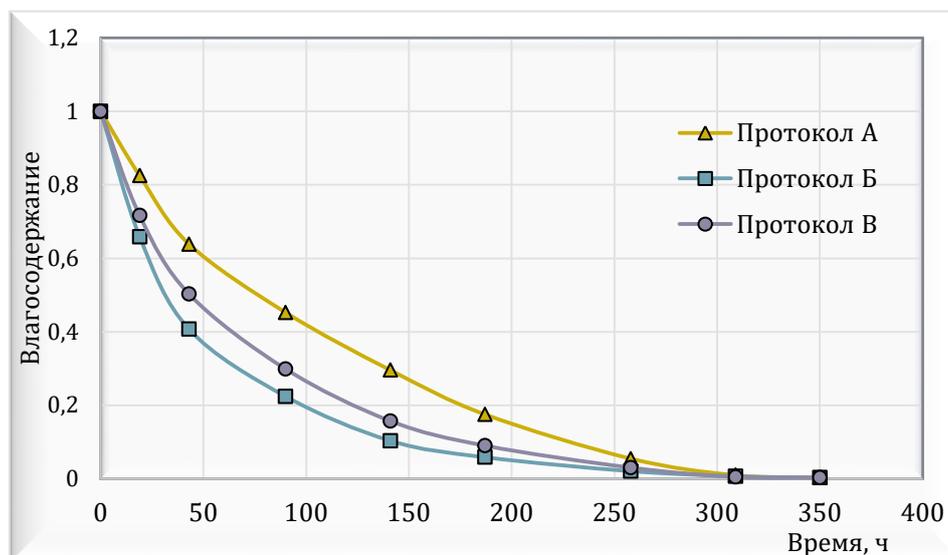
Figure 2. Tobacco leaf surface: after and before treatment by filamentary microplasma, and pictures of outer epidermis (Э) and thorough channel (О) made by optic microcode

Товароведческая оценка показала, что табачные листья, прошедшие обработку нитевидной микроплазмой по протоколу Б, не уступают по качеству контрольному образцу по протоколу А. Обработка придала листьям ровный, желто-оранжевый цвет. В окраске листьев, обработанных по протоколу В, сохраняются зеленые зоны, характеризующие исходный цвет до обработки, зафиксированный на уровне недостаточного распада хлорофилла. Данный факт говорит об изменениях в биохимических процессах (распад крахмала, распад белковых веществ и пр.), происходящих в листьях, что может повлиять на химический состав конечного продукта.

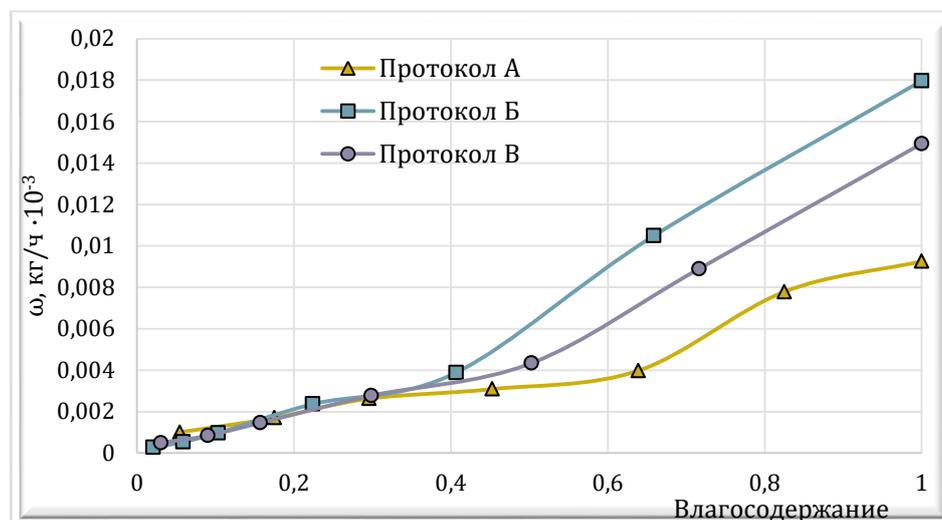
*Влияние обработки нитевидной микроплазмы на эффективность сушки.* Эффективность воздействия обработки нитевидной микроплазмой определяли по уровню потери влаги табачными листьями в процессе естественной сушки. На рисунке 3 представлены экспериментальные данные сушки табачных листьев по протоколам А, Б и В. Из рисунка 3 видно, что для всех протоколов кривая сушки характеризуется лишь наличием падающей скорости сушки и управляется диффузионным переносом влаги. Установлено, что скорость сушки листьев табака, обработанных по протоколу Б, характеризуется интенсивным массопереносом ( $\omega > 0,004 \cdot 10^{-3}$  кг/кг·ч) до достижения влажности  $E = 0,41$ , в то время как для необработанных листьев табака (протокол А) скорость сушки  $\omega = 0,004 \cdot 10^{-3}$  кг/кг·ч достигается уже

