

УДК 536.37: 537.868

DOI 10.52928/2070-1624-2025-44-1-47-52

**ОСОБЕННОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ СУСПЕНЗИЙ
ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В АВТОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ***канд. физ.-мат. наук М. А. БРИЧ, Н. М. ГОРБАЧЁВ, канд. физ.-мат. наук И. А. КОЗНАЧЕВ**(Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси, Минск)**канд. техн. наук, доц. Ю. Г. ГРОЗБЕРГ, канд. техн. наук., доц. А. Л. АДАМОВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

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.*

Введение. 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 ее 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 от 5 до 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 влияния 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 – твердое тело».

Постановка задачи. Рассмотрим задачу нагрева 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 расчетах учитывалось выделение энергии за счет 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, когда микроволновой нагрев выключался при достижении температуры в центре образца заданного значения $T_{\max}$.

Динамика системы описывается уравнениями

$$\rho_t \frac{\partial e_t}{\partial t} = W_t + Q;$$

$$\rho_m \frac{\partial e_m}{\partial t} = W_m - Q - \operatorname{div}(\mathbf{q});$$

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T_m;$$

$$\rho_t = \beta \rho_{0t};$$

$$\rho_m = (1 - \beta) \rho_{0m};$$

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

где 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;

β – относительное содержание (объемная доля) торфа в смеси;

γ – доля массы торфа, приходящаяся на вещества, которые вступают в реакцию;

λ – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность (масса на единицу объема системы);

ρ_0 – истинная плотность (масса на единицу объема компонента).

Индексы «м» и «т» обозначают масло и торф соответственно.

Мощность, передаваемая материалу микроволновым излучением и 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;

ε – диэлектрическая проницаемость материала;

ω – циклическая частота излучения, определяемая как $\omega = 2\pi f$;

f – частота излучения.

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

Тепловая мощность, передаваемая от среды биоматериалу и приходящаяся на единицу объема, рассчитывается по формуле

$$Q = \alpha S (T_l - T_m),$$

где α – коэффициент теплообмена.

Влияние газовой фазы на теплопередачу учитывалось путем использования двух различных моделей: принималось, что либо газ присутствует в виде пузырьков, равномерно распределенных в объеме (пузырьковая модель), либо формируется газовая прослойка между частицами материала и средой (пленочная модель). Для пузырьковой модели

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\lambda_l V_l + \lambda_g V_g}{\lambda_l (V_l + V_g)};$$

для пленочной модели

$$\alpha = \alpha_0 / \left(1 + \frac{h_g}{h_l} \right),$$

где $h_l = \frac{\Delta r}{\lambda_l}$, $h_g = \frac{\sqrt[3]{V_g}}{\lambda_g}$;

$\alpha_0 = \frac{1}{\frac{d}{2} \left(\frac{1}{\lambda_l} + \frac{1}{\lambda_m} \right)}$ – коэффициент межкомпонентного теплообмена в отсутствие газовой фазы.

Используемый при расчетах параметр газонасыщенности G определяется по формуле

$$G = \frac{V_g}{V_l + V_g}.$$

Удельная мощность тепловыделения за счет экзотермической реакции I вычисляется по выражению

$$I = hk\gamma\rho_r,$$

где h – тепловой эффект реакции;

k – константа скорости экзотермической химической реакции, зависящая от температуры.

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 α – 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/м²/К. Значения параметров материалов приведены в таблице.

Таблица. – Значения параметров материалов

Материал (вещество)	ρ_0 , кг/м ³	c , Дж/кг/К	λ , Вт/м/К	ε , Ф/м	$10^3 \cdot \text{tg } \delta_e$
Торф	500	2000	0,2	3,2	7,1
Силиконовое масло	800	2300	0,1	2,55	60
Вода	1000	4185	0,6	72	250

Константа скорости экзотермической реакции определялась из соотношения Аррениуса

$$k = Ae^{-E_a/R_0T},$$

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⁻¹.

При моделировании использовался метод численного решения Патанкара [4].

