

UO‘K 662.997

**COMSOL MULTIPHYSICS YORDAMIDA O‘SIMLIK BIOMASSASINING PIROLIZ JARAYONINI MODELLASHTIRISH****Mamatkulova Sayyora Gulyamovna-** doktorant (PhD), E-mail: [urisheva80@mail.ru](mailto:urisheva80@mail.ru)

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada Comsol Multiphysics dasturi yordamida modellashtirilgan piroliz qurilmasi (PQ) quvursimon reaktorida kislorod bo‘lmaganda yuqori haroratlarda biomassaning parchalanishini ilmiy o‘rganish misoli keltirilgan. Soddalashtirilgan geometriyaga ega PP quvursimon reaktorining ishlab chiqilgan modeli hisob-kitoblarni sezilarli darajada qisqartiradi va hisoblash vaqtini 72% ga qisqartiradi, bu esa piroliz jarayonlarini o‘rganish va optimallashtirish vositasiga aylanadi. Model doimiy issiqlik o‘tkazuvchanligi, zichligi va dinamik yopishqoqligi bilan o‘simlik biomassasining parchalanish jarayonining uch o‘lchovli tasviridir. Ushbu tadqiqot piroliz jarayonlarini o‘rganish va optimallashtirishda kompyuter simulyatsiyalaridan foydalanish muhimligini ta’kidlaydi. Bu pirolizni yaxshilash va qimmatbaho biomassa mahsulotlarini ishlab chiqarish uchun yangi imkoniyatlar ochadi. Bundan tashqari, ushbu tadqiqot natijalari mavjud piroliz qurilmalarini takomillashtirish va biomassani qayta ishlashning yangi texnologiyalarini ishlab chiqish uchun ishlatilishi mumkin. Modelni yanada takomillashtirish va uni qo‘llash sohasini kengaytirish bo‘yicha keyingi tadqiqotlar rejalashtirilgan.

**Kalit so‘zlar:** biomassa pirolizi, makkajo‘xori so‘tasi pirolizi, bug‘doy somoni pirolizi, Comsol multiphysics, biomassa parchalanishi.

УДК 662.997

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ COMSOL MULTIPHYSICS****Маматкулова Сайёра Гулямовна – докторант (PhD)**

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

**Аннотация.** В данной статье представлен пример научного исследования разложения биомассы при высоких температурах в отсутствие кислорода в трубчатом реакторе пиролизной установки (ПУ), смоделированного с помощью программы Comsol Multiphysics. Разработанная модель трубчатого реактора ПУ с упрощенной геометрией значительно сокращает объем вычислений и позволяет сократить время расчета на 72%, что делает ее инструментом для изучения и оптимизации процессов пиролиза. Модель представляет собой трехмерное представление процесса разложения растительной биомассы с постоянной теплопроводностью, плотностью и динамической вязкостью. Данное исследование подчеркивает важность использования компьютерного моделирования при изучении и оптимизации процессов пиролиза. Это открывает новые возможности для улучшения пиролиза и получения ценных продуктов из биомассы. Кроме того, результаты данного исследования могут быть использованы для усовершенствования существующих пиролизных установок и разработки новых технологий переработки биомассы. Планируются дальнейшие исследования для дальнейшего совершенствования модели и расширения сферы ее применения.

**Ключевые слова:** пиролиз биомассы, пиролиз кукурузных початков, пиролиз пшеничной соломы, Comsol multiphysics, разложение биомассы.

UDC 662.997

## SIMULATION OF THE PYROLYSIS PROCESS OF PLANT BIOMASS USING COMSOL MULTIPHYSICS

**Mamatkulova Sayera Gulyamovna** – Doctoral student (PhD)

Karshi engineering-economics institute, Karshi city, Uzbekistan

**Abstract.** *This article presents an example of a scientific study of the decomposition of biomass at high temperatures in the absence of oxygen in a tubular reactor of a pyrolysis plant (PP), modeled using the Comsol Multiphysics program. The developed model of a tubular PP reactor with a simplified geometry significantly reduces the amount of calculations and reduces the calculation time by 72%, which makes it a tool for studying and optimizing pyrolysis processes. The model is a three-dimensional representation of the decomposition process of plant biomass with constant thermal conductivity, density and dynamic viscosity. This study highlights the importance of using computer modeling in the study and optimization of pyrolysis processes. This opens up new opportunities for improving pyrolysis and obtaining valuable products from biomass. In addition, the results of this study can be used to improve existing pyrolysis plants and develop new technologies for processing biomass. Further research is planned to further improve the model and expand its scope of application.*

