

УДК 021.166:004.94
DOI 10.47367/0021-3497_2025_4_115

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УЗКОГО ЛУЧЕВОГО ПОТОКА
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**STUDY OF A NARROW BEAM PASSAGE FOR THE
IMPLEMENTATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS OF FIBROUS
MATERIALS**

С.Н. ВИНИЧЕНКО, Е.А. РЫЖКОВА

S.N. VINICHENKO, E.A. RYZHKOVA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Kosygin Russian State University)

E-mail: vini80_06@mail.ru

В статье рассмотрены аналитические методы оценки однократного и двукратного рассеяния инфракрасного потока при прохождении узкого лучевого излучения через волокнистый материал, что позволяет определить значения энергетической яркости рассеяния при различных углах наблюдения. При этом учитывается, что оценка неровноты смешивания натуральных и химических волокон во многом зависит от характера изменения прохождения данного излучения через исследуемый продукт. Представлены результаты моделирования изменения энергетической яркости однократно и двукратно рассеянного потока излучения при различных углах наблюдения, которые показали, что изменение энергетической яркости во многом зависит от толщины слоя волокнистого материала.

The article examines analytical methods for assessing single and double scattering of infrared fluxes when passing a narrow beam of radiation through fibrous material, which allows determining the values of scattering radiance at different observation angles. It is also taken into account that assessing the unevenness of the blending of natural and chemical fibers largely depends on the nature of the change in the transmission of this radiation through the product under study. The results of modeling the change in the radiance of single and double scattered radiation fluxes at different observation angles are presented, which showed that the change in radiance largely depends on the thickness of the fibrous material layer.

Ключевые слова: текстильные волокна, узкий лучевой поток, энергетическая яркость, однократное и двукратное рассеяние потока излучения, модель изменения энергетической яркости рассеяния.

Keywords: textile fibers, narrow beam flux, radiance, single and double scattering of radiation flux, model of change in radiance scattering.

Введение

Современные требования к качеству текстильных материалов обуславливают необходимость совершенствования методов контроля их структуры и состава. Особую актуальность приобретает задача неразрушающего определения характеристик смешанных текстильных волокон, позволяющая сохранить целостность материала при проведении испытаний.

Для реализации неразрушающего контроля смешивания текстильных волокон следует уделять особое внимание разработке методов определения количественных и качественных характеристик исследуемого материала.

Методы

Перспективным направлением определения неровноты смешивания разнородных волокон непосредственно на оборудовании подготовительных процессов прядильного [1] производства является инфракрасный метод оценки [2...4]. При этом для наблюдения за прохождением узкого лучевого потока через волокнистый материал с преимущественно ориентированными в одном направлении волокнами [4, 5] наиболее предпочтительным является метод последовательного учета рассеяния потока разных кратностей [6]. Энергетическая яркость выходящего излучения $\Phi_{\text{пр}}$, Вт/м², в общем случае определяется выражением [7, 8]:

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi_0 e^{-l_{y0}}, \quad (1)$$

где Φ_0 – поток входного излучения, Вт/м²; $l_{y0} = (\kappa_a + S) l$, м – оптическая длина, зависящая от коэффициентов поглощения κ_a и рассеяния S , а также от геометрической толщины l , м, исследуемого материала.

В полярных координатах для узкого лучевого потока в телесном угле $\Delta\omega$ шириной $2l_0$ (м) однократно рассеянный поток, прошедший через слой волокнистого материала и существующий в любой точке l_{x0} (м), под углом наблюдения β будет определяться выражением:

$$B_{\text{пр}} = \frac{\alpha B_0 \mu(\beta) S h l_0 \Delta\omega}{\pi \sin \beta} e^{-[l_{y0} + (l_{x0} - l_0) \operatorname{tg}(\beta/2)]}. \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{S}{S + \kappa_a}$; $\mu(\beta)$ – индикатриса рассеяния под углом наблюдения β .

