

## **РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ПИРОЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ В РЕАКТОРАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА**

**Аннотация.** В статье представлен один из способов математического моделирования тепло-распределения при процессе пиролиза растительной биомассы. Представлены результаты численного эксперимента над выбранной моделью. Разработаны средства визуализации теплораспределения в осесимметричном случае.

**Ключевые слова:** моделирование теплораспределения, пиролиз биомассы, цилиндрический реактор, осесимметричная задача теплопроводности, уравнение теплопроводности, явная схема.

**Введение.** В последние десятилетия человечество находится в поиске новых энергетических источников. Традиционные способы получения энергии из угля и материалов, путем их сжигания, вызывают загрязнение атмосферы. Также большое внимание уделяется области вторичной переработки различного сырья.

Российская Федерация обладает богатыми запасами растительного сырья [1], представляющего собой биомассу различных видов: отруби, торф, скорлупа орехов, шелуха, опилки и т. д.

На сегодняшний день пиролиз является перспективным направлением в области переработки сырья и теплоэнергетики. Процесс пиролиза биомассы представляет собой термохимическое разложение органического материала при отсутствии кислорода [2]. Этот процесс обычно происходит при повышенных температурах, исключающих полное горение биомассы. В результате пиролиза образуются различные продукты, например, твердый уголь, жидкие органические вещества (пиролизное масло) и газ.

Пиролиз биомассы может быть эффективным методом утилизации различных органических отходов, включая сельскохозяйственные, лесные и биологические. Это может помочь снизить проблемы загрязнения и уменьшить объемы отходов, которые, иначе, могли бы быть направлены на свалку.

Существуют различные подходы к моделированию пиролиза растительной биомассы [3–7]. В основе моделирования процесса пиролиза лежит моделирование процесса теплораспределения.

**Проблема исследования.** Зачастую, проведение натурального эксперимента может нести существенные временные и ресурсные затраты. Некоторые натурные эксперименты не могут быть проведены из-за их сложности. Измерение температуры биомассы во время процесса пиролиза происходит в нескольких местах реактора. Невозможно измерить температуру во всех частях реактора пиролиза, т. е. на всех уровнях его заполненности органическим сырьем.

В связи с вышеперечисленным, стоит задача создания системы компьютерного моделирования для изучения особенностей процесса пиролиза в динамике.

**Материалы и методы.** В данной статье рассматривается моделирование теплораспределения для реактора цилиндрического типа в соответствии с ГОСТ 3168–93 (ИСО 647:2017) «Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода продуктов полукоксования» (см. рис. 1).

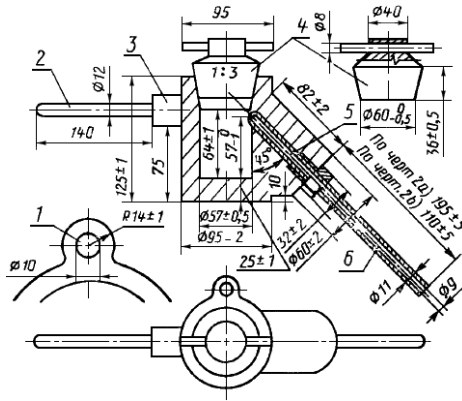


Рис. 1. Устройство реактора для моделирования

Распределение тепла описывается дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = f(r, t), \quad (1)$$

где  $T$  — температура,  $t$  — время,  $a$  — коэффициент теплопроводности,  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $f(r, t)$  — функция теплового источника и  $T(r, t)$  зависит от координат точки  $r$  и времени  $t$ .

Переходя от уравнения в общем виде (1) к уравнению в декартовых координатах, уравнение теплопроводности приобретает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = f(x, y, z, t), \quad (2)$$

где  $T$  — температура;  $t$  — время;  $a$  — коэффициент теплопроводности;  $x, y, z$  — координаты соответствующих осей;  $f(x, y, z, t)$  — функция теплового источника, зависящая от координат  $x, y, z$  и времени  $t$ .