**Keywords:** *pyrolysis of biomass, pyrolysis of corn cobs, pyrolysis of wheat straw, Comsol multiphysics, decomposition of biomass.*

### Kirish

Hozirgi vaqtda biomassa pirolizi bo'yicha tadqiqotlar turli yo'nalishlarda faol davom etmoqda, jumladan jarayonlarni optimallashtirish, yangi materiallar va katalizatorlarni ishlab chiqish va olingan mahsulotlarni qo'llash imkoniyatlarini o'rganilmoqda. Shuningdek, ularning yaroqliligini aniqlash, piroliz jarayoni va jarayonni optimallashtirish, maqsadli yakuniy mahsulotlarni olish uchun turli xil xomashyo turlari (masalan: yog'och, plastik chiqindilar, biomassa va boshqalar) pirolizi o'rganilmoqda [1, 2, 3].

Piroliz jarayonida xom ashyo tarkibining ta'siri ham muhim rol o'ynaydi [4]. Turli xil biomassa turlari va organik chiqindilar turli xil tuzilish va kimyoviy tarkibga ega bo'lishi mumkin, bu ularning piroliz jarayonida o'zini tutishiga ta'sir qiladi. Masalan, yog'och, plastmassa, biomassa va ko'mir tarkibida uglevodorodlar, namlik miqdori va boshqa tarkibiy qismlarning farqlari tufayli piroliz paytida turli xil parchalanish va mahsulot hosil bo'lish tezligiga ega bo'lishi mumkin.

Piroliz jarayoni paytida material qanday harakat qilishini taxmin qilish uchun piroliz kinetikasini tushunish muhimdir. Bu, shuningdek jarayonni optimallashtirish uchun mos bo'lgan reaktorni ishlab chiqish hamda uni matematik modellashtirishga imkon beradi. Uglevodorod chiqindilarini issiqlik bilan qayta ishlash va biomassani o'rganish sohasida piroliz kinetikasi va xomashyo tarkibining ta'siri dolzarbdir.

Biomassa pirolizi jarayonini samarali va xavfsiz o'rganish PQ reaktori ichida sodir bo'ladigan issiqlik jarayonlarini aniq tushunishni talab qiladi. Bu erda amaliy dasturiy ta'minot va kompyuterli modelashtirish muhim rol o'ynaydi.

Kompyuterli modellashtirish yordamida PQ quvursimon reaktorining 3D modelini yaratish va reaktorning turli sharoitlarga qanday javob berishini ko'rish uchun bir qator virtual tajribalar o'tkazish mumkin. Bu bizga reaktor dizaynini optimallashtirishga, uning samaradorligi va xavfsizligini yaxshilashga va ilmiy tadqiqotlarni o'tkazish uchun vaqt va mablag'ni tejashga yordam beradi.

### Uslub va materiallar

Comsol Multiphysics foydalanuvchiga ma'lum bir jarayonda ishtirok etadigan turli xil fizik jarayonlarni birlashtirishga va ularni modellashtirishga imkon beradi [5].

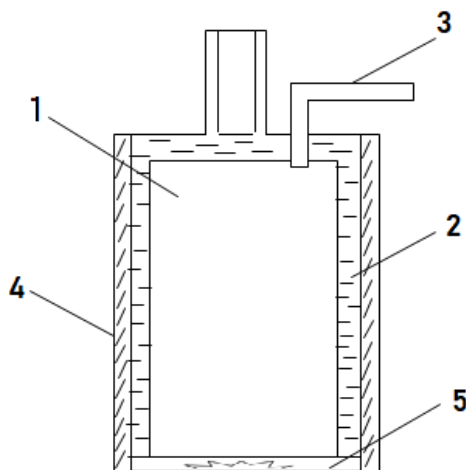
Comsol Multiphysicsda PQ quvursimon reaktorini modellashtirishning maqsadi reaktor ichida sodir bo'ladigan jarayonlarni o'rganish va optimallashtirishdir. Comsol Multiphysics yordamida quyidagi vazifalarni bajarish mumkin:

- **Issiqlik jarayonlarini tahlil qilish:** PQ quvursimon reaktor ichidagi harorat taqsimotini, issiqlik jarayonlarining piroliz tezligi va samaradorligiga ta'sirini o'rganish.
- **Kimyoviy reaksiyalarni o'rganish:** PQ quvursimon reaktorida sodir bo'ladigan kimyoviy reaksiyalarni modellashtirish va ularning yakuniy mahsulotga ta'sirini o'rganish.
- **PQ quvursimon reaktor dizaynini optimallashtirish:** samaradorlik va xavfsizlikni ta'minlash uchun quvursimon reaktor dizaynini optimallashtirish uchun modellashtirish natijalaridan foydalanish.
- **Oqimlarni modellashtirish:** quvursimon reaktor ichidagi materiallar oqimini va ularning piroliz jarayoniga ta'sirini o'rganish.

Shuni ta'kidlash kerakki, Comsol Multiphysicsdan samarali foydalanish uchun Comsol Multiphysics PQ quvursimon reaktor ichida sodir bo'ladigan fizik va kimyoviy jarayonlarni chuqur tushunish, shuningdek, raqamli usullar va modellashtirish dasturlari bilan ishlash tajribasi talab qilinadi.

Quvursimon reaktorda piroliz jarayoni issiqlik bilan amalga oshiriladi, shuning uchun issiqlik uzatish shartlari butun jarayonni belgilaydi. Tizimning geometriyasi (quvursimon reaktor), xususan geometriya va reaktiv biomassa zarralarining kattaligi issiqlik almashinuviga katta ta'sir ko'rsatadi. Piroliz jarayonida dastlab xom ashyoda mavjud bo'lgan moddalar, shuningdek oraliq moddalar va yakuniy mahsulotlar ishtirok etadigan turli xil reaksiyalar mavjud [6, 7, 8, 9].

Biz modellashtirgan quvursimon reaktor PQ zanglamaydigan, issiqlikka chidamli po'latdan yasalgan (1-rasm). U bir nechta bloklardan iborat: piroliz reaktori, suv ko'ylagi, gorelka, pirogaz quvuri. Barcha bloklar bitta metall ramkaga o'rnatiladi. Shuni ta'kidlash kerakki, quvursimon reaktorning dizayni va ishlashi o'rnatishning o'ziga xos pirolizi va jarayon talablariga qarab farq qilishi mumkin.



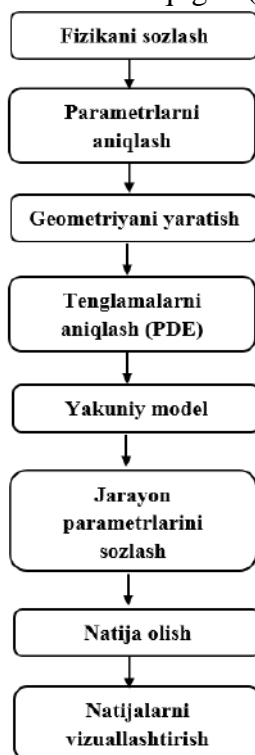
1-rasm. PQ quvursimon reaktor sxemasi: 1-piroliz reaktori; 2-suv ko'ylagi; 3-pirogaz quvuri; 4-izolyatsiya; 5-gorelka.

Biomassa PQ quvursimon reaktorida quyidagi fizik jarayonlar sodir bo'ladi [10, 11, 12]:

- Termal parchalanish: biomassa pirolizi organik birikmalarning termal parchalanishidir. Piroliz jarayonida kimyoviy reaksiyalar sodir bo'ladi, natijada uglevodorodlar yengilroq molekularga yoki kimyoviy elementlarga parchalanadi.
- Radiatsion isitish: radiatsion bo'limda piroliz quvursimon reaktorlar mavjud bo'lib, ular ushbu qismning tashqi yonuvchi gazning yonish issiqligi bilan isitiladi.
- Issiqlik almashinuvi: reaktorda issiqlik almashinuvi jarayoni ham sodir bo'ladi, bu reaktor ichidagi harorat maydoniga ta'sir qiladi.