В общем случае индикатриса рассеяния задается таблицей значений по углам рассеяния и является нерегулярной функцией [9]. Однако для текстильных волокон данные значения должны определяться экспериментально. Поэтому для описания параметров индикатрисы при аналитических расчетах одним из удобных способов будет являться разложение среднего косинуса $q = \overline{\cos(\varphi)}$ угла рассеяния φ индикатрисы с помощью аппроксимации функцией Хэни-Гринштейна [10]:

$$\mu(\varphi) = \frac{1-q^2}{(1+q^2-2q\cos\varphi)^{3/2}}, \quad 0 \leq \varphi \leq 1. \quad (3)$$

Согласно данной формуле при значении $q = 0$ индикатриса рассеяния будет иметь сферическую форму, при $q \sim 0,8 \dots 0,9$ – вытянутую вперед. При этом, как показано в работе [9], для преимущественно ориентированных волокон рассеивание света в горизонтальной плоскости полярных координат будет уменьшаться в направлении, параллельном оси прохождения продукта, и увеличиваться в перпендикулярном.

Учитывая, что однократно рассеянный поток существует при таких значениях

$$B_{\text{пр}} = \frac{\alpha B_0 \mu(\beta) (l_{x0} - 2l_0) \Delta\omega}{2\pi \sin\beta} e^{-[l_{y0} + (l_{x0} - 2l_0)/2 \cdot \text{tg}(\beta/2)]}. \quad (5)$$

Если $\beta = 0$, то

$$B_{\text{пр}} = \frac{\alpha}{2\pi} B_0 \mu(0) l_{y0} \Delta\omega e^{-l_{y0}}. \quad (6)$$

Результаты и обсуждения

Полученные результаты моделирования (рис. 1) показали, что малая толщина плоскопараллельного слоя ведет к увеличению энергетической яркости излучения рассеяния, что характерно для малых углов наблюдения.

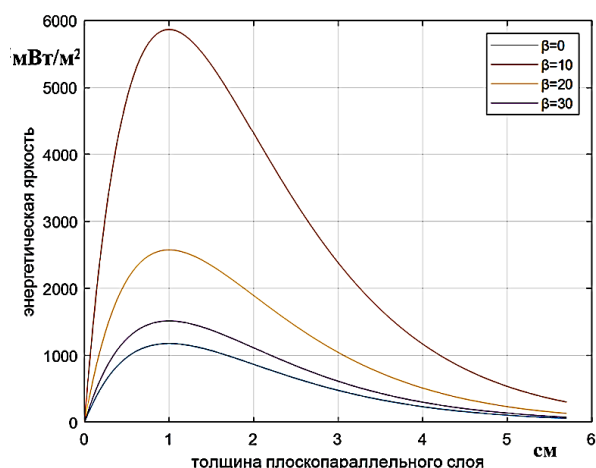


Рис. 1

$$B_{2\text{пр}} = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 \frac{B_0 2l_0 \Delta\omega}{\cos\beta} e^{-l_{y0}/\cos\beta} \int_0^{l_{y0}} e^{-l_y \frac{1-\cos\beta}{\cos\beta}} dl_y \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{\mu(\gamma)\mu(\gamma+\beta)}{\sin(\gamma+\beta)} e^{-[(l_{x0}-l_0)-(l_{y0}-l_y)\text{tg}\beta]\text{tg}(\frac{\gamma+\beta}{2})} d\gamma, \quad (9)$$

углов наблюдения и падения β , как $\infty \gg \text{tg}\beta \gg l_{x0}/l_{y0}$, при расположении l_{x0} на участках от l_0 до $2l_0$ яркость однократно рассеянного потока будем рассчитывать по формуле:

$$B_{\text{пр}} = \frac{\alpha B_0 \mu(\beta) l_{x0} \Delta\omega}{2\pi \sin\beta} e^{-[l_{y0} + l_{x0}/2 \cdot \text{tg}(\beta/2)]}. \quad (4)$$

Тогда, как при условии $(l_{x0} - 2l_0)/l_0 \gg \text{tg}(-\beta) \gg -\infty$, уравнение будет иметь вид, Вт/м²:

Так, наибольшую яркость рассеянного потока, проходящего через ленту с преимущественно ориентированными в одном направлении волокнами, можно наблюдать в точках, близких к основному потоку излучения, т. е. при малых углах β . С увеличением угла наблюдения энергетическая яркость излучения рассеяния начинает уменьшаться.

