

**РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ
ТЕРМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Шокин Григорий Олегович

аспирант

ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»

Аннотация: в статье представлены результаты разработки лабораторного стенда для определения теплофизических характеристик (далее – ТФХ, а именно, объемной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) слоя древесных опилок различной насыпной плотности и влагосодержания, используемых для получения копильного дыма в пищевой промышленности в специальных устройствах - дымогенераторах. Указанные выше параметры являются ключевыми, влияющими на интенсивность протекания пиролиза – процесса термического разложения древесины при температуре от 280 до 1200 °С в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха в результате нагрева древесины от внешнего источника теплоты или в результате внутреннего теплообразования при горении. Точное определение ТФХ слоя опилок конечной толщины позволит специалистам-технологам, надежнее контролировать температуру процесса пиролиза в дымогенераторе экзотермического типа путем управления интенсивностью подвода теплоты к слою топлива в согласовании с кинетикой его нагрева. Применяемые в настоящее время методы определения ТФХ различных технологических сред, преимущественно расчетные и косвенные, требуют своего развития и совершенствования в целях повышения энергоэффективности тепловых технологических процессов, в том числе процесса дымогенерации. Предложен и изготовлен лабораторный стенд для определения ТФХ слоя древесных опилок или щепы на основе метода импульсного теплового контроля с использованием тепловизора и пирометра «TESTO» для регистрации прохождения теплового импульса через тонкий слой опилок.

Ключевые слова: объемная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент температуропроводности, тепловой импульсный контроль, тепловизор, пирометр, лабораторный стенд.

**DESIGN OF A LABORATORY STAND FOR DETERMINING
THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF TECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS OF FOOD PRODUCTION
BY THERMOGRAPHIC METHOD**

Shokin Grigoriy Olegovich

Abstract: the article presents the results of the development of a laboratory stand for determining the thermophysical characteristics (hereinafter referred to as TPH, namely, the volume heat capacity, thermal conductivity and temperature conductivity coefficients) of a layer of sawdust of various bulk density and moisture content used to produce smoke in the food industry in special devices - smokegenerators. The above parameters are key to the intensity of pyrolysis, a process of thermal decomposition of wood at a temperature of 280 to 1200 ° C in conditions of limited access of oxygen to the air as a result of heating wood from an external heat source or as a result of internal heat generation during combustion. Accurate determination of the TFC of the sawdust layer of the final thickness will allow technologists to more reliably control the temperature of the pyrolysis process in an exothermic smokegenerator by controlling the intensity of heat supply to the fuel layer in accordance with the kinetics of its heating. Currently used methods for determining the TFC of various technological media, mainly calculated and indirect, require development and improvement in order to increase the energy efficiency of thermal technological processes, including the smoke generation process. A laboratory stand for determining the TFC of a layer of sawdust or wood chips based on the method of pulsed thermal monitoring using a thermal imager and a pyrometer «TESTO» for recording the passage of a thermal pulse through a thin layer of sawdust is proposed and manufactured.

Key words: volume heat capacity, thermal conductivity, thermal conductivity coefficient, thermal pulse control, thermal imager, pyrometer, laboratory stand.

Актуальность. Одной из глобальных проблем нашего времени наряду с ухудшением экологии и мировым экономическим кризисом, является высокое

потребление топливно-энергетических ресурсов. Эта проблема как никогда актуальна для пищевой промышленности Российской Федерации, что связано с большой степенью износа технологического оборудования, корпусов цехов, складских помещений, транспортных средств и других средств труда, которые участвуют в производственном процессе. Поскольку цены на энергоресурсы и тарифы для предприятий в Российской Федерации неуклонно растут все последнее десятилетие, а основные производственные фонды обновляются медленно или не обновляются вовсе, формируется негативная тенденция к снижению рентабельности и конкурентоспособности отечественной пищевой продукции. В результате издержки энергонезэффективного производства переносятся на потребителя через рост цен на продукты питания, либо производитель несет серьезные убытки.

Исследования Федеральной службы государственной статистики в среднем степень износа основных производственных фондов по отраслям связанным с производством продуктов питания составляет около 50 %, при этом в самом плохом состоянии находится отрасль рыболовства и рыбоводства с показателем около 60 %. Устаревшее оборудование не соответствует требованиям времени, так как имеет низкую по современным меркам производительность и недопустимо высокое энергопотребление [1].

Для решения стоящих перед российской пищевой промышленностью вызовов разработана «Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» [2]. В этом документе приведен анализ состояния отрасли и намечены основные пути развития на ближайшую перспективу. Стратегия предусматривает комплексное развитие отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности с учетом развития основных направлений сельскохозяйственного производства.