- Kimyoviy reaksiyalar: piroliz jarayonining matematik modeli biomassaning kimyoviy tarkibiy qismlarini parchalashning ko‘p bosqichli sxemasidan foydalanishga asoslangan bo‘ladi.

Ushbu ishda PQ quvursimon reaktorida issiqlik uzatish jarayoni simulyatsiya qilinadi. PQ quvursimon reaktorini modellashtirish va issiqlik jarayonlarini vizualizatsiya qilish uchun jarayon bosqichlarini o‘z ichiga olgan blok-sxema ishlab chiqilgan (2-rasm).



2-rasm. PQ quvursimon reaktorini modellashtirish jarayoni uchun blok-sxema.

Ishlab chiqilgan blok-sxema (2-rasm) Comsol Multiphysics dasturi yordamida PQ quvursimon reaktorini modellashtirish jarayonini tavsiflaydi. Blok-sxema vertikal holatda joylashtirilgan va sakkizta blokdan iborat bo‘lib, bu jarayon ketma-ketligini ifodalaydi.

- **Fizikani sozlash:** ushbu bosqich issiqlik o‘tkazuvchanligi, zichlik va dinamik yopishqoqlik kabi modelda ishlatiladigan fizik parametrlarni aniqlashni o‘z ichiga oladi.
- **Parametrlarni aniqlash:** bu erda modelning o‘ziga xos parametrlari, masalan, boshlang‘ich va chegara shartlari aniqlanadi.
- **Geometriyani yaratish:** ushbu bosqichda quvursimon reaktorning 3D grafigi yaratiladi.
- **Tenglamalarni aniqlash (PDE):** bu erda issiqlik va massa uzatish kabi reaktor ichidagi fizik jarayonlarni tavsiflovchi tenglamalar ishlab chiqilgan.
- **Yakuniy model:** barcha parametrlar va tenglamalarni aniqlagandan so‘ng, raqamli tajribalarni o‘tkazish uchun ishlatilishi mumkin bo‘lgan yakuniy model olinadi.
- **Jarayon parametrlarini sozlash:** ushbu bosqichda model tenglamalarini raqamli yechish uchun panjara aniqlanadi.
- **Natija olish:** bu erda model tenglamalari tanlangan raqamli usul yordamida yechiladi.
- **Natijalarni vizuallashtirish:** simulyatsiya natijalari tahlil qilinadi va quvur reaktoridagi piroliz jarayoni haqida foydali ma’lumot olish uchun talqin qilinadi.

Ushbu blok-sxema PQ quvursimon reaktorini modellashtirish, shuningdek, piroliz jarayonini tadqiq qilish va optimallashtirish uchun foydali vosita bo‘lib, tadqiqotchilarga turli sharoitlarda tizimning xatti-harakatlarini bashorat qilish va maksimal samaradorlik uchun optimal parametrlarni aniqlash imkonini beradi.

Comsol Multiphysics dasturi yordamida alohida va o‘zaro bog‘liq fizik jarayonlarni tahlil qilish mumkin. U geometrik modelni qurish, materiallar xususiyatlarini belgilash va jarayon fizikasini

tavsiflashdan tortib, olingan modellashtirish natijalarini hisoblash va tahlil qilishgacha bo‘lgan barcha bosqichlarni bosib o‘tishga imkon beradigan modellarni ishlab chiqish muhitini o‘z ichiga oladi.

Modelni ishlab chiqqandan so‘ng, uning asosida dasturlarni ishlab chiqish muhitida keng doiradagi foydalanuvchilar, shu jumladan hamkasblar, mijozlar va minimal raqamli modellashtirish tajribasiga ega odamlar tomonidan odatiy jatayonlarni hal qilish uchun maxsus interfeysga ega modellashtirish dasturini yaratish mumkin.

