

УДК 664.951.3

## Расширение области применения математической модели пиролиза топлива в ИК-дымогенераторе повышенной производительности

К.Б. Аллояров<sup>1</sup>, Ю.В. Шокина<sup>1</sup>, А.А. Коробицин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Технологический факультет МГТУ, кафедра технологий пищевых производств

<sup>2</sup> Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра технической механики

**Аннотация.** Изучение закономерностей тепло- и влагообмена в слое древесного топлива представляет собой актуальную проблему в связи с решением важной и социально значимой задачи повышения безопасности и конкурентоспособности копченой рыбной продукции. Разработка новых способов получения эффективных и функциональных дымовых коптильных сред требует детального изучения механизмов взаимодействия внешнего и внутреннего теплообменов при дымогенерации и установления основных закономерностей влияния на температуру пиролиза топлива – ключевого фактора канцерогенной безопасности копченой рыбной продукции. Показано, что основными факторами, влияющими на температуру пиролиза древесины при дымогенерации с ИК-энергоподводом, являются удельная поверхность и начальная влажность опилок, количество добавленной воды, а также толщина слоя опилок. Исследован тепло- и влагообмен в слое топлива толщиной 0,1-0,13 м при дымообразовании в ИК-дымогенераторе повышенной производительности. Доказана универсальность ранее полученной математической модели процесса пиролиза с ИК-энергоподводом. Данная модель позволяет: получать распределение температуры и влажности в слое топлива, задавая любое сочетание основных влияющих на процесс пиролиза топлива факторов; выявлять критически влияющие на температуру пиролиза топлива факторы; значительно облегчить процесс проектирования новых дымогенераторов с ИК-энергоподводом.

**Abstract.** Studying laws of wood pyrolysis in infrared smoke generator is an actual problem in connection with all technological properties of smoke. The mathematical model of wood pyrolysis in infrared smoke generator has been developed. Physical processes of diffusion and thermo diffusion of water, drying, pyrolysis into layer of wood fuel have been studied and the main parameters of these processes have been calculated. The mathematical model of wood fuel pyrolysis practically gives some preliminary information about its temperature correlating virtually with all technological properties of smoke and allows to lighten development of new smoke generators.

**Ключевые слова:** копчение, канцерогенная безопасность продукции, дымогенерация, ИК-энергоподвод, древесное топливо, влажностепроводность, термовлажностепроводность, механизм тепло- и массопереноса, влияющие факторы, температура пиролиза

**Key words:** smoking, carcinogenic safety of product, smoke generation, wood fuel, hydraulic conductivity, heat and hydraulic conductivity, mechanism of heat and mass transfer, influencing factors, pyrolysis temperature

### 1. Введение

Одним из основных факторов, определяющих химический состав коптильных сред, а значит, и степень зараженности копченой продукции опасными для здоровья человека химическими веществами, является температура разложения древесины в процессе получения дыма – температура пиролиза. Поэтому для обеспечения биологической и химической безопасности копченых мясных и рыбных продуктов приоритетной является задача максимального снижения содержания ПАУ и НА в коптильном дыме.

Наиболее рациональным способом решения этой задачи является обеспечение устойчивого температурного режима пиролиза древесины в процессе генерации дыма на уровне 380-400 °С, что намного ниже известных "канцерогенных" температурных пиков. С целью решения этой задачи на кафедре технологий пищевых производств МГТУ разработан способ получения дымовой коптильной среды с использованием ИК-энергоподвода к топливу и устройство для его осуществления – ИК-дымогенератор (ИК ДГ). Проведенными ранее исследованиями установлено, что использование для дымогенерации древесных опилок насыпной массой от 84,0 до 154,0 кг/м<sup>3</sup> содержащих воды от 35 до 65 % на общую массу, а также дополнительное увлажнение опилок в процессе дымообразования водяным паром позволяет удерживать температуру пиролиза на уровне не более 380-400 °С. Экспериментально подтверждено, что к факторам, влияющим на температуру пиролиза в ИК-дымогенераторе, относится толщина слоя топлива, подаваемого в зону дымогенерации (Ершов и др., 2002).

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований была предложена физическая модель процесса пиролиза топлива с ИК-энергоподводом, учитывающая экспериментально установленные коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности в слое топлива.

