

# Кинетика термического разложения древесно-полимерных композитов

Э.Н. Ганиева<sup>1а</sup>, М.Г. Ермоchenkov<sup>1б</sup>, М.Ю. Кладов<sup>2с</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

<sup>2</sup>АО «Композит», Королев, ул. Пионерская, 4, Россия

<sup>а</sup> ganieva@bmstu.ru, <sup>б</sup> ermochenkoy@bmstu.ru, <sup>с</sup> info@kompozit-mv.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0006-7177-7097>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5608-7035>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8554-2161>

Статья поступила 14.04.2025, принята 25.04.2025

*В статье представлены результаты экспериментального термогравиметрического анализа четырех видов древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена низкой плотности с добавками карбоната кальция, полиэтилена высокой плотности, полипропилена и поливинилхлорида. Определена термическая стабильность и изменение массы на различных стадиях с помощью математической обработки полученных данных. В результате определены температура начала термодеструкции, температура максимальной скорости разложения и температура завершения стадии, рассчитаны кинетические параметры термической деструкции для каждой стадии разложения, построены кривые изменения параметров и составлена таблица значений. Указанные параметры получены с использованием метода, основанного на уравнении Аррениуса. Сравнение экспериментальных кривых потери массы материалов и скоростей процесса с расчетами, проведенными по полученным кинетическим параметрам, показало удовлетворительное совпадение. Различные композиты демонстрируют разную устойчивость к термическому разложению. Каждый материал проходит через несколько стадий деградации, что указывает на сложный механизм разложения. Подчеркнута значимость частотного фактора после достижения определенной температуры. В представленной таблице не указаны конкретные значения влажности, однако результаты термогравиметрического анализа могут быть использованы для определения содержания влаги в материалах. Изученная равновесная влажность помогает оценивать стабильность материала в условиях хранения и эксплуатации. Значение равновесной влажности способствует коррекции и прогнозированию теплофизических параметров материалов, таких как теплопроводность, теплоемкость и коэффициент теплового расширения. Полученные результаты могут быть применены при разработке режимов технологических процессов по формованию изделий из древесно-полимерных композитов, включающих нагрев исходного сырья.*

**Ключевые слова:** древесно-полимерный композит; термогравиметрический анализ; полиэтилен низкой плотности; полиэтилен высокой плотности; полипропилен; поливинилхлорид; потеря массы.

## Kinetics of thermal decomposition of wood-polymer composites

E.N. Ganieva<sup>1а</sup>, M.G. Ermochenkoy<sup>1б</sup>, M.Yu. Kladov<sup>2с</sup>

<sup>1</sup>Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University; 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

<sup>2</sup>Composite, JSC; 4, Pionerskaya St., Korolev, Russia

<sup>а</sup> ganieva@bmstu.ru, <sup>б</sup> ermochenkoy@bmstu.ru, <sup>с</sup> info@kompozit-mv.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0006-7177-7097>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5608-7035>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8554-2161>

Received 14.04.2025., accepted 25.04.2025

*The paper presents the results of experimental thermogravimetric analysis of four types of wood-polymer composites based on low-density polyethylene with calcium carbonate additives, high-density polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride. Thermal stability and mass change at different stages are determined using mathematical processing of the obtained data. As a result, the temperature of the beginning of thermal degradation, the temperature of the maximum rate of decomposition and the temperature of stage completion are determined, the kinetic parameters of thermal degradation for each stage of decomposition are calculated, curves of parameter variation are plotted and a table of values is compiled. The above parameters are obtained using a method based on the Arrhenius equation. Comparison of the experimental curves of material mass loss and process rates with the calculations made using the obtained kinetic parameters show a satisfactory coincidence. Different composites show different resistance to thermal decomposition. Each material goes through several degradation stages, indicating a complex degradation mechanism. The significance of the frequency factor after reaching a certain temperature is emphasized. No specific moisture content values are given in the presented table, but the results of thermogravimetric analysis can be used to determine the moisture content of materials. The studied equilibrium moisture content helps to evaluate the stability of the material under storage and operating conditions. The value of equilibrium moisture content helps in correcting and predicting thermophysical parameters of materials such as thermal conductivity, heat capacity and coefficient of thermal expansion. The obtained results can be applied in the development of technological process regimes for molding products from wood-polymer composites, including heating of the initial raw material.*

**Keywords:** wood-polymer composite; thermogravimetric analysis; low-density polyethylene; high-density polyethylene; polypropylene; polyvinyl chloride; mass loss.

