

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIIY TA‘LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**MASHINASOZLIK
ILMIY-TEXNIKA JURNALI**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ИННОВАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**MINISTRY OF HIGHER EDUCATION, SCIENCE AND INNOVATIONS REPUBLIC
OF UZBEKISTAN
ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
MACHINE BUILDING**

O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi (OAK) Rayosatining 2021-yil 30-dekabrda 310/10-son qarori bilan Andijon mashinasozlik institutining “Mashinasozlik” ilmiy-texnika jurnali “TEXNIKA” va “IQTISODIYOT” fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

Ushbu jurnalda chop etilgan materiallar tahririyatning yozma ruxsatisiz to‘liq yoki qisman chop etilishi mumkin emas. Tahririyatning fikri mualliflar fikri bilan har doim mos tushmasligi mumkin. Ilmiy-texnika jurnalida yozilgan materiallarning haqqoniyligi uchun maqolaning mualliflari mas’uldirlar.

MASHINASOZLIK VA MASHINASHUNOSLIK. MASHINASOZLIKDA MATERIALLARGA ISHLOV BERISH. METALLURGIYA. AVIASIYA TEXNIKASI	
Payvandlash uchun grafitli elektrodlar haqida umumiy tushuncha <i>Tursunov A.S, Turdialiyev U.M.</i>	6
Junni o‘simlik aralashmalaridan ajratish kuchi va uzayishini aniqlash <i>Djurayev A., Elmonov S.M.</i>	10
Arrali jin mashinasi operatorini xavfsizligini ta‘minlovchi optik to‘siq sensorini modellashtirish <i>Azizov Sh.M., Usmanov O.N.</i>	16
Мобильная опреснительная установка <i>Турсунов М.Н., Сабиров Х., Ахтамов Т.З., Насимов У.М., Жабборов Ш. А.</i>	26
Разработка технологии изготовления корпуса подшипника роликов ленточного конвейера <i>Хамраев Б.Д., Хусанов Я., Шакулов Б.К., Усманов Ш.Н., Далиев Ш.Л.</i>	31
Sanoat changlarini yong‘in xavfini baholash tizimlari tahlili <i>Qobulova N.J.</i>	36
Vintli konveyer mashina agregati yuritgich-reduktori va vint valini harakat qonunlarini aniqlash <i>Teshaboyev O.A.</i>	42
Zichlashtirish mashinalari texnologik jarayonini tadqiq etishda fizik modellashtirishning mohiyati <i>Xankelov T.Q., Kayumov A.D., Xudaykulov R.M., Komilov S.I.</i>	48
Разработка облегченной конструкции пыльного цилиндра джина <i>Мирзамудов А.Ш.</i>	54
Flyus qatlami ostida payvandlangan vagon – sisternalarni payvand chokining mexanik xossalarni tadqiqot qilish <i>Qosimov K.Z., Begmatov D.K.</i>	60
Respublikamiz sharoitida mavjud tuproqqa ishlov beruvchi mashinalar ishchi organlari va hududlardagi tuproqlarning turlari va ulardan foydalanishning tadqiqi <i>Qosimov K.Z., Maxmudov I.R., Ro‘ziyev A.Y.</i>	66
Термическая обработка порошкообразных наплавочных износостойких литых деталей машин <i>Тилабов Б.К., Олимжонов Р.З.</i>	71
ENERGETIKA VA ELEKTROTEXNIKA. QISHLOQ XO‘JALIGI ISHLAB CHIQRISHINI ELEKTRLASHTIRISH TEXNOLOGIYASI. ELEKTRONIKA	
Criteria for the existence of established modes of power systems <i>Davirov A.K., Mamadiev H.N.</i>	77
Yog‘-moy korxonalarida mahsulot birligiga to‘g‘ri keladigan elektr energiya solishtirma sarfiga turli omillarning ta‘sirini regression tahlili <i>Latipov S.T.</i>	84
Comsol multiphysicsda biomassa piroliz jarayonining kinetikasini modellashtirish <i>Gulom N.U., Sayyora G.M.</i>	93
Elektr energiyasini sanoat va ishlab chiqarish korxonalarida iste‘mol qilish qonuniyatlarini tahlil qilish <i>Shirinov S.G‘., Olimov J.S.</i>	99

Gulom Norboyevich Uzakov

t.f.d., professor, Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti,
<https://orcid.org/0009-0005-7386-8075>

Sayyora Gulyamovna Mamatkulova

tayanch doktorant, Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti,

e-pochta: urisheva80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0987-5298>, tel: 90 050 0880

COMSOL MULTIPHYSICSDA BIOMASSA PIROLIZ JARAYONINING KINETIKASINI MODELLASHTIRISH

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ НА COMSOL MULTIPHYSICS

MODELING THE KINETICS OF THE BIOMASS PYROLYSIS PROCESS AT COMSOL MULTIPHYSICS

Annotatsiya.

