

**ОСОБЕННОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ СУСПЕНЗИЙ  
ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В АВТОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

*М.А. Брич, канд. физ.-мат. наук<sup>1</sup>,*

*Н.М. Горбачёв<sup>1</sup>,*

*Ю.Г. Грозберг<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,*

*И.А. Козначеев<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук,*

*А.Л. Адамович<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,*

*Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,*

*Новополоцк, Беларусь*

*В численном эксперименте микроволновой торрефикации суспензии органического материала, когда часть теплоты для нагрева поступает от экзотермической реакции разложения, показано, что газовыделение продуктов разложения существенно меняет диэлектрические свойства среды и условия теплообмена, что необходимо учитывать для обеспечения управляемости температурного режима.*

**Ключевые слова:** *суспензия, микроволновая торрефикация, экзотермическая реакция, газовыделение, диэлектрические свойства, тепловой режим, численное моделирование.*

Эффективным способом тепловой обработки органических материалов является микроволновой нагрев. Известно его промышленное применение для сушки растительных материалов, торфа, лигнина. Актуальной задачей для производства топлив, смазок, сорбентов является высокотемпературная обработка суспензий этих материалов в режиме торрефикации – низкотемпературного пиролиза. Одной из разновидностей такой обработки является гидротермальная карбонизация – получение биоугля обработкой суспензий или влажных органических материалов. Для повышения энергетической эффективности торрефикации целесообразно использовать теплоту разложения её органических компонентов, таких, например, как гемицеллюлозы, то есть проводить разогрев в так называемом автотермическом режиме [1]. Особенностью этого режима является быстрый, лавинообразный рост температуры. Использование традиционных способов нагрева в этом случае затруднено из-за их инерционности. Скорость разложения значительно превышает быстроедействие горелочных устройств, работающих на органическом топливе. В работе [2] показана принципиальная возможность управления автотермическим режимом при использовании циклического микроволнового разогрева смеси лигнина, торфа с углеродом, нефтяным коксом. Режим торрефикации органических материалов сопровождается потерей массы, часть разложившегося материала и химически связанная вода переходят в газовую фазу. Для торфа

эти потери составляют 5–12 %. Таким образом, обрабатываемая среда при высокотемпературной обработке влажных материалов и суспензий в автотермическом режиме является трехфазной. Учитывая существенное различие диэлектрических свойств этих сред, практически важной задачей является исследование влияние выделяющегося газа на процесс нагрева в автотермическом режиме, когда обеспечение устойчивости процесса нагрева затруднено. Следует учитывать при этом, что, барботаж газа через поверхность материала меняет не только диэлектрические свойства жидкой среды, но и условия теплообмена на границе жидкость твёрдое тело.

**Постановка задачи.** Моделируется нагрев суспензии торфа в силиконовом масле за счет поглощения энергии микроволнового излучения.

Смесь находится в цилиндрической камере радиусом  $R$  и высотой  $L$ . Состояние каждого компонента характеризуется своей температурой  $T$ , являющейся функцией времени  $t$  и радиальной координаты  $r$  (неоднородность в осевом направлении не учитывается). В расчетах принято допущение, что в исследуемом диапазоне температур теплофизические и диэлектрические свойства не зависят от температуры.

В расчётах учитывалось энерговыделение за счёт экзотермических реакций, протекающих в торфе при высоких температурах, а также – выделение из торфа летучих газовых компонентов, оказывающих влияние на процессы теплообмена. При расчетах имитировалась обратная связь: микроволновой нагрев выключался при росте температуры в центре образца до заданного значения  $T_{\max}$ .

