

УДК 66.096.5

Андрей Васильевич Митрофанов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45; e-mail: and2mit@mail.ru

Ольга Владимировна Сизова

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: siz-olga@yandex.ru

Наталья Сергеевна Шпейнова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: shpejnova@mail.ru

Вадим Александрович Катюшин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: katyshin_v@mail.ru

Математическое моделирование и анализ функционирования цилиндрического пиролизного реактора с радиальным нагревом

Авторское резюме

Состояние вопроса. Вектор развития твердотопливной энергетики в настоящее время направлен в сторону расширения диапазона используемых возобновляемых видов топлива. Наряду с прямым сжиганием топлива все более широкую нишу занимают процессы регулируемого термического преобразования исходной биомассы в бескислородной среде для получения на ее основе нового топлива (жидкого, твердого, газообразного). Значительная часть исследований в этой области связана с изучением формальной кинетики подобных процессов, в то же время не менее важным, но менее исследованным вопросом является аппаратное оформление процесса. Последнее делает актуальным построение математических моделей функционирования пиролизной аппаратуры.

Материалы и методы. В качестве математической основы моделирования физико-химических превращений и процессов переноса в радиальном направлении цилиндрического пиролизного реактора выбрана явная разностная аппроксимация этих процессов в рамках осесимметричной постановки задачи. Материальные константы процессов заимствованы из известных литературных источников.

Результаты. С использованием предложенной и верифицированной ранее одномерной математической модели цилиндрического пиролизного реактора исследованы неохваченные натурным экспериментом режимы его функционирования. Рассмотрены вопросы влияния безразмерной кинетической функции процесса (модели реакции) на реализацию термопреобразования материала в аппарате. Показано существенное влияние выбранной модели реакции на кинетический характер процесса, а также взаимное влияние сушки и пиролиза, наличие которого связано с энергетическими эффектами процессов. Выявлена существенная пространственная неоднородность процесса и показана возможность существования нетривиального эффекта опережающего нагрева внутренних зон аппарата по сравнению с периферийными.

Выводы. Вычислительный эксперимент может помочь обнаружить нетривиальные эффекты и показать вариативность реализации процесса даже в рамках одного конструктивно-технологического оформления процесса пиролиза. Результаты численных экспериментов, на наш взгляд, указывают на то, что математическое моделирование может быть основой принятия технологических решений. Однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на достоверное определение материальных констант процесса.

Ключевые слова: пиролиз, твердое топливо, явная разностная аппроксимация, кинетика, цилиндрический пиролизный реактор

Andrey Vasilyevich Mitrofanov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: and2mit@mail.ru

Olga Vladimirovna Sizova

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Information Technologies and Digital Economics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: siz-olga@yandex.ru

Natalia Sergeevna Shpeynova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: shpeynova@mail.ru

Vadim Aleksandrovich Katyushin

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: katyushin_v@mail.ru

Mathematical modeling and analysis of operation of cylindric pyrolysis reactor with radial heating

Abstract

Background. The vector of development of solid-fuel energy is currently directed towards expanding the range of renewable fuels used. Along with the direct combustion of fuel, the processes of controlled thermal transformation of the raw biomass in an oxygen-free surrounding to obtain a new fuel based on it (liquid, solid, gaseous) are widely spread. A significant part of research in this sphere is related to the study of the formal kinetics of such processes, at the same time, the hardware design of the process is no less important, but less studied. Thus, development of mathematical models of pyrolysis equipment operation is relevant.

Materials and methods. A decisive difference approximation of these processes in the framework of an axisymmetric formulation of the problem is chosen as a mathematical basis for modeling physical and chemical transformations and transfer processes in the radial direction of a cylindrical pyrolysis reactor. The material constants of the processes are borrowed from the well-known literature references

Results. The authors studied the modes of reactor operation not covered by a full-scale experiment, using the previously proposed and verified one-dimensional mathematical model of a cylindrical pyrolysis reactor. The issues of the influence of the dimensionless kinetic function of the process (reaction model) on the thermal transformation of the material in the apparatus are considered. The significant influence of the chosen reaction model on the kinetic nature of the process is pointed out. The mutual influence of drying and pyrolysis the presence of which is due to the energy effects of the processes is considered. A significant spatial heterogeneity of the process is defined and the possibility of the existence of a non-trivial effect of advanced heating of the internal zones of the apparatus in comparison with the peripheral ones is specified.