Рассматривая двукратное рассеяние инфракрасного излучения, следует учитывать, что яркость потока, однократно рассеянного под определенным углом γ к точке наблюдения А с соответствующими координатами l_x и l_y , будет определяться аналогично вышеприведенным выражениям:

$$B_A = \frac{\alpha B_0 \mu(\gamma+\beta) l_0}{\pi \sin(\gamma+\beta)} e^{-(l_y - l_0)}. \quad (7)$$

Тогда яркость потока излучения, выходящего под углом β , будет определяться интегрированием условия:

$$d^2 B_{2\text{пр}} = \frac{\alpha B_A \mu(\gamma)}{2\pi \cos\beta} e^{-\frac{(l_{y0}-l_y)}{\cos\beta}} dl_y d\gamma. \quad (8)$$

Таким образом,

где предельные углы интегрирования γ_1 и γ_2 рассчитываются по формулам:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{l_{x0} - (l_{y0} - l_y) \operatorname{tg} \beta}{l_y} - \beta$$

$$\gamma_2 = \arctg \frac{l_{x0} - (l_{y0} - l_y) \operatorname{tg} \beta}{(l_y - l_{y0})} - \beta, \quad (10)$$

$$B_{2\text{пр}} = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 B_0 2l_0 \Delta \omega e^{-l_{y0}} \int_0^{l_{y0}} e^{-l_y} dl_y \int_{\arctg \frac{l_{x0}}{l_y}}^{\arctg \frac{l_{x0}}{l_y - l_{y0}}} \frac{\mu(\gamma)^2}{\sin \gamma} e^{-(l_{x0} - l_0) \operatorname{tg}(\frac{\gamma}{2})} d\gamma. \quad (11)$$

Результаты моделирования двукратного рассеяния потока излучения, выходящего под углом β , показали (рис. 2), что увеличение толщины волокнистого слоя, т. е. уплотнение волокнистой массы, приводит к большему рассеиванию излучения.

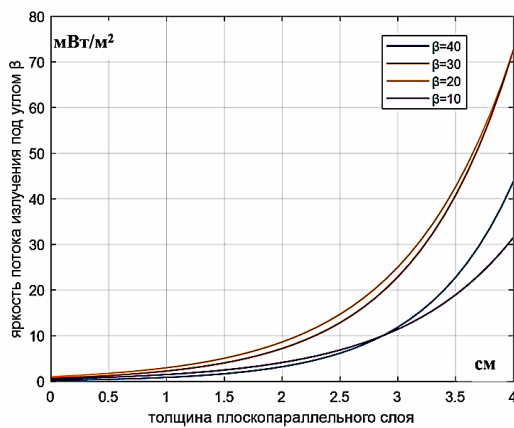


Рис. 2

Анализируя вышесказанное, следует отметить, что для решения задачи оптимального расположения нескольких источников и приемников излучения необходимо соблюдать определенное расстояние между ними, исключая тем самым искажения результатов измерения из-за влияния рассеянного потока излучения на чувствительные элементы.

ВЫВОДЫ

Полученные модели уравнений изменения энергетической яркости излучения, выходящего из материала, показали, что наибольшую яркость рассеянного узкого

l_{x0} — координата точки и поверхности слоя, где наблюдается отраженный поток.

Следовательно, при $\beta = 0$ выражение (8) примет вид, Вт/м²:

лучевого потока инфракрасного излучения, проходящего через волокнистый материал, можно наблюдать в точках, близких к основному потоку излучения. С увеличением расстояния угла наблюдения значительно сокращается и энергетическая яркость рассеянного потока.

