

**BIOENERGETIKA.BIOMASSA ENERGIYASI//БИОЭНЕРГЕТИКА.
ЭНЕРГИЯ БИОМАССЫ//BIOENERGY. BIOMASS ENERGY.**

УДК 662.997.715.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ
(ОТХОДЫ ПОДСОЛНЕЧНИКА)**

Маматкулова Сайёра Гулямовна - докторант (PhD)
ORCID: 0000-0002-0987-5298 E-mail: urisheva80@mail.ru

Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан, 180100, г. Карши,
пр-т. Мустакиллик, 225

Для контактов: Маматкулова Сайёра Гулямовна-докторант (PhD),
E-mail: urisheva80@mail.ru

Аннотация. Введение. В данной статье изучена кинетика процесса пиролиза биомассы частиц отходов подсолнечника на основе программного обеспечения (ПО) Comsol multiphysics, которая позволяет определить скорость химических реакций, происходящих в процессе разложения материала, и выявить основные факторы, влияющие на скорость и эффективность пиролиза. Полученные модели довольно хорошо описывают тенденции изменения температур. Был сделан вывод, что процесс пиролиза биомассы частицы отходов подсолнечника происходил в диапазоне температур 440-717 К. При температуре 440 К биомасса начала терять массу, а потеря массы остановилась при температуре 717 К. Кинетические параметры были рассчитаны методом Киссенжера. Для вычислений кинетических и постоянных параметров использовался метод наименьших квадратов и корреляционный анализ. Результаты будут полезны в будущем для оптимизации процесса и условий процесса пиролиза биомассы.

Методы и материалы. Для проведения анализа в данном исследовании использовалась биомасса отходов подсолнечника, так как данная биомасса имеет высокие тепловые способности и высоким выходом бионефти. Размер частиц составлял 0,02 м², использованы теплофизические свойства подсолнечника. Анализ проводился с применением программного обеспечения Comsol Multiphysics.

Результаты. При моделировании процесса пиролиза биомассы отходов подсолнечника на основе ПО Comsol Multiphysics, для измерения изменения температур были установлены температурные датчики на поверхности биомассы и в центре биомассы. Получены данные изменения температуры в зависимости от времени. Полученные модели довольно хорошо описывают тенденции изменения температур, особенно температуры в центре биомассы.

Заключение. Кинетические параметры были рассчитаны методом Киссенжера. Для вычислений кинетических и постоянных параметров использовался метод наименьших квадратов и корреляционный анализ. Результаты будут полезны в будущем для оптимизации процесса условий процесса пиролиза биомассы. В методе Киссинджера кинетические параметры были одинаковыми для всего процесса пиролиза. Коэффициент корреляции между температурой и скоростью нагрева в модели равен 0,86.

Ключевые слова: кинетика пиролиза, пиролиз биомассы, отходы подсолнечника, Comsol multiphysics, деградация, метод Киссинджера.

Дата поступления: 17.02.2024. После обработки: 12.03.2024. Принято печать: 14.03.2024

UDC 662.997.715.1





RESEARCH OF THE KINETICS OF THE PYROLYSIS PROCESS OF BIOMASS (SUNFLOWER WASTE)

Mamatkulova Sayyora Gulyamovna – PhD student
ORCID: [0000-0002-0987-5298](https://orcid.org/0000-0002-0987-5298) E-mail: urisheva80@mail.ru

Karshi Engineering-Economics Institute, house 225, Mustakillik str., 180100, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. This article studies the kinetics of the pyrolysis process of biomass of sunflower waste particles based on Comsol multiphysics software, which allows us to determine the rate of chemical reactions occurring during the decomposition of the material and identify the main factors affecting the speed and efficiency of pyrolysis. The resulting models describe temperature trends quite well. It was concluded that the pyrolysis process of biomass of sunflower waste particles occurred in the temperature range of 440-717 K. At a temperature of 440 K, the biomass began to lose mass, and the mass loss stopped at a temperature of 717 K. The kinetic parameters were calculated using the Kissinger method. The least squares method and correlation analysis were used to calculate kinetic and constant parameters. The results will be useful in the future to optimize the process and conditions of the biomass pyrolysis process.