при влажности  $E = 0,65$ . Данный факт говорит о значительном ускорении процесса массопереноса для обработанных микроплазмой листьев табака. При сравнении протоколов Б и В установлено, что обработка всей пластины приводит к снижению скорости сушки, что характеризуется распределением точечной обработки на площадь всего листа. Однако учитывая, что большая часть влаги содержится именно в жилке [17], необходимость обработки всей пластины должна учитывать энергетические затраты на обработку и качественные характеристики получаемого продукта.

Стоит отметить, что по данным кривой скорости сушки величина критического влагосодержания достигается при значении  $E = 0,65$  для необработанных листьев табака, а для обработанных НМ достигает при  $E = 0,38$  при обработке жилки табака и  $0,5$  при обработке всей пластины.



(a)



(b)

Рисунок 3 – Кривые сушки (a) и кривые скорости сушки (b) табачного листа по протоколам  
 Figure 3. Tobacco leaves drying (a) and drying rate (b) curves for various protocols

На основе экспериментальных данных сушки можно сделать вывод о том, что для достижения требуемой влажности листьев табака  $E = 0,05$  для протокола А требуется 250 ч сушки, протокола Б – 170 ч и для протокола В – 220 ч. Данный факт говорит о снижении временных затрат на сушку на 32 и 12% для протоколов Б и В соответственно.

Визуальная картина процесса сушки для обработанной жилки табачных листьев представлена на рисунке 4. На рисунке отчетливо видно, что обработанная нитевидной микроплазмой жилка эффективнее подвергается процессу сушки и как следствие более интенсивной усадке.



Рисунок 4 – Образец табачного листа после сушки в течение 48 ч, предварительно обработанный нитевидной микроплазмой

Figure 4. A sample of tobacco leaf pretreated by filamentary microplasma alter 48 h drying

Экспериментальные данные, приведенные в таблице 1, показывают, что обработка табачных листьев физическими методами интенсифицирует отдачу влаги в процессе искусственной сушки по сравнению с контролем.

**Влияние обработки нитевидной микроплазмы на фракционный состав.** Данные фракционного состава, представленные в таблице 1, показывают, что количество ценного для производства волокна увеличилось для образцов листьев табака по протоколам Б и В на 7,3 и 13,3%. При этом количество пыли снизилось на 0,2 и 0,91% соответственно. Данный факт связан с наличием сквозных каналов в структуре мембран клеток при нитевидной обработке, что способствует объемному массопереносу по всему объему высушиваемого продукта. Аналогичные рассуждения были подтверждены авторами при использовании обработки импульсным электрическим полем для образцов листьев чая [16].

Таблица 1. Фракционный состав измельченных листьев табака по протоколам

Table 1. Fraction composition of broken tobacco leaves for various protocols

Образец	Количество волокна, %	Количество мелочи %	Количество пыли, %
протокол А	76,4	21,9	1,7
протокол Б	83,7	14,8	1,5
протокол В	89,7	9,52	0,79

Учитывая, что чем выше выход волокна, тем лучшие показатели будут при оценке объемно-упругих свойств и тем меньший расход сырья будет на единицу курительных изделий, то данный факт является важным для производства.

Таблица 2. Химический состав измельченных листьев табака по протоколам

Table 2. Chemical composition of broken tobacco leaves for various protocols

Образец	Содержание никотина, %	Содержание углеводов, %	Содержание белков, %	Число Шмука
протокол А	2,2	4,7	6,0	0,8
протокол Б	1,8	7,9	6,1	1,3
протокол В	1,3	2,1	7,0	0,3

**Влияние обработки нитевидной микроплазмы на химический состав.** Из полученных данных химического состава, представленных в таблице 2, следует, что влияние предварительной обработки нитевидной микроплазмой влияет на химический состав листьев табака. В результате, следуя протоколу

В, в котором обработке поддавалась вся пластина, число Шмука, как главный показатель углеводно-белкового баланса, снизилось с 0,8 до 0,3 в сравнении с протоколом А. Данный факт авторы объясняют изменениями, произошедшими после обработки всей пластины табака, в частности, снижению окислительных процессов, сопровождающихся побурением и покоричневением листьев за счет сохранения продуктов окисления – хромогенов. Дополнительная гипотеза данного факта связана с сохранением хлорофилла, отвечающего за окраску листьев.

