

УДК 664.951.3

Уточнение коэффициентов теплопроводности тепло- и массопереноса в математической модели процесса пиролиза с инфракрасным энергоподводом при дымогенерации

Ю.В. Шокина¹, Ю.Т. Глазунов¹, А.Н. Папуша², К.Б. Аллояров¹,
А.А. Коробицин³

¹ Технологический факультет МГТУ, кафедра технологий пищевых производств

² Естественно-технический факультет МГТУ, кафедра механики сплошных сред и морского нефтегазового дела

³ Судомеханический факультет МГТУ, кафедра технической механики

Аннотация. В статье рассматривается разработанная ранее математическая модель процесса пиролиза древесного топлива в ИК-дымогенераторе и существующие подходы к математическому моделированию дымогенерации, обсуждаются достоинства и недостатки этой модели, ограничения области ее применения, намечаются возможные пути целенаправленного совершенствования этой математической модели.

Abstract. The paper considers the mathematical model of wood pyrolysis in an infrared smoke generator and some approaches to mathematical modelling of smoke generating process. Merits and demerits of the model have been discussed; limits of its application have been given; possible ways of the model purposeful improvement have been contemplated.

Ключевые слова: дымогенерация, ИК-энергоподвод, древесное топливо, теплопроводность, термовлагодпроводность, механизм тепло- и массопереноса, влияющие факторы, температура пиролиза

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

1. Введение

В предыдущих исследованиях по вопросу дымогенерации с ИК-энергоподводом были изучены процессы, происходящие в слое древесного топлива при пиролизе, обоснована математическая модель, адекватно описывающая происходящие физические процессы, найдены оптимальные режимы процесса дымообразования в сконструированном ИК-дымогенераторе, доказана канцерогенная безопасность вырабатываемой ИК-дымогенератором копильной среды (Шокина и др., 2009; 2010а;б).

Математическая модель процесса пиролиза с инфракрасным энергоподводом при дымогенерации может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + r \cdot \alpha \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} + w(x) + q(x) \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = D_u \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + D_t \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \end{cases}, \quad (1)$$

где $C\rho = c_s \cdot U \cdot \rho_{on} + (1 - U) \cdot c_{on} \cdot \rho_{on}$ – теплоемкость единицы объема слоя топлива, сформированного в носителе ИК-дымогенератора увлажненными опилками, Дж/(м³·К); c_{on} – удельная теплоемкость опилок, Дж/(кг·К); c_s – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); ρ_{on} – насыпная масса опилок, кг/м³; U – влажность опилок, доли единицы; λ – коэффициент теплопроводности слоя древесных опилок, Вт/(м·К), зависит от насыпной массы опилок, определяющей пористость слоя, и влажности опилок; r – скрытая теплота парообразования, Дж/(кг); α – эмпирический коэффициент, определяющий долю участия процессов конденсации и парообразования, доли единицы; $w(x)$ – поглощение тепла в единице объема слоя опилок известной насыпной с координатой x , которая определяется относительно нижней границы опилок в сторону ИК-излучателя, Вт/м³; $q(x)$ – энергия экзотермической реакции разложения древесины, которая выделяется после достижения опилками температуры 270 °С, определяется как

$$q = Q / \tau, \quad (2)$$

где Q – объемная теплота сгорания древесины, составляет $9,8 \cdot 10^9$ Дж/м³; τ – продолжительность пиролиза, с; D_U – коэффициент потенциалопродности влагопереноса, характеризует перенос влаги в слое топлива за счет капиллярных явлений и адсорбции влаги на поверхности опилок, м²/с; D_t – коэффициент потенциалопродности термовлагопереноса в слое опилок, К²/с.

Для получения единственного решения системы дифференциальных уравнений (1) были учтены основные влияющие на процесс пиролиза древесины факторы.

Вошедшие в систему коэффициенты потенциалопродности влагопереноса и термовлагопереноса были установлены для слоя топлива толщиной 7 см для опилок трех насыпных масс 104, 118, 154 кг/м³, что ограничивало область применения разработанного на ее основе программного обеспечения для прогнозного расчета температурных и влажностных полей в топливе при пиролизе.

В целях расширения применимости модели и созданного на ее основе программного обеспечения признано целесообразным провести экспериментальное определение коэффициентов потенциалопродности влагопереноса и термовлагопереноса для топлива различной насыпной массы, для слоев толщиной от 4 до 12 см.

2. Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся дымогенератор с инфракрасным энергоподводом, в качестве топлива использовали опилки лиственных и выдержанных в течение полугода хвойных пород деревьев.

Влажность опилок и насыпную массу определяли стандартным методом.

Коэффициент потенциалопродности влагопереноса определяли обратным методом из уравнения влагопродности. Из уравнения пиролиза топлива в системе (1) выводили уравнение теплопереноса, при помощи которого рассчитывали коэффициент потенциалопродности термовлагопереноса.

