



Научно-практический журнал. Основан в 2005 году. Предыдущее название «Вестник ВИЭСХ».  
Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям: 2.4.5 / 4.3.1 / 4.3.2. Входит в базу данных AGRIS и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

## Редакционная коллегия:

**Д.А. Тихомиров**, д.т.н., профессор  
РАН, член-корр. РАН  
(главный редактор);  
**А.В. Виноградов**, д.т.н., профессор  
(заместитель главного редактора);  
**А.Ю. Измайлов**, д.т.н., профессор,  
академик РАН, член Президиума РАН;  
**Я.П. Лобачевский**, д.т.н., профессор,  
академик РАН;  
**А.С. Дорохов**, д.т.н., профессор,  
академик РАН;  
**А.Н. Васильев**, д.т.н., профессор;  
**Д.А. Будников**, д.т.н.;  
**М.М. Благовещенская**, д.т.н., проф.;  
**М.Г. Тягунов**, д.т.н., профессор;  
**В.И. Зацепина**, д.т.н., профессор.  
**Иностранцы члены редколлегии:**  
**И.И. Гируцкий**, д.т.н., профессор  
(Беларусь);  
**А.Б. Оспанов**, д.т.н., профессор,  
член-корр. НАН РК  
(Республика Казахстан);  
**П.А. Утениязов**, д.т.н., с.н.с.  
(Республика Узбекистан);  
**Пандиан Васант**, д-р философии  
(Малайзия);  
**В. Вивекананд**, д-р философии,  
доцент (Индия);  
**Салам Чафик-Тома**, профессор  
(Франция).

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-74528 от 14.12.2018 г.  
Адрес издателя, редакции и типографии:  
109428, Москва,  
1-й Институтский проезд, 5, стр. 1.  
Телефон: (499)174-88-11; (499)174-89-01  
E-mail: vestnikviesh@gmail.com  
Ответственный секретарь  
*Р.М. Нурбагандова*  
Редактор  
*Т.В. Бердникова*  
Компьютерный оригинал-макет  
*В.В. Бижаев*

**Выходит 4 раза в год (Свободная цена)**  
Дата выхода в свет 14.06.2024 г.  
Формат 60×84/8. Объем 15,75 печ. л.  
Тираж 100 экз. Печать цифровая.

Отпечатано в типографии  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ  
ISSN 2658-4859

## Содержание номера

### Электрофизические воздействия на материалы и среды

- Селемир В.Д., Яицкий А.В., Верхова А.Ф., Зуймач Е.А., Вилков Ю.В., Ивенин В.В., Ашаева О.В.*  
Влияние предпосевной обработки семян электрическим полем на урожайность льна-долгунца и яровой пшеницы ..... 3  
*Филатов Д.А., Олонин И.Ю.*  
Энергоэффективное освещение для выращивания микрозелени на вертикальных фермах ..... 14  
*Сафонов Д.И., Смирнов И.Г., Кутырёв А.И., Мирзаев М.А.*  
Анализ применения лазерного излучения для контроля сорной растительности ..... 20

### Электроснабжение и электрооборудование

- Виноградов А.В., Панфилов А.А.*  
Оценка вероятности несанкционированной подачи напряжения в сельских электрических сетях 0,4-10 кВ ..... 29  
*Артемьев В.С., Мокрова Н.В.*  
Интеграция метода функций Ляпунова для анализа устойчивости электрооборудования АПК ..... 37

### Тепло-энергообеспечение и энергосбережение

- Узаков Г.Н., Маматкулова С.Г., Сафарова С.У.*  
Моделирование кинетики процесса пиролиза биомассы с учетом влияния состава сырья в трубчатых реакторах ..... 45

### Технологии и средства механизации и роботизации

- Гаджиев П.И., Махмутов М.М., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П.*  
Повышение эффективности использования картофелекопателя с автоматической системой в переменных условиях почвы ..... 51  
*Черных А.Г.*  
Определение скорости и производительности аэрозольной струи дождевателей в круговых самоходных дождевательных установках ..... 59  
*Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Юрочка С.С., Хакимов А.Р.*  
Технико-технологическая оценка доильных роботов различных производителей ..... 70  
*Хакимов А.Р.*  
Анализ направлений модернизации поточного устройства анализа параметров качества молока ..... 77