Результаты расчетов. Суспензия торфа в силиконовом масле. Ниже представлены результаты исследования влияния газовой выделения, связанного с выходом летучих при нагреве частиц торфа, на распределение температур. Расчеты выполнены в двух вариантах: по пленочной и по пузырьковой модели. В обоих вариантах предполагается, что газ выделяется равномерно в течение 2 мин и весь выделившийся газ остается в объеме камеры.

Расчет по пленочной модели. Соотношение торф : масло = 1 : 2. Доля летучих равна 10 %. Источник излучения выключается, когда температура в центре превышает 250 °С.

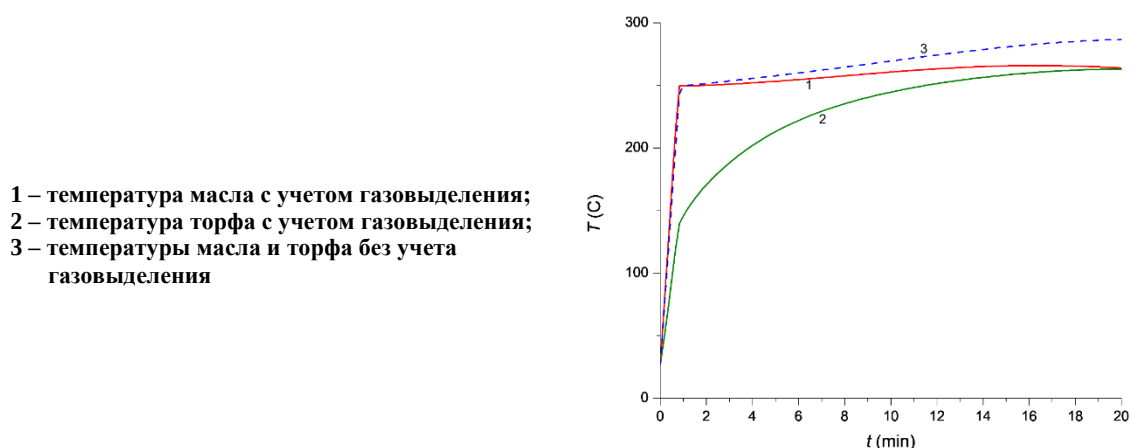


Рисунок 1. – Зависимость температуры в центре образца от времени (с учетом экзотермической реакции)

Расчет по пузырьковой модели. Соотношение торф : масло = 1 : 2. Доля летучих равна 10 %. Источник излучения выключается, когда температура в центре превышает 250 °С.

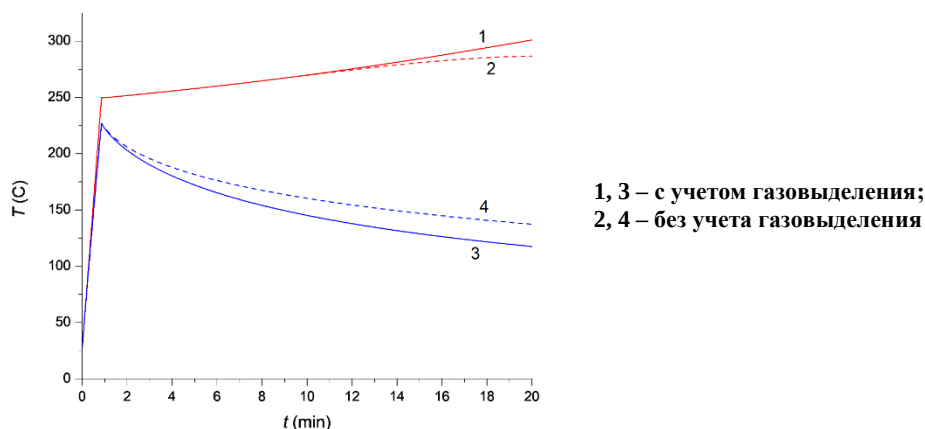


Рисунок 2. – Зависимость температуры от времени в центре (1, 2) и вблизи поверхности (3, 4) образца