Conclusions. The paper shows that a computational experiment can help to detect non-trivial effects and identify the variability of the process implementation even within the framework of a single design and technological solution of the pyrolysis process. According to the authors, the results of the obtained numerical experiments indicate that mathematical modeling can be the basis of making technological solution. However, further research is also needed to determine reliably the material constants of the process.

Key words: pyrolysis, solid fuel, decisive difference approximation, kinetics, cylindric pyrolysis reactor

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.060-067

Введение. На сегодняшний день вектор развития энергетических комплексов ряда стран, в том числе Российской Федерации, направлен на диверсификацию энергетики путем увеличения твердотопливной ниши за счет вовлечения в оборот различных видов возобновляемого местного топлива [1]. При этом одним из перспективных процессов термохимической переработки органических материалов является их пиролиз или газификация, осуществляемая в отсутствие кислорода при повышенных температурах [2–3].

Большое количество исследовательских работ направлено на изучение формальной кинетики брутто-реакции термопреобразования материала, а также на развитие методов оценки кинетических параметров реакции. Результаты такого рода исследований с акцентом на различные виды местного сырья достаточно активно публикуются [4–6]. При этом используются хорошо апробированные методы, включающие термогравиметрический анализ разложения образцов материала [4–6], и соответствующие методики обработки полу-

ченных данных для установления кинетических параметров реакции (подробный анализ возможных подходов к восстановлению кинетических параметров приведен в [7]). Необходимо отметить, что под кинетическими параметрами понимается триплет: энергия активации E , Дж·моль⁻¹; предэкспоненциальный множитель A , с⁻¹; безразмерная кинетическая функция реакции f . Первые два параметра определяют константу скорости реакции, которая считается функцией температуры вещества, а кинетическая функция полагается зависящей от степени завершения процесса, типа и механизма реакции [6–8].

Несмотря на то, что установление кинетических параметров является важной и актуальной задачей, решение которой формирует первооснову для внедрения соответствующих технологических решений, на наш взгляд, гораздо менее исследованным является следующий этап жизненного цикла процесса – его аппаратное оформление [2, 9]. В связи с этим представляется актуальным развитие методов расчета и моделирования пиролизной аппаратуры, а также анализ сценарных вариантов развития процесса в аппарате, если теоретическая модель функционирования этого аппарата в достаточной мере формализована и верифицирована.

Ниже предлагается теоретический анализ сценарных вариантов проведения пиролиза в цилиндрическом аппарате, полученных как результат численных экспериментов с разработанной и верифицированной ранее [2] математической моделью. В [2] показана продуктивность использования модели для описания конкретного процесса в аппарате периодического принципа действия, однако исследования функционирования самой модели не проводилось.

Необходимость анализа сценариев развития процесса обусловлена, на наш взгляд, тем, что явление пиролиза, если его рассматривать как технологический процесс, является весьма вариативным. Отмеченная вариативность обусловлена колебаниями характеристик исходного сырья, а именно влажностью древесной биомассы и ее составом (породой древесины). В [2] достигнуто хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных при определенном наборе значений материальных констант. Последнее говорит о качественной непротиворечивости модели

и возможности дальнейшей работы с моделью уже без опоры на данные натурального эксперимента.

Ниже проведено численное исследование параметров работы цилиндрического аппарата с радиальным нагревом, в котором происходит обезвоживание древесной биомассы и ее пиролиз. Процесс удаления влаги требует затрат энергии, нагрев материала также необходим для инициации реакции пиролиза, которая, однако, сама является экзотермической.

Материалы и методы. Подробное описание математической модели представлено в [2], поэтому ниже излагаются только основные ее положения.

Для моделирования распространения теплоты в радиальном направлении реактора используется одномерная модель с явной разностной аппроксимацией процесса нестационарной теплопроводности. Для такой расчетной схемы (рис. 1) представительным элементом является цилиндрический слой толщиной Δr .

