

### 3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

---

УДК 66.33.31; 44.31.01

УДК 620.9:662.6

Ар.А. Федяев. Ал.А. Федяев

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВИДЕНИЯ

*Введение.* Различные методы по определению тепловых потерь в окружающую среду элементами теплотехнологического оборудования используются в настоящее время. Величина потерь теплоты, как правило, колеблется в пределах нескольких процентов, а в ряде случаев и существенно больше. Любое теплотехнологическое оборудование имеет свои режимы работы, различные конфигурации рабочих поверхностей нагрева и температурные диапазоны. Для расчета величины коэффициентов теплоотдачи часто используют эмпирические зависимости вида  $Nu = f(Gr, Pr)$  или данные, полученные при помощи программных продуктов по расчету тепло- и массообмена с двух- и трехмерной графикой. Использование таких программных продуктов (например, PHOENICS) позволяет уточнить получаемые значения коэффициентов.

В связи со сложностью использования подобных программ, тем более для объектов с переменными геометрическими формами, нередко при исследованиях выполняется экспериментальная оценка величины фактических тепловых потерь теплотехнологическими установками с помощью обследования тепловизором. Величина потерь тепловой энергии, как правило, весьма существенная, всегда необходима при выполнении такого важного элемента энергоаудита любого предприятия как тепловой баланс [Федяев и др., 2014; Данилов, Леончик, 1986; Баскаков и др., 1991], важную роль в определении которых играют тепловизионные обследования.

Инфракрасное сканирование играет важную роль в техническом обслуживании промышленного оборудования. Изображения, полученные в невидимом человеческому глазу тепловом диапазоне, позволяют без со-

прикосновения с объектом получить полную информацию о распределении температуры по поверхности объекта, что позволяет выявить температурные аномалии, нередко предшествующие отказам техники.

Тепловые методы контроля оборудования позволяют производить его диагностику в процессе эксплуатации, не требуя отключения оборудования на время диагностики, использования трудоемких измерений температуры и тепловых выделений [Данилов, Леончик, 1986; Федяев, Шейшенов, 2013; Федяев А., Федяев П., 2003].

Современные приборы для инфракрасного обследования обладают широкими возможностями для отслеживания тепловой информации в реальном времени, что существенно повышает оперативность контроля. Кроме того, современный инфракрасный прибор обязательно имеет устройство для запоминания полученных тепловых изображений с целью их последующей обработки в лабораторных условиях. Это позволяет проследить долговременные тенденции поведения оборудования и выявить возможные неисправности задолго до их возникновения.

Есть ряд условий для объективного проведения тепловизионных измерений: обследование проводят при изменении среднесуточных температур наружного воздуха, близком к стационарному режиму теплопередачи. Отклонение фактического режима теплопередачи от стационарного оценивают по справочному приложению ГОСТ 26629–85 «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций»; при измерениях поверхность обследуемой ограждающей конструкции условно разбивают на зоны, включающие в поле обзора элементы, являющиеся геометрическими реперами с известными линейными размерами; натурные тепловизионные обследования проводят по возможности при отсутствии атмосферных осадков, тумана и задымленности; расстояние до объекта измерений варьируется от 2 до 50 м, угол визирования желателно не должен превышать +/- 20 град (ГОСТ Р 54852–2011), [Садович и др., 2011].

Определение погрешности при проведении тепловизионных измерений. Погрешность измерения температуры по абсолютно черному телу не более  $\pm 2\%$  от верхнего значения шкалы или  $\pm 2$  °С (паспортное значение для тепловизоров, инфракрасных сканеров и пирометров). При использовании метода сличения температурная чувствительность аппаратуры должна составлять не более  $\pm 1$  °С (для пирометров) и  $\pm 0,2$  °С (паспортное значение для тепловизоров).

Измеряемой величиной при определении теплотерь объекта и сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций является температура. При определении погрешности измерения температуры также реко-

мендуется исходить из погрешности ее измерений практически на уровне 0,5–2,0 °С при использовании тепловизора.

Важными составляющими тепловизионного обследования являются методы измерений и требования к средствам измерений. Метод измерения температурного поля поверхности зданий и сооружений основан на регистрации теплового излучения любого физического тела с температурой, отличной от температуры абсолютного нуля, с использованием тепловизионного комплекса, обеспечивающего бесконтактную регистрацию теплового излучения [Федяев и др., 2014; Данилов, Леончик, 1986; Баскаков и др., 1991].

