

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 663.95:615.453.87:574

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-264-10-79-84

И.А. Худоногов, М.В. Шевченко,
С.Н. Воякин, Е.Г. Худоногова
I.A. Khudonogov, M.V. Shevchenko,
S.N. Voyakin, E.G. Khudonogova

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF VOLUMETRIC INFRARED IRRADIATION IN THE THERMAL PROCESSING OF MEDICINAL PLANTS

Ключевые слова: инфракрасное облучение (ИК-облучение), термообработка лекарственных растений, процессы электрофизические, объемное облучение, сушка растительного сырья, многоярусные технологии.

Представлено теоретико-экспериментальное обоснование методов объемного инфракрасного (ИК) облучения в процессах термообработки лекарственных растений. Исследование основано на термодинамических принципах повышения энергетической эффективности оптических электротехнологий, сформулированных в работах проф. В.Н. Карпова. В рамках теории необратимых процессов показано, что величина полезного энергетического потока определяется совокупностью термодинамических сил, кинетических коэффициентов и условий взаимодействия излучения с обрабатываемой средой. Установлено, что ключевым фактором интенсификации терморadiационных процессов является повышение равномерности распределения лучистой энергии в объеме материала, а не увеличение градиентов температур. Это обеспечивает рост «напора потенциала» без увеличения сопротивления переносу и генерации энтропии, что существенно повышает энергетическую эффективность процессов. Рассмотрены возможности повышения эффективности за счет управления кинетическими коэффициентами, использования сопряженных термодинамических эффектов (свободная конвекция, термодиффузия), а также

увеличения поверхности взаимодействия. Предложен гидромеханический принцип согласованного перемещения облучаемой среды относительно градиента поглощаемого излучения, обеспечивающий равномерное объемное облучение. На основе данного принципа разработана многоярусная технологическая схема, реализующая послойную обработку материала и эффективное использование лучистой энергии без потерь. Экспериментальные исследования процесса сушки лекарственных растений, включая листья иван-чая, подтвердили, что увеличение числа слоев способствует интенсификации влагоудаления и снижению удельных энергозатрат. Показано, что рациональное сочетание предварительного конвективного нагрева и последующего ИК-облучения позволяет учитывать формы связи влаги и предотвращать разрушение биологически активных веществ. Экономия энергии при применении разработанных методов возрастает с увеличением начальной влажности сырья, что подтверждает их высокую эффективность и перспективность промышленного применения.

Keywords: infrared (IR) irradiation, thermal treatment of medicinal plants, electrophysical processes, volumetric ray treatment, plant material drying, multi-stage processing technologies.

Theoretical and experimental substantiation of volumetric infrared (IR) irradiation methods in the thermal

treatment of medicinal plants is discussed. The study is based on thermodynamic principles for improving the energy efficiency of optical electrotechnologies formulated in the works of Prof. V. N. Karpov. Within the framework of the theory of irreversible processes, it is shown that the magnitude of the useful energy flux is determined by the combination of thermodynamic forces, kinetic coefficients, and the conditions of interaction between radiation and the treated medium. It is found that the key factor in intensifying thermoradiative processes is the improvement of the uniformity of radiant energy distribution within the material volume rather than increasing temperature gradients. This approach ensures an increase of the "potential driving force" without raising transfer resistance or entropy generation, thereby significantly enhancing energy efficiency. The possibilities for improving efficiency through the control of kinetic coefficients, the use of coupled thermodynamic effects (free convection, thermodiffusion), and the increase of the interaction surface are considered. A

hydromechanical principle of coordinated movement of the irradiated medium relative to the gradient of absorbed radiation is proposed providing uniform volumetric irradiation. Based on this principle, a multi-tier technological scheme was developed implementing layer-by-layer processing of the material and efficient utilization of radiant energy without losses. Experimental studies of the drying process of medicinal plants, including fireweed leaves, confirmed that increasing the number of layers enhances moisture removal intensity and reduces specific energy consumption. It is shown that a rational combination of preliminary convective heating and subsequent IR irradiation allows accounting for different forms of moisture binding and prevents the degradation of biologically active substances. Energy savings achieved through the application of the developed methods increase with the initial moisture content of the raw material which confirms their high efficiency and prospects for industrial implementation.