### Автоматизация и управление технологическими процессами

- Рылов С.А.*  
IIoT передача данных с БПЛА в промышленную среду агрокомплексов в режиме реального времени ..... 83  
*Юферев Л.Ю., Масчев О.В.*  
Актуальность проведения мониторинга сельскохозяйственных культур и хвойного подростка в вегетативный период ..... 93  
*Каргин В.А., Сохинов Д.Ю., Усанов К.М., Мокрушин С.А., Кротов И.В.*  
Интеллектуальная автоматизированная система управления сортировкой фруктов ..... 100  
*Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Юрочка С.С., Хакимов А.Р.*  
Выявление подострого ацидоза и клинического мастита у дойных коров с помощью цифровой системы внутреннего мониторинга ..... 107

### Возобновляемая и нетрадиционная энергетика

- Бекиров О.С., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н.*  
Методы математического моделирования характеристики мощности ветроэнергетической установки ..... 113

### Мобильные энергетические средства

- Гданский Н.И., Каргин В.А., Карпов А.В.*  
Моделирование сглаживающих траекторий перемещения автономных электрифицированных платформ ..... 121



## Моделирование кинетики процесса пиролиза биомассы с учетом влияния состава сырья в трубчатых реакторах

Гулом Норбоевич Узаков,  
профессор, e-mail: uzoqov66@mail.ru;  
Сайёра Гулямовна Маматкулова,  
докторант;  
Ситора Улугбек кизи Сафарова,  
магистрант

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан

**Реферат.** Процесс пиролиза растительной биомассы можно лучше понять, исследуя кинетический механизм разложения различных компонентов. Биомассы могут обладать разной структурой, теплофизическим свойством и химическим составом, что влияет на кинетику процесса пиролиза. (Цель исследования) Смоделировать и изучить кинетику процесса пиролиза частицы кукурузных початков, которая позволяет определить скорость химических реакций, происходящих в ходе разложения материала, и выявить основные факторы, влияющие на скорость и эффективность пиролиза. (Материалы и методы) Использовали для анализа с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics биомассу кукурузных початков, которая имеет размер частиц 0,02 квадратных метра и имеет теплофизические свойства. (Результаты и обсуждение) Получили модели, которые хорошо описывают тенденции изменения температур, особенно температуры в центре биомассы. Показали, что температура на поверхности биомассы доходит до пика 727 Кельвин через 460 секунд, температура в центре биомассы доходит до 794 Кельвин через 433 секунды. Установили, что энергия активации и частотный коэффициент получены из наклона линии линейной регрессии и пересечения. (Выводы) Выявили, что процесс пиролиза биомассы частицы кукурузного початка происходил в диапазоне температур 190-432 градуса Цельсия; при температуре 190 градусов Цельсия биомасса начала терять массу, а потеря массы остановилась при температуре 432 градуса Цельсия. Рассчитали кинетические параметры методом Киссинджера. Использовали для вычислений кинетически постоянных параметров метод наименьших квадратов и корреляционный анализ. Констатировали, что результаты будут полезны в будущем для оптимизации процесса пиролиза биомассы. Определили, что в методе Киссинджера кинетические параметры были одинаковыми для всего процесса пиролиза; коэффициент корреляции между температурой и скоростью нагрева в модели равен 0,79.

**Ключевые слова:** кинетика пиролиза, пиролиз биомассы, кукурузный початок, Comsol Multiphysics, потеря массы, метод Киссинджера.

**Для цитирования:** Узаков Г.Н., Маматкулова С.Г., Сафарова С.У. Моделирование кинетики процесса пиролиза биомассы с учетом влияния состава сырья в трубчатых реакторах // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. №2. С. 45-50. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-45-50. EDN: WIKTUS.