В основе стратегического развития пищевой промышленности должен лежать переход к техническому перевооружению организаций с внедрением современных достижений научно-технического прогресса для снижения потребления топливно-энергетического ресурса, сокращения экологического ущерба и повышения доходности и конкурентоспособности вырабатываемой продукции на внутреннем и внешнем рынках [2].

С учетом вышеизложенного проблема энергоэффективности и энергосбережения пищевых производств представляется важной и

актуальной. В соответствии с определением, приведенным в ГОСТ Р 53905-2010 «Энергосбережение. Термины и определения», энергоэффективность – это характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования топливно – энергетических ресурсов (ТЭР) к их затратам, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.

В настоящее время вопросам повышения энергетической эффективности российских предприятий уделяется значительное внимание со стороны государственной власти (разрабатываются и внедряются нормативные акты, методики, стандарты) и поставщиков оборудования (внедряются новые технологии, повышается энергоэффективность устройств и экологичность оборудования).

Основные элементы энергетической политики России сформулированы в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» и в Законе № 261ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3].

Для разрешения проблемы большого потребления ТЭР пищевыми предприятиями разрабатывают энергосберегающие технологии и аппараты. В Мурманском государственном техническом университете разработан метод количественной термографии, позволяющий осуществлять энергоаудит теплового технологического оборудования для копчения и дымогенерации, а также стерилизации консервов [4]. Используемый при этом методологический подход позволяет непосредственно в процессе эксплуатации оборудования собирать параметры, характеризующие его техническое состояние, а также оценивать количественно исходящие от рабочих поверхностей тепловые потоки. Достоинствами метода являются хорошая воспроизводимость результатов измерений, погрешность не более 20 %, возможность обнаружения непроизводительных тепловых потерь вследствие погрешностей конструкции аппаратов. Использование метода количественной термографии позволяет собрать данные, анализ которых лежит в основе разработки подходов к оптимизации энергопотребления тепловым технологическим оборудованием.

Однако до настоящего времени отсутствуют литературные данные об использовании метода тепловизионной диагностики при определении ТФХ технологических сред пищевых производств в тепловых технологических процессах, в том числе в процессе ИК-дымогенерации.

Таким образом, разработка лабораторного стенда для определения ТФХ слоя технологических сред конечной толщины с целью повышения точности математических моделей тепловых процессов пищевых производств, для оптимизации потребления ТЭР представляет собой актуальную задачу.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – разработка лабораторного стенда для определения ТФХ слоя технологических сред пищевых производств методом импульсного теплового контроля.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены задачи:

- ✓ разработки лабораторного стенда для определения ТФХ методом импульсного теплового контроля с регистрацией теплового импульса, проходящего через тонкий слой среды при помощи тепловизора и пирометра «TESTO»;

- ✓ определения ТФХ технологической среды – древесных опилок, используемых в качестве топлива для дымогенерации с помощью разработанного лабораторного стенда;

- ✓ анализ результатов экспериментального определения ТФХ опилок различной насыпной плотности и влагосодержания с литературными данными.

Материалы и методы. Опытное определение ТФХ проводили для тонких слоев древесных опилок насыпной плотностью 154 кг/м^3 с влагосодержанием от 30 до 60 % на общую массу. Перед измерением ТФХ опилки увлажняли водой, добавляемой из расчета достижения требуемого влагосодержания, для равномерного распределения влаги опилки выдерживали в герметичной упаковке при постоянной температуре $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 часов.

В работе использованы исследования:

- ✓ физические: определение насыпной плотности опилок как отношения массы навески опилок к ее объему, установленному при свободном насыпании в измерительную емкость (мерный цилиндр на 1000 см^3), кг/м^3 ; определение температуры на облученной ИК-импульсом поверхности слоя опилок при помощи пирометра «TESTO»; определение

температуры на необлученной поверхности слоя опилок при помощи тепловизора «TESTO»; определение плотности падающего на слой опилок теплового потока при помощи милливольтметра и стандартного датчика плотности теплового потока;

✓ физико-химические: определение влагосодержания опилок, % (ГОСТ 16483.7-71 «Древесина. Методы определения влажности»);

✓ математические – статистическая обработка результатов эксперимента и измерений по методу МНК (метод наименьших квадратов) с использованием пакета прикладных программ MS Excel.

Результаты и обсуждение.

В основе предлагаемого лабораторного стенда для определения ТФХ тонкого слоя древесной щепы и опилок, различающихся показателями массовой доли влаги и величиной насыпной плотности – воздействие мощным тепловым ИК-импульсом и определение возникающего вследствие этого в слое температурного градиента.