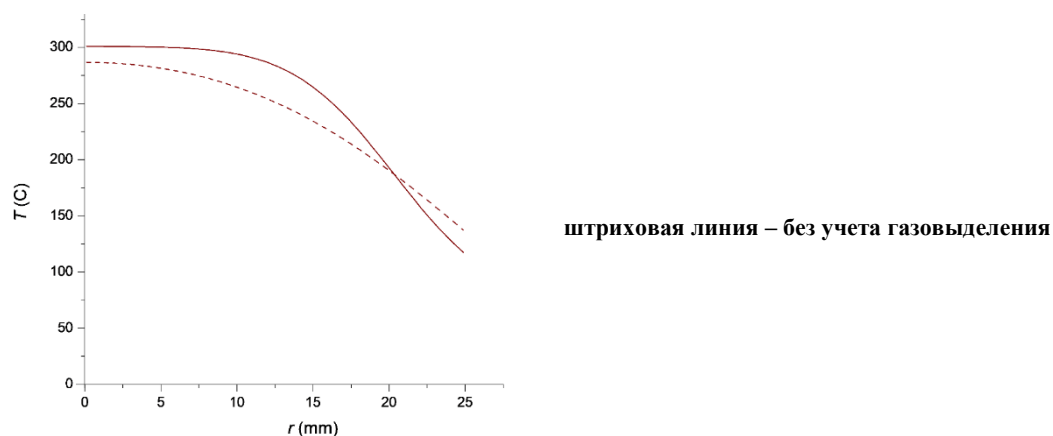


Рисунок 3. – Радиальное распределение температуры в образце

Суспензия торфа в воде. Влияние газонасыщенности на радиальное распределение температур. Соотношение торф : вода = 1 : 2.

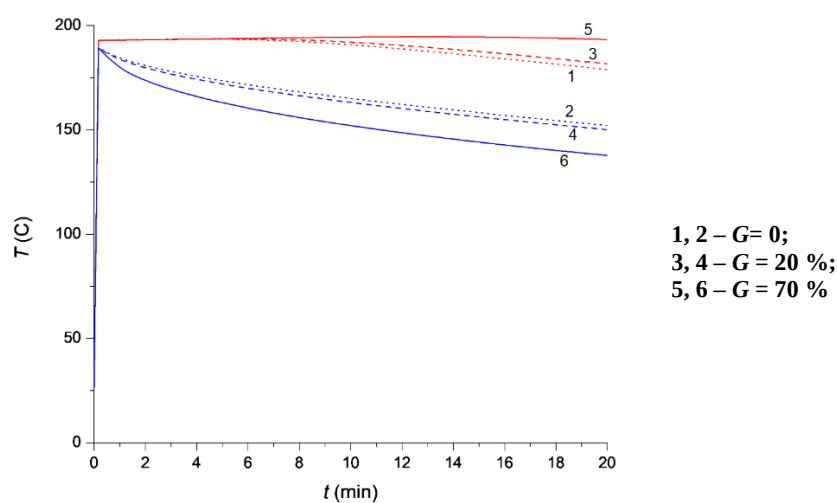
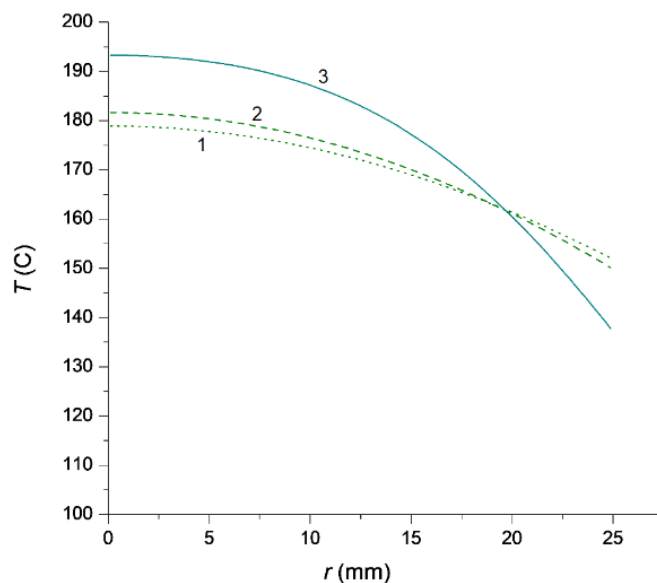