Реактор пиролиза имеет цилиндрический тип, поэтому уравнение теплопроводности (2) при переходе к цилиндрическим координатам будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + f(r, z, \varphi, t). \quad (3)$$

В данной статье рассматривается осесимметричная задача, т. е. угловая координата не рассматривается ( $\varphi = 0$ ). Также, не рассматривается автотермический процесс пиролиза с выделением энергии, т. е. функция теплового источника  $f(r, z, 0, t) = 0$ . Исходя из вышесписанного, рассматриваемое уравнение (3) будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Для численного решения уравнения теплопроводности (4) существуют различные подходы [4, 7]. В данной статье будет рассмотрена явная разностная схема [8]. Соответствующие частные производные аппроксимируются разностными уравнениями (5-8):

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{ij}^{t+1} - T_{ij}^t}{\Delta t}. \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{T_{i+1,j}^t - T_{i-1,j}^t}{\Delta r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i-1,j}^t}{\Delta r^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t}{\Delta z^2} \quad (8)$$

Учитывая аппроксимацию, описанную выше, итоговая конечно-разностная схема имеет вид:

$$T_{i,j}^{t+1} = T_{i,j}^t + a * \Delta t * \left( \frac{T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i-1,j}^t}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1,j}^t - T_{i-1,j}^t}{r_i * \Delta r} + \frac{T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t}{\Delta z^2} \right) \quad (9)$$

Для явной конечно-разностной схемы (9) начальные условия имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(r, z, t) = T(0,0,0) = T_0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

На текущем этапе данного исследования, тепло подводится к стенкам реактора, поэтому рассматриваются граничные условия, имеющие вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(r, z, t) = T(r, z_{max}, t) = T_{const} = 0 \\ T(r, z, t) = T(r, 0, t) = T_{const} = 0 \\ T(r, z, t) = T(r_{max}, z, t) = T_{const} = 0 \\ T(r, z, t) = T(0, z, t) = T_{const} = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

**Результаты.** В качестве используемого сырья для моделирования были использованы пшеничные отруби, так как они практически не дают усадки в процессе полукоксования. Данные по их теплофизическим характеристикам представлены в табл. 1.

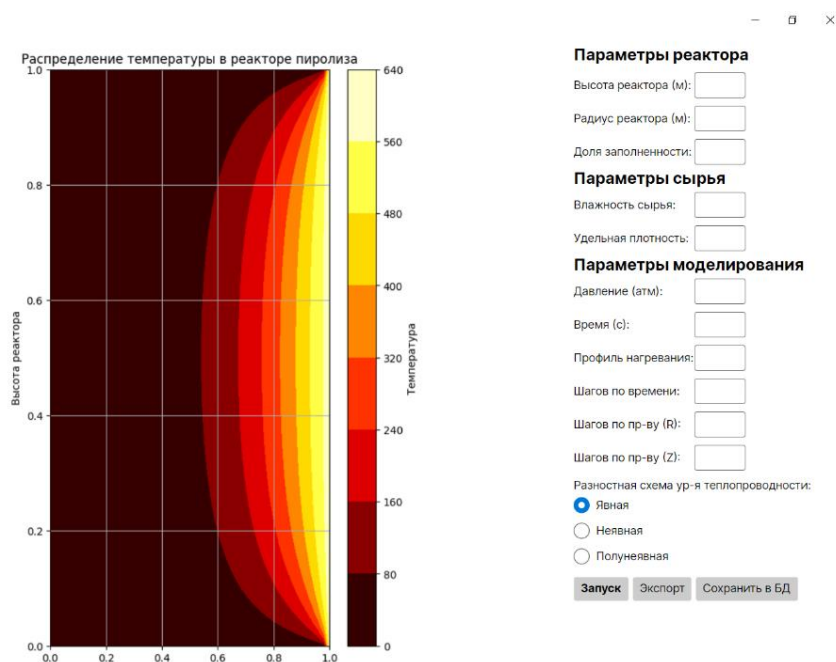
Таблица 1

Теплофизические характеристики сырья для моделирования

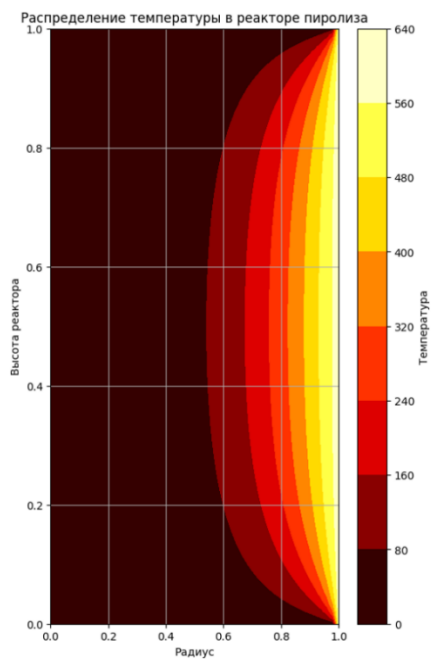
Параметр	Значение	Единица измерения
Температуропроводность	0,0007	см <sup>2</sup> /с
Теплопроводность	0,2128	Вт/(м*К)
Удельная теплоемкость	2323,8	Дж/(кг*К)
Плотность	1472,8	кг/м <sup>3</sup>

