

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ ТЕКСТИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА
В РЕАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РУБАШКОЙ НАГРЕВА**

**MATHEMATICAL MODELING OF TEXTILE WASTE PYROLYSIS
IN A BATCH REACTOR WITH A HEATING JACKET**

В.А. ОГУРЦОВ¹, В.Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, А.В. МИТРОФАНОВ³, А.В. ОГУРЦОВ³, З.В. ЗАРУБИН³

V.A. OGURTSOV, V.E. RUMYANTSEVA, A.V. MITROFANOV, A.V. OGURTSOV, Z.V. ZARUBIN

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,
Ivanovo State Power Engineering University)**

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Утилизация отходов текстильного производства представляет собой актуальную задачу. Наиболее остро эта проблема проявляется в регионах с развитой текстильной промышленностью. Для преодоления указанной проблемы предложены различные технические решения, в том числе возможно использование текстильных отходов в химико-энергетических целях. Процесс пирогенной переработки материалов позволяет получать различные продукты, необходимые химической и другим отраслям материального производства. В работе предложена одномерная математическая модель функционирования цилиндрического реактора для пиролиза периодического принципа действия с рубашкой нагрева. Модель построена на основе явной разностной схемы и адаптирована для случая термического разложения ткани рами. Материальные константы для параметрической идентификации модели взяты из известных литературных источников. В ходе численных экспериментов показана качественная непротиворечивость результатов и обоснована необходимость описания подобной аппаратуры как объектов с распределенными характеристиками. Модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа для построения компьютерного метода расчета аппаратуры пирогенетической утилизации текстильных отходов.

Recycling of textile production waste is an urgent task. This problem is the most acute in regions with a developed textile industry. To overcome this problem, various technical solutions have been proposed, including the use of textile waste in chemical and energy purposes. The process of pyrogenic treatment of materials makes it possible to obtain various products necessary for chemical and other branches of material production. The paper proposes a one-dimensional mathematical functioning model of a cylindrical batch reactor for pyrolysis with a heating jacket. The model is based on an explicit difference scheme and adapted for the case of rami textile thermal decomposition. The material constants for parametric identification of the model are taken from well-known literary sources. In the course of numerical experiments, the qualitative consistency of the results is shown and the necessity of describing such an apparatus as objects with distributed characteristics is justified.

The model can be considered as a reliable scientific basis for constructing a computer method for calculating equipment of textile waste pyrogenetic disposal.

Ключевые слова: пиролиз, текстильные отходы, численное моделирование, тепло- и массообмен.

Keywords: pyrolysis, textile waste, numerical modeling, heat and mass transfer.

1. Введение

Наблюдающееся в настоящее время сокращение запасов доступного ископаемого топлива на фоне злободневных проблем загрязнения окружающей среды побуждает многие страны (в том числе и РФ [1]) расширять твердотопливную нишу за счет вовлечения в топливно-энергетический оборот отходов различных производств, пригодных для термохимической переработки [2], [3]. При этом наряду с прямым сжиганием, все более широкое распространение получают процессы пиролиза или газификации, проводимые при повышенных температурах в безокислительной среде [2...4]. Конечным результатом процесса пиролиза могут быть различные твердые, газообразные и жидкие продукты, пригодные для использования в энергетике и химической инженерии [2...4].

Поскольку вовлекаемые в оборот материалы, как правило, имеют сложный химический состав, то при рассмотрении кинетики их термического преобразования описанию подлежит некоторая суммарная реакция с использованием формально-кинетических моделей, применяемых для анализа результатов термогравиметрического исследования термического преобразования материалов [5], [6]. Несмотря на известные трудности с математической формализацией результатов термогравиметрических исследований [5], они обычно позволяют получить достаточно надежные формально-кинетические зависимости для прогнозирования реализации термического преобразования материалов [5...7].