Динамика системы описывается уравнениями:

$$\rho_{\tau} \frac{\partial e_{\tau}}{\partial t} = W_{\tau} + Q,$$

$$\rho_{\text{м}} \frac{\partial e_{\text{м}}}{\partial t} = W_{\text{м}} - Q - \text{div}(\mathbf{q}),$$

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T_{\text{м}},$$

$$\rho_{\tau} = \beta \rho_{0\tau},$$

$$\rho_{\text{м}} = (1 - \beta) \rho_{0\text{м}},$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = -k\gamma.$$

Здесь  $e$  – удельная внутренняя энергия;  $Q$  – количество тепла, передаваемого от масла торфу в единице объема в единицу времени;  $q$ , – плотность теплового потока;  $W$  – удельная мощность, передаваемая материалу от микроволнового излучения;  $\beta$  – относительное содержание (объемная доля) торфа в смеси;  $\gamma$  – доля массы торфа, приходящаяся на вещества, которые вступают в реакцию;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  – плотность (масса на единицу объема системы);  $\rho_0$  – истинная плотность (масса на единицу объема компонента). Индексы м и т обозначают масло и торф, соответственно.

Мощность, передаваемая материалу излучением, приходящаяся на единицу объема, определяется формулой

$$W = \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta_e E^2,$$

где  $E$  – эффективное значение напряженности электрического поля излучения;  $\operatorname{tg} \delta_e$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота излучения;  $f$  – частота излучения.

При расчете использовались значения напряженности, соответствующие технически достижимым значениям удельной мощности  $W = 0,5\text{--}2,5$  кВт/кг.

Удельная мощность тепловыделения за счет экзотермической реакции  $I$  вычисляется по выражению

$$I = hk\nu\rho_T,$$

где  $h$  – тепловой эффект реакции;  $k$  – зависящая от температуры константа скорости экзотермической химической реакции.

В начальный момент времени температура смеси во всех точках образца равна температуре окружающей среды. Граничное условие на боковой поверхности образца (при  $r = R$ ) имеет вид

$$q = \alpha \Delta T_{\text{окр}},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена с окружающей средой;  $\Delta T_{\text{окр}}$  – разность между температурой торфа на боковой поверхности образца и температурой окружающей среды.

При расчетах были использованы следующие значения параметров:  $R = 20$  мм,  $L = 120$  мм;  $d = 1$  мм;  $f = 2.45$  ГГц;  $E = 250$  В/см;  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>/К. Значения параметров материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров материалов

Материал (вещество)	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , Дж/кг/К	$\lambda$ , Вт/м/К	$\varepsilon$ , Ф/м	$10^3 \operatorname{tg} \delta_e$
Торф	500	2000	0.2	3.2	7.1
Силиконовое масло	800	2300	0.1	2.55	60

Константа скорости экзотермической реакции определялась из соотношения Аррениуса:

$$k = A e^{-E_a/R_0T},$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель константы скорости экзотермической реакции разложения торфа;  $E_a$  – энергия активации экзотермической реакции разложения торфа;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная. Значения кинетических параметров взяты из работы [3]:  $E_a = 68.9$  кДж/моль,  $A = 2537$  с<sup>-1</sup>.

При моделировании использовался метод численного решения Патанкара [4].

**Результаты расчетов.** Ниже представлены результаты исследования влияния газовой выделения, связанного с выходом летучих при нагреве частиц торфа, на распределение температур. Расчёты выполнены в двух вариантах. В обоих вариантах предполагается,

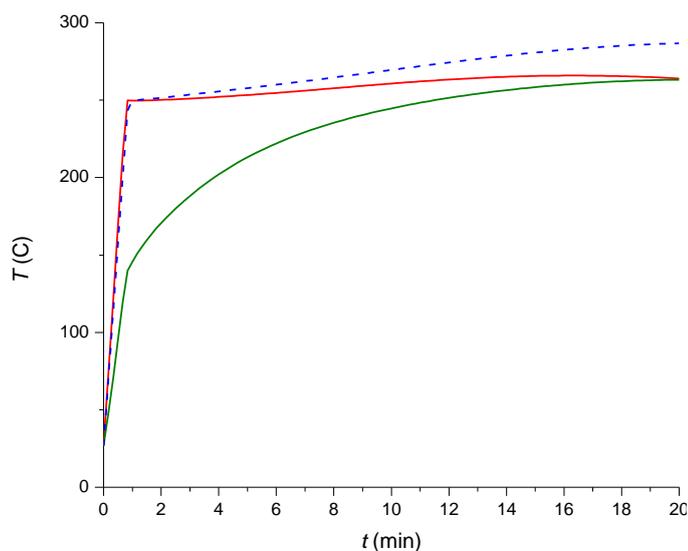
что весь выделившийся газ остаётся в объёме камеры. В первом варианте считается, что выделившийся газ обволакивает частицы торфа, образуя газовую прослойку между частицами и маслом и, таким образом, приводя к ухудшению теплообмена между ними. Во втором варианте считается, что выделившийся газ равномерно распределяется по объёму масла в виде пузырей.