Худоногов Игорь Анатольевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: hudonogovi@mail.ru.

Шевченко Максим Валерьевич, к.с.-х.н., доцент, зав. кафедрой электроэнергетики и электротехники, ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, г. Благовещенск, Российская Федерация, e-mail: shev-max@yandex.ru.

Воякин Сергей Николаевич, д.т.н., доцент, декан электроэнергетического факультета, ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, г. Благовещенск, Российская Федерация, e-mail: electro-dalgau@rambler.ru.

Худоногова Елена Геннадьевна, д.б.н., доцент, зав. кафедрой ботаники, плодового и ландшафтной архитектуры, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: doky2015@yandex.ru.

Khudonogov Igor Anatolevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: hudonogovi@mail.ru.

Shevchenko Maksim Valerevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Far Eastern State Agricultural University, Blagoveshchensk, Russian Federation, e-mail: shev-max@yandex.ru.

Voyakin Sergey Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Dean, Electrical Power Engineering Dept., Far Eastern State Agricultural University, Blagoveshchensk, Russian Federation, e-mail: electro-dalgau@rambler.ru.

Khudonogova Elena Gennadevna, Dr. Bio. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University, Molodezhnyy, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: doky2015@yandex.ru.

Введение

Фундаментальные термодинамические принципы оптических электротехнологий, разработанные профессором В.Н. Карповым, легли в основу (ИК) электротехнологии производства оздоровительного чая. Их применение позволяет повысить энергетическую эффективность процессов и оптимизировать технологические затраты. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки технологий обработки лекарственных растений, направленных на уменьшение энергозатрат при максимальном сохранении биологически активных компонентов [1, 2].

Целью работы является теоретическое обоснование и экспериментальная проверка принципов повышения энергетической эффек-

тивности ИК-электротехнологии сушки лекарственных растений.

Задачи исследования:

проанализировать термодинамические принципы интенсификации ОЭТ;

разработать технологическую схему объемного ИК-облучения;

исследовать влияние равномерности облучения и гидромеханических факторов на процесс сушки;

экспериментально оценить эффективность многоярусной организации процесса;

определить рациональные режимы термообработки термолабильного сырья.

Объектом исследования являлись листья лекарственных растений (в частности, иван-чая).

Методологической основой служили положения термодинамики необратимых процессов, в частности линейные уравнения Л. Онсагера, согласно которым полезный выходной поток определяется через разность термодинамических потенциалов системы и параметры внешней среды, учитывающие необратимые потери энергии.

$$\vec{J}_i = \sum_j L_{ij} \vec{X}_j, \quad (1)$$

где $\vec{J}_i$ – термодинамический поток i -того процесса;

L_{ij} – обобщенная термодинамическая сила j -того процесса;

$\vec{X}_j$ – феноменологические коэффициенты Онсагера;

i, j – индексы различных процессов переноса.

Применение уравнения в теории объемного облучения растительного сырья позволяет количественно оценить полезный энергетический поток, поступающий на слой листьев растений, с учетом необратимых термодинамических потерь. На основе этого подхода моделируется распределение энергии внутри объема растительного сырья, что обеспечивает выбор оптимальных параметров облучения – интенсивности, длительности и спектрального состава – для сохранения биологически активных веществ и повышения эффективности термообработки.

Для терморadiационных ОЭТ в качестве $\vec{J}_K$ выступает тепловой поток. Из уравнения (1) следует, что увеличение полезного выходного потока можно ожидать за счет повышения соответствующей ему основной движущей силы X_{Ki} , подключения дополнительных спутных движущих сил X_i , увеличения кинетических коэффициентов L_{Ki} , а также увеличения поверхности или объема взаимодействия.