В случае обработки листьев табака по протоколу Б установлено увеличение числа Шмука с 0,8 до 1,3. Данный факт трактуется авторами снижением длительности сушки табачных листьев, в процессе которой происходят основные химические процессы, связанные с изменениями углеводной группы. Известно, что наибольшие изменения состава табачных листьев происходят в первую фазу сушки, при которой идет энергичный распад запасных форм углеводов [18–21]. Обработка нитевидной микроплазмой способствует снижению уровня никотина, а следовательно, токсичности сырья.

## Выводы

Испытания технологии обработки нитевидной микроплазмой табачных листьев сорта Вирджиния 202 показали, что предварительная обработка обеспечивает снижение длительности сушки на 32 и 12% в сравнении с контрольным образцом при обработке жилки и всей пластины соответственно. Установлено, что при обработке нитевидной микроплазмой нарушается анатомическая целостность покровных слоев листьев табака с формированием микроразмерных сквозных каналов, способствующих более интенсивному массопереносу. Фракционный состав полученных образцов показал, что предварительная обработка нитевидной микроплазмой как жилки, так и всего листа увеличивают выход волокна, что говорит о положительном эффекте для применения в производстве.

Химический анализ обработанных листьев табака свидетельствует, что показатель углеводно-белкового баланса при обработке нитевидной микроплазмой всей пластины табака снижается. Однако при обработке НМ жилки число Шмука увеличивается. Из полученных данных можно сделать вывод, что технология предварительной микроплазменной обработки является перспективной для применения в промышленности, в частности, при обработке жилки и может влиять на химический состав и качественные характеристики получаемого конечного продукта.

Для более детального анализа влияния обработки нитевидной микроплазмой на химический состав будут проведены дополнительные исследования.

## Литература

1. Смышляев А.В., Платонова Н.И., Мельников Ю.Ю. Административно-правовые аспекты борьбы с потреблением табака в Российской Федерации на современном этапе: проблемы и перспективы // Пробелы в российском законодательстве. 2019. № 2. С. 216–219.
2. Мохначев И.Г., Загоруйко М.Г., Петрий А.И. Технология сушки и ферментации табака. М.: Колос, 1993. 271 с.
3. Шорткий И.А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке: монография. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2020. 172 с.
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V. A., Baev I.V., Prokofyev P.V., Armyanov N.K. Electrotechnology as one of the most advanced branches in the agricultural production development. *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. USA, IGI Global. 2018. pp. 149–175.
5. Li C., Ji D., Lv B., Zhang S. Research on traceability modelling of tobacco production quality based on information synergy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, V. 1646, no. 1, article 012124.
6. Long M., Hua Y., Wang X., Wang Y., He C., Huangfu D., Zi W. Effect of different combined moistening and redrying treatments on the physicochemical and sensory capabilities of smoking food tobacco material. *Drying Technology*. 2018, V. 36, pp. 52–62.
7. Ульянченко Е.Е., Гнучих Е.В., Винеvская Н.Н. Эффективность применения физических методов интенсификации сушки на различных сортах табака // Новые технологии. 2020. № 1. С. 57–65.
8. Монастырева А.М., Антоненко И.Г. Ускорение процесса искусственной сушки табака при воздействии физических методов на свежесобраные листья // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. 2009. № 178. С. 104–108.
9. Armyanov N.K., Diprose M.F., Stefanova S.L., Stoyanova T.M., Dimitrova St.K. An investigation into electrical treatment methods for the processing of tobacco leaves. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2000, V. 76, no. 2, pp. 197–203.