Ushbu maqolada biomassasi (makkajo'xori so'tasi) ning piroliz jarayoni kinetikasi o'rganib chiqilgan, bu biomassaning degradatsiya jarayonida sodir bo'ladigan kimyoviy reaksiyalar tezligini aniqlash, piroliz tezligi va samaradorligiga ta'sir qiluvchi asosiy omillarni aniqlash imkonini beradi. Kinetik parametrlar Kissinger usuli bilan hisoblab chiqilgan. Olingan natijalar kelajakda biomassa piroliz jarayonining shartlarini optimallashtirish uchun foydali bo'ladi.

Аннотация.

В данной статье рассмотрена кинетика процесса пиролиза биомассы (кукурузной початки), позволяющая определить скорость химических реакций, протекающих в процессе разложения биомассы, определить основные факторы, влияющие на скорость и эффективность пиролиза. Кинетические параметры рассчитывались методом Киссинджера. Полученные результаты пригодятся в дальнейшем для оптимизации условий процесса пиролиза биомассы.

Abstract.

This article examines the kinetics of the pyrolysis process of biomass (corn cob), which allows us to determine the rate of chemical reactions occurring during the decomposition of biomass, to determine the main factors affecting the speed and efficiency of pyrolysis. The kinetic parameters were calculated using the Kissinger method. The results obtained will be useful in the future to optimize the conditions of the biomass pyrolysis process.

Kalit so'zlar: piroliz, quvursimon reaktor, biomassa, makkajo'xori so'tasi, Kissinger usuli, piroliz kinetikasi.

Ключевые слова: пиролиз, трубчатый реактор, биомасса, кукурузная початка, метод Киссинджер, кинетика пиролиза.

Keywords: pyrolysis, tubular reactor, biomass, corn cob, Kissinger method, pyrolysis kinetics.

1. Kirish (Introduction)

Piroliz - biomassani termokimyoviy qayta ishlashning asosiy jarayonlaridan biridir. Biomassa piroliz qurilmasini muvaffaqiyatli konstruksiyalash uglevodorod chiqindilarini kamaytirish bo'yicha energiya loyihasining maqsadga muvofiqligini yanada oshiradi [1,2].

Piroliz jarayoni vaqtida biomassa qanday harakat qilishini taxmin qilish uchun piroliz kinetikasini tushunish muhimdir. Shuningdek, u jarayonni optimallashtirish uchun tegishli

reaktor va matematik reaktor simulyatsiyasini yaratishda yordam beradi. Uglevodorod chiqindilarini issiqlik bilan qayta ishlash va biomassa sohasida piroliz kinetikasi va xom ashyo tarkibining ta'sirini o'rganish dolzarb masalalardan biridir.

Biomassaning kinetik ma'lumotlarini tahlil qilish uchun turli xil usullar mavjud bo'lib, ular ikki turga bo'linadi: modelga asoslanmagan usullar va modelga asoslangan usullar. Modelsiz yoki izokonversiya usulida hisoblash bir xil konversiya qiymati uchun har xil isitish tezligida kinetik egri chiziqlar asosida amalga oshiriladi, undan belgilangan konversiya nuqtasi uchun faollashtirish energiyasi hisoblab chiqiladi, kinetik parametrlar esa modelga mos keladigan parametrlar to'plamidagi funktsiya yordamida hisoblanadi. Xato-bu har qanday berilgan model parametrlari to'plami uchun olingan ma'lumotlar va modelni bashorat qilish ma'lumotlari o'rtasidagi kuzatilgan farq. Kinetik tahlil uchun bu farqni minimallashtiradigan eng yaxshi parametrlar tanlanadi [3,4,5]. Ushbu usul bir qator kamchiliklarga ega, ayniqsa ularning izotermik bo'lmagan sharoitlar uchun mos reaksiya modelini aniqlay olmaydi. Usul kinetik doimiyning yuqori qiymatlarini berganligi uchun bu usul bekor qilindi va uning o'rniga izokonversiya usullari qo'llaniladi. Modelsiz usulning afzalligi uning soddaligi va kinetik modelni tanlash bilan bog'liq xatolardan qochish qobiliyatidir. Ushbu modellar ma'lum bir transformatsiya uchun faollashtirish energiyasi E ni baholaydi. Ushbu usulning kamchiligi shundan iboratki, turli xil isitish tezligi va inert gaz oqimi tezligida bir xil namuna massasi uchun bir qator o'lchovlarni amalga oshirish kerak, ularning farqlari xatolarga olib kelishi mumkin [6,7].