Внутри такого слоя все свойства считаются равномерно распределенными, однако введение в рассмотрение набора из счетного числа n указанных элементов позволяет рассмотреть аппарат как объект с распределенными параметрами. Для записи распределения определенного параметра вводится вектор-столбец соответствующего состояния.

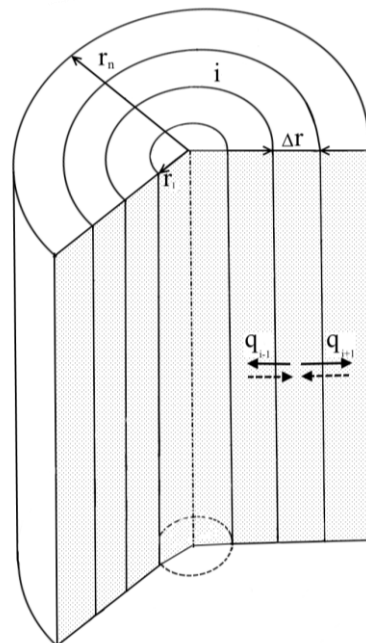


Рис. 1. Разностная схема численного моделирования радиальной теплопроводности в цилиндрическом реакторе

Так, распределение теплосодержаний слоев описывается вектором-столбцом теплового состояния реакторного пространства $\mathbf{Q} = \{Q_{ij}\}$, имеющего размерность $n \times 1$. Векторы аналогичной размерности характеризуют и другие параметры процесса.

Эволюция вектора состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1) \Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Эволюция состояния рассчитывается на основе рекуррентных матричных процедур. При рассмотрении теплового баланса в i -й ячейке учитывается, что она граничит с соседними ячейками с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться с ней порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} .

Считается также, что все пространство реактора занято дисперсным материалом, подлежащим термопреобразованию. Такое допущение позволяет считать, что теплопроводность элементарных объемов аппарата определяются эффективной теплопроводностью материала в рыхлонасыпанном состоянии. При этом коэффициент теплопроводности слоя сыпучего материала λ является функцией степени завершения процесса α [10]:

$$\lambda = (1 - \varepsilon^{2/3}) \lambda_s + \frac{\varepsilon^{2/3}}{\left(1 - \varepsilon^{1/3} / 2\lambda_s\right) + \left(\varepsilon^{1/3} / \lambda_g\right)}, \quad (1)$$

где ε – пористость слоя ($\varepsilon = 0,7$); λ_s – теплопроводность материала частиц, зависящая от степени конверсии α материала ($\lambda_s = (0,2 - 0,142)\alpha$) [10]; λ_g – то же газовой фазы.

Таким образом, теплопроводность материала в отдельных элементах слоя зависит от положения этих элементов и времени процесса ($\lambda = \lambda(i, k)$).

Изменение состояния процесса во времени описывается на основе рекуррентных матричных процедур, отражающих тепловой баланс совокупности цилиндрических слоев. При рассмотрении теплового состояния в i -м слое учитывается, что он обменивается порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} с соседними слоями. При этом:

- для $i = \overline{2, n}$

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t; \quad (2)$$

- для $i = \overline{1, n-1}$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} \right] L (2\pi r_i) \Delta t, \quad (3)$$

где T_i – элемент вектора температур материала $\mathbf{T} = \{T_{ij}\}$; L – высота аппарата.

Балансовые соотношения (2)–(3) описывают перенос теплоты в радиальном направлении аппарата. При этом внутри каждой ячейки могут содержаться внутренние источники или стоки теплоты. Источники теплоты связаны с наличием экзотермических эффектов реакции пиролиза, а также с поступлением теплоты через боковую (нагреваемую) поверхность аппарата.