Градиент температуры возникая в результате поглощения слоем, представляющем собой многофазную систему из твердых частиц древесины, влажного воздуха и водного конденсата, тепловой энергии в направлении нормали от облученной поверхности, создает в указанном направлении внутри слоя тепловую волну, четко регистрируемую в течение короткого промежутка времени [5, 6, 7].

Для измерения температуры неоднородной поверхности слоя щепы или опилок используют тепловизор «TESTO».

Разработан лабораторный стенд (рис. 1), основным элементом которого является контейнер из материала, обладающего свойствами диэлектрика, в который непосредственно помещают исследуемую технологическую среду (рис. 2).

Алгоритм определения ТФХ при помощи разработанного лабораторного стенда приведен ниже.

1. Подготовка сыпучего материала необходима для удаления посторонних примесей и включений, а также для определения равновесной влажности.

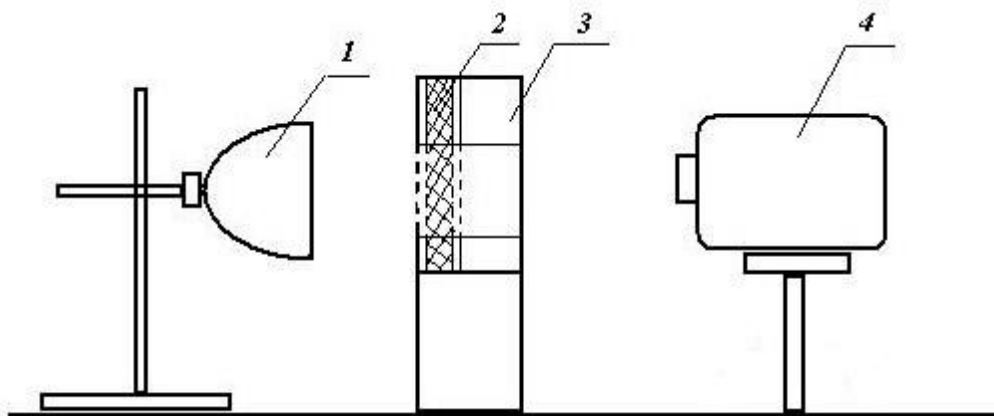


Рис. 1. Схема лабораторного стенда: 1 – источник ИК-энергии (ИК-лампа мощностью 1 кВт); 2 – слой опилок, регулируемый по толщине; 3 – контейнер из диэлектрика для формирования слоя сыпучего материала заданной толщины; 4 – тепловизор

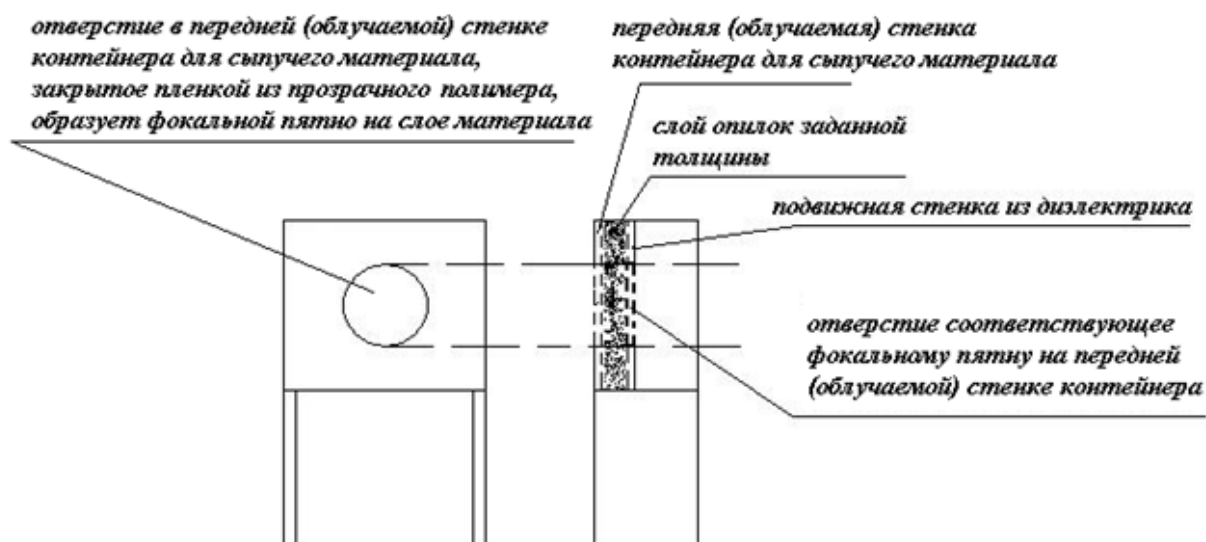


Рис. 2. Схематичное изображение контейнера для сыпучих материалов (поз. 3 на рис. 1)

Подготовка щепы или опилок заключается в определении насыпной плотности и массовой доли влаги. Для достижения равномерного теплового поля внутри слоя опилок перед исследованием выдерживают их не менее 24 часов в термостате при температуре 20 ± 1 °С.