Methods and materials. For the analysis in this study, the biomass of sunflower waste was used, since this biomass has high thermal abilities and a high yield of bio-oil. The particle size was 0.02 m², and the thermophysical properties of sunflower were used. The analysis was performed using Comsol Multiphysics software.

Results. When modeling the pyrolysis process of sunflower waste biomass based on Comsol Multiphysics software, temperature sensors were installed on the surface of the biomass and in the center of the biomass to measure temperature changes. Data on temperature changes depending on time are obtained. The models obtained describe temperature trends quite well, especially the temperature in the center of the biomass.

Conclusion. The kinetic parameters were calculated using the Kissinger method. The least squares method and correlation analysis were used to calculate kinetic and constant parameters. The results will be useful in the future to optimize the process conditions of the biomass pyrolysis process. 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 0.86.

Key words: kinetics of pyrolysis, pyrolysis of biomass, sunflower waste, Comsol multiphysics, degradation, Kissinger method.

UO‘K 662.997.715.1

BIOMASSA PIROLIZ JARAYONINING KINETIKASINI TADQIQ QILISH (KUNGABOQAR CHIQUINDILARI MISOLIDA)

Mamatkulova Sayyora Gulyamovna – tayanch doktorant
ORCID: [0000-0002-0987-5298](https://orcid.org/0000-0002-0987-5298) E-mail: urisheva80@mail.ru

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, 180100, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Ushbu maqola Comsol multiphysics dasturiy ta‘minotiga asoslangan kungaboqar chiqindilari bo‘laklari biomassasining piroliz jarayonining kinetikasini o‘rganib chiqildi, bu biomassani parchalanishi jarayonida sodir bo‘ladigan kimyoviy reaksiyalar tezligini aniqlash va piroliz tezligi va samaradorligiga ta‘sir qiluvchi asosiy omillarni aniqlash imkonini beradi. Olingan modellar harorat o‘zgarishi tendentsiyalarini juda yaxshi tavsiflaydi. Kungaboqar chiqindi bo‘laklari biomassasining piroliz jarayoni 440-717 K harorat oralig‘ida sodir bo‘lgan.





440 K haroratda biomassa massasini yo'qotishni boshladi, massa yo'qolishi esa 717 K haroratda to'xtadi. Kinetik parametrlar Kissenjer usuli bilan hisoblab chiqilgan. Kinetik va doimiy parametrlarni hisoblash uchun eng kichik kvadratlar usuli va korrelyatsion tahlil ishlatilgan. Natijalar kelajakda biomassa piroliz jarayonining jarayoni va sharoitlarini optimallashtirish uchun foydali bo'ladi.

Usullar va materiallar. Tahlil qilish uchun ushbu tadqiqotda kungaboqar chiqindilarining biomassasi ishlatilgan, chunki bu biomassa yuqori issiqlik qobiliyatiga va yuqori bioneft rentabelligiga ega. Bo'laklar hajmi $0,02 \text{ m}^2$ ni tashkil etdi, kungaboqarning termofizik xususiyatlari ishlatildi. Tahlil Comsol Multiphysics dasturi yordamida amalga oshirildi.

Natijalar. Comsol Multiphysics asosida kungaboqar chiqindilari biomassasining piroliz jarayonini modellashtirishda harorat o'zgarishini o'lchash uchun biomassa yuzasida va biomassa markazida harorat datchiklari o'rnatildi. Vaqtga qarab harorat o'zgarishi ma'lumotlari olindi. Olingan modellar harorat tendentsiyalarini, ayniqsa biomassa markazidagi haroratni juda yaxshi tavsiflaydi.

Xulosa. Kinetik parametrlar Kissinger usuli bilan hisoblab chiqilgan. Kinetik va doimiy parametrlarni hisoblash uchun eng kichik kvadratlar usuli va korrelyatsion tahlil ishlatilgan. Natijalar kelajakda biomassa piroliz jarayoni sharoitlarini optimallashtirish uchun foydali bo'ladi. Kissinger usulida kinetik parametrlar butun piroliz jarayoni uchun bir xil edi. Modeldagi harorat va isitish tezligi o'rtasidagi korrelyatsiya koeffitsiyenti 0,86 ga teng.