**Введение.** Первые попытки производства изделий из древесно-полимерных композитов (ДПК) столкнулись с множеством технических сложностей и препятствий, что заставило усомниться в перспективности этого материала. Несмотря на это, отрицательный опыт оказался незаменимым для последующего совершенствования технологий и рецептур композитов. Механохимическая модификация древесной муки позволяет повысить физико-механические свойства ДПК на 30–40 % и уменьшить степень водопоглощения на 17 % [1]. Для повышения эксплуатационных характеристик изделий из древесины они подвергаются процессу термического модифицирования, что позволяет улучшить их свойства [2]. Однако даже после термомодификации древесной муки в древесно-полимерном композите может оставаться влага, а неполное покрытие древесных частиц полимером в процессе компаундирования или экструзии способствует естественному поглощению влаги материалом [3]. Улучшенные методы экструзии, прессования и формовки позволили добиться более равномерного распределения компонентов и повышения механической прочности композита [4]. Примерно половина всех пластиковых деталей для автомобилей производится с использованием методов термоформования. Учитывая прочностные показатели древесно-полимерных композитов, они могут стать альтернативой синтетическим полимерным материалам в машиностроении и архитектуре. Также внедрение новых технологий, таких как 3D-печать, открыло новые горизонты для применения ДПК [5,6,7,8]. Кроме того, растущий интерес к экологически чистым и устойчивым материалам способствует дальнейшему развитию ДПК.

Вариативность компонентов древесно-полимерных композитов позволяет адаптировать материал под конкретное применение и конструкторское решение, исходя из условий эксплуатации и экономических соображений. Применение переработанного полимерного сырья значительно расширяет возможности комбинирования различных компонентов [9]. При этом каждая вариация композита будет иметь свои термические свойства. Согласно зарубежным исследованиям [10,11,12], органические добавки в полимеры улучшают их термические характеристики и снижают скорость деградации композитных материалов при нагреве. Увеличение содержания древесной муки в полиэтилене, в полипропилене и других термопластах приводит к снижению текучести и повышению температуры разложения, что способствует улучшению термической стабильности. Высокое содержание древесного продукта создает тепловой барьер, уменьшающий скорость распада полимера, хотя увеличение количества древесной пыли ускоряет потерю массы. Дополнительно в результатах зарубежных исследований указано, что при температурах ниже 110 °C наблюдается незначительная потеря массы, что в основном связано с удалением различных легких компонентов, таких как входящая вода и летучие вещества, в то время как разложение аморфных полимеров происходит при температурах значительно выше 250 °C.

Определение с высокой точностью теплофизических и физико-химических характеристик способствует

эффективной оптимизации процесса производства изделий [13]. Термический анализ и соответствующие методы обработки полученных результатов измерений позволяют определить температуру начала деструкции, количество и массы стадий, скорость процесса деструкции, тепловые эффекты процесса и стадий, кинетические параметры, показатели которых необходимы для создания композитов на основе полимерной матрицы и их дальнейшей переработки [14,15]. В современной технике важно оценивать работоспособность композита при тепловых воздействиях. Термодеструкцию можно рассматривать как процесс физико-химических превращений внутри материала под действием теплоты, сопровождающийся разрушением напряженных межатомных связей и носящий многостадийный характер для большинства композиционных материалов. В качестве допущения принимается, что реакция протекает параллельно и независимо. Каждая стадия характеризуется своей степенью превращения и сопровождается разрывом определенного количества межатомных связей, что приводит к снижению физико-механических характеристик материала. Расчет кинетических параметров этих стадий проводят по результатам термогравиметрического анализа исследуемого материала [16].

Результаты этих исследований критичны при использовании материала в различных отраслях для экономики замкнутого цикла [17,18,19].

Цель исследования заключается в изучении термической стабильности и изменений массы образцов древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена низкой плотности с добавками карбоната кальция, полиэтилена высокой плотности, полипропилена и поливинилхлорида при различных температурных режимах нагрева, результаты которых будут использованы для разработки технологий формовки изделий из этих материалов.

**Оборудование и методы.** Для исследования использовался синхронный термоанализатор TA Instruments SDT 650. Принцип метода термогравиметрического анализа заключается в измерении изменения массы образца в зависимости от температуры или времени в условиях контролируемого нагрева или охлаждения [20]. Перед проведением анализа производилась калибровка прибора по температуре (по точкам плавления чистых металлов: In, Sn, Pb, Zn, Au) и по массе (с использованием специальных керамических гирь).