2. Собирают лабораторный стенд для определения теплофизических характеристик в соответствии со схемой на рисунке 1.

В контейнере закрепляют стенку с отверстием диаметром 80 мм, затянутым прозрачным для ИК-излучения материалом не пропускающим влагу. Затем равномерно насыпают на стенку слой щепы или опилок

толщиной 15 мм, выдерживают его от 5 до 15 минут для естественной осадки сыпучего материала в контейнере, после чего слой опилок закрывают второй стенкой с отверстием меньшего диаметра, изготовленной из того же диэлектрика, что и контейнер с первой стенкой. Отверстие на второй стенке также должно быть затянуто прозрачным для ИК-излучения влагонепроницаемым материалом (например, тонкой полипропиленовой пленкой) и быть соосно с отверстием в первой стенке. Таким образом, в контейнере формируется тонкий слой щепы или опилок заданной толщины. Вторую стенку закрепляют для удержания слоя в процессе исследования, после чего устанавливают контейнер в вертикальное положение на расстоянии 300 мм от излучающей поверхности до стенки с отверстием большего диаметра. На расстоянии 450 мм от стенки контейнера с отверстием меньшего диаметра закрепляют на штативе тепловизор, после чего проверяют чтобы фокус объектива приходился на центр отверстия в стенке контейнера.

В ходе исследования не допускают изменения пространственного положения тепловизионной камеры, с помощью которой выполняют «нулевые» снимки поверхности слоя щепы или опилок. Измеряют при помощи пирометра температуру поверхности топлива со стороны облучаемой в ходе исследования стенки контейнера.

Измеряют температуру и относительную влажность воздуха в помещении, в котором проводят исследование. Затем включают генератор ИК-излучения – инфракрасную лампу, исследование не проводят до выхода лампы на стационарный режим работы. Принимают меры к защите подготовленного контейнера с щепой или опилками от ИК-излучения, используя отражающий экран.

3. После выхода ИК-лампы на стационарный режим работы, убирают от контейнера защитный экран и облучают его в течение 15 секунд, после чего источник излучения выключают. Далее, проводя замеры температуры облученной и необлученной поверхностей слоя при помощи пирометра «TESTO» и тепловизора «TESTO» соответственно, фиксируют формирование температурного градиента и тепловой волны по толщине слоя. Измерение температуры обеих поверхностей слоя проводят в течение двух минут каждые 5 секунд, далее – с интервалом 15 секунд еще 10 минут, после чего с интервалом в одну минуту до выравнивания температуры по толщине слоя – то есть до окончания прохождения через слой тепловой волны.

Результаты тепловизионной съемки необлученной поверхности слоя щепы или опилок обрабатывают с использованием специального программного обеспечения тепловизора и получают графическую зависимость

$$\Delta T_3 = f(\tau), \quad (1)$$

где ΔT_3 , °C – избыточная температура задней (необлучаемой) поверхности слоя опилок;

τ , с – время.

Максимальную избыточную температуру находят из соотношения

$$\Delta T_{3_{\max.}} = T_{3_{\max.}}(\tau) - T_{30}, \quad (2)$$

где $T_{3_{\max.}}(\tau)$, °C – максимальная температура задней поверхности слоя опилок в момент времени $\tau_{\max.}$;

T_{30} , °C – начальная температура задней поверхности слоя опилок.

По показаниям пирометра строят графическую зависимость вида

$$T_{\Pi} = f(\tau), \quad (3)$$

где T_{Π} , °C – температура передней (облучаемой) поверхности слоя опилок;

τ , с – время.

С помощью графика зависимости по формуле (1) находят $\tau_{1/2}$, с, или время, за которое температура на задней поверхности слоя опилок достигнет половины своего максимального значения после облучения.