*Методика исследования.* В результате оптико-механического сканирования исследуемой поверхности оборудования при использовании тепловизора на неохлаждаемый многоэлементный приемник излучения последовательно попадает излучение от каждой точки объекта в пределах поля зрения. На выходах приемника образуется видеосигнал, который после усиления, аналого-цифрового преобразования, цифрового запоминания и цифро-аналогового преобразования управляет яркостью и цветностью изображения на видеоконтрольном устройстве. Аналого-цифровое преобразование и встроенные в тепловизор абсолютно – черное тело позволяют производить измерение численного значения температурного поля. Температурное поле поверхности исследуемой конструкции отображается в условных цветах.

В состав программно-аппаратного комплекса входит: тепловизор (ИК-сканер «Аврора»), набор приборов для определения параметров окружающей среды и объекта контроля, компьютерная система и пакет прикладных программ расчета выходных характеристик. Определение дефектов наружных ограждающих конструкций, определение их теплотехнических характеристик и определение тепловых потерь производится путем измерения температуры по поверхности наружной ограждающей конструкции. Также определяются параметры окружающей среды и внутреннего воздуха с последующей обработкой изображений тепловых полей с использованием программно-аппаратного комплекса.

При выполнении тепловизионных измерений проводится ряд подготовительных операций: на основе проектной документации, или используя метод прямых измерений (используется в настоящей работе), определяют площадь ограждающей конструкции оборудования  $S$  (возможно косвенное определение оборудования здания по термограмме с использованием маркера известных размеров, в качестве которого может служить любой предмет с хорошим излучательным контрастом, например, металлическая мет-

ровая линейка); проводится внешний визуальный осмотр наружных ограждений, их доступность для съёмки, места установки тепловизионной камеры; перед началом испытаний температура воздуха внутри и снаружи цеха должна быть измерена с точностью  $\pm 0,5$  °С; тепловизор устанавливают в выбранных точках и в соответствии с инструкцией по его эксплуатации производят съёмку поверхности ограждающих конструкций тепло-технологического оборудования или иных изучаемых объектов.

При определении параметров микроклимата помещений измеряют температуру и относительную влажность воздуха в объеме производственного помещения в соответствии с ГОСТ 30494–96.

Некоторые технические характеристики тепловизионного оборудования: спектральный диапазон измерений, мкм – 3–5; температурное разрешение (при  $t = 30$  °С), °С – 0,5; диапазон измеряемых температур, °С – от –20 до +200; погрешность измерения температуры, °С – 1; мгновенный угол зрения, мрад – 5; угол сектора сканирования, град. – 40.

Основные возможности сканера: снятие термопрофилей в режиме реального времени с возможностью записи в память прибора; получение полной тепловой картины объекта с записью в память и последующим анализом на компьютере; одновременное отображение на экране видимого и ИК-изображений для более точного определения дефектов; построение изотерм, спотметры, изменение палитр изображений; экспорт информации в любые графические редакторы под управлением операционной системы Microsoft Windows, генерация отчетов в виде HTML-файлов.

Также регистрация температурных полей поверхности ограждающих конструкций с помощью тепловизора должна производиться с учетом излучательной способности обследуемой поверхности. Выбор излучательной способности обследуемой поверхности выполняется в соответствии со справочным материалом или на основе экспериментальных данных (путем сравнения температур поверхностей, полученных контактным методом и тепловизионным, при вариации относительного коэффициента излучения поверхности).

Объектом исследования в настоящей работе является штабель пиломатериала и экспериментальное определение полей температур по его длине, высоте, а также по ширине после выгрузки (в горячем состоянии) из камерной сушильной машины конвективного типа. Полученные тепловизионные данные позволяют определить равномерность (или неравномерность) полей температур по поверхности штабеля, а значит и энергоподвода к сушиму материалу, и возможные перепады температур с целью даль-

нейшей оценки фактической продолжительности термообработки материала и необходимости в перспективе проведения экспериментальных исследований для получения реальной аэродинамической обстановки в камере сушки установки и ее эффективности.

*Результаты исследований.* При энергоаудите крупного лесопромышленного комплекса и деревообрабатывающего завода [Федяев А., Федяев П., 2003; Федяев и др., 2007] использовался ИК-сканер «Аврора». Линейный сканер является оптико-электронным устройством. В основе его работы лежит принцип преобразования потока инфракрасного излучения от объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный тепловой спектральной мощности потока излучения.