Термогравиметрические исследования проводились по ГОСТ Р 56721-2015 (ИСО 11358-1:2014). Образец представлял собой навеску материала, предварительно измельченного до порошка, частицы которого равномерно распределяли в тигле из оксида алюминия. По форме тигель представлял собой цилиндрическую чашку объемом 90 мкл с плоским дном. После процедуры распределения навеска занимала от 10 до 15 % объема тигля. Масса навески составляла в среднем 16 мг. Крышки на тигли образца и сравнения не устанавливались. Измерения проводились в интервале температур от 20 до 1000 °C с постоянной скоростью нагрева 10 °C/мин в токе аргона особой чистоты. Расход газа составлял 150 мл/мин, давление газа в печи равнялось

атмосферному. В ходе эксперимента получали кривую потери массы образца в зависимости от времени с ростом температуры. Задание условий проведения опыта, управление прибором и запись получаемых данных на жесткий диск компьютера осуществляли при помощи программного обеспечения TRIOS.

Анализ полученных результатов позволяет изучать термическую стабильность материалов. По результатам термогравиметрического анализа (ТГА) могут быть рассчитаны: частотный фактор ( $A$ ), энергия активации стадий ( $E$ ), начальная относительная масса стадий ( $\omega_0$ ), температура начала ( $T_{нач}$ ), конца ( $T_{кон}$ ) и максимума скорости стадии ( $T_{max}$ ). Разложение компонентов древесно-полимерного композита – это многостадийный процесс термической деструкции. Древесная мука утрачивает влагу и подвергается разложению на начальных этапах, тогда как полимерная матрица разрушается позднее. Уравнение, описывающее скорость протекания стадий термической деструкции, рассматривает их как параллельные и независимые реакции [21]:

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{n_j} \cdot A_j \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где  $j$  – номер стадии;  $m$  – номер и число стадии;  $T$  – температура, К;  $n_j$  – порядок реакции  $j$ -й стадии;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль\*К);  $E_j$  – энергия активации  $j$ -й стадии, Дж/моль;  $A_j$  – частотный фактор  $j$ -й стадии,  $c^{-1}$ ;  $\omega_j$  – безразмерная масса стадии.

Кинетические параметры  $E_j$ ,  $A_j$ ,  $\omega_j$  описывают скорость химических реакции  $j$ -й стадии. Результаты термогравиметрических исследований образцов из древесно-полимерного композита для получения выше указанных параметров получены с использованием метода, основанного на уравнении Аррениуса [22].

Результаты математической обработки экспериментальных исследований приведены в табл.