Kalit so'zlar: piroliz kinetikasi, biomassa pirolizi, kungaboqar chiqindilari, Comsol multiphysics, degradatsiya, Kissinger usuli.

Для цитирования: Узаков Г.Н., Маматкулова С.Г. Исследование кинетики процесса пиролиза биомассы (отходы подсолнечника). Альтернативная энергетика. 2024. №1 (12). С.43-51.

Введение

Традиционный способ получения энергии, основанный на сжигании природных органических топлив (уголь, газ и нефтяные продукты), является одним из основных источников загрязнения окружающей среды и изменения климата в мире [1, 2].

Важно отметить, что в большинстве стран мира особое внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3–7]. На сегодняшний день, одним из наиболее перспективных направлений является пиrolиз. Он позволяет перерабатывать биомассу в различные химические и энергетически ценные продукты. При пиrolизе в результате процесса образуются твердый углеродный остаток, жидкие продукты и горючий газ. Состав и характеристики этих продуктов зависят от многих факторов: природы сырья, температуры, давления, скорости нагрева и продолжительности процесса обработки. При столь сложном механизме зависимости, которая учитывает множество параметров и многообразие химических реакций, которые могут протекать в пиrolизе, все еще остаются актуальными физическими экспериментами [8–12].

Идут исследования, направленные на разработку численных алгоритмов для изучения и моделирования процессов термического разложения биомассы. Цель - уменьшить временные и трудовые затраты при разработке, наладке и внедрении оборудования в технологический процесс. Для достижения этой цели необходимо детально изучить кинетику пиrolиза.

В рамках данного исследования, рассмотрены частицы отходов подсолнечника, выращиваемых в республике Узбекистан. Главная цель работы заключается в анализе кинетических параметров пиrolиза биомассы отходов подсолнечника с применением метода Киссенжера на основе данных, полученных при дифференциальном термическом анализе с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics.

Методы и материалы

Для проведения анализа в данном исследовании использовалась биомасса отходов подсолнечника, так как данная биомасса имеет высокие тепловые способности и высоким

выходом бионефти. Размер частиц составлял $0,02 \text{ м}^2$, использованные теплофизические свойства приведены в таблице 1. Анализ проводился с применением программного обеспечения Comsol Multiphysics.

Таблица № 1.

Теплофизические свойства отходов подсолнечника [13]

Table 1.

Thermophysical properties of sunflower waste [13]

Показатели	Значения
Плотность, кг/м^3	130–140
Влажность, %	20-25
Размеры, mm	10x20
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м}\cdot\text{°C}$	0,046 - 0,093
Пористость	0,95
Размер пор	$2\text{e-}4$
Излучательная способность	0,95
Эффективная теплопроводность в поперечном направлении волокон, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$27\cdot 10^{-3}$
Эффективная теплопроводность по направлению волокон, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$77\cdot 10^{-3}$

Для проведения эксперимента были настроены в ПО Comsol Multiphysics экспериментальные условия которые приведены в таблице 2.

Таблица № 2.

Экспериментальные условия для проведения анализа

Table 2.

Experimental conditions for the analysis

Показатели	Значения
Начальная температура биомассы, K	298
Температура печи, K	793
Температура газа в реакторе, K	720

Для проведения эксперимента была создана экспериментальная система, которая состоит из изотермической печи с инертной атмосферой на основе трубчатого реактора. Температура печи, измеряемая термопарами (ТП), поддерживается постоянной, а инертная атмосфера достигается за счет азота, проходящего через камеру печи. Для каждого эксперимента биомасса в объёме 1 кг помещается в изотермическую печь, и температура образца и масса образца регистрируются в процессе пиролиза.

Для изучения кинетики процесса пиролиза биомассы отходов подсолнечника, в данном исследовании мы измерили температуры на поверхности и в центре биомассы частицы отхода подсолнечника. Эксперименты в данном типе реактора позволяют получить данные о температуре пиролиза при различных условиях.

Скорость пиролиза в системе осуществился с помощью весовым методом и использованием 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 дают возможность измерить изменения температуры в реакторе с течением времени которое также позволяет оценить скорость процесса.