Scientific article

## Biomass Pyrolysis Kinetics Modelling with Influence of Raw Material Composition in Tubular Reactors

Gulom N. Uzakov,  
professor, e-mail: uzoqov66@mail.ru;  
Sayyora G. Mamatkulova,  
postgraduate;  
Sitara Ulugbek kizi Safarova,  
master student

Karshi engineering and economic Institute, Karshi, Republic Uzbekistan

**Abstract.** *The pyrolysis process of plant biomass can be better understood by investigating the kinetic mechanism of the decomposition process of various components. Biomass can have different structures, thermophysical properties and chemical composition, which affects the kinetics of the pyrolysis process. (Research purpose) The research purpose is simulating and studying the kinetics of the pyrolysis process of corn cob particles, which allows to determine the rate of chemical reactions occurring during the decomposition of the material, and identifying the main factors affecting the rate and efficiency of pyrolysis. (Materials and methods) The biomass of corn cobs, which has a particle size of 0.02 square meters and has thermophysical properties, was used for analysis using Comsol multiphysics software. (Results and discussion) We have obtained models that describe temperature trends, especially the temperature in the center of biomass. It was shown that the temperature on the surface of the biomass reaches a peak of 727 Kelvin after 460 seconds; the temperature in the center of the biomass reaches 794 Kelvin after 433 seconds. It was shown that the activation energy and frequency coefficient are derived from the slope of the linear regression line and the intersection. (Conclusions) It was found that the process of pyrolysis of biomass of a corn cob particle occurred in the temperature range of 190-432 degrees Celsius; at a temperature of 190 degrees Celsius, the biomass began to lose mass, and the mass loss stopped at a temperature of 432 degrees Celsius. The kinetic parameters were calculated by the Kissinger method. The least squares method and correlation analysis were used to calculate kinetically constant parameters. It was stated that the results will be useful to optimize the process of pyrolysis of biomass. It was determined that in the Kissinger method the kinetic parameters were the same for the entire pyrolysis process; the correlation coefficient between temperature and heating rate in the model is 0.79.*

**Keywords:** *kinetics of pyrolysis, pyrolysis of biomass, corn cob, Comsol Multiphysics, mass loss, Kissinger method.*

**For citation:** Uzakov G.N., Mamatkulova S.G., Safarova S.U. Biomass pyrolysis kinetics modelling with influence raw material composition in tubular reactors. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2024. Vol. 71. N2. 45-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-45-50. EDN: WIKTUS.

**П**иролиз – один из основных процессов термохимической переработки биомассы. Успешная реализация промышленной установки пиролиза биомассы еще больше повысит осуществимость энергетического проекта по сокращению выбросов углерода [1, 2].

Чтобы предсказать, как материал будет вести себя во время пиролиза, важно понимать его кинетику. Это также помогает в создании соответствующего реактора и математического моделирования реактора для оптимизации процесса. Актуальны исследования кинетики пиролиза и влияния состава сырья в области термической переработки углеродородных отходов и биомассы.

Для анализа кинетических данных биомассы доступны различные методы, которые подразделяются на два типа: методы, не основанные на моделях, и методы, соответствующие модели. В безмодельном методе или методе изоконверсии расчет выполняется на основе кинетических кривых при различных скоростях нагрева для одного и того же значения конверсии, из которого вычисляется энергия ак-

тивации для установленной точки конверсии, тогда как кинетические параметры вычисляются с использованием функции в наборе параметров при подгонке модели и возвращаемого прогнозируемого набора данных. Ошибка – это наблюдаемая разница между полученными данными и данными прогнозирования модели для любого заданного набора параметров модели. Для кинетического анализа выбираются наилучшие параметры, которые минимизируют эту разницу [3-5]. Метод обладает рядом недостатков, в частности невозможностью определить подходящую модель реакции для неизотермических условий. Метод дает более высокие значения кинетической постоянной, следовательно, от этого метода отказались и вместо него применяют методы изоконверсии.