**Таблица.** Кинетические параметры термической деструкции древесно-полимерных композитов в среде аргона

| Материал | Номер стадии | Температура начала стадии, $T_{нач}$ , К | Температура максимальной скорости стадии, $T_{max}$ , К | Температура завершения стадии, $T_{кон}$ , К | Начальная масса стадии, $\omega_0$ | Энергия активации, $\frac{E}{R}$ , Дж/моль | Частотный фактор, $A$ , $c^{-1}$ |
|----------|--------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|
| ДПК_ПЭНП | 1            | 312                                      | 417                                                     | 482                                          | 0,01                               | 4794                                       | 465                              |
|          | 2            | 485                                      | 583                                                     | 636                                          | 0,21                               | 11345                                      | $1,591 \cdot 10^6$               |
|          | 3            | 586                                      | 636                                                     | 661                                          | 0,208                              | 28982                                      | $7,047 \cdot 10^{17}$            |
|          | 4            | 579                                      | 675                                                     | 725                                          | 0,037                              | 16074                                      | $1,322 \cdot 10^8$               |
|          | 5            | 695                                      | 746                                                     | 772                                          | 0,383                              | 39472                                      | $1,052 \cdot 10^{21}$            |
|          | 6            | 667                                      | 819                                                     | 906                                          | 0,017                              | 13983                                      | $8,808 \cdot 10^4$               |
|          | 7            | 873                                      | 961                                                     | 1005                                         | 0,085                              | 37423                                      | $5,402 \cdot 10^{14}$            |
|          | 8            | 923                                      | 1164                                                    | -                                            | 0,043                              | 17215                                      | $5,586 \cdot 10^3$               |
| ДПК_ПЭВП | 1            | -                                        | 294                                                     | 526                                          | 0,029                              | 592                                        | 0,013                            |
|          | 2            | 500                                      | 587                                                     | 634                                          | 0,179                              | 13038                                      | $2,788 \cdot 10^7$               |
|          | 3            | 591                                      | 636                                                     | 656                                          | 0,181                              | 33700                                      | $1,479 \cdot 10^{21}$            |
|          | 4            | 482                                      | 642                                                     | 741                                          | 0,109                              | 7436                                       | 327                              |
|          | 5            | 698                                      | 749                                                     | 774                                          | 0,4                                | 40689                                      | $4,578 \cdot 10^{21}$            |
|          | 6            | 697                                      | 873                                                     | 975                                          | 0,046                              | 13443                                      | $1,439 \cdot 10^4$               |
|          | 7            | 720                                      | 1009                                                    | 1205                                         | 0,032                              | 9571                                       | 20                               |
|          | 8            | 1042                                     | 1209                                                    | -                                            | 0,027                              | 29450                                      | $1,253 \cdot 10^8$               |
| ДПК_ПП   | 1            | -                                        | 355                                                     | 392                                          | 0,02                               | 6143                                       | $2,68 \cdot 10^5$                |
|          | 2            | 496                                      | 610                                                     | 674                                          | 0,436                              | 10360                                      | $1,125 \cdot 10^5$               |
|          | 3            | 660                                      | 740                                                     | 782                                          | 0,481                              | 23677                                      | $5,513 \cdot 10^{11}$            |
|          | 4            | 539                                      | 901                                                     | 1205                                         | 0,042                              | 5039                                       | 0,275                            |
|          | 5            | 889                                      | 1155                                                    | -                                            | 0,021                              | 14786                                      | 662                              |
| ДПК_ПВХ  | 1            | -                                        | 294                                                     | 429                                          | 0,027                              | 1348                                       | 0,217                            |
|          | 2            | 502                                      | 551                                                     | 576                                          | 0,426                              | 21793                                      | $1,739 \cdot 10^{15}$            |
|          | 3            | 427                                      | 587                                                     | 692                                          | 0,146                              | 6004                                       | 79                               |
|          | 4            | 630                                      | 727                                                     | 776                                          | 0,135                              | 18668                                      | $8,556 \cdot 10^8$               |
|          | 5            | 506                                      | 757                                                     | 940                                          | 0,075                              | 5776                                       | 3,4                              |
|          | 6            | 819                                      | 939                                                     | 1002                                         | 0,059                              | 25210                                      | $2,162 \cdot 10^9$               |
|          | 7            | 856                                      | 1012                                                    | 1096                                         | 0,093                              | 21603                                      | $6,529 \cdot 10^6$               |
|          | 8            | 952                                      | 1186                                                    | -                                            | 0,045                              | 18750                                      | $1,634 \cdot 10^4$               |

Примечание. Прочерк – отсутствуют измеренные данные для указанной стадии.

Важным этапом в термогравиметрических исследованиях является определение остатка, который позволяет оценить массу вещества, оставшегося после нагревания.

$$\omega(\%) = \frac{m_{\text{нач}} - m_{\text{кон}}}{m_{\text{кон}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

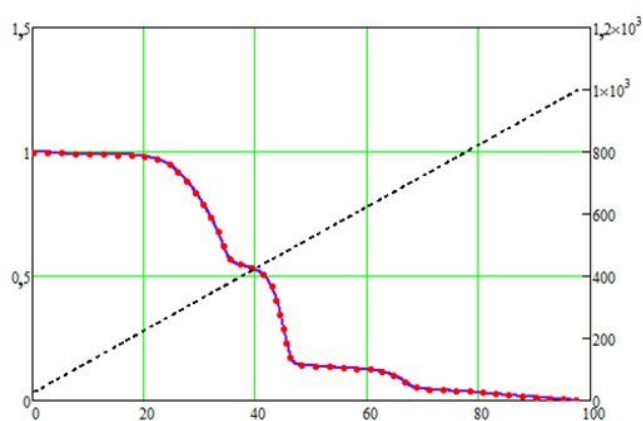
где  $m_{\text{нач}}$  – масса перед нагреванием, мг;  $m_{\text{кон}}$  – масса, соответствующая конечной температуре, мг.

Изменения относительной массы образцов ДПК с полиэтиленом низкой плотности (ПЭНП), полиэтиленом высокой плотности (ПЭВП), полипропиленом (ПП) и поливинилхлоридом (ПВХ) соответственно приведены на рис. 1.