Для изучения кинетики пиролиза биомассы, были введены теплофизические свойства отходов подсолнечника в ПО Comsol multiphysics. Вес исходного образца биомассы устанавливается с высокой точностью 1 кг, перед началом эксперимента. Это начальное



значение массы будет использоваться для определения изменения массы образца в процессе пиролиза.

В течении процесса пиролиза с помощью ПО Comsol multiphysics, поддерживались необходимые экспериментальные условия (температура, давление и т. д.) для пиролиза. Во время эксперимента вес образца регулярно отслеживался с использованием нужных функций ПО.

С течением времени в процессе пиролиза вес образца изменялся в результате убывания массы. Изменение массы регистрировался датчиками в течение эксперимента.

После завершения эксперимента данные о изменении массы образца анализировались. Эти данные были использованы для определения скорости нагрева в зависимости от времени и температуры.

Для 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 данных.

Для исследования кинетики пиролиза биомассы частицы отходов подсолнечника в исследовании использован метод Киссинджера [14]:

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

где: E - энергия активации (кДж/моль), T - абсолютная температура (К), T_m - пиковая температура (К), A - частотный коэффициент, (мин^{-1}), β - скорость нагрева ($^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), R - газовая постоянная (кДж/моль*К). Прямая линия получается путем построения графика $\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$, от $\frac{1}{T}$, исходя из которого оценивается кажущаяся энергия активации (E_{α}).

Результаты

При моделировании процесса пиролиза биомасс, таких как отходов подсолнечника на основе ПО Comsol Multiphysics, во временном диапазоне 0÷10 мин., с температурой нагревания 500 °С получены следующие результаты (рис.1-3).

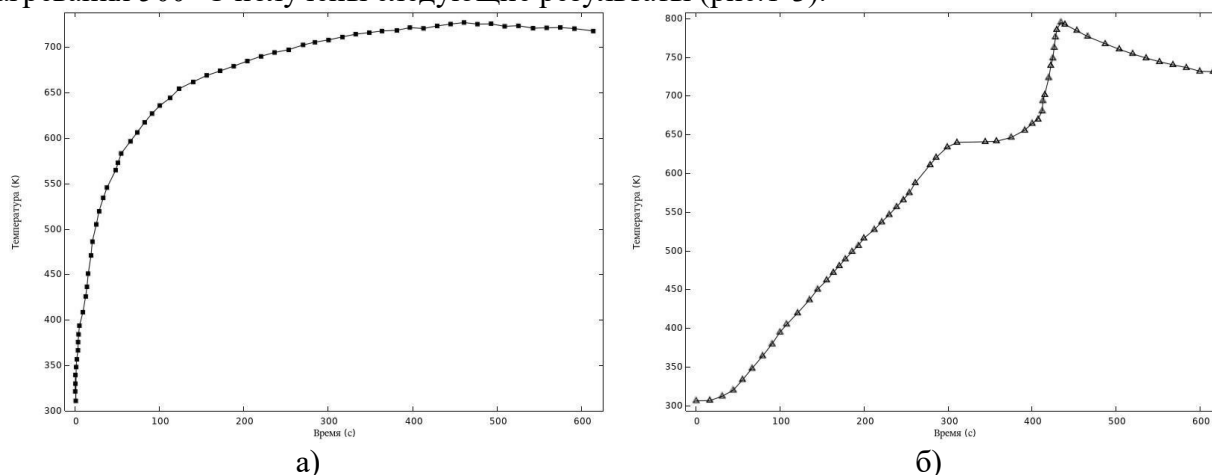


Рис.1. Изменение температуры в процессе пиролиза: а) на поверхности биомассы, б) в центре биомассы

Fig. 1. Temperature change during pyrolysis: a) on the surface of biomass, b) in the center of biomass