Коэффициент температуропроводности a , м²/с, рассчитывают по формуле

$$a = 1,38 \cdot \frac{L^2}{\pi^2 \cdot \tau_{1/2}} \quad (4)$$

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) и объемную теплоемкость $c \cdot \rho$, Дж/(м³·К), рассчитывают по формуле, полученной на основании решения

задачи о лучистом теплообмене плоской пластины с окружающей средой при граничных условиях 2-го рода

$$c \cdot \rho = \frac{Q_{\text{макс.}}}{L \cdot \Delta T_{3 \text{ макс.}}} \quad (5)$$

где $Q_{\text{макс.}}$, Дж/м² – величина лучистой энергии, поглощенной слоем через отверстие в облученной стенке контейнера;

L , м – толщина слоя опилок;

Величину $Q_{\text{макс.}}$ определяют следующим образом. С помощью стандартного датчика теплового потока экспериментально определяют плотность теплового потока лучистой энергии $N_{\text{макс.}}$, Вт/м², падающего на облученную поверхность слоя опилок от ИК-лампы, работающей в стационарном режиме. Затем определяют величину лучистой энергии по формуле

$$Q_{\text{макс.}} = N_{\text{макс.}} \cdot \tau_{\text{импульс}} \quad (6)$$

где $\tau_{\text{импульс}}$, с – продолжительность теплового импульса.

Коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho \quad (7)$$

Результаты эксперимента по определению теплофизических характеристик слоя опилок насыпной плотностью 154 кг/м³ с влагосодержанием от 10 до 60 % на общую массу приведены ниже.

На рисунках 3-5 приведена графическая зависимость избыточной температуры необлученной поверхности слоя опилок с различной массовой долей влаги от времени, во всех опытах начальная температура необлученной поверхности 19,9 °С.

На рисунке 6 приведена графическая зависимость избыточной температуры облученной поверхности слоя опилок с массовой долей влаги 50 % от времени, начальная температура необлученной поверхности 19,9 °С. На рисунке 7 приведена в качестве примера гистограмма избыточной температуры после обработки снимка с использованием специального программного обеспечения тепловизора «TESTO». Результаты расчета ТФХ слоя опилок представлены в таблице 1.

Таблица 1

**ТФХ насыпного слоя опилок с массовой долей влаги 50 %
и насыпной плотностью 154 кг/м³**

$\Delta T_{3 \text{ макс.}},$ К (°C)	$L,$ м	$\tau_{1/2},$ с	$a,$ м ² /с	$\lambda \cdot 10^{-3},$ Вт/(м·К)	$c \cdot \rho,$ Дж/(м ³ ·К)	$\rho,$ кг/м ³
274	0,019	202	$2,50 \cdot 10^{-7}$	0,5763	2 305,03	158,0

Примечание:

Измеренный тепловой поток в фокальном пятне 800 Вт/м², с учетом длительности теплового импульса 15 с, $Q_{\text{макс.}}$ составит 12 000 Дж/м².

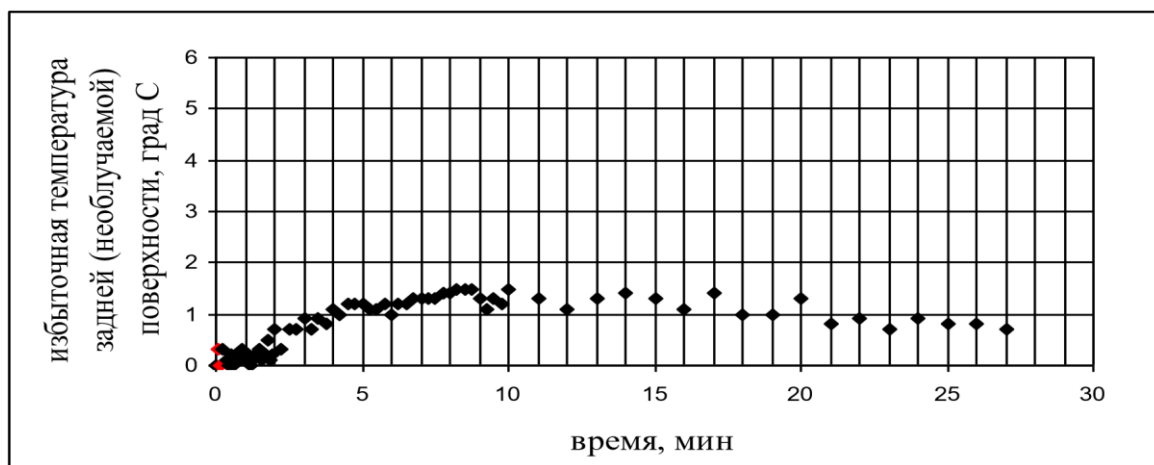


Рис. 3. Зависимость избыточной температуры необлученной поверхности слоя опилок с массовой долей влаги 10 % от времени, полученная по термограммам тепловизора