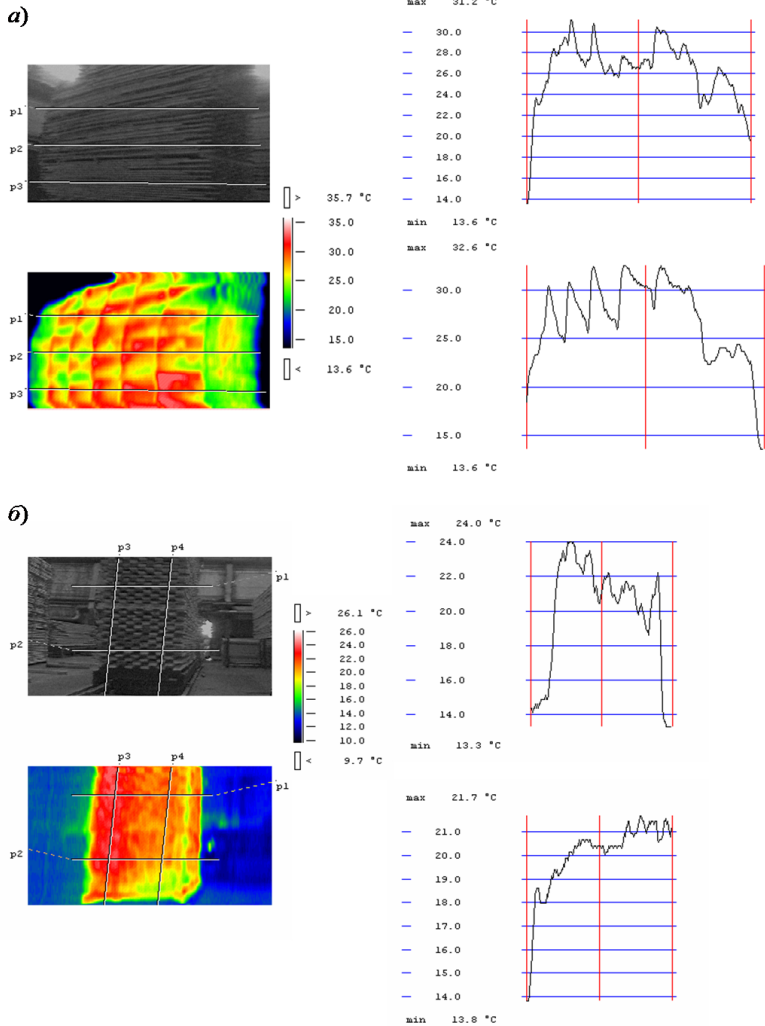
Работа с ИК-сканером велась в одном из двух основных режимов: оперативном и в режиме получения тепловых изображений.

На ЛДЗ ОАО «ЦКК» экспериментальные исследования проводились для температурных режимов работы крупногабаритных конвективных сушилок непрерывного действия фирмы «Valmet» [Федяев и др., 2014]. С помощью тепловизионного оборудования выполнены фотографические съемки и сканирование распределения температурного профиля по поверхности штабеля сразу после выгрузки из сушильной камеры (рисунок).

При анализе профилей температур по фронтальной части штабеля в верхней и нижней части (рисунок а) отмечается более высокая температура (в среднем на 1,4 °С, а в локальных точках выше – более 2 °С). В торцевой части штабеля также отмечается (рисунок б) перепад температур в диапазоне 1,3–1,6 °С, по ширине штабеля пиломатериала (сечение р4-р4) перепад выше, в среднем до 3–4 °С.

На первый взгляд перепад температур небольшой (от 3 до 6%), но учитывая существенную продолжительность процесса сушки (в зависимости от породы и категории сушки колеблется ориентировочно от 3 до 5 суток), однозначно пиломатериал будет иметь повышенное влагосодержание в верхней части штабеля, а также по ширине штабеля (в правой части).

Следовательно, в одной части штабеля возможна «пересушка» материала, в другой части штабеля – «недосушка», что может приводить к растрескиванию пиломатериала; некондиционным параметрам, т.е. к технологическому браку. Досушка частей штабеля пиломатериала с повышенным влагосодержанием в различных зонах термообработки в свою очередь однозначно приводит к увеличению продолжительности сушки, а значит и к росту энергозатрат.