Было показано, что величина насыпной массы опилок в диапазоне от 104,0 до 154,0 кг/м<sup>3</sup> не оказывает существенного влияния на величину коэффициента потенциалопроводности влагопереноса в слое топлива толщиной 0,07 м, которая для указанного топлива колеблется от  $6,607 \cdot 10^{-8}$  до  $6,692 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Экспериментально было установлено, что насыпная масса топлива влияет на величину коэффициента потенциалопроводности термовлагопереноса, значения которого изменялись от  $1,796 \cdot 10^{-9}$  до  $1,099 \cdot 10^{-9}$  К<sup>2</sup>/с для опилок насыпной массой 104,0 и 154,0 кг/м<sup>3</sup> соответственно (Шокина и др., 2009). На основании предложенной физической модели процесса дымогенерации с ИК-энергоподводом была разработана методика расчета температуры пиролиза топлива и ее программное обеспечение. Данная методика позволяет: получать распределение температуры и влажности в слое топлива, задавая любое сочетание основных влияющих на процесс пиролиза топлива факторов; выявлять критически влияющие на температуру пиролиза топлива факторы; значительно облегчить процесс проектирования новых дымогенераторов с ИК-энергоподводом.

Одним из возможных путей дальнейшего повышения производительности ИК ДГ является увеличение толщины слоя топлива, подаваемого в зону дымогенерации. Задачей проводимых исследований являлось подтверждение применимости разработанной ранее методики прогнозного расчета температуры пиролиза древесины в ИК ДГ в условиях протекания процесса в слое толщиной 0,1 м.

## 2. Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлся ИК ДГ повышенной производительности. Принципиальная схема ведения процесса дымообразования в ИК ДГ представлена на рис. 1. Возможно изменение положения фальш-дна по высоте носителя, тем самым обеспечивается регулирование толщины слоя топлива. Фальш-дно представляет собой мелкоячеистую решетку из нержавеющей стали. Подача так называемой "добавленной воды" к слою топлива в процессе собственно дымообразования осуществляется в виде пара через ячеи решетки фальш-дна.

В качестве топлива использованы опилки лиственных пород деревьев по ТУ 13-322 "Сырье древесное для копчения" с насыпной массой от 114 кг/м<sup>3</sup> – крупные, 122 кг/м<sup>3</sup> – средние и 158 кг/м<sup>3</sup> – мелкие. Фракционный ряд топлива представлен на рис. 2.

Определение массовой доли воды в топливе, отбор проб, подготовку их к испытанию проводили стандартными методами (ГОСТ 16483.7, ГОСТ 17231). Насыпную массу опилок определяли по разработанной методике, как отношение массы образца средней пробы к его объему при свободном насыпании опилок.

Температуру пиролиза топлива определяли по методу Ершова-Шокиной (Шокина, Ершов, 1999), суть которого состоит в определении температуры пиролиза специально изготовленных деревянных образцов, моделирующих пористый слой опилок.