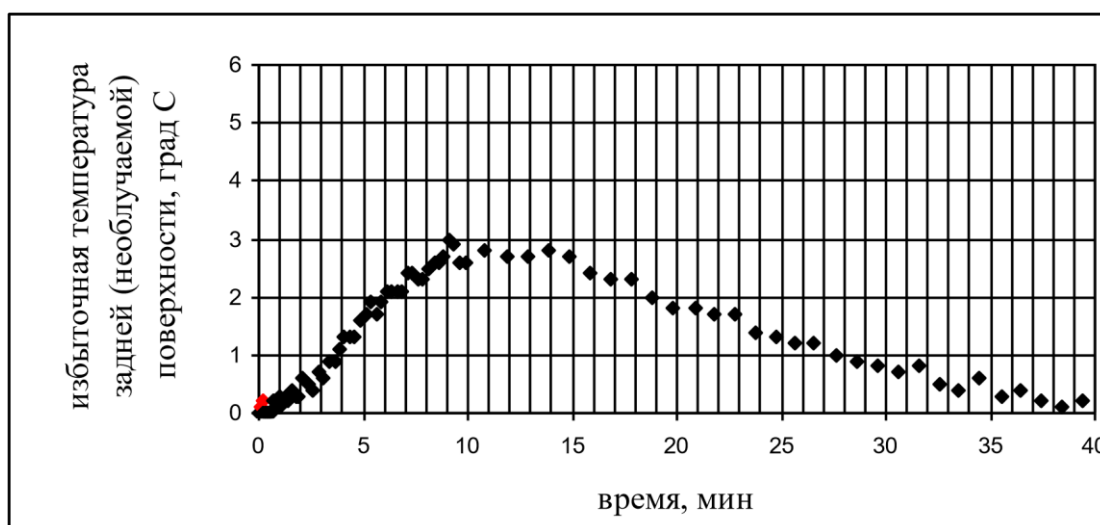


Рис. 4. Зависимость избыточной температуры необлученной поверхности слоя опилок с массовой долей влаги 30 % от времени, полученная по термограммам тепловизора

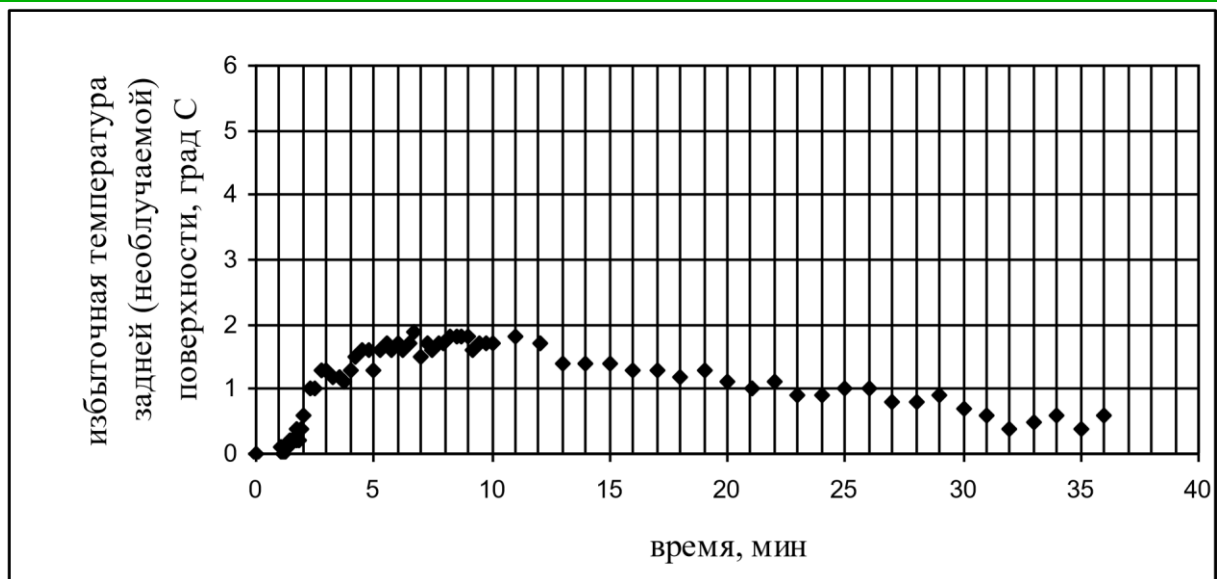


Рис. 5. Зависимость избыточной температуры необлученной поверхности слоя опилок с массовой долей влаги 50 % от времени, полученная по термограммам тепловизора