Реакция пиролиза описывается кинетической зависимостью вида [7–8]

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot f(\alpha), \quad (4)$$

где k – аррениусовское выражение для константы скорости, которое записывается для каждого i -го элемента объема аппарата и зависит от температуры T_i^k в нем [7–8]:

$$k_i^k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_i^k}\right).$$

Значения энергии активации E и предэкспоненциального множителя A определяются экспериментально для конкретного материала [6–8]. При постоянном значении степени превращения α скорость реакции зависела бы только от температуры, однако очевидно, что степень превращения оказывает влияние на кинетику реализации процесса, поэтому вводится некоторая функция $f(\alpha)$, которая представляет собой математическую модель безразмерной кинетической функции и зависит от типа и механизма реакции. Функция $f(\alpha)$ имеет вид [6–8]

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^\eta, \quad (5)$$

где η – численный параметр модели, называемый порядком реакции [6–8].

При использовании модели реакции (5) пиролиз древесной биомассы может быть описан как реакция первого порядка [4, 16].

Однако в [11] показано, что разложение древесной биомассы в области температур 400–600 °С протекает в соответствии с сигмоидальным уравнением Авраами–Ерофеева и, соответственно,

$$f(\alpha) = 2(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}. \quad (6)$$

Процесс обезвоживания древесной биомассы в реакторах подобного типа при-

нято рассматривать как процесс, описываемый во многом аналогично химической реакции [12–14].

В результате масса влаги, удаляемая за малый интервал времени Δt из материала, содержащегося в каждой ячейке, рассчитывается как

$$\Delta m_{w,i} = k_{w,i}^k (X_{w0} - X_{w,i}^k) m_{w,i}^k \Delta t, \quad (7)$$

где k_w – константа скорости процесса обезвоживания материала; X_w и X_{w0} – текущее и начальное влагосодержание материала ячейки; m_w – масса влаги в материале ячейки.

Константа скорости процесса записана в форме аррениусовской зависимости:

$$k_{w,i}^k = k_{w0} \exp\left(-\frac{E_{aw}}{RT_i^k}\right), \quad (8)$$

где $k_{w0} = 5,13 \cdot 10^{10}$; $E_{aw} = 88$ кДж/моль – энергия активации процесса [12–14].

Соотношения (1)–(8) позволяют записать балансы содержания теплоты по ячейкам. Как показано в [2], это удобно сделать, записав сначала уравнения, описывающие пространственный перенос теплоты, который происходит особым образом для крайних ячеек (наружной (при $i = n$) и внутренней ($i = 1$)):

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k \quad \text{для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (9)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k \quad \text{для } i = 1; \quad (10)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_s^k \quad \text{для } i = n, \quad (11)$$

где $q_s^k = -\lambda_n^k (T_n^k - T_s) (2\pi r_n L) \Delta t / dr$ – количество теплоты, поступающее в реактор от источника через наружную поверхность аппарата на k -м рекуррентном шаге; температура поверхности реактора T_s считается постоянной (изотермическое граничное условие).

Затем сформированный вектор теплового содержания Q корректируется путем добавления слагаемых, которые определяются наличием объемных источников и стоков теплоты из-за протекания реакции пиролиза и квазиреакции обезвоживания:

$$Q^{k+1} = Q^{k+1} + k_p^k \cdot M^k \cdot \Delta t \cdot r_r - \Delta m_w^k \cdot r_w, \quad (12)$$

где r_r – удельный тепловой эффект реакции пиролиза древесины ($r_r = 1150$ кДж/кг) [11]; r_w – то же испарения влаги ($r_w = 2600$ кДж/кг) [15].

Естественно, что, помимо пространственно-временных изменений теплосо-

держания, в аппарате происходит перенос и изменение других аддитивных свойств, однако описание соответствующих уравнений представлено в [2] и нами не приводится. Ниже предлагается анализ сценариев, связанных с неоднозначностью идентификации кинетического триплета (параметров $f(\alpha)$, E и k) и постановкой задач оптимального управления (так, в [17] показано, что пути повышения производительности функционирования аппарата могут быть найдены и независимо от точности определения конкретных материальных констант процесса).