Преимущество безмодельного метода – его простота и возможность избежать ошибок, связанных с выбором кинетической модели. Эти модели оценивают энергию активации  $E$  для конкретного преобразования. Недостаток метода – необходимость проведения серии измерений для одной и той же массы

Теплофизические свойства отходов кукурузных початков [9, 10] Thermophysical properties of corn cob waste [9, 10]	
Показатели	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	282,38
Влажность, %	5-6,5
Размеры, мм	10 × 20
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,096
Пористость	0,4
Размер пор	5E-5m
Излучательная способность	0,95
Эффективная теплопроводность в поперечном направлении волокон, Вт/(м·К)	1,32
Эффективная теплопроводность по направлению волокон, Вт/(м·К)	3,7

Экспериментальные условия для проведения анализа Experimental conditions for the analysis	
Показатели	Значения
Начальная температура биомассы, К	293
Температура печи, К	820
Температура газа в реакторе, К	773

образца при различных скоростях нагрева и расходе инертного газа, различия в которых могут привести к ошибкам [6, 7].

**Цель исследования** – смоделировать и изучить кинетику процесса пиролиза частицы кукурузных початков, которая позволяет определить скорость химических реакций, происходящих в процессе разложения материала, и выявить основные факторы, влияющие на скорость и эффективность пиролиза.

**Материалы и методы.** Так как початки кукурузы имеют преимущество высокой теплотворной способности и выхода бионефти, в настоящей исследовательской работе для анализа с помощью программного обеспечения (ПО) *Comsol Multiphysics* использовали биомассу кукурузных початков, которая имеет размер частиц 0,02 м<sup>2</sup> и имеет теплофизические свойства, представленные в таблице 1 [8].

Для проведения эксперимента настроили в ПО *Comsol Multiphysics* экспериментальные условия, которые приведены в таблице 2.

С целью выполнения эксперимента создали экспериментальную систему, состоящую из изотермической печи с инертной атмосферой на основе трубчатого реактора. Температура печи, измеряемая термомпарами (ТП), поддерживается постоянной, инертная атмосфера достигается за счет азота, проходящего через камеру печи. Для каждого эксперимента биомасса в объеме 1 кг помещается в изотермическую печь, температура образца и масса образца регистрируются в процессе пиролиза.

Для изучения кинетики процесса пиролиза биомассы кукурузных початков измерили скорость пиролиза в трубчатом реакторе. Эксперименты в этом типе реактора позволяют получить данные о скоро-

сти пиролиза при различных условиях (температуре, давлении, скорости нагрева и других).

Измерение скорости пиролиза в трубчатом реакторе осуществили весовым методом с помощью датчиков температуры в ПО *Comsol Multiphysics*. Весовой метод основан на измерении изменения массы образца биомассы в реакторе с течением времени. После проведения пиролиза можно анализировать изменения в массе образца, что позволяет определить скорость пиролиза. Так как пиролиз обычно сопровождается выделением тепла, использование датчиков температуры дает возможность измерить изменения температуры в реакторе с течением времени, которое также позволяет оценить скорость процесса.

С целью исследования кинетики пиролиза биомассы ввели теплофизические свойства кукурузного початка в ПО *Comsol Multiphysics*. Вес исходного образца биомассы устанавливается с высокой точностью 1 кг перед началом эксперимента. Это начальное значение массы использовали для определения изменения массы образца в процессе пиролиза.

В ходе пиролиза с помощью ПО *Comsol Multiphysics* поддерживались необходимые экспериментальные условия (температура, давление и так далее) для пиролиза. Во время эксперимента вес образца регулярно отслеживался с использованием функций ПО.

Со временем вес образца изменялся в результате убывания массы в процессе пиролиза. Это изменение массы регистрировали в течение эксперимента.

После завершения эксперимента данные об изменении массы образца проанализировали. Использовали эти сведения для определения скорости нагрева в зависимости от времени и температуры.