10. Bi S., Zhang B., Mu L., Ding X., Wang J. Optimization of tobacco drying process control based on reinforcement learning. *Drying Technology*. 2020, V. 38, no. 10, pp. 1291–1299.
11. Шорсткий И.А., Худяков Д.А. Оценка воздействия импульсного электрического разряда на процесс переноса вещества в растительном материале // Изв. вузов. Пищевая технология. 2019. № 2–3. С. 79–82.
12. Писклов В.П., Кочеткова С.К., Остапченко И.М., Пережогина Т.А., Дурунча Н.А., Попова Н.В. и др. Лабораторный контроль табачного сырья, нетабачных материалов и табачной продукции. Краснодар: Просвещение-Юг, 2014. 239 с.
13. Yiqin W., Xiuming L., Yunhua Q., Chengming Zh., Yong X., Yaling Y., Chao L. Determination of nicotine in tobacco and tobacco products by DART-MS/MS. *Tobacco Science & Technology*. 2017, V. 50, no. 8, pp. 46–51.
14. Диккер Г.Л., Дорохов П.К., Скиба Г.М. Технохимический контроль табачного производства. М.: Пищевая промышленность, 1973. 223 с.
15. Liu Z., Esveld E., Vincken J. P., Bruins M.E. Pulsed electric field as an alternative pre-treatment for drying to enhance polyphenol extraction from fresh tea leaves. *Food and Bioprocess Technology*. 2019, V. 12, no. 1, pp. 183–192.
16. Phoon P.Y., Galindo F.G., Vicente A., Dejmek P. Pulsed electric field in combination with vacuum impregnation with trehalose improves the freezing tolerance of spinach leaves. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 88, no. 1, pp. 144–148.
17. Винеvский Е.И. Винеvская Н.Н., Петрий А.И., Пестова Л.П., Бубнов Е.А. Обоснование инновационной технологии ручной уборки и послеуборочной обработки табака в едином потоке // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. №. 101. С. 742–759.
18. Zhu W.K., Wang L., Duan K., Chen L.Y., Li B. Experimental and numerical investigation of the heat and mass transfer for cut tobacco during two-stage convective drying. *Drying Technology*. 2015, V. 33, no. 8, pp. 907–914.
19. Song Z.P., Li T.S., Zhang Y.G., Cao H.J., Gong C.R., Zhang W.J. The mechanism of carotenoid degradation in flue-cured tobacco and changes in the related enzyme activities at the leaf-drying stage during the bulk curing process. *Agricultural Sciences in China*. 2010, V. 9, no. 9, pp. 1381–1388.
20. Liu J.T., Li M., Yu Q.F., Ling D.L. A novel parabolic trough concentrating solar heating for cut tobacco drying system. *International Journal of Photoenergy*. 2014, V. 2014, article 209028.
21. Sheng C., Xiaoling W. Effects of drying parameters on the quality of tobacco processing. *Journal of Southern Agriculture*. 2014, V. 45, no. 12, pp. 2248–2252.

## References

1. Smyshlyaev A.V., Platonova N.I., Melnikov Yu.Yu. Legal and administrative aspects of tobacco control in the Russian Federation: problems and perspectives. *Gaps in Russian legislation*. 2019, no. 2, pp. 216–219. (In Russian).
2. Mokhnachev I.G., Zagoruiko M.G., Petriy A.I. *Technology for drying and fermentation of tobacco*. Moscow, Kolos Publ., 1993. 288 p. (In Russian).
3. Shorstkiy I.A. *Application of pulsed electric field processing of biomaterials in preparation for drying*. Krasnodar, Publishing House – South, 2020. 172 p. (In Russian).
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V. A., Baev I.V., Prokofyev P.V., Armyanov N.K. Electrotechnology as one of the most advanced branches in the agricultural production development. *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. USA, IGI Global. 2018. pp. 149–175.
5. Li C., Ji D., Lv B., Zhang S. Research on traceability modelling of tobacco production quality based on information synergy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, V. 1646, no. 1, article 012124.
6. Long M., Hua Y., Wang X., Wang Y., He C., Huangfu D., Zi W. Effect of different combined moistening and redrying treatments on the physicochemical and sensory capabilities of smoking food tobacco material. *Drying Technology*. 2018, V. 36, pp. 52–62.
7. Ulyanchenko E.E., Gnuchikh E.V., Vinevskaya N.N. Efficiency of application of physical methods of drying intensification to various tobacco varieties. *New Technologies*. 2020, Is. 1, pp. 57–65.
8. Monastyreva A.M., Antonenko I.G. Acceleration of the process of artificial drying of tobacco under the influence of physical methods on freshly harvested leaves. *Collection of scientific papers of the All-Russian Research Institute of Tobacco, shag and Tobacco Products*. 2009, no. 178, pp. 104–108. (In Russian).
9. Armyanov N.K. Diprose M.F., Stefanova S.L., Stoyanova T.M., Dimitrova St.K. An investigation into electrical treatment methods for the processing of tobacco leaves. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2000, V. 76, no. 2, pp. 197–203.
10. Bi S., Zhang B., Mu L., Ding X., Wang J. Optimization of tobacco drying process control based on reinforcement learning. *Drying Technology*. 2020, V. 38, no. 10, pp. 1291–1299.
11. Shorstkiy I.A., Khudyakov D.A. Assessment of pulse electric discharge on the process of transfer of substance in plant material. News of institutes of higher education. *Food Technology*. 2019, no. 2–3, pp. 79–82. (In Russian).
12. Pisklov V.P., Kochetkova S.K., Ostapchenko I.M., Perezhogina T.A., Duruncha N.A., Popova N.V., et al. Laboratory