Результаты. На рис. 2–3 представлены дифференциальные расчетные кривые убыли массы материала в аппарате в целом, полученные при использовании различных представлений о модели протекания реакции. Оба расчета (рис. 3–8) выполнены для аналогичных конструктивных и технологических условий: начальная влажность биомассы 30 %; $L = 0,5$ м; $r_n = 0,5$ м; $\Delta r = r_n/10$ м; $T_s = 450$ °С; $\Delta t = 0,75$ с; $k = 38,5 \cdot \exp(-57200/RT) \text{ с}^{-1}$ [11].

Убыль массы происходит в результате двух процессов: удаления влаги и термопреобразования материала. Связь между этими процессами осуществляется через формирование общего температурного поля в аппарате. Пиролиз сопровождается выделением теплоты, в то время как сушка является исключительно энергозатратной.

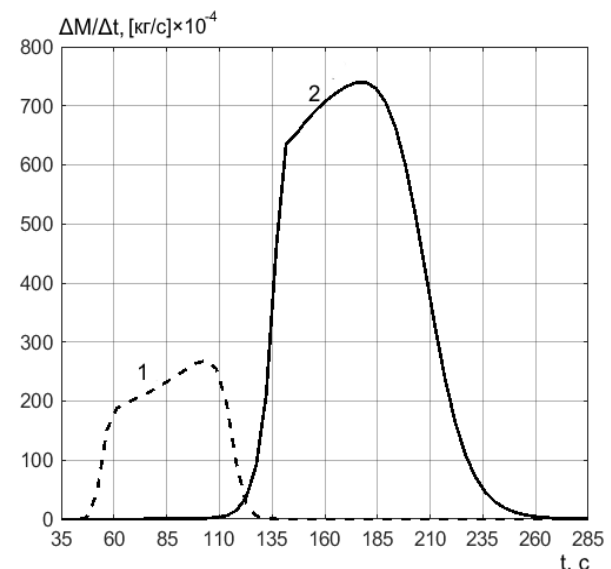


Рис. 2. Расчетные дифференциальные кривые уменьшения массы навески при использовании модели реакции (5): 1 – для процесса сушки частиц; 2 – для процесса термической конверсии частиц

Анализ полученных кривых (рис. 2) показывает, что процесс обезвоживания материала только на малом промежутке времени (в интервале от 110 до 127 мин) совпадает с процессом пиролиза. Однако в этом временном интервале процесс пиролиза (целевой процесс) замедляется, а после удаления влаги (в интервале от 127 мин до 135 мин) растет практически линейно.

Результаты подобного расчета, в котором, однако, полагается справедливой модель реакции (6), приведены на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает, что процессы сушки и пиролиза при таком сценарии происходят последовательно, не влияя друг на друга. Кроме того, ожидается, что целевой процесс при таком сценарии реализуется быстрее (за 231 мин).

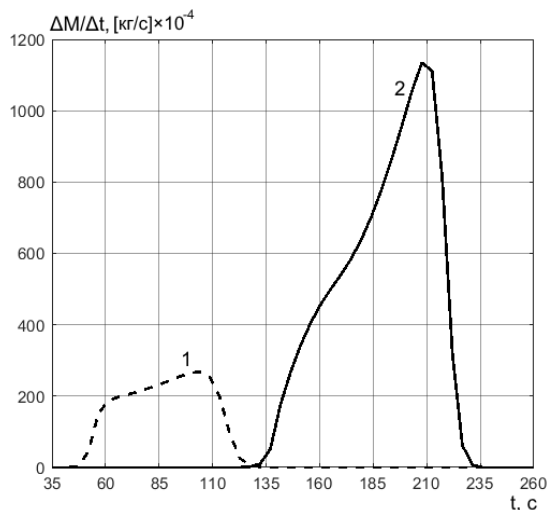


Рис. 3. Расчетные дифференциальные кривые уменьшения массы навески при использовании модели реакции (6): 1 – для процесса сушки частиц; 2 – для процесса термической конверсии частиц

Дальнейший анализ рассматриваемых расчетных сценариев показывает, что процесс в целом характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Так, на рис. 4–5 показаны изменения эффективной (с учетом влагосодержания) плотности материала в наружном и внутреннем цилиндрических слоях.