Ishning maqsadi-makkajo'xori so'tasi bo'lagining piroliz jarayonining kinetikasini modellashtirish va o'rganish, bu biomassaning parchalanishi jarayonida sodir bo'ladigan kimyoviy reaksiyalar tezligini aniqlash va piroliz tezligi va samaradorligiga ta'sir qiluvchi asosiy omillarni aniqlash imkonini beradi.

2. Materiallar va usullar (Materials and Methods)

Makkajo'xori so'talari yuqori kaloriya qiymatiga va bioneft rentabelligi kabi afzalliklariga ega [8], ushbu tadqiqot ishida Comsol multiphysics dasturiy ta'minoti (DT) yordamida tahlil qilish uchun $0,02 \text{ m}^2$ o'lchamiga ega bo'lgan va quyidagi termofizik xususiyatlarga ega bo'lgan makkajo'xori so'tasi biomassasi ishlatilgan (1-jadval).

1-jadval. Makkajo'xori so'tasining termofizik xususiyatlari [9,10]

№	Ko'rsatkichlar	Qiymatlar
1.	Zichligi, kg/m^3	282,38
2.	Namligi, %	5-6,5
3.	O'lchami, mm	10x20
4.	Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $\text{Vt/m}^{\circ}\text{C}$	0,096
5.	G'ovakliligi	0.4
6.	G'ovak o'lchami	5E-5 m
7.	Radiatsion qobiliyati	0.95
8.	Tolalarning ko'ndalang yo'nalishi bo'yicha samarali issiqlik o'tkazuvchanligi, $\text{Vt/(m} \cdot \text{K)}$	1,32
9.	Tolalar yo'nalishi bo'yicha samarali issiqlik o'tkazuvchanligi, $\text{Vt/(m} \cdot \text{K)}$	3,7

Comsol Multiphysicsda tadqiqotni o'tkazish uchun 2-jadvalda keltirilgan eksperimental shartlar o'rnatildi.

Comsol multiphysicsda tadqiqotni o'tkazish uchun quvurli reaktorda inert atmosferaga ega izotermik o'choqdan iborat eksperimental tizim yaratildi. Termoparalar (TP) yordamida o'choqning harorati uzluksiz o'lchandi va o'choq kamerasi orqali o'tadigan azot orqali inert

atmosfera erishildi. Tajribada 1 kg biomassa izotermik reaktorga joylashtirildi va namunaning harorati va massasi piroliz jarayonida qayd etib borildi.

Makkajo'xori so'tasi bo'laklari biomassasi piroliz jarayonining kinetikasini o'rganish uchun ushbu tadqiqotda biz quvurli reaktorda piroliz tezligini o'lchadik. Ushbu turdagi reaktorda o'tkazilgan tajribalar turli sharoitlarda (harorat, bosim, isitish tezligi va boshqalar) piroliz tezligi to'g'risida ma'lumot olish imkonini beradi.

2-jadval. Tadqiq qilish uchun eksperimental shartlar

№	Ko'rsatkichlar	Qiymatlar
1.	Biomassaning boshlang'ich harorati, K	293
2.	Reaktor harorati, K	820
3.	Reaktordagi gaz harorati, K	773

Quvur reaktorida piroliz tezligini o'lchash Comsol multiphysicsda harorat sensorlaridan foydalangan holda amalga oshirildi. Vaqt o'tishi bilan reaktorda biomassa namunasining massa o'zgarishi qayd etildi. Pirolizdan so'ng namuna massasidagi o'zgarishlarni tahlil qilish mumkin, bu esa piroliz tezligini aniqlashga imkon beradi. Piroliz odatda issiqlik chiqishi bilan birga bo'lganligi sababli, harorat sensorlaridan foydalanish vaqt o'tishi bilan reaktorda harorat o'zgarishini o'lchash imkonini beradi, bu esa jarayon tezligini ham baholashga imkon beradi.