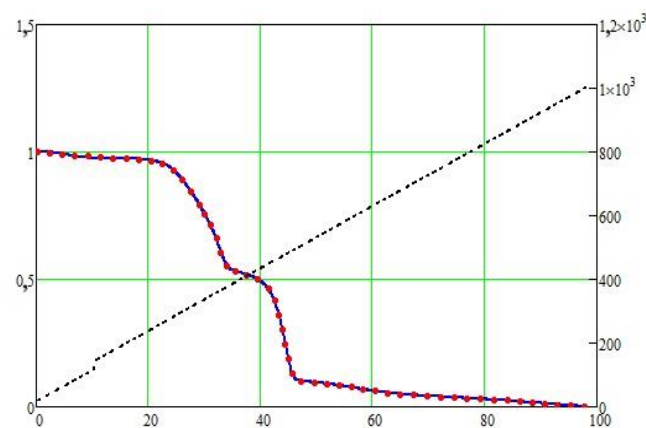
Количественный анализ стандартной кривой потери массы определяется путем дифференцирования кривой потери массы, графики которых указаны на рис. 2.

Определение результатов ТГА по стадиям с использованием дифференциальной потери массы ДПК для каждого композита устанавливает, что процесс убыли массы происходит в несколько стадий (от 5 до 8 в зависимости от термопласта). Первые стадии потери массы образцов связаны с потерей влаги и летучих компонентов композита.

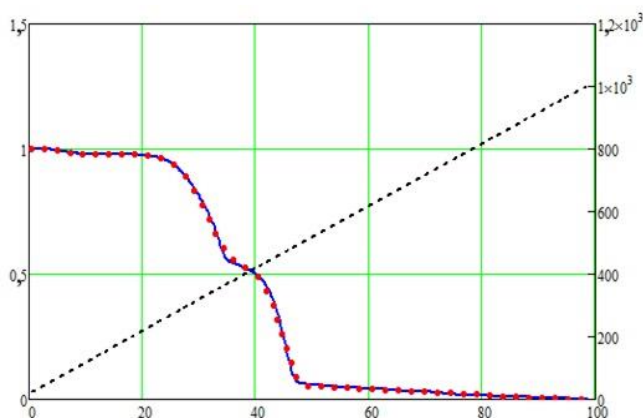
Анализ результатов, представленных на рис.1,2, может подтвердить адекватность предложенной модели протекания физико-химических процессов в древесно-полимерных композитах под воздействием тепла. При разработке технологий формования изделий следует учитывать, что температуры, при которых начинается разрушения компонентов ДПК, не должны быть превышены, что позволит обеспечить стабильность свойств материалов и правильный контроль температурных режимов.



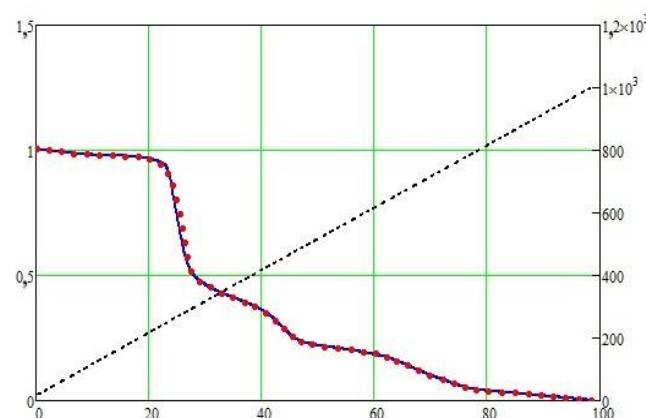
а)



б)