Переработка отходов текстильного производства представляется достаточно актуальной [7...9], поэтому кинетика термохимического преобразования в некоторой степени исследована [7], [9]. Однако необходимо отметить, что кинетические параметры получают при термогравиметричес-

ком исследовании возможно малых по своим массогабаритным параметрам образцов материала, а организация технологической переработки отходов текстильного производства требует надежных моделей для описания кинетики преобразования больших объемов материалов, находящихся в реакторном пространстве. Поскольку химико-технологическая аппаратура далеко не всегда может быть отнесена к аппаратам идеального смешения, то возникает потребность в ее описании как системы с распределенными характеристиками [11], [12].

Целью настоящей статьи является формирование математической модели для описания реактора пиролиза текстильных отходов, снабженного рубашкой нагрева.

2. Материалы и методы

2.1. Описание процессов переноса в пространстве аппарата

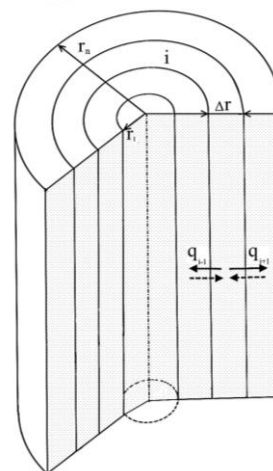


Рис. 1

В основу моделирования положена явная разностная схема представления основных технологических процессов в аппарате, использованная ранее для описания пиролиза древесины в аппарате с радиальным нагревом [2]. Расчетная схема предла-

гаемой одномерной математической модели технологических процессов в реакторном пространстве показана на рис. 1.

В работе [2] была показана принципиальная качественная непротиворечивость математических построений, поэтому в настоящей работе акцент делается на дальнейшей работе с моделью и ее адаптации к процессам энерготехнологической переработки отходов текстильного производства. При этом рассматривается сценарий работы аппарата, при котором в одном агрегате совмещаются процессы сушки и термохимического преобразования слоя текстильных отходов.

Детальное описание математических построений модели описано в работе [2], поэтому в настоящей работе фиксируются только базовые ее положения. Для описания переноса аддитивных свойств (влаги и теплоты) в радиальном направлении аппарата используется явная разностная аппроксимация процессов массопроводности и теплопроводности. Межфазное взаимодействие и химические превращения описываются обычным образом [2], но дифференцированно для каждого цилиндрического слоя толщиной Δr .

Так, например, теплосодержание во всем аппарате описывается вектор-столбцом $Q = \{Q_i\}$, имеющим размерность $n \times 1$ (где n – число ячеек). Каждый элемент этого вектора содержит теплоту внутри i -го цилиндрического слоя. Векторы такой же размерности позволяют описывать и другие аддитивные характеристики процессов внутри реакторного пространства (распределение влаги, массы реагирующих компонентов и т.д.). Эволюция этих векторов, характеризующих состояние процесса в аппарате, рассчитывается при помощи рекуррентных математических процедур и фиксируется в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода.

Базовые соотношения модели [2] отражают достаточно очевидные уравнения баланса и, например, для процесса пространственного переноса теплоты, записываются следующим образом:

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

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k \text{ для } i = 1, \quad (2)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_s^k \text{ для } i = n. \quad (3)$$

Источниковое слагаемое q_s определяет количество теплоты, поступающее в аппарат от тепловой рубашки с температурой стенки T_s на каждом рекуррентном шаге, и рассчитывается как:

$$q_s^k = -\lambda_n^k (T_n^k - T_s) (2\pi r_n L) \Delta t / dr, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности слоя сыпучего материала, который зависит от степени завершенности процесса термопреобразования материала α и реологических характеристик слоя (эмпирическая функциональная зависимость и порядок расчета описан в работе [2]).

При построении балансовых уравнений (1)...(3) учитывается также, что каждый рассматриваемый i -й цилиндрический слой граничит и обменивается порциями теплоты с соседними слоями, номера которых $(i+1)$ и $(i-1)$ соответственно. Порции теплоты, которые может получать или отдавать i -й слой q_{i-1} и q_{i+1} , могут быть определены как:

для $i = \overline{2, n}$:

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t, \quad (5)$$

для $i = \overline{1, n-1}$:

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} L \right] (2\pi r_i) \Delta t, \quad (6)$$

где T_i – элемент вектора температур материала $T = \{T_i\}$, который формируется на основе вектора содержания теплоты в цилиндрических слоях $Q = \{Q_i\}$, L – высота реактора.