С целью анализа энергии активации в точках преобразования для изотермических или неизотермических экспериментов подход без использования моделей обозначается методом изоконверсии. Применение безмодельного метода является последовательным, и стандартные кинетические данные могут быть получены из неизотермических. Безмодельное уравнение для трех различных методов приведено ниже [11].

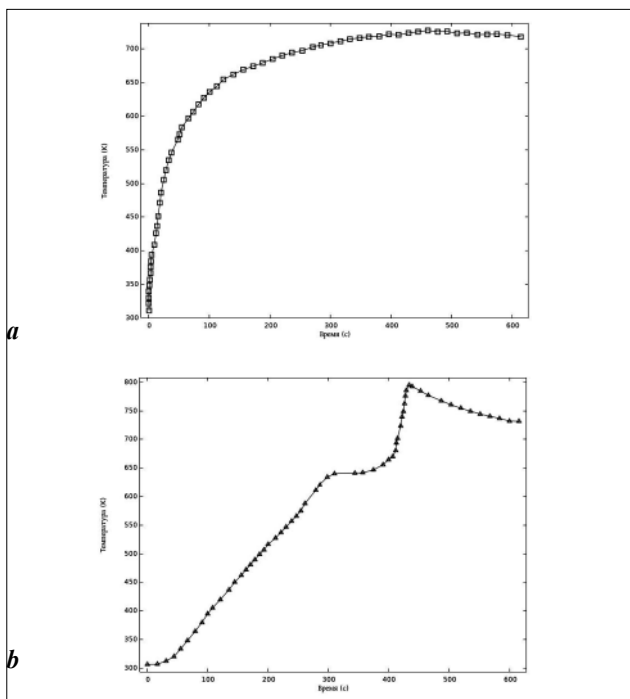
Для исследования кинетики пиролиза биомассы частицы кукурузного початка использовали метод Киссинджера:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \frac{E}{RT_m},$$

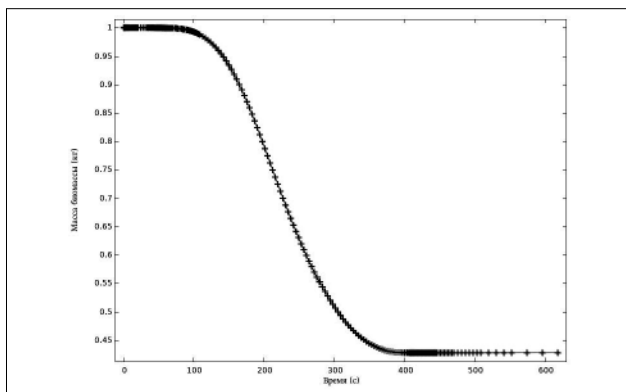
где  $\beta$  – скорость нагрева, °С/мин;  $T$  – абсолютная температура, К;  $T_m$  – пиковая температура, К;  $A$  – частотный коэффициент, мин<sup>-1</sup>;  $R$  – газовая постоянная, кДж/моль·К;  $E$  – энергия активации, кДж/моль.

**Результаты и обсуждение.** При моделировании процесса пиролиза биомасс, таких как кукурузные початки, на основе ПО *Comsol Multiphysics* во временном диапазоне 0-10 мин с температурой нагревания 500°С получили следующие результаты (рис. 1-3).

При моделировании процесса пиролиза биомассы кукурузных початков на основе ПО *Comsol Multiphysics* для измерения изменения температур установили температурные датчики на поверхности биомассы и в центре биомассы. Изменения температуры в зависимости от времени приведены на рис. 1. Полученные модели хорошо описывают тенденции изменения температур, особенно температуры в центре биомассы (рис. 1б). Как временные, так и абсолютные значения пиковых температур для каждого положения ниже, чем в экспериментах. На рис. 1а видно, что температура на поверхности биомассы доходит до пика 727 К через 460 с, а температура в центре биомассы доходит до 794 К через 433 с.