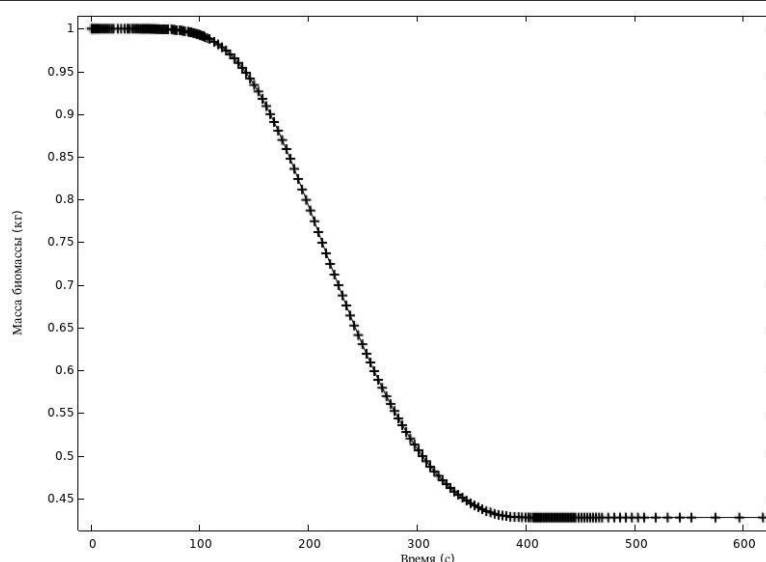


Рис.2. Изменение массы биомассы в зависимости от температуры

Fig.2. Change in biomass mass depending on temperature

При моделировании процесса пиролиза биомассы отходов подсолнечника на основе ПО Comsol Multiphysics, для измерения изменения температур были установлены температурные датчики на поверхности биомассы и в центре биомассы. Изменения температуры в зависимости от времени приведены на рис.1. Полученные модели довольно хорошо описывают тенденции изменения температур, особенно температуры в центре биомассы (рис. 1, б). Как временные, так и абсолютные значения пиковых температур для каждого положения ниже, чем в экспериментах. По рис.1 (а) можно увидеть что, температура на поверхности биомассы резко повышается до 596 К и медленно доходит до пика 727 К через 460 секунд, а температура в центре биомассы доходит до пика 794 К через 433 секунд.

Обсуждение

Изменение массы биомассы в зависимости от времени можно увидеть по рис.2. Частица отходов подсолнечника начиная с 97 секунд резко начинает терять массу. Примерно за 215 секунды, частица биомассы теряет 58% собственной массы. В конце процесса биомасса отходов подсолнечника полностью преобразуется и большая часть частиц будет состоять из обуглившегося материала.

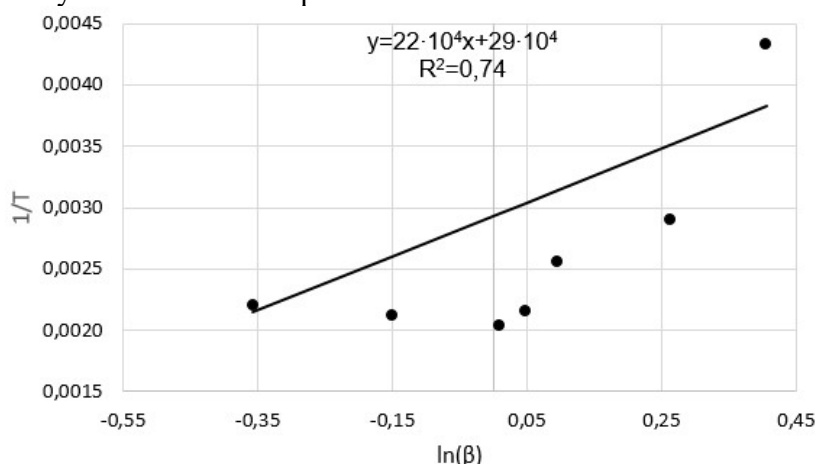


Рис. 3. График Киссенжера для частицы отходов подсолнечника

Fig. 3. Kissinger graph for a corncob particle

Исходя от полученных измеренных данных температуры датчиками, мы находим скорость нагрева (рис.3). Для этого мы использовали средние арифметическое значение температуры на поверхности биомассы и температуры в центре биомассы.



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

Энергия активации и частотный коэффициент получены из наклона линии линейной регрессии и пересечения, как показано в таблице 2. Энергия активации и частотный коэффициент составляют 18,3 КДж/моль и $2,21 \cdot 10^{-3}$ сек⁻¹ соответственно для частицы отходов подсолнечника.