Рисунок 4. – Зависимость температуры от времени в центре (1, 3, 5) и вблизи поверхности (2, 4, 6) образца при разных значениях газонасыщенности G



1 – $G = 0$; 2 – $G = 20\%$; 3 – $G = 70\%$

Рисунок 5. – Радиальное распределение температуры в образце на момент времени $t = 20$ мин при разных значениях газонасыщенности G

Заключение. Разработана математическая модель микроволновой торрефикации органических материалов в жидкой среде с учетом образования газовой фазы, выделяющейся при частичном термическом разложении этих материалов. Результаты численного моделирования торрефикации суспензии торфа в масле и воде показывают существенное изменение характера роста температуры частиц торфа со временем, обусловленное этим газовыделением, а также заметное изменение радиального распределения температуры в разрабатываемом образце. Разработка технологии микроволновой высокотемпературной обработки суспензий органических материалов, сопровождающейся их экзотермическим разложением, должна вестись с учетом влияния на нагрев образующейся газовой фазы. Работы по торрефикации органических материалов с учетом газовыделения будут продолжены в направлении одновременного использования микроволновой и кавитационной обработки, что, предположительно, позволит повысить эффективность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайченко В. М., Шевченко А. Л. Энергоэффективная торрефикация с использованием управляемой экзотермической реакции // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, № 3. – С. 448–454. – DOI: 10.31857/S0040364422020090.
2. Оценка возможности микроволновой торрефикации биомассы с использованием теплоты экзотермической реакции разложения / М. А. Брич, Н. М. Горбачев, И. А. Козначев и др. // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97, № 7. – С. 1769–1777.
3. Altynbaeva D., Astafev A., Tabakaev R. Kinetics of biomass low-temperature pyrolysis by Coats-Redfern method // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 194: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (HMTTSC-2018). – Art. ID 01058. – DOI: [10.1051/mateconf/201819401058](https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401058).
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

REFERENCES

1. Zaichenko, V. M., & Shevchenko, A. L. (2022). Energy Efficient Torrefication Using a Controlled Exothermic Reaction. *High Temperature*, 60(3), 403–408. DOI: [10.1134/S0018151X22020092](https://doi.org/10.1134/S0018151X22020092).
2. Brich M. A., Gorbachev N. M., Koznacheev I. A., & Makarenko D. S. (2024). Otsenka vozmozhnosti mikrovolnovo torrefikatsii biomassy s ispol'zovaniem teploty ekzotermicheskoi reaktsii razlozheniya [Evaluation of the possibility of microwave torrefaction of biomass using the heat of the exothermic decomposition reaction]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 97(7), 1769–1777. (In Russ.).

3. Altynbaeva, D., Astafev, A., & Tabakaev, R. (2018). Kinetics of biomass low-temperature pyrolysis by Coats-Redfern method. In *MATEC Web Conf: Vol. 194. Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (HMTTSC-2018)* (01058). DOI: [10.1051/mateconf/201819401058](https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401058).
4. Patankar S. (1984). *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).

Поступила 12.03.2025

FEATURES OF MICROWAVE PROCESSING OF ORGANIC MATERIALS SUSPENSIONS IN AUTOTHERMAL MODE

M. BRITCH, N. GORBACHOV, I. KOZNACHEEV
(A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus)

Y. GROZBERG, A. ADAMOVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

In a numerical experiment of microwave torrefaction of a suspension of organic material, when part of the heat for heating comes from an exothermic decomposition reaction, it was shown that the gas release of decomposition products significantly changes the dielectric properties of the medium and the heat exchange conditions, which must be taken into account to ensure controllability of the temperature regime.

Keywords: suspension, microwave torrefaction, exotheric reaction, gas evolution, dielectric properties, thermal regime, numerical modeling.