**Рис. 1. Изменение температуры в процессе пиролиза: а – на поверхности биомассы; б – в центре биомассы**  
**Fig. 1. Temperature change during pyrolysis: a – on the surface of biomass; b – in the center of biomass**



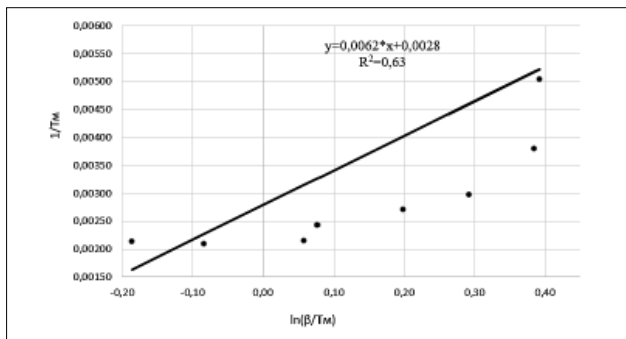
**Рис. 2. Изменение массы биомассы в зависимости от температуры**

**Fig. 2. Biomass mass on temperature**

Изменение массы биомассы в зависимости от времени можно увидеть на рисунке 2. Частица кукурузного початка, проходя 112 с, резко начинает терять массу. Примерно за 292 с частица биомассы теряет 58% собственной массы. В конце процесса биомасса кукурузного початка полностью преобразуется и большая часть частиц будет состоять из обуглившегося материала.

Исходя из полученных измеренных данных температуры датчиками, нашли скорость нагрева (рис. 3). Для этого использовали среднее арифметическое значение температуры на поверхности биомассы и температуры в центре биомассы.

Для использования в методе Киссинджера пиковой температуры выбрали максимальную температуру из вычислений среднеарифметических значений температур исходя из температур на поверхности и в центре частицы биомассы, это значение будет постоянным при различных скоростях нагрева. Линейная линия получается с помощью метода Киссинджера, как показано на рисунке 3, из которого вычисляются кинетические константы. Кинетические константы вычислили на основе метода наименьших квадратов.



**Рис. 3. График Киссинджера для частицы кукурузного початка**

**Fig. 3. Kissinger graph for a corncob particle**

Биомасса		Скорость нагрева, °C/с	$T_{\text{макс}}$ , °C	$E$ , кДж/моль	$A$ , с <sup>-1</sup>	$R^2$
Частица кукурузного початка		1,30	95,38	51,53	$6,2 \cdot 10^3$	0,63
		1,48	198,54			
		1,47	263,54			
		1,34	336,38			
		1,22	368,38			
		1,08	411,86			
		1,06	464,59			
		0,92	478,49			
		0,83	467,37			

Энергию активации и частотный коэффициент получили из наклона линии линейной регрессии и пересечения, как показано в таблице 3. Энергия активации и частотный коэффициент составляют 51,53 Кдж/моль и  $6,2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  соответственно для частицы кукурузного початка.

**Выводы.** Кинетический анализ пиролиза биомассы частицы в размере 0,02 м<sup>2</sup> кукурузного початка провели с помощью ПО *Comsol Multiphysics* в диапазоне температур 20-500°C при диапазоне времени 10 мин. ПО *Comsol Multiphysics* дало возможность измерить изменения температур на поверхности и в центре биомассы, а также изменение массы биомассы в течение времени. Из полученных данных с помощью математических вычислений, весового метода, метода наименьших квадратов получили значения, использованные для создания графика Киссинджера, который дает возможность получить кинетические константы для изучения процесса пиролиза биомассы частиц кукурузного початка.

При полученных данных можно сделать следующие выводы:

- температура на поверхности частицы биомассы резко поднимается примерно за 200 с до 684 К, а дальше в течение 400 с поднимается лишь до 717 К, и сохраняет стабильность при температуре 773 К в реакторе;

- температура в центре частицы биомассы достигает температуры 684 К за 374 с, пик температуры достигает до 794 К в течение 433 с, после того медленно снижается до 615 К;

- деградация частицы биомассы происходит, начиная через 108 с. Деградация заканчивается на 483 с, когда масса теряет 79% от общей массы. Из этого можно сделать вывод, что обуглившаяся масса состоит из 21% или 210 г;

- в ходе исследования установили, что макси-

мальная потеря массы кукурузного початка составляет 58% и наблюдается в диапазоне температур от 180 до 360°C.