Таблица 3.

Кинетические параметры отходов подсолнечника, определенные методом Киссинджера
Table 3.

Kinetic parameters of sunflower waste determined by the Kissinger method

Биомасса	Скорость нагрева (°C/сек)	T _{макс} (°C)	Е (кДж/моль)	А (сек ⁻¹)	R ²
Частица отходов подсолнечника	1,50	231,17	18,3	$2,21 \cdot 10^{-3}$	0,74
	1,30	345,38			
	1,10	390,57			
	1,05	464,6			
	1,01	491			
	0,86	472,73			
	0,7	455,1			

Заключение

В данном исследовании кинетический анализ пиролиза биомассы частицы в размере 0,02 м² отходов подсолнечника проводился с помощью ПО Comsol multiphysics в диапазоне температур 25-500°C при диапазоне времени 10 минут. ПО Comsol multiphysics дала возможность измерить изменения температур на поверхности и в центре биомассы, а также изменение массы биомассы в течении времени. Из полученных данных используя математические вычисления, весовой метод, метод наименьших квадратов мы получили данные, которые использовались для создания графики Киссинджера которая даёт возможность получить кинетические константы для изучения процесса пиролиза биомассы частиц отходов подсолнечника.

При полученных данных можно сделать следующие выводы:

- температура на поверхности частицы биомассы резко поднимается примерно за 123 секунд до 654 К, а дальше в течении 460 секунд медленно поднимается до 727 К сохраняя стабильность;

- температура в центре частицы биомассы достигает данную температура (654 К) за 390 секунд, температура достигает до 794 К в течении 433 секунд, после того медленно снижается до 731 К;

- деградация частицы биомассы происходит, начиная через 97 секунд и заканчивается на 398 секунде, когда масса теряет 58% от общей массы. Из этого можно сделать вывод, что обуглившаяся масса состоит из 42% и максимальная потеря массы отходов подсолнечника составляет 58% и наблюдается в диапазоне температур от 440 до 717 К.

Кинетические параметры были рассчитаны методом Киссинджер. Для вычислений кинетических и постоянных параметров использовался метод наименьших квадратов и корреляционный анализ. Результаты будут полезны в будущем для оптимизации процесса условий процесса пиролиза биомассы. В методе Киссинджера кинетические параметры были

одинаковыми для всего процесса пиролиза. Коэффициент корреляции между температурой и скоростью нагрева в модели равен 0,86.

Литература

- [1] Jaroenkhasemmesuk C., Tippayawong N., Thermal degradation kinetics of sawdust at intermediate heating rates, *Appl. Therm. Eng.*, 103 (2016), pp. 170-176.
- [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*, 411, 01021, (2023).
- [3] Haykiri-Acma, H., Yaman, S. and Kucukbayrak, S., "Effect of heating rate on the pyrolysis yields of rapeseed", *Renewable Energy*, Vol. 31, (2006), 803-810. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.013>
- [4] Islam, M.A., Auta, M., Kabir, G. and Hameed, B.H., "A thermogravimetric analysis of the combustion kinetics of karanja (*Pongamiapinnata*) fruit hulls char", *Bioresource Technology*, Vol. 200, (2016), 335-341. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.057>).
- [5] Uzakov G., Mamatkulova S., Ergashev Sh. and el. Modeling of heat exchange processes in a condenser of a pyrolysis bioenergy plant. *BIO Web Conf.*, 71 02021. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102021>, (2023).
- [6] Mishra, G., Kumar, J. and Bhaskar, T., "Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood", *Bioresource Technology*, Vol. 182, (2015), 282-288. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.087>).
- [7] Mamatkulova S. G. and 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 T 1070 1*, (2022).
- [8] Damartzis, Th., Vamvuka, D., Sfakiotakis, S. and Zabaniotou, A., "Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynaracardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)", *Bioresource Technology*, Vol. 102, (2011), 6230-6238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.060>
- [9] Zhai, M., Li, G., Zhang, Y., Dong, P., Qi, G. and Huang, Y., "Kinetic parameters of biomass pyrolysis by TGA", *Bio Resources*, Vol. 4, (2016), 8548-8557. (<http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.8548-8557>).
- [10] Kaczor Z., Buliński Z., Werle S.: Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review, *Renewable Energy*, 2020, Volume 159, Pages 427-443, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.110>.
- [11] Mamatkulova S. Comsol multiphysics yordamida o'simlik biomassasining piroliz jarayonini modellashtirish. *Innovatsion texnologiyalar 3(52)*, 2023.
- [12] Singh S, Sawarkar AN. Thermal decomposition aspects and kinetics of pyrolysis of garlic stalk. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1716891>
- [13] Singh P, Singh R.K., Gokul P.V., Hasan S.H., Sawarkar A.N. Thermal degradation and pyrolysis kinetics of two Indian rice husk varieties using thermogravimetric analysis. *Energy Sources, Part A: recovery, Utilization, and Environmental Effects*; 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1736215>
- [14] Heydari, M., Rahman, M. and Gupta, R., "Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal", *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2015, (2015), 1-9. (<http://dx.doi.org/10.1155/2015/481739>).