Biomassa piroliz kinetikasini o'rganish uchun Comsol multiphysics bo'yicha makkajo'xori so'tasining issiqlik-fizik xususiyatlari joriy etildi. Dastlabki biomassa namunasining og'irligi tajriba boshlanishidan oldin yuqori aniqlik bilan 1 kg deb o'rnatildi. Ushbu boshlang'ich massa qiymati piroliz jarayonida namuna massasining o'zgarishini aniqlash uchun ishlatiladi.

Comsol multiphysics yordamida piroliz jarayonida piroliz uchun zarur eksperimental sharoitlar (harorat, bosim va boshqalar) saqlanib qoldi. Tajriba davomida dasturiy ta'minotning kerakli funktsiyalari yordamida namunaning og'irligi muntazam ravishda kuzatildi.

Vaqt o'tishi bilan namunaning og'irligi piroliz jarayonida massaning pasayishi natijasida o'zgargan. Ushbu massa o'zgarishi tajriba davomida qayd etilgan. Tajriba tugagandan so'ng, namuna massasining o'zgarishi to'g'risidagi ma'lumotlar tahlil qilindi. Ushbu ma'lumotlar vaqt va haroratga qarab isitish tezligini aniqlash uchun ishlatilgan.

Izotermik yoki izotermik bo'lmagan tajribalar uchun konversiya nuqtalarida faollashuv energiyasini tahlil qilish uchun modellardan foydalanmasdan yondashuv izokonversiya usuli bilan belgilanadi. Modelsiz usulni qo'llash izchil va standart kinetik ma'lumotlar izotermik bo'lmagan ma'lumotlardan olinishi mumkin. Ushbu usul uchun modelsiz tenglama quyida keltirilgan [11].

Makkajo'xori so'tasi bo'lagi biomassasining piroliz kinetikasini o'rganish uchun tadqiqotda Kissinger usulidan foydalanilgan:

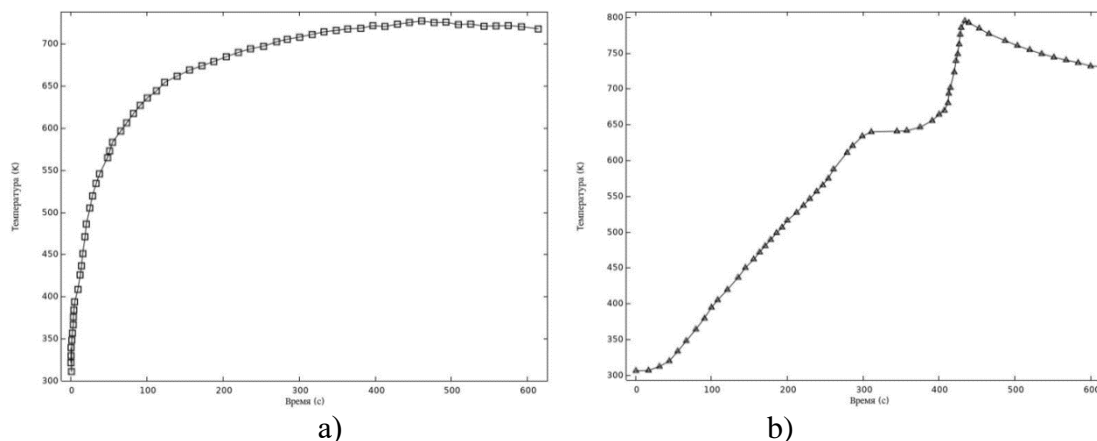
$$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \frac{E}{RT_m}$$

bu erda: E-faollashtirish energiyasi (kJ/mol), T - mutlaq harorat (K), T_m - eng yuqori harorat (K), A - chastota koeffitsienti, (min⁻¹), β - isitish tezligi (°C/min), R - gaz doimiysi (kJ/mol·K).