Рассмотрим особенности направлений с учетом специфики оптического облучения. Движущая сила обычно определяется градиентом соответствующего потенциала. При равномерном объемном облучении температурные градиенты отсутствуют, а движущая сила задается «напором потенциала», который может возрасти до достижения кинетических ограничений явления. Равномерное объемное облучение обеспечивает полное использование термодинамического потенциала, повышает энергоэкономичность оптических электротехнологий, позволяет по-

глощать большую мощность без роста сопротивления переносу. Следовательно, принципом повышения эффективности является улучшение качества облучения [3, 4].

Дополнительные движущие силы, совмещенные с основной, усиливают выходной поток за счет сопряженных термодинамических эффектов (например, свободной конвекции и термодиффузии). Несмотря на увеличение производства энтропии, феноменологические коэффициенты сохраняют существенный резерв повышения эффективности процесса.

Потенциал интенсификации процессов термообработки лекарственного растительного сырья связан с реализацией двух подходов: микроуровень, предполагает использование нестационарных режимов энергетического воздействия, включая импульсное облучение, и управляемые температурные колебания. Макроуровневая интенсификация обеспечивается гидромеханическими методами, способствующими обновлению межфазной поверхности, развитию пленочного течения и перемешиванию среды. Рассмотренные закономерности носят универсальный характер для ОЭТ и допускают использование дополнительных методов, обусловленных спецификой их реализации. Даже использование этих принципов позволяет создавать эффективные технологические схемы облучения.

Схемы различаются для поверхностного и объемного облучения: первое применяется к объектам фиксированной формы, второе – к газам, жидкостям и сыпучим средам. Равномерность объемного поглощения достигается оптимизацией слоя и излучателей, однако более эффективно согласованное движение среды с направлением излучения, обеспечивающее равномерную дозу энергии и однородность обработки.

Для анализа теплообмена использовалось уравнение Ньютона, согласно которому количество теплоты Q , передаваемое при конвективном теплообмене от теплоносителя к продукту, определяется коэффициентом теплопередачи α_K , площади поверхности теплообмена F и температурного напора между теплоносителем t_c и продуктом t_n :

$$Q = \alpha_K \cdot F(t_c - t_n). \quad (2)$$

Эффективность удаления влаги возрастает при расширении поверхности контакта между продуктом и теплоносителем, что обусловлено усилением теплообмена [5-7].

Применялись **экспериментальные методы** исследования процессов сушки с использованием ИК-облучения в различных технологических схемах (однослойной и многоярусной).

Для реализации объемного облучения предложена схема, в которой перемещение обрабатываемого материала согласовано с распределением лучистой энергии в рабочей зоне (рис. 1).

Регулирование толщины снимаемого слоя обеспечивает минимальную неравномерность поглощения и эффективное использование излучения, которое передается нижележащим слоям без потерь.

Реализованная по данному методу многоярусная установка для процесса сушки лекарственных растений сочетает высокую энергоэффективность, технологичность и качество термообработки.