Распределение температурного профиля в штабеле после выгрузки из сушильной камеры:

- а) фронтальная часть (сечение p1-p1, p3-p3);
- б) торцевая часть (сечение p1-p1, p4-p4)

Distribution of temperature profile in the stack after unloading from the drying chamber:

- а) frontal part (section p1-r1, p3-r3); б) end part (section p1-r1, p4-r4)

Более высокий фон температур в нижней части штабеля по его длине и в левой части по ширине, очевидно, связан с более значительным энергоподводом в этих частях штабеля. Последнее свидетельствует о неравномерном поле скоростей, а значит и температур в узле распределения параметров сушки по высоте камеры. Последнее требует отдельных экспериментальных исследований в частности сушильных установок, так как часто габариты и их количество довольно значительны. Например, на отмеченном выше производстве число работающих установок в разные периоды работы достигало 24 штук, количество штабелей в каждой установке – 12 штук.

*Заключение.* Выполненные тепловизионные исследования подтвердили влияние внешней неравномерности в рабочей камере крупногабаритной сушильной машины на кондиционные параметры пилопродукции в процессе термовлажностной обработки [Федяев, 2008; Богданов, Козлов, 1990].

Из анализа полученных в работе в промышленных условиях тепловизионных данных измерений и графических зависимостей по распределению конечного влагосодержания по длине и высоте пиломатериала можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдается неравномерное распределение и подача сушильного агента как по длине, высоте, так и ширине штабеля пиломатериала.
2. Имеют место пониженные значения скорости движения сушильного агента (или застойные зоны) в верхней части штабеля пиломатериала.
3. Наличие технологического брака (порядка 4–5%) при термовлажностной обработке пилопродукции в значительной мере обусловлено неравномерным распределением динамических и тепловых полей в рабочей камере сушилки, что вызывает необходимость проводить широкомасштабные расчетные и экспериментальные исследования гидродинамического совершенства рабочих камер сушилок.

Необходимо также установить соответствие с паспортными данными установленной мощности и оборотов вращения установленных двигателей и конструкции крыльчатки вентиляторов в связи со значительными колебаниями скорости потока не только по высоте, но и ширине рабочей камеры сушильной установки.

### **Библиографический список**

- Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. и др.* Теплотехника / под ред. А.П. Баскакова. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
- Богданов Е.С., Козлов В.А.* Справочник по сушке древесины, М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.

Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке, М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.

Садович М.А., Коплик В.С., Федяев П.А. Исследование температурных полей монолитных конструкций с помощью тепловизора // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: матер. X (XXXII) Всерос. науч.-техн. конф. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. С. 98–100.

Федяев А.А. Энергосбережение при сушке пиломатериалов за счет кинетической оптимизации // Вестник «КрасГАУ». 2008. №7. С. 228–232.

Федяев А.А., Федяев П.А. Инструментальное обеспечение проведения энергоаудита // Естественные и инженерные науки – развитию регионов: матер. межрегион. науч.-техн. конф. Братск: БрГТУ, 2003. С. 85–86.

Федяев А.А., Федяева В.Н. Интенсификация процессов тепломассообмена в энергоемких теплотехнологических аппаратах // Труды Братского государственного технического университета. 2004. Т. 2. С. 54–57.

Федяев А.А., Федяева В.Н., Федяев П.А. Повышение энергоэффективности работы основного теплотехнологического оборудования ЦБК // Механика XXI века. VI Всерос. науч.-техн. конф. с Междунар. участием: сб. докл. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. 338 с.

Федяев А.А., Чубинский А.Н., Федяев А.А., Федяев П.А., Танковская Н.Ю. Обоснование необходимости проведения тепловизионного обследования конструкций и сооружений из древесины // Современные проблемы переработки древесины: матер. Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. С. 23–26.

Федяев П.А., Шейшенов Ж.О. Энергетическая оценка выборочных направлений энергосбережения // Вычислительные технологии. 2013. Ч. 1. С. 299–302.

## References

Baskakov A.P., Berg B.V., Vitt O.K. *i dr.* Teplotekhnika: uchebn. dlya vuzov pod red. A.P. Baskakova. 2-e izd., pererab. M.: Energoatomizdat, 1991. 224 p. (In Russ.)

Bogdanov E.S., Kozlov V.A. Spravochnik po sushke drevesiny, M.: Lesn. promst', 1990. 304 p. (In Russ.)

Danilov O.L., Leonchik B.I. Ekonomiya energii pri teplovoj sushke, M.: Energoatomizdat, 1986. 136 p. (In Russ.)