Температурный диапазон нагрева отрубей 20–600 °С. Окончание процесса — достижение 600 °С у стенки реактора. Скорость нагрева 10 °С в минуту. Количество шагов по высоте — 100, по радиусу — 50.

Используя схему (9) с граничными условиями (11), был разработан программный прототип, содержащий численные методы и средства для компьютерного моделирования и визуализации теплораспределения при пиролизе растительной биомассы для реактора цилиндрического типа (рис. 2).



Визуализация происходит в двухмерном осесимметричном отображении распределения температуры внутри реактора пиролиза (рис. 3), где по оси  $X$  откладывается радиус реактора  $r$ , а по оси  $Y$  — высота реактора  $z$ .



**Заключение.** Разработанная программная реализация позволяет производить численное моделирование теплораспределения в реакторе пиролиза. Измерение температуры во всех участках реактора при проведении натурального эксперимента трудноосуществимо. Система компьютерного моделирования позволяет исследовать температурное распределение, не затрачивая время и ресурсы на ряд физических экспериментов. Это помогает сэкономить ресурсы при исследовании термического разложения растительного сырья.

Благодаря разработанным средствам визуализации, можно оценивать величину подаваемого тепла для дальнейшего исследования возможности самоподдерживающегося процесса пиролиза в автотермическом режиме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев А.В., Табакаев Р.Б., Языков Н.А., Заворин А.С. Теплофизическое обоснование пиролитической переработки возобновляемой биомассы за счет теплоты разложения // Известия ТПУ. — 2020. — № 6. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplofizicheskoe-obosnovanie-piroliticheskoy-pererabotki-vozobnovlyаемой-biomassy-za-schet-teploty-razlozheniya> (дата обращения: 29.04.2024).
2. Табакаев Р.Б., Алтынбаева Д.Б., Ибраева К.Т., Заворин А.С. Кинетические характеристики пиролиза биомассы // Известия ТПУ. — 2020. — № 12. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kineticheskie-harakteristiki-piroliza-biomassy> (дата обращения: 27.04.2024).
3. Ranzi E., Eduardo Amaral Debiagi P., Frassoldati A. Mathematical Modeling of Fast Biomass Pyrolysis and Bio-Oil Formation. Note I: Kinetic Mechanism of Biomass Pyrolysis, ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2017 5 (4), 2867-2881. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b03096.
4. Kaczor Z, Buliński Z, Werle S, Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: A review, Renewable Energy. Vol. 159. 2020. P. 427-443. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.110.
5. Panneerselvam Ranganathan, Sai Gu. Computational fluid dynamics modelling of biomass fast pyrolysis in fluidised bed reactors, focusing different kinetic schemes. Bioresource Technology. Vol. 213. 2016. P. 333-341. ISSN 0960-8524. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.02.042.
6. Tao Chen, Xiaoke Ku, Jianzhong Lin, and Henrik Ström. CFD-DEM Simulation of Biomass Pyrolysis in Fluidized-Bed Reactor with a Multistep Kinetic Scheme, Energies 2020. 13. 5358. DOI: 10.3390/en13205358.
7. Widya Wijayanti, Musyaroh, Mega Nur Sasongko, Rizky Kusumastuti, Sasmoko. Modelling analysis of pyrolysis process with thermal effects by using Comsol Multiphysics. Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 28. 2021. 101625. ISSN 2214-157X. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101625.
8. Геренштейн А.В., Геренштейн Е.А., Машрабов Н. Устойчивые явные схемы уравнения теплопроводности для осесимметричной задачи // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. — 2010. — № 9 (185). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivye-yavnye-shemy-uravneniya-teploprovodnosti-dlya-osesimmetrichnoy-zadachi> (дата обращения: 01.05.2024).