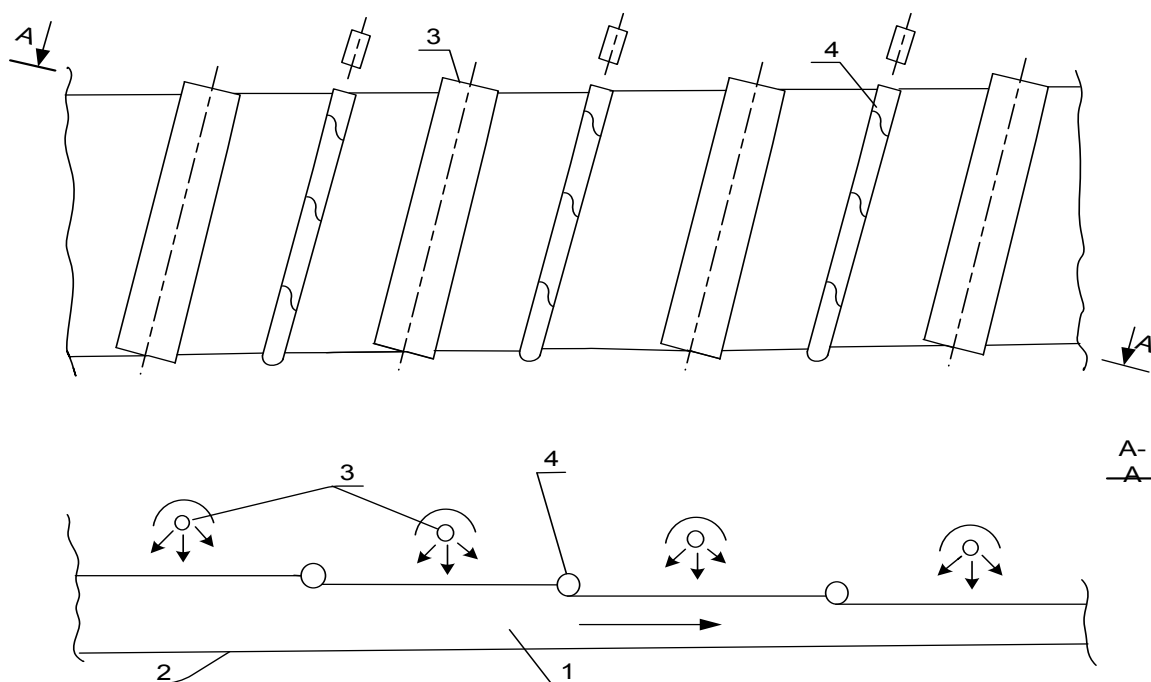


Рис. 1. Схема реализации объемного облучения:
1 – лекарственное растительное сырье; 2 – камера технологическая; 3 – ИК-источник;
4 – механизм удаления продукта из зоны облучения

Экспериментальные исследования сушки листьев лекарственных растений, реализованные в многоярусной установке, подтвердили принцип послойного распределения продукта [8].

Результаты исследований

Рассматривались три варианта: однослойная (А), двухслойная (В) и трёхслойная (С) загрузка при одинаковой мощности ИК-излучения, интенсивности вентиляции и времени сушки (15 мин.) (рис. 2). Результаты для листьев иван-чая, представленные в таблице, показали, что схемы

с двумя и тремя слоями обеспечивают более эффективное удаление влаги, особенно при повышенной начальной влажности сырья. Было выявлено, что в начале процесса сушки, когда удаляется слабосвязанная влага, не требуется высокоинтенсивный нагрев во избежание потерь биологически активных веществ.

Исследования подтвердили, что многоярусные схемы сушки при влажности сырья выше 20% обеспечивают экономию энергии в пределах 4,2-11,8%, причём эффект возрастает с увеличением исходной влажности.