Comsol Multiphysics yordamida modellashtirishning afzalligi foydalanuvchi interfeysining soddaligi bo‘lib, bu murakkab kompyuter kodlash hajmini kamaytirishga yordam beradi. Comsol Multiphysicsning yana bir afzalligi - bu murakkab geometriyani modellashtirish va turli xil fizik jarayonlarni birlashtirishda moslashuvchanligidir. Comsol Multiphysicsda turli xil miqdorlarni o‘rganishni osonlashtiradigan ko‘plab o‘rnatilgan ma‘lumotlarni qayta ishlash vositalari mavjud [13].

Blok-sxemada ko‘rsatilgan barcha modellashtirish jarayonlari Comsol Multiphysics 6.1 dasturida 2,40 GGs chastotali, 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5 protsessorga, 16 GB tezkor xotira va 64 bitli operatsion tizimga ega, kompyuterda amalga oshirildi.

Ushbu tadqiqot uchun ikki xil biomassa tanlandi: 1) makkajo‘xori so‘tasi, 2) bug‘doy somoni. O‘zbekistonda har yili makkajo‘xori katta hajmda yetishtiriladi, 67,5-68,8 s/ga somon hosili olinadi [14]. Makkajo‘xori so‘tasi yuqori bioneft hosildorligiga ega [15].

Makkajo‘xori so‘tasining issiqlik o‘tkazuvchanligi o‘rganildi va materialning o‘ziga xos sharoitlari va tayyorlanishiga qarab farq qilishi aniqlandi. Tadqiqotlarga ko‘ra, makkajo‘xori boshloqlarining issiqlik o‘tkazuvchanligi taxminan 0,096 Wt/MKni tashkil qiladi. Bu qiymat makkajo‘xori so‘talari nisbatan past issiqlik o‘tkazuvchanligiga ega ekanligini ko‘rsatadi, ular issiqlik izolyatsiyalovchi materiallar sifatida ishlatishga yaroqlidir. Makkajo‘xori so‘talarining zichligi taxminan 282,38 kg/m<sup>3</sup>ni tashkil qiladi. Bu qiymat turli ilovalar uchun muhim fizik xususiyati bo‘lgan o‘rtacha massa zichligini ifodalaydi [16]. Somonning o‘tkazuvchanligi odatda xona haroratida

0,03 dan 0,05 Wt/(m·K) gacha. Ushbu qiymat shartlarga va ko‘rib chiqilayotgan somonning o‘ziga xos turiga qarab o‘zgarishi mumkin. Somonning zichligi o‘simlik turi, namlik miqdori va uni qanday siqish kerakligi kabi omillarga qarab farq qilishi mumkin. O‘rtacha, somonning zichligi odatda 80 kg/m<sup>3</sup> dan 150 kg / m<sup>3</sup> gacha. Bug‘doy somonining zichligi 80 kg/m<sup>3</sup> dan 100 kg/m<sup>3</sup>gacha bo‘lishi mumkin. O‘rtacha doimiy bosimdagi somonning issiqlik sig‘imi taxminan 1,5-2,0 J/(g·K) yoki 1 500-2 000 J/ (kg·K) ni tashkil qiladi [16, 17].

### Natijalar

Comsol Multiphysics tomonidan ishlab chiqarilgan makkajo‘xori va bug‘doy somoni kabi biomassaning piroliz jarayonini 10÷60 min vaqt oralig‘ida, 500÷700 °C isitish haroratida modellashtirildi va natijalar olindi (3-rasm). Biomassani dasturdagi materiallar qatoriga kiritish uchun, Material kontekst meyusidagi Blank material punkti orqali modellashtirish jarayonida ishlatiladigan biomassalarning fizik-texnik xususiyatlari kiritiladi (3-rasm). Dastur simulyatsiya davomida ushbu xususiyatlarni inobatga olgan holda jarayonni modellashtiradi.