*Влияние образования газовой прослойки между маслом и частицами (рис. 1).*

Соотношение торф : масло = 1 : 2.

Доля летучих = 10 %.

Источник излучения выключается, когда температура в центре превышает 250 °С.



**красная линия:** температура масла;  
**зелёная линия:** температура торфа;  
**сплошные линии:** с учётом газовыделения;  
**штриховая линия:** температуры масла и торфа без учёта газовыделения

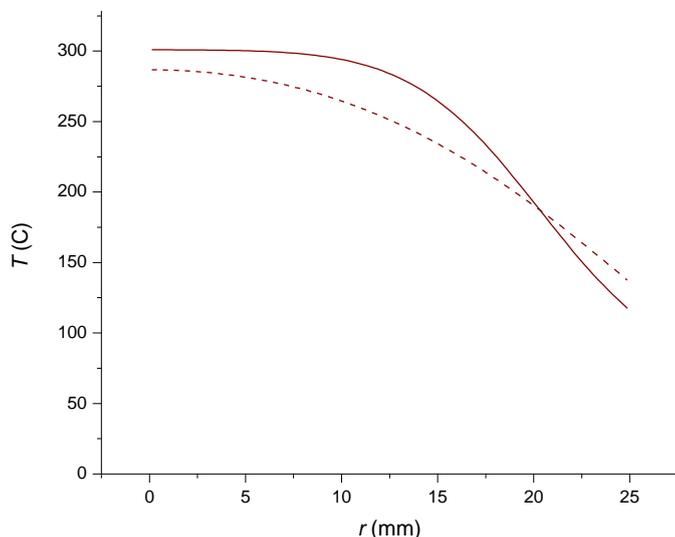
**Рисунок 1. – Зависимость от времени температуры в центре образца (с учетом экзотермической реакции)**

*Влияние образования пузырей (рис. 2)*

Соотношение торф : масло = 1 : 2.

Доля летучих = 10 %.

Источник излучения выключается, когда температура в центре превышает 250°С.



**Рисунок 2. – Радиальное распределение температуры в образце (штриховая линия: без учета тепловыделения)**

**Заключение.** Разработана математическая модель микроволновой торрефикации органических материалов в жидкой среде с учётом образования газовой фазы, выделяющейся при частичном термическом разложении этих материалов. Результаты численного моделирования торрефикации суспензии торфа показывают существенное изменение температуры, обусловленное этим газовыделением. Разработка технологии микроволновой высокотемпературной обработки суспензий органических материалов, сопровождающейся их экзотермическим разложением, должна вестись с учетом влияния на нагрев образующейся газовой фазы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайченко, В. М., Шевченко, А. Л. Энергоэффективная торрефикация с использованием управляемой экзотермической реакции / В. М. Зайченко // ТВТ. – 2022. – Т. 60, № 3. – С. 448–454.
2. Брич, М. А., Горбачёв, Н. М., Козначеев, И. А., Макаренко, Д. С. Оценка возможности микроволновой торрефикации биомассы с использованием теплоты экзотермической реакции разложения / М. А. Брич // Материалы XVII Минского международного форума по теплообмену, Минск, 20–24 мая 2024 г. (электронный документ).
3. Altynbaeva, D., Astafev, A., Tabakaev, R. Kinetics of biomass low-temperature pyrolysis by Coats–Redfern method / D. Altynbaeva // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2018. – V. 194. – Article ID 01058.
4. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984.