Проведенные исследования прохождения инфракрасного потока через волокнистый материал позволяют решить задачу оптимального расположения источника и приемника излучения оптоэлектронного преобразователя для оценки неровноты смешивания волокон в полупродуктах прядельного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарчук М.М. Измерительно-контрольные системы в прядении // Сб-к науч. тр. междунар. науч. конф., посвященной 150-летию со дня рождения проф. Н.А. Васильева. М., 2021. С. 70...75.
2. Никонов М.В., Рыжкова Е.А. Математическое обоснование универсальности оптического датчика // Сб-к науч. тр. междунар. науч.-техн. симпозиума, Международного Косыгинского форума. М., 2019. С. 42...46.
3. Виниченко С.Н., Севостьянов П.А., Масанов Д.В. Компьютерный анализ регрессионных моделей качества смешивания разнородных волокон, полученных в результате полного факторного эксперимента // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 213...217.
4. Никонов М.В., Рыжкова Е.А. Подбор типовой архитектуры системы сбора данных для анализа качества смешивания волокнистых материалов методом ИК-спектроскопии // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020). М., 2020. С. 200...203.

5. *Kazarova A.D., Ryzhkova E.A.* Aspects of the transit of a narrow beam of infrared radiation through a fibrous material // *Fibre Chemistry*, 2018, 49, № 6. pp. 400...404.

6. *Белай О.В.* Быстрый численный метод второго порядка точности для решения обратной задачи рассеяния // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52, № 11. С. 1039...1043.

7. *Козлов А.Б.* Повышение эффективности процессов текстильной технологии за счет контроля параметров качества продукции на базе оптоэлектронной техники: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994. 372 с.

8. *Виниченко С.Н.* Оценка энергетической яркости выходящего из материала излучения, с учетом эффекта рассеяния // *Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022)*. М., 2022. С. 225...228.

9. *Сухарев П.А.* Разработка неразрушающих методов определения параметров структуры волокнистых материалов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 129 с.

10. *Лобанова М.А., Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Зависимость параметра асимметрии индикатрисы рассеяния от характеристик среды / *ResearchGate*, 2010. – URL: [researchgate.net/publication/272479208](https://www.researchgate.net/publication/272479208)

REFERENCES

1. *Bondarchuk M.M.* Measuring and control systems in spinning// *Collection of scientific papers of the International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor N.A. Vasiliev*. Collection of scientific papers. Moscow, 2021. pp. 70...75.

2. *Nikonov M.V., Ryzhkova E.A.* Mathematical substantiation of the universality of an optical sensor // *Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium, International Kosygin'sky Forum*. Moscow, 2019. pp. 42...46.

3. *Vinichenko S.N., Sevostyanov P.A., Masanov D.V.* Computer analysis of regression models of the mixing

quality of dissimilar fibers obtained as a result a complete factorial experiment // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2024. No. 3 (411). pp. 213...217.

4. *Nikonov M.V., Ryzhkova E.A.* Selection of a typical data collection system architecture for quality analysis of fibrous materials mixing by IR spectroscopy // *Design, technologies and innovations in the textile and light industry (INNOVATIONS-2020)*. Moscow, 2020. pp. 200...203.

5. *Kazarova A.D., Ryzhkova E.A.* Aspects of the transit of a narrow beam of infrared radiation through a fibrous material // *Fiber Chemistry*, 2018, 49, No. 6. pp. 400...404.

6. *Belai O.V.* Fast numerical method of the second order of accuracy for solving the inverse scattering problem // *Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, No. 11. pp. 1039...1043.

7. *Kozlov A. B.* Improving the Efficiency of Textile Technology Processes by Monitoring Product Quality Parameters Using Optoelectronic Technology: dissertation for Doctor of Technical Sciences. Moscow, 1994, 372 p.

8. *Vinichenko S. N.* Assessment of Radiance of Radiation Emitted by a Material, Taking into Account the Scattering Effect // *Design, technology and innovation in the textile and light industry (INNOVATIONS-2022)*. М.: 2022. P. 225...228.

9. *Sukharev P.A.* Development of non-destructive methods for determining the structural parameters of fibrous materials: dissertation ... candidate of technical sciences. St. Petersburg, 2015. 129 p.

10. *Lobanova M.A., Vasiliev A.V., Melnikova I.N.* Dependence of the asymmetry parameter of the scattering indicatrix on the characteristics of the medium / *ResearchGate*. 2010. – URL: [researchgate.net/publication/272479208](https://www.researchgate.net/publication/272479208)

Рекомендована кафедрой автоматизации и промышленной электроники РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 10.06.25.