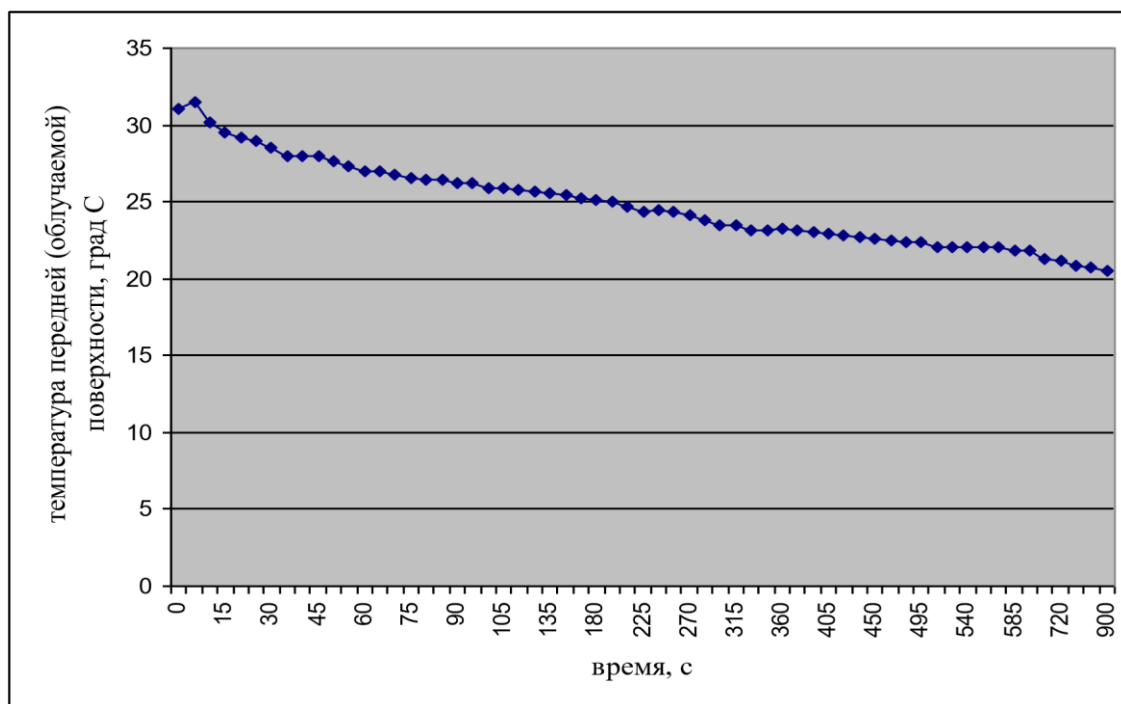


Рис. 6. Зависимость избыточной температуры облученной поверхности слоя опилок с массовой долей влаги 50 % от времени, полученная по показаниям пирометра сразу после теплового импульса