2.2. Описание межфазного взаимодействия и термопреобразования материала

В высокотемпературных процессах обезвоживание материала часто рассматривается по аналогии с описанием химических реакций, поэтому для описания кинети-

тики сушки вводятся уравнения, аналогичные по форме записи уравнению Аррениуса [13...15]. Таким образом, для описания эволюции распределения массы влаги по слоям (которое описывается вектором M_w), можно записать [2]:

$$M_{w,i}^{k+1} = M_{w,i}^k - k_{w,i}^k (X_{w0} - X_{w,i}^k) M_{w,i}^k \Delta t, \quad (7)$$

где k_w – константа скорости процесса обезвоживания материала; X_w и X_0 – текущее и начальное влагосодержание материала в рассматриваемом цилиндрическом слое.

Константа скорости обезвоживания материала представляется в виде аррениусовской зависимости [13...15]:

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

где значения параметров можно принять следующими: $k_{w0} = 5,13 \cdot 10^{10}$ и $E_{aw} = 88$ кДж/моль [13...15].

В разработанной модели процесса в аппарате термическое разложение навески сырья формально описывается одной суммарной реакцией [2]. Такое допущение является традиционным для упрощения инженерных расчетов [15], и позволяет описывать изменение степени завершенности реакции α с использованием единого аррениусовского выражения для константы скорости термического разложения материала [2], [7]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_i^k}\right) f(\alpha), \quad (9)$$

где A и E – предэкспоненциальный фактор и энергия активации суммарной реакции разложения ткани рами ($\lg(A) = -1,3515 + 0,0808 \cdot E$ при $E = 159,99$ кДж/моль и [7]), безразмерная кинетическая функция, определяющаяся типом и механизмом реакции, принята в форме $f(\alpha) = 1 - (1 - \alpha)^{0,5}$ [7].

В результате обезвоживания и реализации термического разложения материала векторы состояния масс компонентов на каждом шаге корректируются (вектор реагирующей массы M , который легко

рассчитывается в зависимости от степени завершенности процесса α , и вектор содержания влаги M_w) [2]. Кроме того, необходима дополнительная (по сравнению с операциями (1)...(3)) корректировка вектора теплового состояния аппарата Q :

$$Q^{k+1} = Q^{k+1} + (M^{k+1} - M^k) r_r - (M_w^{k+1} - M_w^k) r_w, \quad (10)$$

где r_r – удельный тепловой эффект реакции пиролиза; r_w – удельный тепловой эффект испарения влаги.

Таким образом, предложенная модель принципиально позволяет рассчитывать кинетические характеристики основных процессов на основе текущего состояния системы. Это позволяет описать функционирование аппаратуры как нестационарной пространственно-временной системы.

3. Результаты

На рис. 2...4 представлены результаты численных экспериментов, отражающие изменение пространственных характеристик функционирования аппарата во времени.

Численные эксперименты проводились для моделирования пиролиза в цилиндрическом реакторе радиусом $R = 0,1$ м и высотой рабочей зоны $0,75$ м, температура в котором повышается с 20°C до рабочего значения 600°C . При моделировании приняты $\Delta x = R/10$ и $\Delta t = 0,2$ с.

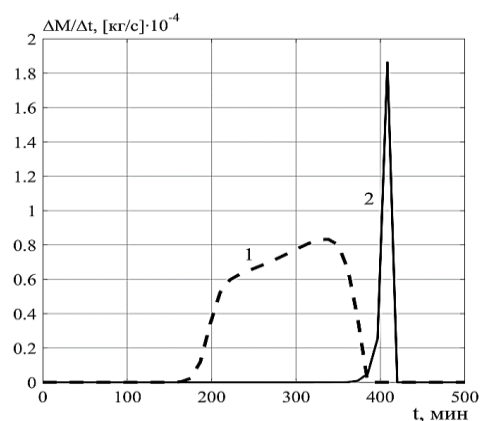


Рис. 2

На рис. 2 (дифференциальные кривые уменьшения массы материала: линия 1 – для процесса сушки, линия 2 – для процесса

термической конверсии) представлены дифференциальные кривые уменьшения массы материала за счет обезвоживания (линия 1) и за счет реакции термического разложения (линия 2). Как видно, указанные процессы не совпадают во времени, соответственно не влияют друг на друга.