Material Contents			
Property	Variable	Value	Unit
Heat capacity at constant pres...	Cp	C_5_moi...	J/(kg·K)
Thermal conductivity	k_iso ;...	0.096	W/(m·K)
Density	rho	282.38	kg/m <sup>3</sup>

a)

Material Contents				
Property	Variable	Value	Unit	
Thermal conductivity	k_iso ;...	0.4	W/(m·K)	
Density	rho	90	kg/m <sup>3</sup>	
Heat capacity at constant pressure	Cp	1500	J/(kg·K)	

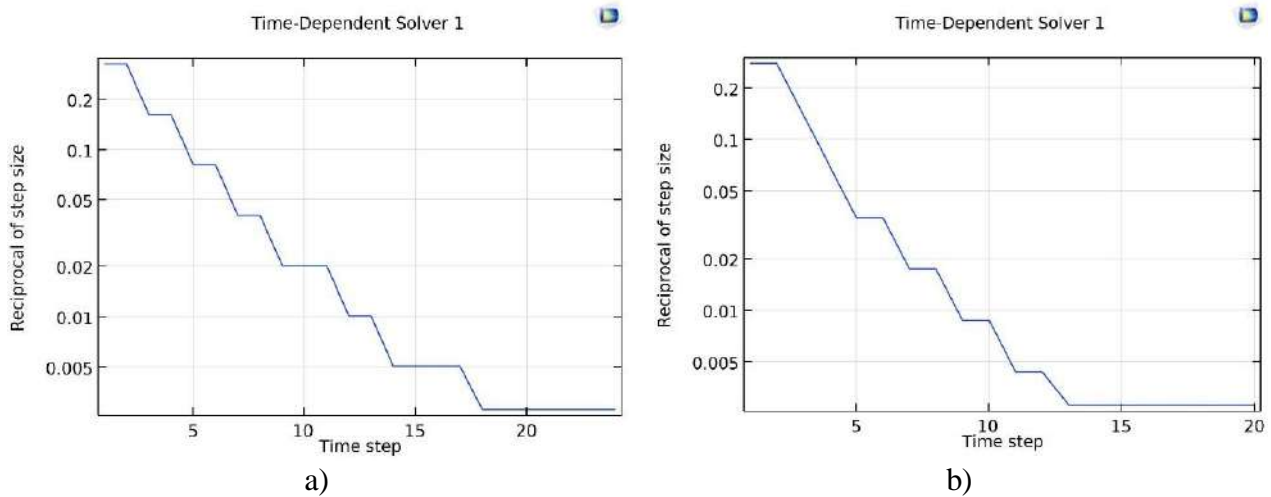
b)

3-rasm. Biomassalarning fizik-texnik xususiyatlarini o'rnatish

a) bug'doy somoni; b) makkajo'xori so'tasi.

Comsol Multiphysics dasturida makkajo'xori so'tasi va bug'doy somoni kabi biomassalarning piroliz jarayonini modellashtirish asosida bir qator natijalar olindi.

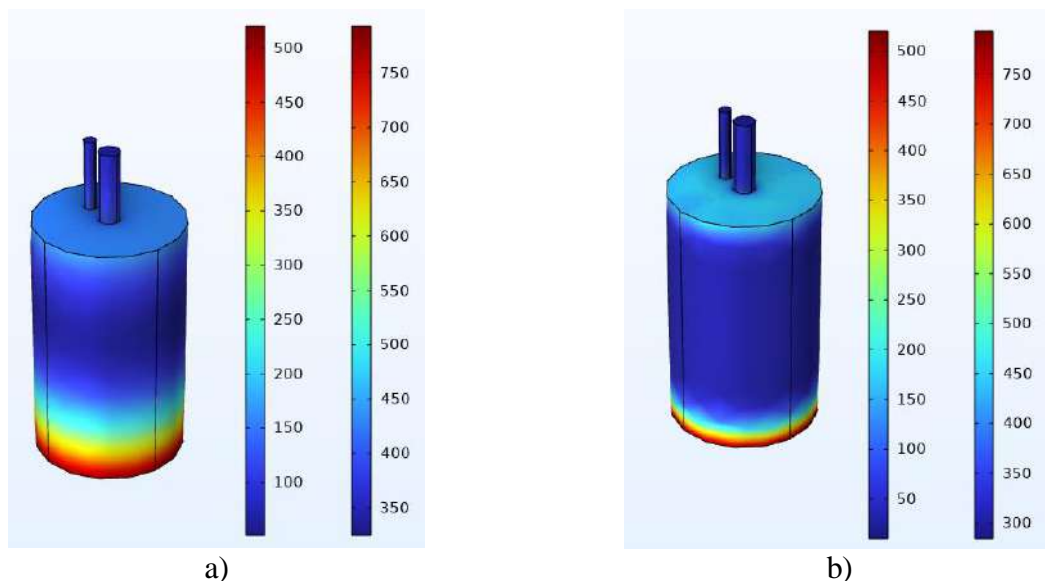
Grafiklarda (4-rasm (a))  $x$  o'qi vaqt bosqichi va  $y$  o'qi reaksiya tezligi sifatida belgilangan. Chiziq 0-bosqichda yuqori reaksiya tezligidan boshlanadi va 18-bosqichga qarab barqaror ravishda pasayadi. Reaksiya tezligi 0-bosqichda taxminan 0,2 dan 18-bosqichda taxminan 0,005 gacha kamayadi. Bu shuni ko'rsatadiki, vaqt o'tishi bilan piroliz jarayonida parchalanish reaksiyasi tezligi pasayadi.