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

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлены зависимости рассчитанных коэффициентов потенциалопродности влагопереноса Y_1 , м²/с и термовлагопереноса Y_2 , К²/с от основных влияющих факторов: толщины слоя и продолжительности процесса.

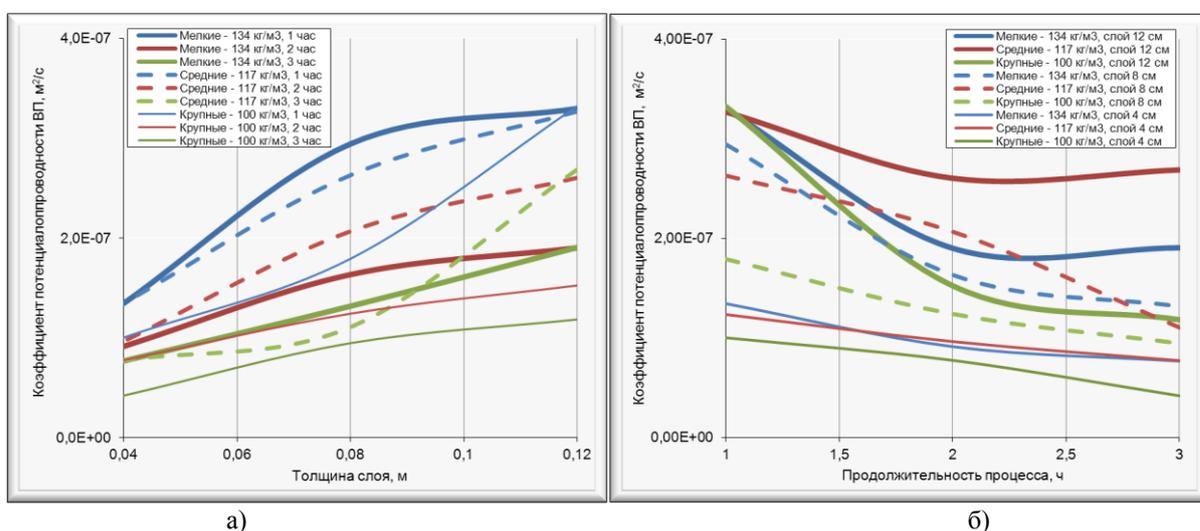


Рис. 1. Кривые зависимости коэффициента потенциалопродности влагопереноса а) от толщины слоя; б) от времени процесса

По результатам экспериментов найдены регрессионные зависимости, связывающие указанные коэффициенты с выбранными влияющими факторами: толщиной слоя X_1 , см, продолжительностью процесса X_2 , ч и насыпной массой топлива X_3 , кг/м³. Остальные влияющие факторы – влажность топлива, расстояние до излучателей, мощность излучателей – поддерживались на постоянном уровне в ходе эксперимента.

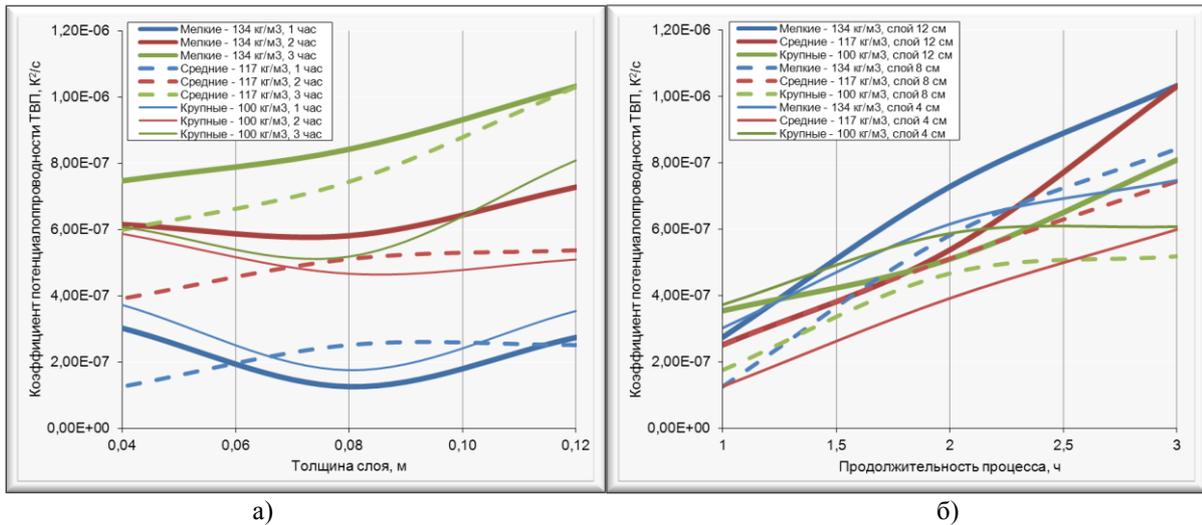


Рис. 2. Кривые зависимости коэффициента теплопроводности термолактопроводности а) от толщины слоя; б) от времени процесса

В результате математической обработки с использованием программы Datafit получены регрессионные уравнения:

$$Y_1 = \exp(aX_1 + bX_2 + cX_3 + d), \quad (3)$$

где $a = 10,67 \pm 1,47$; $b = -0,331 \pm 0,055$; $c = 0,00572 \pm 0,00295$; $d = -16,54 \pm 0,66$; при $P = 0,95$.