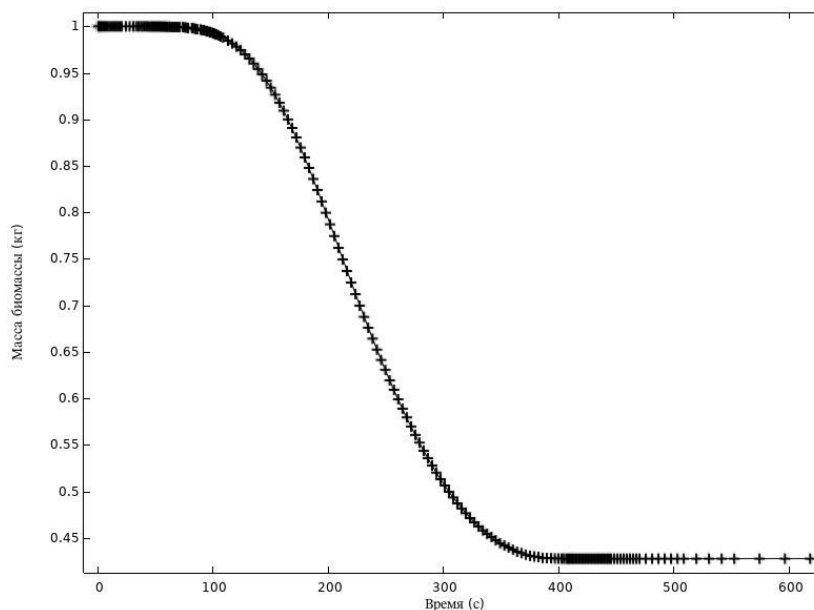
3. Tadqiqot natijalari (Results)

Comsol Multiphysics asosidagi makkajo'xori so'tasi kabi biomassaning piroliz jarayonini 0÷10 min vaqt oralig'ida, isitish harorati 500 °C bo'lgan holda modellashtirishda quyidagi natijalar olingan (rasm.1-3).

Cosmol Multiphysics asosida makkajo'xori so'tasi biomassasi piroliz jarayonini modellashtirishda harorat o'zgarishini o'lchash uchun biomassa yuzasi va biomassa markazida harorat sensorlari o'rnatildi. Olingan modellar harorat o'zgarishi tendentsiyalarini, ayniqsa biomassa markazidagi haroratni juda yaxshi tavsiflaydi (1-rasm, b). Har bir pozitsiya uchun eng yuqori haroratning vaqtinchalik va mutlaq qiymatlari tajribalarga qaraganda pastroq. Rasm 1 (a) bo'yicha shuni ko'rish mumkinki, biomassa yuzasidagi harorat 460 soniyadan keyin 727 K ga, biomassa markazidagi harorat esa 433 soniyadan keyin 794 K ga etadi.



1-rasm. Piroliz jarayonida harorat o'zgarishi: a) biomassa yuzasida, b) biomassa markazida

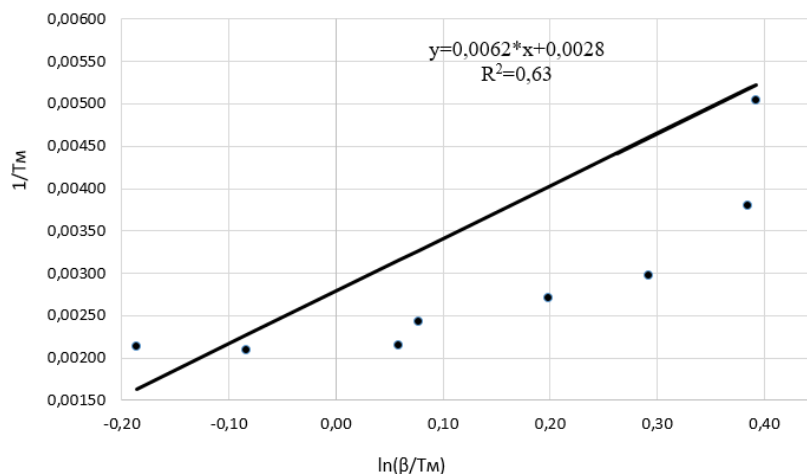


2-rasm. Vaqtga nisbatan biomassa massasi o'zgarishi.