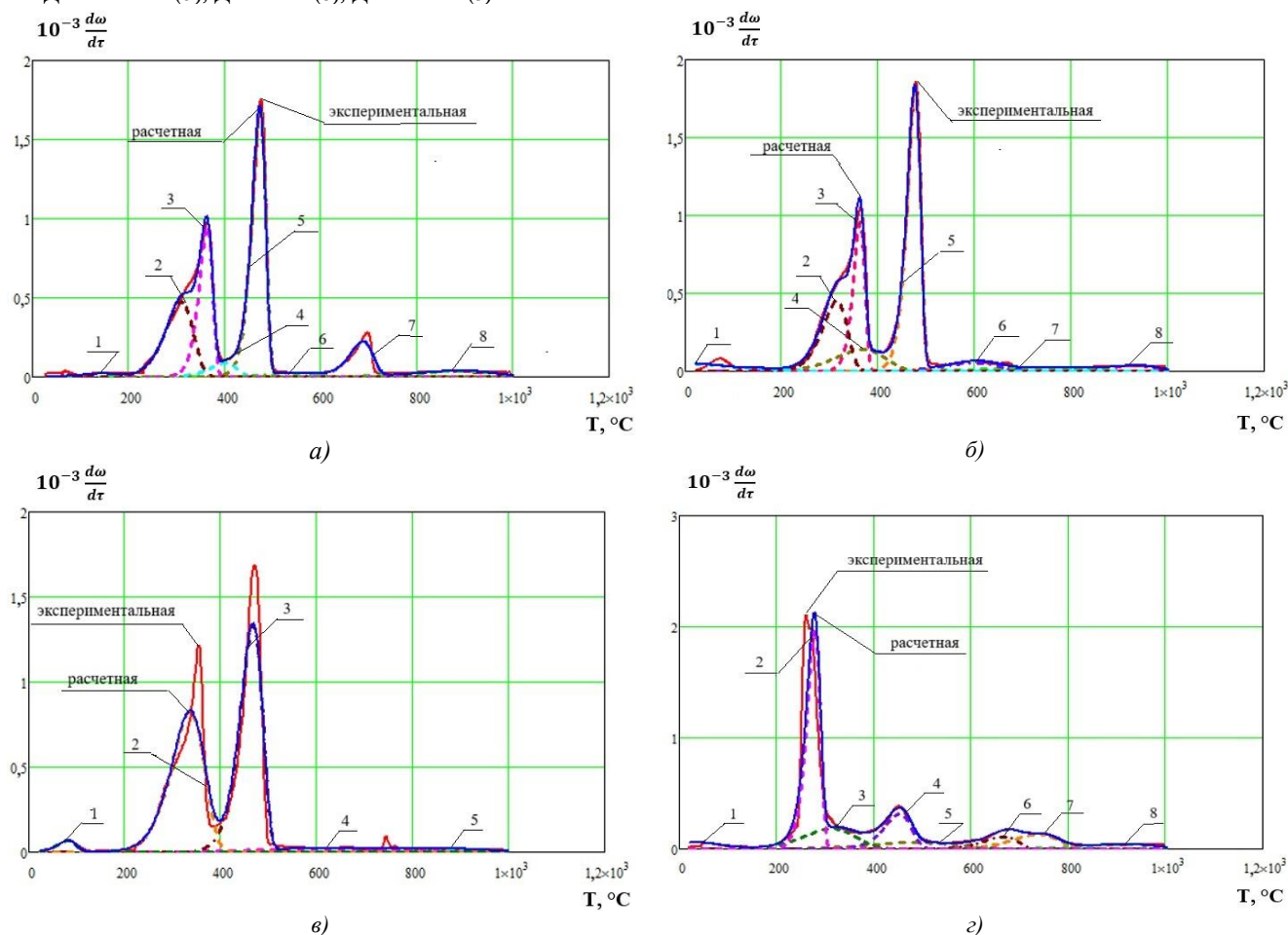
в)



г)

..... экспериментальные значения  
— расчетные значения

**Рис. 1.** Графики изменения относительной массы образца в зависимости от времени и темпа нагрева: ДПК\_ПЭНП (а); ДПК\_ПЭВП (б); ДПК\_ПП (в); ДПК\_ПВХ (г)



**Рис. 2.** Графики изменения скорости убыли относительной массы образца в зависимости от температуры нагрева: ДПК\_ПЭНП (а); ДПК\_ПЭВП (б); ДПК\_ПП (в); ДПК\_ПВХ (г). Стадии убыли массы: 1 – первая; 2 – вторая; 3 – третья; 4 – четвертая; 5 – пятая; 6 – шестая; 7 – седьмая; 8 – восьмая

Проведенный анализ полученных результатов подтверждает многостадийный характер кинетики термического разложения древесно-полимерных композитов. На основе данных по потере массы на первой стадии была определена равновесная влажность образцов: на основе полиэтилена низкой плотности с добавками карбоната кальция – 0,9 %, на основе полиэтилена высокой плотности – 2,2, на основе полипропилена – 1,77 и поливинилхлорида – 1,74 %.

Температура начала термодеструкции на второй стадии для всех композитов в среднем составляет 220 °C и сопровождается значительной потерей массы, причем образец с ПВХ на этой стадии показывает максимальную потерю массы. Для образцов на основе полиэтилена максимальная потеря массы происходит на пятой стадии при температуре начала термодеструкции 422 °C. Максимальная потеря массы для образца с содержанием ПП наступает при температуре начала стадии 387 °C, а значительная потеря массы наблюдается на второй стадии.

Композиты ДПК\_ПЭНП и ДПК\_ПЭВП отличаются высокими показателями частотного фактора на поздних стадиях, что указывает на наличие компонентов, требующих значительных энергетических затрат для начала разложения. Средние значения энергии активации характерны для большинства стадий разложения

ДПК\_ПП и ДПК\_ПВХ, что свидетельствует о более равномерном распределении энергии, необходимой для разложения компонентов.