Рис. 3 и рис. 4 характеризуют пространственно-временные распределения температуры материала.

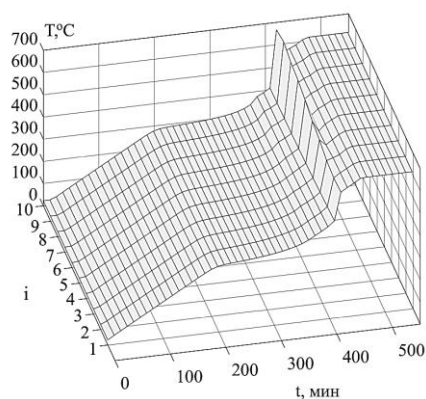


Рис. 3

На рис. 3 видно, что распределение температуры в пространстве аппарата характеризуется существенной неоднородностью, вплоть до завершения всех процессов. Кроме того, процесс обезвоживания материала (начальное содержание влаги полагалось на уровне 20% от массы навески) достаточно долго не позволяет реактору разогреться. Однако после завершения сушки реакция начинается интенсивно и при максимальной скорости реакции (рис. 2) экзотермические эффекты реакции качественно меняют тепловой режим аппарата, что наиболее заметно на рис. 4 (расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени: 1 – 60 мин, 2 – 140 мин, 3 – 250 мин, 4 – 400 мин, 5 – 420 мин, 6 – 500 мин) (линия 5 качественно отличается от линий 1...4 и 6). К моменту времени 420 мин наличие экзотермических эффектов приводит к перегреву внутренней зоны аппарата. В дальнейшем система приходит к равномерному распределению температур (за счет перераспределения теплоты и завершения реакций пиролиза),

однако эта температура оказывается выше, чем температура стенки (600°C).

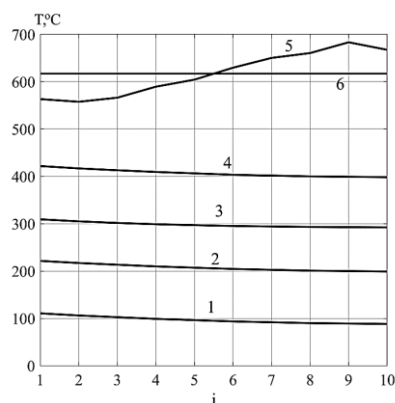


Рис. 4

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных расчетных исследований показана качественная непротиворечивость получаемых результатов в отношении теплового режима проводимых процессов. В частности, показан разогрев материала во внутренних зонах реактора до значений, превышающих температуру стенки, являющейся источником теплоты. Для периодических режимов работы оборудования такие эффекты, объясняющиеся экзотермическим характером реакций, могут иметь важное значение с точки зрения функционирования оборудования. Кроме того, результаты численных экспериментов показывают необходимость описания подобной аппаратуры как объектов с распределенными характеристиками, так как наблюдается значительная пространственная неоднородность полей температур.

Таким образом, модель позволяет технологом облегчить процесс принятия решений при управлении режимами работы оборудования и может быть рассмотрена как достоверная научная основа формирования компьютерного метода расчета аппаратуры для пирогенетической утилизации текстильных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fortov V.E., Popel' O.S. The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia // Thermal engineering. – 2014, №.6. P. 4...13.

2. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Василевич С.В., Малько М.В. Экспериментальное и расчетное исследование пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе // 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. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenergy.– 2012. Vol.38. P. 68...94

5. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Zarubin Z.V. Formal kinetic approaches to the description of thermal decomposition of materials - problems of parameter identification and results interpretation: A brief review // ChemChemTech. – 2022. Vol. 65. № 7. P. 6...16.

6. Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Mitrofanov A.V., Mizonov V.E. An innovate method of thermogravimetric data analysis // ChemChemTech. – 2021. Vol. 64. № 3. P. 24...32. – DOI 10.6060/ivkkt.20216403.6348.

7. Zhu F., Feng Q., Liu R., Li K., Xu Y. Kinetics of pyrolysis of ramie fabric wastes from thermogravimetric data // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2014. Vol. 119. P. 651...657.

8. Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Касьяненко Н.С. Использование отходов текстильной промышленности в производстве строительных композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, №6. С. 21...29.

9. Zhu F., Feng Q., Liu R., Xin Q., Li K., Xu Y. Pyrolysis kinetics of polysulfonamide fiber used for fire protective clothing // Textile Research Journal. – 2015. Vol.86. P. 472...479.

10. Колибаба О.Б., Горбунов В.А., Горинов О.И., Самышина О.В., Габитов Р.Н. Исследование влияния влажности на температурный режим переработки твердых бытовых отходов, содержащих текстиль, термическими методами // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 2. С.192...195.

11. Аleshina А.П., Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Митрофанов А.В. Применение теории цепей Маркова к моделированию кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014, № 5. С. 42...46.

12. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed // Particulate Science and Technology. – 2019. Vol. 37. №8. P. 1028...1033.

13. 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.

14. Lu, H., W. Robert, G. Peirce, B. Ripa, L.L. Baxter.. Comprehensive study of biomass particle combustion // Energy and Fuels. – 2008. Vol. 22. P. 2826...2839.

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

REFERENCES

1. Fortov V.E., Popel' O.S. The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia // Thermal engineering. – 2014, No.6. P. 4...13.

2. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Vasilevich S.V., Malko M.V. Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2021. Vol. 64. No.1. P. 51...64. (in Russian).

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. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenergy.– 2012; Vol.38. P. 68...94

5. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Zarubin Z.V. Formal kinetic approaches to the description of thermal decomposition of materials - problems of parameter identification and results interpretation: A brief review // ChemChemTech. – 2022. Vol. 65. No 7. P. 6...16.

6. Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Mitrofanov A.V., Mizonov V.E. An innovate method of thermogravimetric data analysis // ChemChemTech. – 2021. Vol. 64. No 3. P. 24...32. – DOI 10.6060/ivkkt.20216403.6348.

7. Zhu F., Feng Q., Liu R., Li K., Xu Y. Kinetics of pyrolysis of ramie fabric wastes from thermogravimetric data // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2014. Vol. 119, P. 651...657.

8. Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Rumyantsev E.V., Odintsova O.I., Kasiyanenko N.S. The use of textile industry waste in the production of building composites decomposition // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 6. P. 21...29.

9. Zhu F., Feng Q., Liu R., Xin Q., Li K., Xu Y. Pyrolysis kinetics of polysulfonamide fiber used for fire protective clothing // Textile Research Journal. – 2015. Vol.86/ P. 472...479.

10. Kolibaba O.B., Gorbunov V.A., Gorinov O.I., Samyshina O.I., Gabitov R.N. The influence of the thermo physical properties of solid household wastes with textile components on the temperature regime of the thermal decomposition // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2016, No. 2. P. 192...196

11. Aleshina A.P., Ogurtsov V.A., Mizonov V.E., Mitrofanov A.V. Application of Markov chain theory to modeling the kinetics of vibration shock in a layer of variable height // Transactions of the Ivanovo State Power Engineering University. – 2014. No. 5. P. 42...46.

12. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. Application of the theory of Markov chains to

theoretical study of processes in a circulating fluidized bed // *Particulate Science and Technology*. – 2019. Vol. 37. No 8. P. 1028...1033.

13. *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.

14. *Lu, H., W. Robert, G. Peirce, B. Ripa, L.L. Baxter.* Comprehensive study of biomass particle combustion // *Energy and Fuels*. – 2008. Vol. 22. P. 2826...2839.

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

Рекомендована кафедрой информационных технологий. Поступила 31.10.22.