- control of tobacco raw materials, non-tobacco materials and tobacco products. *Educational and methodical manual*. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug Publ., 2014. 239 p. (In Russian).
13. Yiqin W., Xiuming L., Yunhua Q., Chengming Zh., Yong X., Yaling Y., Chao L. Determination of nicotine in tobacco and tobacco products by DART-MS/MS. *Tobacco Science & Technology*. 2017, V. 50, no. 8, pp 46–51.
  14. Dikker G.L., Dorokhov P.K., Skiba G.M. *Technochemical control of tobacco production*. Moscow, Food industry Publ., 1973. 223 p. (In Russian).
  15. Liu Z., Esveld E., Vincken J. P., Bruins M.E. Pulsed electric field as an alternative pre-treatment for drying to enhance polyphenol extraction from fresh tea leaves. *Food and Bioprocess Technology*. 2019, V. 12, no. 1, pp. 183–192.
  16. Phoon P.Y., Galindo F.G., Vicente A., Dejmeek P. Pulsed electric field in combination with vacuum impregnation with trehalose improves the freezing tolerance of spinach leaves. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 88, no. 1, pp. 144–148.
  17. Vinevskiy E.I., Vinevskaya N.N., Petrii A.I., Pestova L.P., Bubnov E.A. Proving the innovative manual harvesting technology and green leaf processing in one flow. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014, no. 101, pp. 742–759. (In Russian).
  18. Zhu W.K., Wang L., Duan K., Chen L.Y., Li B. Experimental and numerical investigation of the heat and mass transfer for cut tobacco during two-stage convective drying. *Drying Technology*. 2015, V. 33, no. 8, pp. 907–914.
  19. Song Z.P., Li T.S., Zhang Y.G., Cao H.J., Gong C.R., Zhang W.J. The mechanism of carotenoid degradation in flue-cured tobacco and changes in the related enzyme activities at the leaf-drying stage during the bulk curing process. *Agricultural Sciences in China*. 2010, V. 9, no. 9, pp. 1381–1388.
  20. Liu J.T., Li M., Yu Q.F., Ling D.L. A novel parabolic trough concentrating solar heating for cut tobacco drying system. *International Journal of Photoenergy*. 2014, V. 2014, article 209028.
  21. Sheng C., Xiaoling W. Effects of drying parameters on the quality of tobacco processing. *Journal of Southern Agriculture*. 2014, V. 45, no. 12, pp. 2248–2252.

#### Информация об авторах

Иван Александрович Шорсткий – канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения  
Максим Дмитриевич Соснин – аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения  
Евгения Вадимовна Гнучих – д-р техн. наук, замдиректора по научной работе и инновациям  
Елена Евгеньевна Ульянченко – аспирант

#### Information about the authors

Ivan A. Shorstkii, Ph. D., Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems,  
Maxim D. Sosnin, Postgraduate Student of the Department of Technological equipment and Life-Support Systems,  
E.V. Gnuchikh, D. Sc. Deputy Director for research and innovation  
E.E. Ulyanchenko, Postgraduate Student

**Вклад авторов:** И.А. Шорсткий руководил проектом; М.Д. Соснин занимался проведением лабораторных экспериментов, расчетом основных показателей качества; Е.Е. Ульянченко проводила оценку физико-механических и химических показателей качества; Е.В. Гнучих руководила проектом и предоставляла материал для исследований.

**Contribution of the authors:** I.A. Shorstkii supervised the project; M.D. Sosnin performed laboratory experiments and calculated the main quality indicators; E.E. Ulyanchenko conducted an assessment of physical, mechanical and chemical quality indicators; E.V. Gnuchikh supervised the project and provided raw materials for research.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 01.02.2021

Одобрена после рецензирования 15.02.2021

Принята к публикации 20.02.2021

The article was submitted 01.02.2021

Approved after reviewing 15.02.2021

Accepted for publication 20.02.2021