Определили, что процесс пиролиза биомассы частицы кукурузного початка происходил в диапазоне температур 190-432°C. При температуре 190°C биомасса начала терять массу, потеря массы остановилась при температуре 432°C. Кинетические параметры рассчитали методом Киссинджера. Для вычислений кинетически постоянных параметров использовали метод наименьших квадратов и корреляционный анализ. Результаты будут полезны в будущем для оптимизации процесса пиролиза биомассы. В методе Киссинджера кинетические параметры были одинаковыми для всего процесса пиролиза. Коэффициент корреляции между температурой и скоростью нагрева в модели равен 0,79.

#### Библиографический список / References

1. Jaroenkhasemmesuk C., Tippayawong N. Thermal degradation kinetics of sawdust under intermediate heating rates. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 103. 170-176. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.114.
2. Uzakov G., Mamatkulova S., Ergashev S. Thermal mode of the condenser of a pyrolysis bioenergy plant with recuperation of secondary thermal energy. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 411. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341101021.
3. Haykiri-Acma H., Yaman S., Kucukbayrak S. Effect of heating rate on the pyrolysis yields of rapeseed. *Renewable Energy*. 2006. Vol. 31. 803-810. DOI: 10.1016/J.RENENE.2005.03.013.
4. Islam M.A., Auta M., Kabir G., et al. A thermogravimetric analysis of the combustion kinetics of karanja (*Pongamia pinnata*) fruit hulls char. *Bioresource Tech-*

- nology. 2015. Vol. 200. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.09.057.
5. Uzakov G.N., Mamatkulova S., Ergashev Sh., et al. Modeling of heat exchange processes in a condenser of a pyrolysis bioenergy plant. *BIO Web of Conferences*. 2023. Vol. 71. Iss. 1. DOI: 10.1051/bio-conf/20237102021.
  6. Mishra G., Kumar J., Bhaskar T. Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 182C. 282-288. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.087
  7. Mamatkulova S.G., Uzakov G.N. Modeling and calculation of the thermal balance of a pyrolysis plant for the production of alternative fuels from biomass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1070. Iss. 1. 012040.
  8. Damartzis Th., Vamvuka D., Sfakiotakis S., et al. Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*). Pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. Iss. 10. 6230-6238. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.02.060.
  9. Onsree T., Sittisun P., Sasaki R. Pyrolysis of Corn Residues: Kinetic Analysis using Discrete Distributed Activation Energy Model. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 159. Iss. 1. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/159/1/012036.
  10. Kaczor Z., Buliński Z., Werle S. Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 159. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.110.
  11. Heydari M., Rahman M., Gupta R. Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal. *International Journal of Chemical Engineering*. 2015. DOI: 10.1155/2015/481739.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Узаков Г.Н. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, установка экспериментальных условий, доработка текста, формулирование общих выводов и литературный анализ;

Маматкулова С.Г. – подготовка начального варианта статьи, проведение мониторинга моделей и методов изучения кинетики пиролиза биомассы, моделирование процесса пиролиза на Comsol Multiphysics, обработка результатов исследований, визуализация;

Сафарова С.У. – уточнение теплофизических свойств биомассы, литературный анализ.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Coauthors' contribution:

Uzakov G.N. – scientific guidance, formulating the main directions of the study, developing the theoretical background, setting experimental conditions, finalizing the text, drawing general conclusions and literary analysis;

Mamatkulova S.G. – preparing the initial version of the article, monitoring models and methods for studying the kinetics of pyrolysis of biomass, modeling of the pyrolysis process on Comsol Multiphysics, processing the study results, visualization;

Safarova S.U. – clarification of thermophysical properties of biomass, assistance in the formation of literary analysis.

*The authors read and approved the final manuscript.*

**Статья поступила в редакцию 01.03.2024**

**Статья принята к публикации 10.04.2024**