В обоих случаях обращает на себя внимание тот факт, что завершение процесса наступает раньше внутри реактора, хотя нагревается периферия слоя. Объяснение этому можно дать, анализируя радиальные температурные профили материала в аппарате (рис. 6–7). С некоторого момента (разного в зависимости от принятой кинетической модели) за счет экзотерми-

ческого характера самой реакции внутренние зоны аппарата разогреваются больше, чем внешние, что приводит к ускоренной реализации реакции в этих областях.

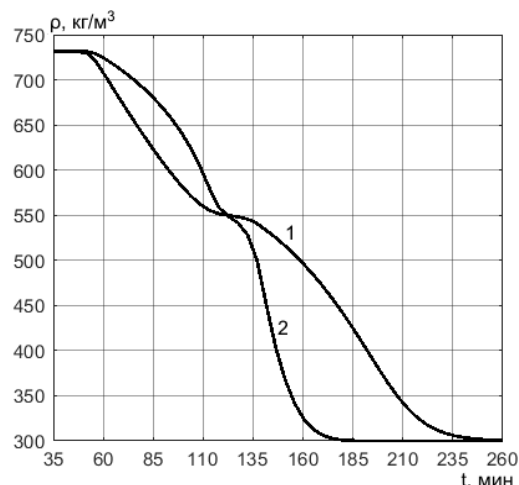


Рис. 4. Изменение эффективной плотности материала в процессе термообработки при использовании модели реакции (5): 1 – в центральной (внутренней) ячейке слоя; 2 – в наружном цилиндрическом слое

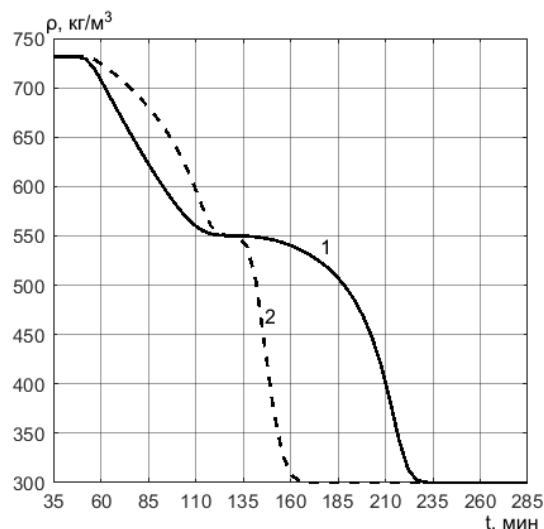


Рис. 5. Изменение эффективной плотности материала в процессе термообработки при использовании модели реакции (6): 1 – в центральной (внутренней) ячейке слоя; 2 – в наружном цилиндрическом слое

Следует также отметить, что в реакторе достигаются достаточно схожие температурные режимы (рис. 6–7, линии 1–3). Существенная разница наблюдается при рассмотрении линий 4–5 на рис. 6–7. Последнее обстоятельство связано с тем, что при использовании модели реакции (6) к моментам времени 220 и 235 скорость реакции резко снижается, поэтому ее тепловой эффект не поддерживает повышение температуры (рис. 2–3).

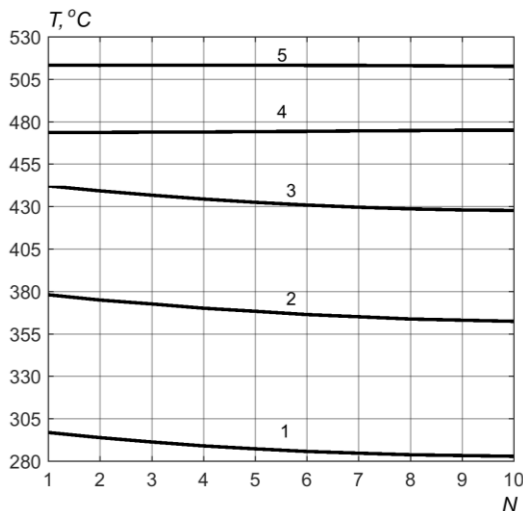


Рис. 6. Расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени при использовании модели реакции (5): 1 – 100 мин; 2 – 150 мин; 3 – 185 мин; 4 – 220 мин; 5 – 235 мин (номер ячейки N отсчитывается в радиальном направлении от поверхности к оси аппарата)