Biomassa massasining vaqtga qarab o'zgarishini ko'rish mumkin (2-rasm). Makkajo'xori so'tasi bo'lagi 112 soniyadan so'ng to'satdan massani yo'qotishni boshlaydi. Taxminan 292 soniyada biomassa bo'lagi o'z massasining 58 foizini yo'qotadi. Jarayon oxirida makkajo'xori so'tasi biomassasi tarkibi to'liq o'zgaradi va bo'laklarning katta qismi kuygan materialdan iborat bo'ladi.

Datchiklar tomonidan o'lchangan harorat ma'lumotlariga asoslanib, biz isitish tezligini topamiz (rasm.3). Buning uchun biz biomassa yuzasidagi harorat va biomassa markazidagi haroratning arifmetik o'rtacha qiymatidan foydalandik.

Kissinger usulidan foydalanish uchun eng yuqori harorat biomassa bo`lagining yuzasi va markazidagi haroratga qarab o'rtacha arifmetik harorat qiymatlarini hisoblandi va eng yuqori harorat tanlandi va bu qiymat har xil isitish tezligida doimiy qilib olindi. To`g`ri chiziq (3-rasm) Kissinger usuli yordamida olindi, undan kinetik konstantalar hisoblandi. Kinetik konstantalar eng kichik kvadratlar usuli asosida hisoblandi.



3-rasm. Makkajo'xori so`tasi bo`lagi uchun Kissinger grafigi.

4. Muhokama (Discussion)

Faollashtirish energiyasi va chastota koeffitsienti 3-jadvalda ko'rsatilganidek, chiziqli regressiya va kesishish chizig'ining qiyaligidan olindi. Faollashtirish energiyasi va chastota koeffitsiyenti 51,53 kJ/mol va $6,2 \times 10^3 \text{ sek}^{-1}$ ni tashkil qiladi.

3-Jadval.

Kissinger usuli yordamida aniqlangan makkajo'xori boshog'ining kinetik parametrlari.

Biomassa	Isitish tezligi ($^{\circ}\text{C}/\text{cek}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	E (kJ/mol)	A (sek^{-1})	R^2
Makkajo'xori so`tasi bo`lagi	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				

5. Xulosa (Conclusions)

Ushbu tadqiqotda $0,02 \text{ m}^2$ makkajo'xori so`tasi bo`lagi biomassasi pirolizining kinetik tahlili Comsol multiphysics tomonidan 20-500 $^{\circ}\text{C}$ haroratda, 10 daqiqa vaqt oralig'ida o'tkazildi. Comsol multiphysics funktsiyalaridan foydalanib, biomassa yuzasi va markazidagi harorat o'zgarishini, shuningdek, vaqt o'tishi bilan biomassa massasining o'zgarishini o'lchash imkoniyati yaratildi. Olingan ma'lumotlardan matematik hisob-kitoblar, eng kichik kvadratlar usuli yordamida ma'lumotlar olindi va ulardan Kissinger grafikasini tuzish uchun foydalanildi, bu esa makkajo'xori so`tasi biomassasining piroliz jarayonini o'rganish uchun kinetik konstantalarni olish imkonini berdi.

O'tkazilgan tadqiqot bo'yicha quyidagi xulosalar chiqarish mumkin: 190°C haroratda biomassa massasini yo'qotishni boshladi, massa yo'qolishi esa 432°C haroratda to'xtadi. Kinetik parametrlar Kissenjer usuli bilan hisoblab chiqildi. Olingan natijalar kelajakda biomassa piroliz jarayonini optimallashtirish uchun foydali bo'ladi. Kissinger usulida kinetik parametrlar butun piroliz jarayoni uchun bir xil bo'ldi. Modeldagi harorat va isitish tezligi o'rtasidagi korrelyatsiya koeffitsienti 0,79 ga teng.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. C. Jaroenkhasemmesuk, N. Tippayawong, 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. G. Uzakov, S. Mamatkulova, Sh. Ergashev 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. Т. Онсри и др. Пиролиз кукурузных остатков: кинетический анализ с использованием модели дискретной распределенной энергии активации, Конференция ИОП. Сер. Окружающая среда Земли. наук. (2018).
10. Z. Kaczor, Z. Buliński, S. Werle: 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. 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>).