Таким образом, корреляция между энергией активации, частотным фактором и температурой разложения подтверждает необходимость учета этих параметров при выборе оптимальных условий для температурного формования и эксплуатации древесно-полимерных композитов, обеспечивая точное управление кинетикой термического разложения.

**Выводы.** В ходе исследования выполнено экспериментальное исследование древесно-полимерных композитов методом термогравиметрического анализа. Проведена математическая обработка результатов ТГА, определены кинетические параметры процесса. Сравнительный анализ данных ТГА и расчетов показал удовлетворительное соответствие. Установлена равновесная влажность исследуемых образцов и температура начала деструкции. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения свойств материалов и оптимизации технологических процессов, что позволит оценить долговечность и стабильность композиционных материалов на основе полиолефинов и поливинилхлорида в эксплуатационных условиях, а также оптимизировать технологии их производства и переработки.

*Литература*

1. Вольфсон С.И. Физико-механические и реологические характеристики древесно-полимерных композитов на основе термически и механически модифицированного наполнителя // Пластические массы. 2015. №. 5-6. С. 39-43.
2. Ермоченков М.Г. Изменение прочностных свойств древесины при термическом модифицировании // Лесной вестник. 2018. Т. 22, № 1. С. 94-99.
3. Leu S.Y., Yang T.H., Lo S. F. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs) // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 29. P. 120-127.
4. Захаров В.П. Влияние влаги на физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе вторичного полипропилена // Пластические массы. 2018. № 5-6. С. 56-58.
5. Говядин И.К. 3D-печать древесно-полимерным композитом в автомобильной промышленности // Цифровые технологии в лесном секторе: мат-лы Всеросс. науч.-технич. конф., Санкт-Петербург, 26-27 марта 2020 г. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 35-38.
6. Говядин И.К. 3D-печать древесно-полимерным композитом с применением автоматически сменных сопел // Цифровые технологии в лесном секторе: мат-лы Всеросс. науч.-технич. конф., Санкт-Петербург, 26-27 марта 2020 г. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 38-41.
7. Говядин И.К. 3D-печать с использованием отходов деревообрабатывающей промышленности // Цифровые технологии в лесном секторе: материалы II Всеросс. науч.-технич. конф.-вебинара, Санкт-Петербург, 18-19 февраля 2021 г. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2021. С. 50-52.
8. Bhayana M. A review on optimized FDM 3D printed Wood/PLA bio composite material characteristics // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 29. P. 120-127.
9. Bhaskar K. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 5886-5891.
10. Cresnar K.P. Functionalised Fibres as a Coupling Reinforcement Agent in Recycled Polymer Composites // Materials. 2024. Vol. 17, № 11. P. 2739.
11. Sozen E. The effects of lignocellulosic fillers on mechanical, morphological and thermal properties of wood polymer composites // Drvna industrija. 2017. Vol. 68, № 3. P. 195-204.
12. Yadav J. Characterization of azadirachta indica natural cellulosic fiber and its polymer composites // Arabian Journ. for Science and Engineering. 2024. P. 1-13.
13. Djidjelli H. Effect of wood flour content on the thermal, mechanical and dielectric properties of poly (vinyl chloride) // Macromolecular Materials and Engineering. 2002. Vol. 287, № 9. P. 611-618.
14. Ермоченко М.Г. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины // Науч. тр. Мытищ. ф-ла Моск. гос. технич. ун-та. 2007. Вып. 335. С. 36-46.
15. Ершова О.В. Использование метода дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа для определения состава и температуры деструкции вторичных полимеров // Успехи современного естествознания. 2015. № 11 (1). С. 26-30.
16. Кладов М.Ю. Исследование кинетических параметров механодеструкции композиционных материалов // Науч. тр. Моск. гос. ун-та леса. 2005. № 331. С. 193.
17. Лопатников М.В. Снижение углеродной нагрузки на окружающую среду путем создания систем замкнутого цикла // Ежегодная национальная (с междунар. уч.) науч.-технич. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищ. ф-ла Моск. гос. технич. ун-та им. Н.Э. Баумана по итогам науч.-исслед. работ за 2023 г.: Мат-лы конф., Мытищи, 29–31 января 2024 г. Красноярск: ООО "Научно-инновационный центр", 2024. С. 71-73.
18. Abidnejad R. High-fiber content composites produced from mixed textile waste: Balancing cotton and polyester fibers for improved composite performance // International Journ. of Biological Macromolecules. 2025. Vol. 292. P. 139227.
19. Ayana K.D. Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization // Sustainable Materials and Technologies. 2024. Vol. 40. P.1-25.
20. Уэндландт У.У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
21. Ермоченков М.Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Лесотехнич. журнал. 2016. Т. 6, №. 4 (24). С. 168-173.
22. Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетнокосмических систем: дисс. ...докт. техн. Наук. М.: Изд-во Мытищ. ф-ла Моск. гос. технич. ун-та, 1990. 542 с.