Fedyayev A.A. Energoberezhenie pri sushke pilomaterialov za schet kineticheskoy optimizacii. *Vestnik «KrasGAU»*, 2008, no. 7, pp. 228–232. (In Russ.)

Fedyayev A.A., Chubinskij A.N., Fedyayev A.A., Fedyayev P.A., Tankovskaya N.Yu. Obosnovanie neobhodimosti provedeniya teplovizionnogo obsledovaniya konstrukcij i sooruzhenij iz drevesiny. *Sovremennye problemy pererabotki drevesiny*: матер. Mezhhdunar. науч.-практ. конф. СПб.: SPbGLTU, 2014, pp. 23–26. (In Russ.)

Fedyayev A.A., Fedyayev P.A. Instrumental'noe obespechenie provedeniya energoaudita. *Estestvennyye i inzhenernyye nauki – razvitiyu regionov*: матер. mezhreg. науч.-tekhn. конф. Bratsk: BrGTU, 2003, pp. 85–86. (In Russ.)



*Fedyayev A.A., Fedyayeva V.N.* Intensifikaciya processov teplomassoobmena v energoemkikh teplotekhnologicheskikh apparatah. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 2, pp. 54–57. (In Russ.)

*Fedyayev A.A., Fedyayeva V.N., Fedyayev P.A.* Povyshenie ener-goefektivnosti raboty osnovnogo teplotekhnologicheskogo oborudovaniya CBK. *Mekhaniki XXI veku. VI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem*: sb. dokl. Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2007. 338 p. (In Russ.)

*Fedyayev P.A., Shejshenov Zh.O.* Energeticheskaya ocenka vyborochnyh napravlenij energosberezeniya. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2013, ch. 1, pp. 299–302. (In Russ.)

*Sadovich M.A., Koplík V.S., Fedyayev P.A.* Issledovanie temperaturnyh polej monolitnyh konstrukcij s pomoshch'yu teplovizora. Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri: mater. H (XXXII) Vseros. nauch.-tekh. konf. Bratsk: Izdvo BrGU, 2011, pp. 98–100. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 26.04.2022*

---

**Федяев Ар.А., Федяев Ал.А.** Исследование процессов сушки пиломатериалов с применением тепловидения // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 202–211. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.202-211*

В работе проведены экспериментальные тепловизионные исследования на промышленном предприятии температурных режимов работы крупногабаритных конвективных сушилок непрерывного действия. Выполнены с использованием тепловизионного оборудования фотографические съемки и сканирование распределения температурного поля в штабеле пиломатериала в период выгрузки из камеры сушильной установки. По результатам анализа полученных данных отмечается повышенный фон температур в нижней части штабеля, что, очевидно, связано с более значительным энергоподводом в этой части штабеля пиломатериала. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о неравномерном поле скоростей энергоносителя, а значит и температур в блоке распределения физических величин для термообработки материала по высоте сушильной камеры.

Ключевые слова: тепловизор, сушка, пиломатериалы, энергоподвод, поля энергоносителей.

**Fedyayev Ar.A., Fedyayev Al.A.** Investigation of the processes of drying lumber with the application of thermal vision. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 202–211 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.202-211

In the work, experimental thermal imaging studies were carried out at an industrial enterprise of the temperature regimes of operation of large-sized continuous convective dryers. Photographic surveys and scanning of the distribution of the temperature field in a pile of lumber during the period of unloading from the chamber of the drying plant were carried out using thermal imaging equipment. According to the results of the analysis of the data obtained, an increased temperature background is noted in the lower part of the stack, which is obviously associated with a more significant energy supply in this part of the lumber stack. The experimental data obtained indicate an uneven field of energy carrier velocities, and hence temperatures in the block of distribution of physical quantities for heat treatment of the material along the height of the drying chamber.

**Keywords:** thermal imager, drying, lumber, energy supply, energy carrier fields.

---

**ФЕДЯЕВ Артур Александрович** – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID ID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-код: 8169-9209.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: art\_fedyaev@mail.ru

**FEDYAEV Artur A.** – PhD (Technical), St.Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-code: 8169-9209.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: art\_fedyaev@mail.ru

**ФЕДЯЕВ Александр Артурович** – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ORCID ID: 0000-0001-6233-3757. SPIN-код: 4618-5907.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vends@newmail.ru

**FEDYAEV Alexander A.** – DSc (Technical), St.Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0001-6233-3757. SPIN-code: 4618-5907.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vends@newmail.ru