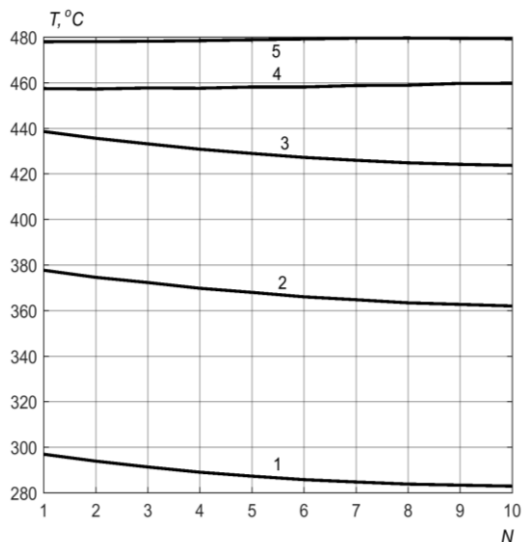


Рис. 7. Расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени при использовании модели реакции (6): 1 – 100 мин; 2 – 150 мин; 3 – 185 мин; 4 – 220 мин; 5 – 235 мин (номер ячейки N отсчитывается в радиальном направлении от поверхности к оси аппарата)

Выводы. Численное исследование сценариев работы цилиндрического реактора периодического действия для сушки и пиролиза древесной биомассы, отличающихся теоретическими представлениями о модели брутто-реакции (разным видом безразмерной кинетической функции), показало, что, в зависимости от выбранных кинетических параметров реакции, процесс удаления влаги может происходить параллельно с целевым процессом, затормаживая последний (ввиду противоположных энергетических

эффектов пиролиза и обезвоживания), что необходимо учитывать при построении режимных карт технологического процесса. Выявлен требующий эмпирической проверки нетривиальный эффект более интенсивного разогрева внутренних зон аппарата из-за термических эффектов реакции.

Список литературы

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
2. **Экспериментальное** и расчетное исследование пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе / А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, С.В. Василевич, М.В. Малько // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Вып. 64, № 1. – С. 51–64.
3. **Zhang L., Xu C.C., Champagne P.** Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass // Energy Convers. Manag. – 2010. – Vol. 51. – P. 969–982.
4. **Pyrolysis** of Pruning Residues from Various Types of Orchards and Pretreatment for Energetic Use of Biochar / P. Kazimierski, P. Hercel, T. Suchocki, et al. // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 2969.
5. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Анализ термогравиметрических данных различных видов древесины // Химия твердого топлива. – 2015. – Вып. 2. – С. 59–64.
6. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 1. – С. 167–182.
7. **Кинетический** анализ термохимической конверсии твердых топлив / А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, Г.И. Худякова, А.Ф. Рыжков // Химия твердого топлива. – 2017. – № 4. – С. 12–21.
8. **Новый** метод анализа термогравиметрических данных / М.В. Малько, С.В. Василевич, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2021. – Т. 64, вып. 3. – С. 24–32.
9. **Experimental** and modeling analysis of a batch gasification/pyrolysis reactor / P. Baggio, M. Baratieri, L. Fiori, et al. // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 1426–1435.
10. **Radiative** Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling / V. Pozzobon, S. Salvador, J.J. Béziau, et al. // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 128. – P. 319–330.
11. **Малько М.В., Василевич С.В.** Исследование кинетики пиролиза древесной биомас-

сы в изотермических условиях // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 321–331.

12. **Bryden K.M., Hagge M.J.** Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle // *Fuel*. – 2003. – Vol. 82. – P. 1633–1644.

13. **Comprehensive** study of biomass particle combustion / H. Lu, W. Robert, G. Peirce, et al. // *Energy and Fuels*. – 2008. – Vol. 22. – P. 2826–2839.

14. **Fatehi H., Bai X.S.** A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion // *Combustion Science and Technology*. – 2014. – Vol. 186. – P. 574–593.