*References*

1. Wolfson S.I. Physico-mechanical and rheological characteristics of wood-polymer composites based on thermally and mechanically modified filler. Plastmassy, 2015. № 5-6. P. 39-43.
2. Ermochenkova M.G., Evstigneev, A.G. Changes in the strength properties of wood during thermal modification. Forest bulletin. 2018. Vol. 22, № 1. P. 94-99.
3. Leu S.Y., Yang T.H., Lo S. F. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs) // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 29. P. 120-127.
4. Zakharov V.P. Influence of moisture on the physico-mechanical properties of wood-polymer composites based on recycled polypropylene // Plastics. 2018. № 5-6. P. 56-58.
5. Govyadin I.K. 3D printing with wood-polymer composite in automotive industry // Digital technologies in forestry sector: materials of All-Russian scientific and technical conf., St. Petersburg, March 26-27. St. Petersburg: Politekh-Press, 2020. P. 35-38.
6. Govyadin I.K. 3D printing with wood-polymer composite using automatically replaceable nozzles // Digital technologies in forestry sector: materials of All-Russian scientific and technical conf., St. Petersburg, March 26-27, 2020. St. Petersburg: Politekh-Press, 2020. P. 38-41.
7. Govyadin I.K. 3D printing using waste from woodworking industry // Digital technologies in forestry sector: proceedings of II All-Russian scientific and technical webinar-conf., St. Petersburg, February 18-19, 2021. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Forest Technical University, 2021. P. 50-52.
8. Bhayana M. A review on optimized FDM 3D printed Wood/PLA bio composite material characteristics // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 29. P. 120-127.
9. Bhaskar K. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 5886-5891.
10. Cresnar K.P. Functionalised Fibres as a Coupling Reinforcement Agent in Recycled Polymer Composites // Materials. 2024. Vol. 17, № 11. P. 2739.
11. Sozen E. The effects of lignocellulosic fillers on mechanical, morphological and thermal properties of wood polymer composites // Drvna industrija. 2017. Vol. 68, № 3. P. 195-204.
12. Yadav J. Characterization of azadirachta indica natural cellulosic fiber and its polymer composites // Arabian Journ. for Science and Engineering. 2024. P. 1-13.

13. Djidjelli H. Effect of wood flour content on the thermal, mechanical and dielectric properties of poly (vinyl chloride) // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2002. Vol. 287, № 9. P. 611-618.
14. Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G., Kuvek T.E. Thermogravimetric studies of the kinetics of thermal drying of wood // *Scientific works of Mytishchi branch of Moscow State Technical University*. 2007. Vol. 335. P.36-46.
15. Ershova O.V., Melnychenko, M.A., Trifonova K.V. Use of differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis methods to determine the composition and decomposition temperature of secondary polymers // *Advances in modern natural science*. 2015. № 11. P. 26-30.
16. Kladov M.Yu., Ermochenkova M.G. Study of kinetic parameters of mechanodestruction of composite materials // *Scientific works of the Moscow State University of Forestry*. 2005. № 331. P. 193.
17. Lopatnikov. M.V., Khromenko A.V. Reducing carbon load on the environment by creating closed-loop systems // *Annual national (with internat. participation) scientific and technical conf. of the faculty, postgraduates and students of the Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University on the results of research work for 2023: Conf. proceedings, Mytishchi, January 29-31, 2024*. Krasnoyarsk: Scientific Innovation Center LLC, 2024. P. 71-73.
18. Abidnejad R. High-fiber content composites produced from mixed textile waste: Balancing cotton and polyester fibers for improved composite performance // *Internat. Journ. of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 292. P. 139227.
19. Ayana K.D., Ha C.S., Ali A.Y. Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization // *Sustainable Materials and Technologies*. 2024. Vol. 40. P. 1-25.
20. Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. Moscow: Mir, 1978. 526 p.
21. Ermochenkova M.G. Kinetics of thermal destruction of wood in an inert gas environment // *Forestry journal*. 2016. Vol. 6, № 4 (24). P.168-173.
22. Shvedov B.A. Energy and mass transfer in heat protection materials of reusable rocket-space systems: diss. ... doctor of technical sciences. Moscow: Publishing house of Mytishchi branch of Moscow State Technical University, 1990. 542 p.