Значение критерия Фишера $F = 36,76$ (по таблице F -распределения $F = 1,92$):

$$Y_2 = \exp(aX_1 + bX_2 + cX_3 + d), \quad (4)$$

где $a = 3,90 \pm 1,31$; $b = 0,501 \pm 0,055$; $c = 0,00704 \pm 0,00263$; $d = -16,69 \pm 0,36$; при $P = 0,95$.

Значение критерия Фишера $F = 46,91$ (по таблице F -распределения $F = 1,92$).

Полученные выражения интегрированы в компьютерную программу прогнозного расчета температуры пиролиза топлива в дымогенераторе с инфракрасным энергоподводом. На рис. 3 представлены результаты работы программы для топлива различной насыпной массы и толщины слоя при начальной влажности опилок 35 % и 40 % добавленной влаги.

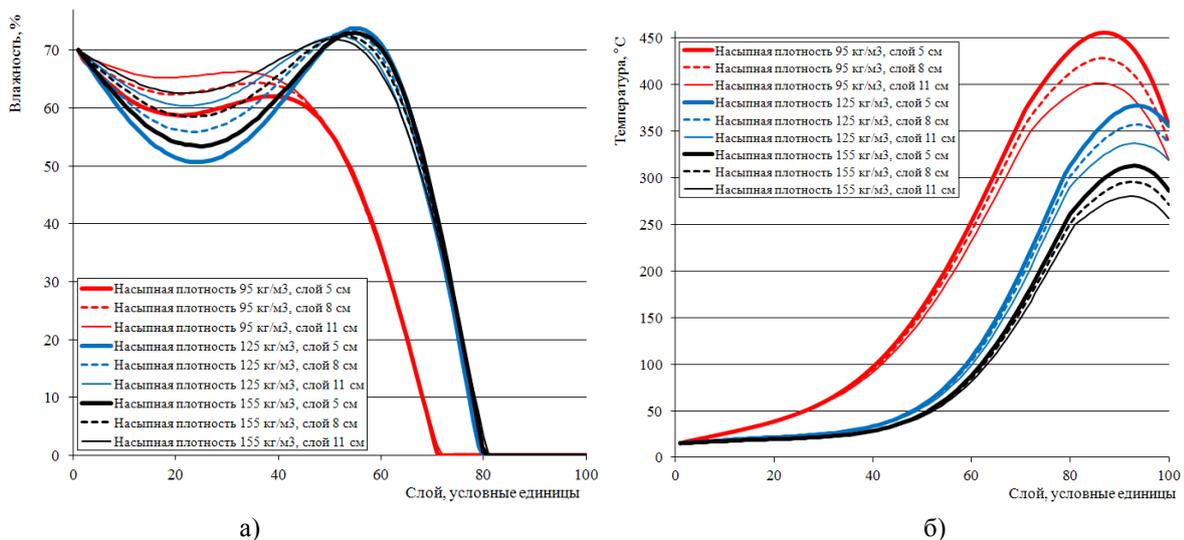


Рис. 3. Результаты работы программы: а) распределение температуры по толщине слоя; б) влажосодержание в слое топлива

Таким образом, подтверждена универсальность компьютерной программы расчета температурных и влажностных полей в слое топлива в процессе пиролиза, что упрощает решение задачи

повышения энергоэффективности нового оборудования при сохранении безопасности вырабатываемой им копильной среды.

4. Заключение

На основании исследования процессов тепло- и массопереноса в слое топлива при дымогенерации с инфракрасным энергоподводом для различных условий внешнего и внутреннего теплообмена подтверждена универсальность физической модели процесса пиролиза топлива с инфракрасным энергоподводом.

Уравнения регрессии, характеризующие зависимость коэффициентов теплопроводности, влагопереноса и термовлагопереноса от влияющих факторов, расширяют область применения методики прогнозного расчета температурных и влажностных полей в слое топлива в процессе пиролиза и совершенствуют программное обеспечение данной методики.

Литература

- Шокина Ю.В., Аллояров К.Б., Коробицин А.А.** Расширение области применения математической модели пиролиза топлива в ИК-дымогенераторе повышенной производительности. *Вестник МГТУ*, т.13, № 4/1, с.681-685, 2010.
- Шокина Ю.В., Коробицин А.А., Обухов А.Ю.** Разработка и совершенствование способов получения безопасных копильных сред. *Рыб. хоз-во*, № 5, с.80-83, 2009.
- Шокина Ю.В., Обухов А.Ю., Коробицин А.А.** Получение дымовой копильной среды с использованием энергии инфракрасного излучения. *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*, № 3, с.92-97, 2010.