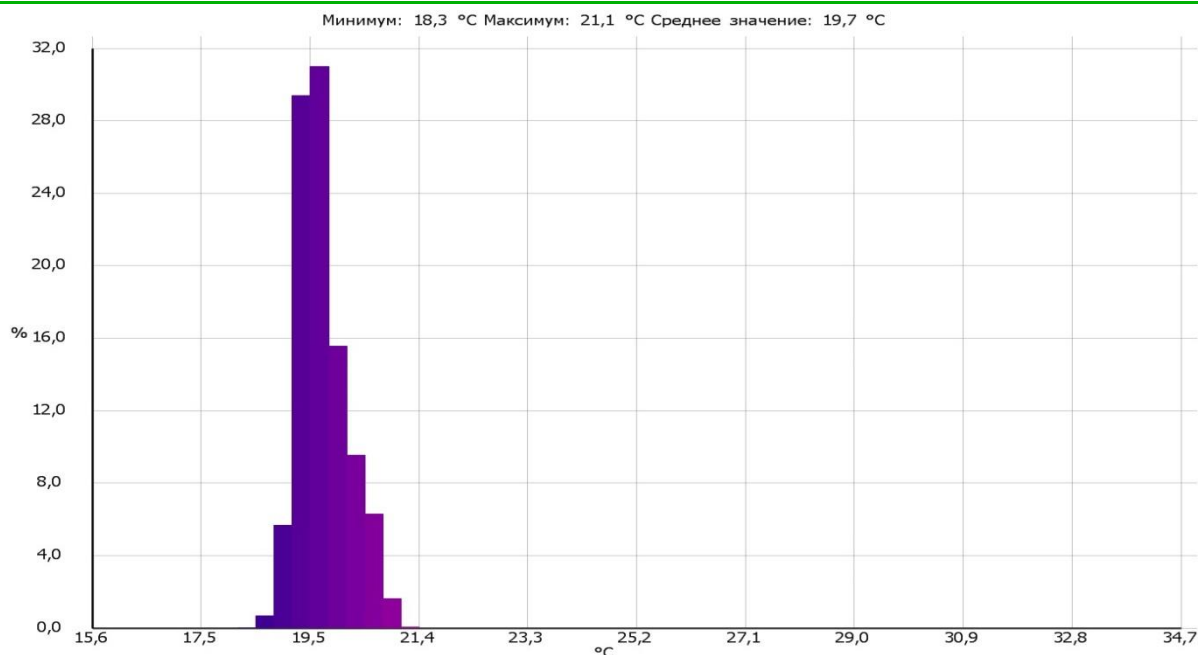


Рис. 7. Пример гистограммы после обработки снимка с использованием специального программного обеспечения тепловизора «TESTO»: по оси ординат вероятность обнаружения температуры в заданном диапазоне, %; по оси абсцисс – температура в области анализируемой поверхности

При сравнении данных таблицы 1 с литературными данными [8] становится очевидным уточнение отдельных ТФХ более чем на 2 порядка (примерно в 100 раз). Результаты сравнения приведены в таблице 2.

Столь существенная разница значений является причиной значительной погрешности математических моделей тепловых технологических процессов и, как следствие, причиной трудностей оптимизации режимов на основе моделирования.

Таблица 2

ТФХ соля опилок, полученных на разработанном лабораторном стенде, с литературными данными (насыпная плотность опилок от 154 до 158 кг/м³, массовая доля влаги в опилках 50 % сопоставимы для сравнения)

Метод определения	Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)	Удельная теплоемкость, Дж/(кгК)	Коэффициент теплопроводности теплопереноса, м ² /с
Лабораторный стенд	0,576	2 305,03	2,50·10 ⁻⁷
Литературные данные	0,046	-	1,099·10 ⁻⁹

Выводы по работе.

Разработан и изготовлен и прошел успешные испытания лабораторный стенд для определения ТФХ тонких слоев технологических сред пищевых производств, основанный на методе импульсного теплового контроля.

Проведено определение ТФХ слоя древесных опилок толщиной 15 мм с различным влагосодержанием и насыпной плотностью, моделирующего слой топлива ИК-дымогенераторе. Сравнение полученных данных с литературными позволило уточнить отдельные ТФХ (коэффициент температуропроводности) более чем в сто раз, что отразится положительным образом на точности математической модели процесса ИК-дымогенерации, используемой для оптимизации и прогнозных расчетов температуры пиролиза древесины.

Использование тепловизора для получения данных о температуре поверхностей тонких слоев многофазных сыпучих технологических сред пищевых производств позволит существенно повысить точность измерений

Список литературы

1. Повышение энергоэффективности в российской промышленности. Что делать! - к.э.н. И.А. Башмаков, директор Центра по эффективному использованию энергии. ЦЭНЭФ, г. Москва, Лауреат Нобелевской премии мира в составе Межправительственной группы экспертов по изменению климата. - senef@co.ru Электронный журнал «Энергосовет» № 3 (28) 2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=390
2. Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 17 апреля 2012 г. N 559-п) / [http:// www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70067828/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70067828/)
3. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_149859/
4. Власов, А.Б. Диагностика тепловых потоков ИК-дымогенератора методом количественной термографии с целью повышения энергетической эффективности / А.Б. Власов, К.Б. Аллюров, Ю.В. Шокина // Вестник МГТУ : труды Мурман. гос. техн. ун-та. – Мурманск : МГТУ. - 2012. – Т. 15, № 1. – С. 72-75.

5. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 554 с.

6. Пат. 2280367 РФ, МПК А23И 4/052 (2006.01) Устройство для получения дыма с использованием энергии ИК-излучения и водяного пара / А.М. Ершов, Ю.В. Шокина, А.Ю. Обухов ; МГТУ. – № 2004118474/13 ; заявл. 18.06.2004 ; опубл. 27.01.2006, Бюлл. № 21. – 6 с. : ил.

7. Parker, W.J. A Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity / W.J. Parker, R.J. Jenkins, et al. // U.S. Navy Report USNRDL-TR-424, May 1960/

8. Шокина, Ю.В. К вопросу о математическом моделировании процесса пиролиза топлива с использованием энергии инфракрасного излучения / Ю.В. Шокина, А.А. Коробицин, М.А. Волков // Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания: сб. докладов II Всерос. науч.-практ. конф., Челябинск, 24 октября 2008 г. / Изд-во Южно-Уральского гос. ун-та. – Челябинск, 2008. – С. 111–113.

© Г.О. Шокин, 2020