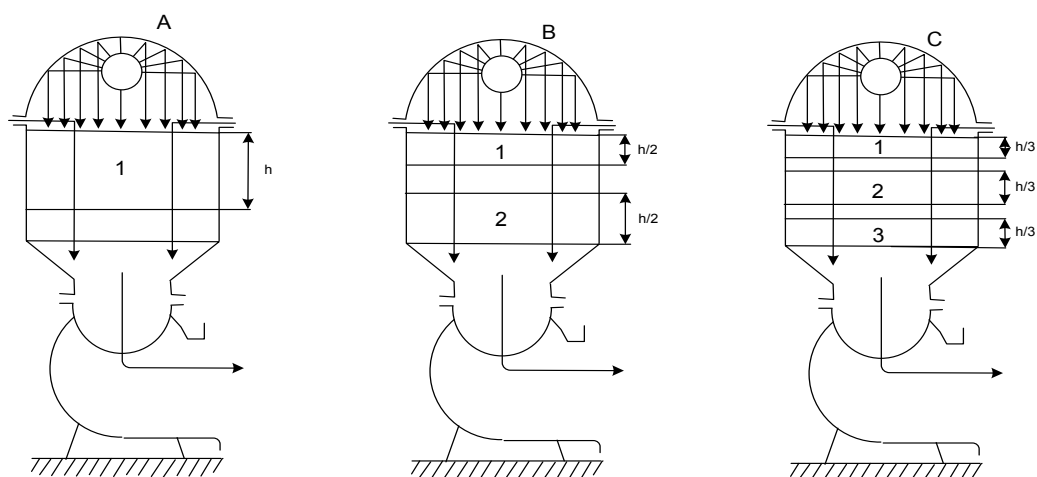


Рис. 2. Варианты послойного распределения лекарственного сырья в процессе сушки

Таблица
Результаты сушки листьев иван-чая
при различной толщине слоя

Вариант схемы	Влагоудаление, г		
	А	В	С
1	5,00	4,9	6,00
2	5,56	5,46	5,23
3	5,31	6,03	7,19

Выводы

1. Ключевой фактор эффективности ИК-обработки – равномерное распределение лучистой энергии в материале, а не рост температурных градиентов. Это повышает «напор потенциала» без лишних потерь и энтропии.

2. Объемное ИК-облучение с равномерным распределением энергии и многоярусной организацией – эффективный метод термообработки лекарственных растений, обеспечивающий качество, интенсификацию процессов и снижение энергозатрат.

3. Последовательность нагрева (сначала мягкий, затем интенсивный ИК) учитывает формы влаги и предотвращает разрушение термолабильных веществ.

4. Многоярусная сушка эффективнее однослойной: ускоряет удаление влаги и снижает энергозатраты (экономия 4,2-11,8%, выше при большей начальной влажности).

Библиографический список

1. Исследование процесса сушки растительного сырья / А. В. Зыков, В. А. Юнин, А. М. Захаров, А. Н. Перекопской. – DOI 10.23670/IRJ020.101.11.022. – Текст непосредственный // Международный научно-исследо-

вательский журнал. – 2020. – № 11 (101). – С. 134-139.

2. Михайлова, А. В. Сушка лекарственного растительного сырья и сохранение биологически активных веществ / А. В. Михайлова, В. П. Карпова. – Текст непосредственный // Фитотерапия. – 2019. – № 3. – С. 12-20.

3. Новые электротехнологии переработки растительного сырья Алтайского края / М. В. Радченко, Т. Б. Радченко, В. В. Шевченко, О. А. Ляпин – Текст: непосредственный // Ползуновский альманах. – 2004. – № 3. – С. 81-84.

4. Костенко, В. И. Электротехнологические методы переработки лекарственного растительного сырья / В. И. Костенко, С. А. Мартынов, Л. Н. Петрова – Текст: непосредственный // Химия растительного сырья. – 2021. – № 4. – С. 45-54.

5. Жданов, Д. А. Определение влажности лекарственного растительного сырья методом ИК-термогравиметрии / Д. А. Жданов, В. Б. Браславский, В. А. Куркин. – Текст: непосредственный // Аспирантский вестник Поволжья. – 2021. – № 5-6. – С. 73-77.

6. Кузнецова, М. А. Лекарственное растительное сырье: учебное пособие для химико-технологических техникумов, фармакологических и медицинских училищ / М. А. Кузнецова. – Москва: Высшая школа, 1984. – 208 с. – Текст: непосредственный.

7. Kudra, T., Mujumdar, A.S. (2009). Advanced Drying Technologies (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>.

References

1. Zykov A. V, Yunin V. A., Zakharov A. M., Perekopsky A.N. Issledovanie protsessa sushki

rastitelnogo syrya / A.V. Zykov, V.A. Yunin, A.M. Zakharov, A.N. Pereporskoy // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. – 2020. – No. 11 (101). – DOI:10.23670/IRJ020.101.11.022.