4-rasm. Vaqt o'tishi bilan reaksiya tezligining o'zgarishi:

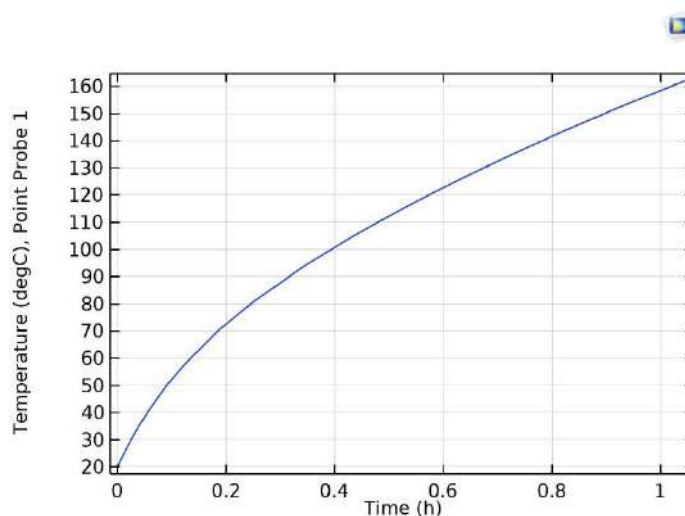
Bug'doy somoni; b) makkajo'xori so'tasi.

Vaqt (60 daqiqa) o'tishi bilan quvursimon reaktor uzunligi bo'ylab harorat o'zgarishi kuzatildi (5-rasm). Reaktor uzunligi oshgani sayin harorat pasayadi, bu piroliz jarayoni bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Natijalardan ko'rinib turibdiki, bug'doy somoniga qaraganda, degradatsiya jarayoniga kelishi uchun makkajo'xori so'tasi uchun yuqoriroq harorat talab qilinadi. Jarayonning boshida, harorat eng yuqori bo'lganida, uzun zanjirli uglevodorodlar molekulyar og'irligi past bo'lgan molekullarga parchalanadi. Bu mavjud infratuzilmada yanada qayta ishlanishi mumkin bo'lgan mahsulotlarning shakllanishiga olib keladi.



5-rasm. Reaktor bo'ylab haroratni o'zgarishi:

bug'doy somoni; b) makkajo'xori so'tasi.



6-rasm. Reaktorning yuqori nuqtasida harorat o'zgarishi

Grafikda (6-rasm) 60 daqiqadan so'ng reaktorning yuqori nuqtasidagi harorat 150-160 °C bo'lishini kuzatishimiz mumkin.

Shuni ta'kidlash kerakki, bosim, oqim tezligi va aralashmaning tarkibi kabi jarayonning o'ziga xos shartlari va parametrlari piroliz jarayoniga va shuning uchun quvur reaktoridagi harorat profiliga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin. Aniqroq tahlil qilish uchun qo'shimcha ma'lumotlarni olish mumkin.