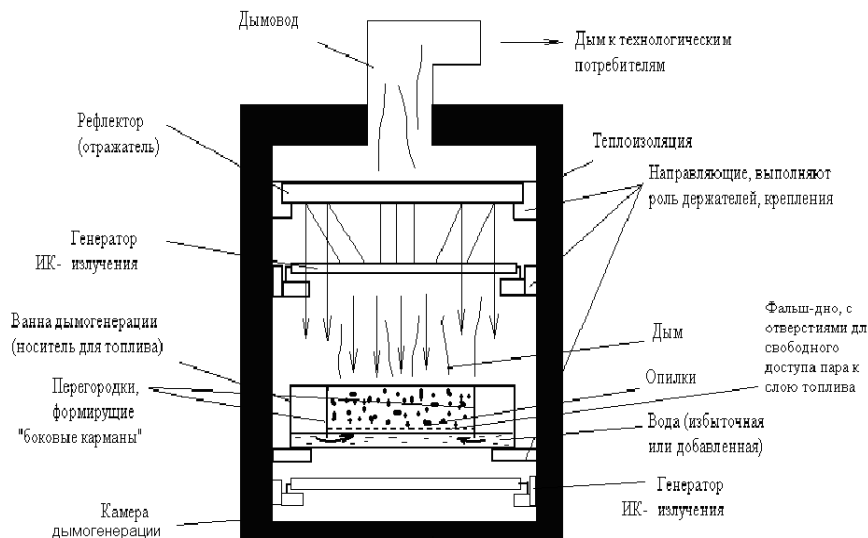


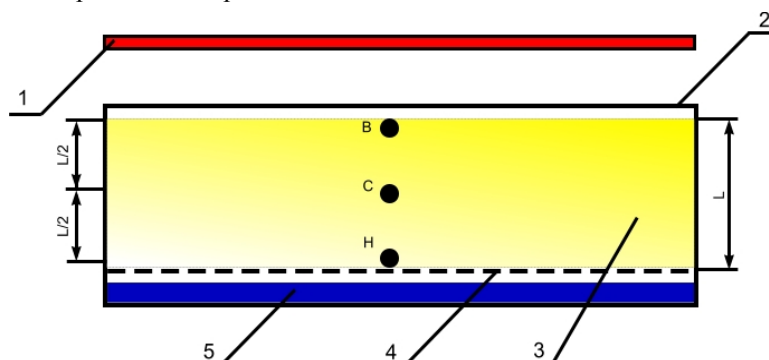
Рис. 1. Принципиальная схема дымообразования с ИК-энергоподводом при увлажнении топлива водяным паром



Рис. 2. Фракционный ряд топлива

Рис. 3. Расположение точек измерения температуры в слое опилок:

- 1 – генератор инфракрасного излучения,
- 2 – ванна дымогенерации,
- 3 – опилки,
- 4 – фальш-дно,
- 5 – избыточно добавленная влага;
- В – верхняя точка,
- С – средняя точка,
- Н – нижняя точка



Исследование температуры топлива проводили в трех точках (рис. 3), размещая равномерно по высоте слоя в качестве датчиков температуры термопары ТХА-1000 ГОСТ 3044, подключенные к микровольтнаноамперметру Ф-136. Произведенные в милливольтгах замеры переводились в градусы Цельсия по градуировочной шкале хромель–копель. Отбор проб опилок для определения влажности производили в тех же точках.

Для определения коэффициента потенциалопроводности влагопереноса в слое топлива  $D_U$ , м<sup>2</sup>/с, определяли относительные влажности слоев топлива на уровнях В, С, Н (рис. 3) при свободном поднятии влаги по слою топлива: опилки (начальной влажностью от 21,0 до 28,0 %) массой 1,5 кг засыпали в емкость, на дно емкости заливали 1 литр воды. Затем производили определение влажности слоев топлива стандартным методом каждый час в течение трех часов.

Коэффициент потенциалопроводности влагопереноса определяли обратным способом из уравнения диффузии

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

Производные влажности по времени и слою определяли из экспериментальных данных, задаваясь их приближенными значениями:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{u_{cp}(\tau_1) - u_{cp}(\tau_2)}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_x(\text{верх}) - 2u_x(\text{сер}) + u_x(\text{низ})}{\Delta x^2}, \quad (3)$$

где  $u_{cp}(\tau_1)$ ,  $u_{cp}(\tau_2)$  – средняя влажность опилок в моменты времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , %;  $u_x(\text{верх})$ ,  $u_x(\text{сер})$  и  $u_x(\text{низ})$  – соответственно значения влажности топлива в верхнем, среднем и нижнем слоях в момент времени  $\tau_2$ , %.

Для определения коэффициента потенциалопроводности термовлагопереноса в слое топлива  $D_t$ , К<sup>2</sup>/с, в ванну для дымогенерации засыпали 1,5 кг опилок, под фальш-дно заливали 1 л воды. Затем включали генераторы ИК-излучения, нижние по отношению к носителю топлива (генераторы над слоем топлива были выключены). Нагрев топлива осуществлялся паром, который образует добавленная под фальш-дно вода.

Коэффициент потенциалопроводности влагопереноса  $D_t$  определяли из следующей формулы:

$$D_l = \frac{\frac{\partial U}{\partial \tau} - D_u \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \Delta u}{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}} \quad (4)$$

При расчете коэффициента потенциалопроводности влагопереноса топлива учитывалась также влага  $\Delta u$ , поступающая в процессе генерации дыма в слой топлива от конденсации воды, добавленной под фальш-дно носителя.