2. Mikhaylova A. V., Karpova V. P. Sushka lekarstvennogo rastitelnogo syrya i sokhraneniye biologicheskii aktivnykh veshchestv / A. V. Mikhaylova, V. P. Karpova // Fitoterapiya. – 2019. – No. 3. – S. 12-20.

3. Radchenko M. V., Radchenko T. B., Shevchenko V. V., Lyapin O. A. Novye elektrotekhnologii pererabotki rastitelnogo syrya Altayskogo kraya / M.V. Radchenko, T. B. Radchenko, V. V. Shevchenko, O. A. Lyapin // Polzunovskiy almanakh. – 2004. – No. 3. – S. 81–84.

4. Kostenko V. I., Martynov S. A., Petrova L. N. Elektrotekhnologicheskie metody pererabotki le-

karstvennogo rastitelnogo syrya / V. I. Kostenko, S. A. Martynov L. N. Petrova // Khimiya rastitelnogo syrya. – 2021. – No. 4. – S. 45–54.

5. Zhdanov D. A., Braslavskiy V.B., Kurkin V. A. Opredeleniye vlazhnosti lekarstvennogo rastitelnogo syrya metodom IK-termogravimetrii / D.A. Zhdanov, V.B. Braslavskiy, V.A. Kurkin // Aspirantskiy vestnik Povolzhya. – 2021. – No. 5–6. – S. 73–77.

6. Kuznetsova M. A. Lekarstvennoe rastitelnoe syre. Uchebnoe posobie dlya khimiko-tekhnologicheskikh tekhnikumov, farmakologicheskikh i meditsinskikh uchilishch. – Moskva: Vysshaya shkola, 1984. – 208 s.

7. Kudra, T., Mujumdar, A.S. (2009). Advanced Drying Technologies (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>.



УДК 681.586.48

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-264-10-84-91

В.А. Осипов, Ц.И. Калинин, Р.А. Куницын

V.A. Osipov, Ts.I. Kalinin, R.A. Kunitsyn

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

LINEARIZATION OUTCOMES OF STATIC CHARACTERISTIC OF AN ULTRASONIC TRANSDUCER MEASURING THE PARAMETERS OF FIBER MATERIALS

Ключевые слова: ультразвук, математическая модель, погрешность измерения, линеаризация статической характеристики, измерительный преобразователь.

Известно, что качество получаемых полуфабрикатов и изделий из волоконного сырья зависит от физико-механических свойств используемых материалов. В настоящее время волоконное сырье обрабатывается на высокоскоростных агрегатах по технологиям непрерывных процессов с минимальным числом переходов. Такие технологии возможны при автоматическом регулировании работы агрегатов и автоматизированном экспресс-контроле, чтобы обеспечить показатели продуктов переработки (ленты, нити) с заданной массой (номером) и минимально допустимой неравномерностью (квадратическая неравномерность). Рассматривается перспектива решения этих задач путем применения ультразвуковых акустических датчиков. Цель работы – выполнить сравнительный анализ линеаризации статической характеристики ЭАПП и произвести выбор базовой схемы, обеспечивающей минимальную статическую по-

грешность. Выполнена аппроксимация входной статической характеристики ультразвукового датчика экспоненциальным полиномом, на основании чего обосновано ее преимущество в сравнении с логарифмическим методом линеаризации. Рассмотрены и исследованы 2 структурные схемы линеаризации статической характеристики ультразвукового датчика: коррекция с помощью логарифмического усилителя, коррекция с помощью функционального генератора. Без линеаризации коэффициент усиления изменяется от 6,1 до 0,4 В/кТекс, а относительная погрешность достигает 110%. Логарифмическая схема не обеспечивает линейности: отклонения K_u составляют от -36% до +61% относительно среднего значения 3,1 В/кТекс. Предложенная схема с функциональным генератором стабилизирует коэффициент усиления на уровне 3 В/кТекс с отклонениями, не превышающими погрешности измерительного тракта. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации систем автоматизированного контроля качества волокнистого сырья на предприятиях агропромышленного комплекса.