15. **Mujumdar A.S.** Handbook of Industrial Drying. – 3rd ed. – New York, CRC Press; Taylor & Francis Group, 2006. – 1312 p.

16. **Термическое** разложение древесины тропических пород / Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, Б.Д. Тхань, Р.М. Асеева // *Лесной вестник*. – 2005. – Вып. 2. – С. 70–76.

17. **Theoretical** Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Camelo, L. Ovchinnikov // *Recent Innovations in Chemical Engineering*. – 2018. – No. 11 (1). – P. 20–28.

References

1. Fortov, V.E., Popel', O.S. Sostoyanie razvitiya vozobnovlyаемых источников энергии в мире и в России [The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia]. *Теплоэнергетика*, 2014, no. 6, pp. 4–13.

2. Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Vasilevich, S.V., Mal'ko, M.V. Eksperimental'noe i raschetnoe issledovaniya piroliza biomassy v tsilindricheskom reaktore [Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 51–64.

3. Zhang, L., Xu, C.C., Champagne, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Convers. Manag.*, 2010, vol. 51, pp. 969–982.

4. Kazimierski, P., Hercel, P., Suchocki, T., Smoliński, J., Pladzyk, A., Kardaś, D., Łuczak, J., Januszewicz, K. Pyrolysis of Pruning Residues from Various Types of Orchards and Pretreatment for Energetic Use of Biochar. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 2969.

5. Mar'yandyshev, P.A., Chernov, A.A., Lyubov, V.K. Analiz termogravimetricheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesiny [Analysis of Thermogravimetric Data for Different Forms of Wood]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2015, vol. 2, pp. 59–64.

6. Mar'yandyshev, P.A., Chernov, A.A., Lyubov, V.K. Analiz termogravimetricheskikh i kineticheskikh dannykh razlichnykh vidov

drevesnogo biotopliva Severo-Zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii [Thermogravimetric and Kinetic Data Analysis of Wood Biofuels in the North-Western Region of the Russian Federation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 1, pp. 167–182.

7. Kozlov, A.N., Svishchev, D.A., Khudyakova, G.I., Ryzhkov, A.F. Kineticheskiy analiz termokhimicheskoy konversii tverdykh topliv [Kinetic analysis of thermo-chemical conversion of solid fuels]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2017, no. 4, pp. 12–21.

8. Mal'ko, M.V., Vasilevich, S.V., Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E. Novyy metod analiza termogravimetricheskikh dannykh [An innovate method of thermogravimetric data analysis]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 24–32.

9. Baggio, P., Baratieri, M., Fiori, L., Grigante, M., Avi, D., Tosi, P. Experimental and modeling analysis of a batch gasification/pyrolysis reactor. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 1426–1435.

10. Pozzobon, V., Salvador, S., Bézian, J.J., El-Hafi, M., Le Maoult, Y. Radiative Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling. *Fuel Processing Technology*, 2014, vol. 128, pp. 319–330.

11. Mal'ko, M.V., Vasilevich, S.V. Issledovanie kinetiki piroliza drevesnoy biomassy v izotermicheskikh usloviyakh [Kinetics of Pyrolysis of Wood Biomass under Isothermal Conditions]. *Vesti Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 321–331.

12. Bryden, K.M., Hagge, M.J. Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle. *Fuel*, 2003, vol. 82, pp. 1633–1644.

13. Lu, H., Robert, W., Peirce, G., Ripa, B., Baxter, L.L. Comprehensive study of biomass particle combustion. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 2826–2839.

14. Fatehi, H., Bai, X.S. A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion. *Combustion Science and Technology*, 2014, vol. 186, pp. 574–593.

15. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying. New York, CRC Press; Taylor & Francis Group, 2006. 1312 p.

16. Sivenkov, A.B., Tkhan', B.D., Serkov, B.B., Aseeva, R.M. Termicheskoe razlozhenie drevesiny tropicheskikh porod [Thermal decomposition of some tropical wood species]. *Lesnoy vestnik*, 2005, issue 2, pp. 70–76.

17. Mizonov, V., Mitrofanov, A., Camelo, A., Ovchinnikov, L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28.