Расчет коэффициентов дифференциальных уравнений осуществляли с помощью ПЭВМ и программы MathCAD R14.

### 3. Результаты и их обсуждение

С целью установить влияние толщины слоя на массо- и теплообмен в опилках при дымогенерации с ИК-энергоподводом и увлажнении топлива водяным паром проводилась серия экспериментов для слоя топлива толщиной 0,1 м. При этом расстояние от поверхности топлива до генераторов ИК-излучения составило 0,03 м. Увлажнение топлива производилось водяным паром (прочие влияющие факторы поддерживались в ходе всех экспериментов на постоянном уровне). В ходе экспериментов начальная влажность опилок составляла 45,0 %, количество добавленной воды – 65,0 % от массы топлива. На рис. 4 представлены поля температуры в слое топлива с насыпной массой 122,0 кг/м<sup>3</sup>.

Анализ представленных на рис. 4 данных показал, что увеличение толщины слоя топлива при его увлажнении водяным паром ведет к повышению температуры поверхностного слоя до 500 °С и выше, что свидетельствует о недопустимом повышении температуры пиролиза.

Происходит быстрое и значительное обезвоживание поверхностного слоя опилок за счет испарения влаги в окружающую среду и переноса с потоком теплоты в средний слой. В результате мощного оттока влаги из поверхностного слоя опилок резко повышается его температура. Возникающий обратно-направленный поток влаги не достигает не только поверхностного, как при увлажнении водой, но даже среднего слоя опилок. Таким образом, в слое опилок толщиной 0,10 м перестает действовать механизм, обеспечивающий контроль температуры пиролиза опилок за счет постоянного подвода влаги к дымообразующему слою под действием влагопроводности и термовлагопроводности. К середине процесса температура поверхностного обезвоженного слоя достигает значения выше 500 °С.

Результаты расчетов коэффициентов потенциалопроводности термовлагопереноса и влагопереноса в слое топлива толщиной 0,1 м представлены в таблице.

Таблица. Коэффициенты потенциалопроводности термовлагопереноса и влагопереноса

Насыпная масса опилок, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент потенциалопроводности	
	термовлагопереноса, К <sup>2</sup> /с	влагопереноса, м <sup>2</sup> /с
114	1,98·10 <sup>-8</sup>	5,69·10 <sup>-7</sup>
122	2,29·10 <sup>-8</sup>	2,59·10 <sup>-7</sup>
158	2,54·10 <sup>-8</sup>	3,18·10 <sup>-7</sup>

Рис. 4. Поля температуры в слое опилок

Параметры дымообразования: начальная влажность опилок – 40 %; добавленная вода, от массы опилок – 60,0 %.

За 0,00 м толщины слоя принято днище ванны, таким образом, точка замера 0,095 м соответствует поверхностному слою опилок, поглощающему ИК-излучение