### Munozara

Comsol Multiphysics dasturidan foydalangan holda ishlab chiqilgan PQ quvursimon reaktor modelida 500÷700 °C haroratda makkajo'xori so'talari va bug'doy somoni kabi o'simlik biomassasining piroliz kinetikasini o'rganish bo'yicha tajriba natijalari harorat va jarayon tezligining o'zgarishi va biomassaning degradatsiyasi jarayonining 3D tasvirini ifodalaydi. Piroliz jarayonida issiqlik o'tkazuvchanligini o'rganish modeli yuklangan biomassaning piroliz reaktoriga issiqlik o'tkazuvchanligi, zichligi va dinamik yopishqoqligini o'z ichiga oladi. Ushbu termofizik xususiyatlar piroliz samaradorligini aniqlashda muhim rol o'ynaydi va Comsol Multiphysics dasturi yordamida aniq modellashtirilish imkonini beradi. Tajriba natijalari Selsiy harorat shkalasi sifatida taqdim etilgan va modellar piroliz jarayonida reaktor ichidagi harorat taqsimotini tasavvur qilish uchun ishlatilgan.

### Xulosa

Comsol multiphysics dasturidan foydalangan holda jarayonni izosuratlar shaklida o'rganish natijasida olingan modellar, reaktorning vertikal qismidagi uch o'lchamli kesim analogi hisoblanadi. Izosuratlar kompyuter grafikasi yordamida chiqariladi va hisoblash termodinamikasida tasvirlash usullari sifatida ishlatiladi. Izotermik pirolizda organik moddalarning parchalanishi 10 daqiqada 250 dan 350 °C gacha bo'lgan. Makkajo'xori so'talarining maksimal massa yo'qotishi 61,92% ni tashkil qiladi va 180 dan 360 °C gacha bo'lgan harorat oralig'ida kuzatildi.

Ushbu modeldan kelajakda rekuperativ issiqlik almashtirgichli PQni tadqiq qilish uchun foydalaniladi.

### Adabiyotlar

[1] International Energy Agency. Renewables Information: Overview. IEA. 2020. <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview/>

[2]

- 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).
- [3] S. Zafar, Bioenergy in Southeast Asia: Perspectives. BioEnergy Consult, 2020.
- [4] C. Jaroenkhasemmesuk, N. Tippayawong, Thermal degradation kinetics of sawdust at intermediate heating rates, Appl. Therm. Eng., 103 (2016), pp. 170-176.
- [5] COMSOL Multiphysics® Simulation Software: Understand, Predict, and Optimize Real-World Designs, Devices, and Processes with Simulation. <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>.
- [6] Simulating Heat Transfer in Layered Materials. <https://www.comsol.com/support/learning-center/article/41591>
- [7] Z. Kaczor, Z. Buliński, S. Werle: Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review, Renewable Energy, Volume 159, Pages 427-443, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.110>, (2020).
- [8] 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).
- [9] E. J. Kansa et al. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection, Combustion and Flame, Volume 29, 1977, Pages 311-324, ISSN 0010-2180, [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90121-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90121-3).
- [10] C. Di Blasi et al. Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 19, Issue 1, 1993, Pages 71-104, ISSN 0360-1285, [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90022-7)
- [11] Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Vasilevich S.V., Malko M.V. Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor. Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.;64(1):51-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64>, (2021).
- [12] C. K. Lee et al., Charring pyrolysis of wood in fires by laser simulation, Symposium (International) on Combustion, Volume 16, Issue 1, 1977, Pages 1459-1470, ISSN 0082-0784, [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80428-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80428-1)
- [13] Comsol Multiphysics User's Guide Comsol AB, Stockholm, Sweden Version 5.0., (2014). Tubular pyrolysis reactor: description, operating principle and application. A source:<https://rospatenta.ru/i/trubcatyi-reaktor-piroliza-opisanie-princip-raboty-i-primeneniye>.
- [14] Абдусаматов С. Оптимальные сроки и нормы осенней посадки пшеницы // Сборник исторических и научных статей, посвященных 70-летию Ферганского филиала Узпит. – Фергана, 1997. – стр. 81-83.
- [15] 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).
- [16] Mamatkulova S.: Improvement of the GIS map of the potential of biomass for the development of bioenergy production in the Republic of Uzbekistan. AIP Conference Proceedings AIP Publishing LLC 2432 1, (2022).
- [17] Doris Laudert. Mythos Baum. — 7. — München: BLV, — С. 57-63. — ISBN 978-3-8354-0557-8, (2009).