Reference

- [1] Jaroenkhasemmesuk C., Tippayawong N., Thermal degradation kinetics of sawdust at intermediate heating rates, *Appl. Therm. Eng.*, 103 (2016), pp. 170-176.
- [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*, 411, 01021, (2023).



- [3] Haykiri-Asma, H., Yaman, S. and Kucukbayrak, S., “Effect of heating rate on the pyrolysis yields of rapeseed”, *Renewable Energy*, Vol. 31, (2006), 803-810. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.013>
- [4] Islam, M.A., Auta, M., Kabir, G. and Hameed, B.H., “A thermogravimetric analysis of the combustion kinetics of karanja (*Pongamiapinnata*) fruit hulls char”, *Bioresource Technology*, Vol. 200, (2016), 335-341. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.057>).
- [5] Uzakov G., Mamatkulova S., Ergashev Sh. and el. Modeling of heat exchange processes in a condenser of a pyrolysis bioenergy plant. *BIO Web Conf.*, 71 02021. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102021>, (2023).
- [6] Mishra, G., Kumar, J. and Bhaskar, T., “Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood”, *Bioresource Technology*, Vol. 182, (2015), 282-288. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.087>).
- [7] Mamatkulova S. G. and 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 T 1070 1*, (2022).
- [8] Damartzis, Th., Vamvuka, D., Sfakiotakis, S. and Zabaniotou, A., “Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynaracardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)”, *Bioresource Technology*, Vol. 102, (2011), 6230-6238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.060>
- [9] Zhai, M., Li, G., Zhang, Y., Dong, P., Qi, G. and Huang, Y., “Kinetic parameters of biomass pyrolysis by TGA”, *Bio Resources*, Vol. 4, (2016), 8548-8557. (<http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.8548-8557>).
- [10] Kaczor Z., Buliński Z., Werle S.: Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review, *Renewable Energy*, 2020, Volume 159, Pages 427-443, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.110>.
- [11] Mamatkulova S. Comsol multiphysics yordamida o‘simlik biomassasining piroliz jarayonini modellashtirish. *Innovatsion texnologiyalar 3(52)*, 2023. (*In Uzb.*).
- [12] Singh S, Sawarkar AN. Thermal decomposition aspects and kinetics of pyrolysis of garlic stalk. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1716891>
- [13] Singh P, Singh RK, Gokul PV, Hasan SH, Sawarkar AN. Thermal degradation and pyrolysis kinetics of two Indian rice husk varieties using thermogravimetric analysis. *Energy Sources, Part A: recovery, Utilization, and Environmental Effects*; 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1736215>
- [14] Heydari, M., Rahman, M. and Gupta, R., “Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal”, *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2015, (2015), 1-9. (<http://dx.doi.org/10.1155/2015/481739>).

For citation: Uzakov G.N., Mamatkulova S.G. Research of the kinetics of the pyrolysis process of biomass (sunflower waste). *Alternative Energy*. 2024. 1(12). Pp. 43-51. (*In Rus.*)

Correspondence: Mamatkulova Sayyora Gulyamovna – PhD student.
E-mail: urisheva80@mail.ru