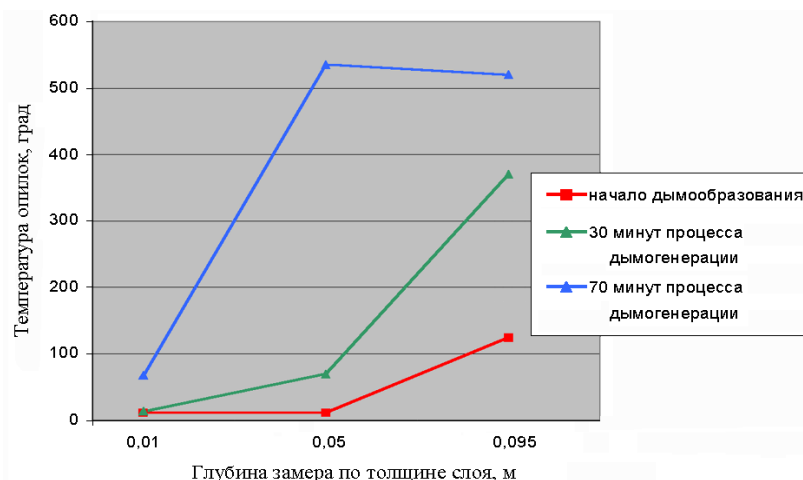
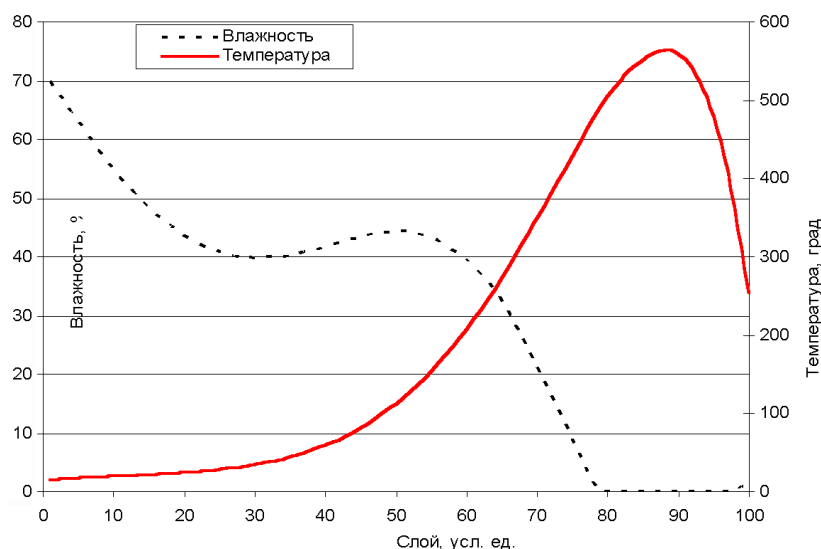


Рис. 5. Распределение температуры и влагосодержания в слое топлива насыпной массой 122 кг/м<sup>3</sup>



Полученные данные позволили адаптировать разработанное в 2008 г. программное обеспечение методики прогнозного расчета температуры пиролиза топлива в ИК ДГ для слоя толщиной 0,1 м. На рис. 5 представлены распределения температуры и влажности в слое топлива толщиной 0,1 м, полученные с помощью компьютерного моделирования.

Результаты математического моделирования находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментов по определению температуры пиролиза топлива. Разработанная модель позволяет получать распределение температуры и влажности в слое топлива толщиной 0,1 м.

#### 4. Заключение

1. Исследованы тепло- и массообменные процессы в слое опилок различной насыпной массы толщиной 0,1 м при дымогенерации с ИК-энергоподводом. Впервые определены коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности в слое топлива. Установлено, что величина насыпной массы (удельной поверхности) опилок в диапазоне от 114,0 до 158,0 кг/м<sup>3</sup> оказывает существенное влияние на величину коэффициента потенциалопроводности влагопереноса в слое топлива толщиной 0,1 м. Экспериментально установлено, что насыпная масса топлива не оказывает значительного влияния на величину коэффициента потенциалопроводности термовлагопереноса.

2. Адаптировано разработанное ранее программное обеспечение методики прогнозного расчета температуры пиролиза топлива в ИК ДГ. Данная методика позволяет: получать распределение температуры и влажности в слое топлива толщиной 0,1 м, задавая любое сочетание основных влияющих на процесс пиролиза топлива факторов; выявлять критически влияющие на температуру пиролиза топлива факторы.

#### Литература

- Ершов А.М., Шокина Ю.В., Толсторебров И.Н., Обухов А.Ю.** Способ получения коптильного дыма с использованием энергии ИК-излучения и устройство для его осуществления – ИК-дымогенератор. *Перспективы развития рыбохозяйственного комплекса России – XXI век. Мат. докладов междунар. науч.-практ. конференции, Москва, 27-28 июня 2002 г., ВНИРО*, с.142-143, 2002.
- Шокина Ю.В., Коробицин А.А., Обухов А.Ю.** Разработка и совершенствование способов получения безопасных коптильных сред. *Рыб. хоз-во*, № 5, с.80-83, 2009.
- Шокина Ю.В., Ершов А.М.** Разработка способа генерации дыма с использованием энергии инфракрасного излучения. *Изв. Тихоокеан. науч.-исслед. рыбохоз. центра, Владивосток*, т.125, с.115-118, 1999.