



UO‘K: 662.76:536.24:519.63

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.16](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.16)**PIROLIZ QURILMASI REAKTORIGI ISSIQLIK JARAYONLARINI
MODELLASHTIRISH**

Pardayev Zokir Elmurodovich - texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori, dotsent,
<https://orcid.org/0009-0006-3596-7344> e-mail: z.pardayev986@gmail.com

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Maqolada piroliz qurilmasi reaktorining spiralsimon qizdirish quvurida kechadigan turbulent oqim va issiqlik almashinuvi jarayonlarini matematik modellashtirish natijalari keltirilgan.

Usul va materiallar. Tadqiqot ishida matematik modellashtirishda turbulentlikning kinetik energiyasi va uning dissipatsiyasini hisobga oluvchi k- ϵ modelidan foydalanilgan. Hisoblashlar COMSOL Multiphysics 6.1 dasturida bajarilgan.

Natijalar. Sonli modellashtirish natijasida bug' oqimining kontur bo'ylab harakatlanishida harorat, tezlik va bosimning taqsimlanish xususiyatlari aniqlangan. Hisoblash natijalariga ko'ra, bug' harorati 812 K dan 574 K gacha, oqim tezligi esa 3,4 m/s dan 1,2 m/s gacha pasayishi kuzatilgan.

Xulosa. Olingan natijalardan piroliz reaktorlarining qizdirish konturlaridagi issiqlik-gidrodinamik jarayonlarni tahlil qilish va konstruktiv parametrlarini takomillashtirishda foydalanish mumkin.

Kalit so'zlar: piroliz reaktori, issiqlik almashinuvi, turbulent oqim, matematik modellashtirish, spiralsimon quvur, bug' oqimi, harorat taqsimoti, bosim yo'qotilishi, issiqlik-gidrodinamik jarayonlar.

Дата поступления: 01.07.2026. После обработки: 20.08.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Pardayev Z.E. Mathematical Modeling of Thermal Processes in a Pyrolysis Reactor. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 123-130.

УДК: 662.76:536.24:519.63

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В
РЕАКТОРЕ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ**

Пардаев Зокир Элмуродович - PhD, доцент

<https://orcid.org/0009-0006-3596-7344> e-mail: z.pardayev986@gmail.com

Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. В статье представлены результаты математического моделирования турбулентного течения и процессов теплообмена в спиральном нагревательном трубопроводе реактора пиролизной установки.

Материалы и методы. Для математического моделирования использована модель турбулентности k- ϵ , учитывающая кинетическую энергию турбулентности и скорость её диссипации. Численное моделирование выполнено с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.1.

Результаты. В результате численного моделирования определены закономерности распределения температуры, скорости и давления потока водяного пара при его движении по нагревательному контуру. Установлено, что температура пара снижается с 812 до 574 K, а скорость потока уменьшается с 3,4 до 1,2 м/с.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для анализа теплогидродинамических процессов в нагревательных контурах пиролизных реакторов, а также для совершенствования их конструктивных параметров.



Ключевые слова: пиролизный реактор, теплообмен, турбулентное течение, математическое моделирование, спиральный трубопровод, поток водяного пара, распределение температуры, потери давления, теплогидродинамические процессы.

UDC: 662.76:536.24:519.63

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES IN A PYROLYSIS REACTOR

Zokir Elmurodovich Pardaev - PhD, Associate Professor

<https://orcid.org/0009-0006-3596-7344> e-mail: z.pardayev986@gmail.com

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. This paper presents the results of mathematical modeling of turbulent flow and heat transfer processes in the spiral heating tube of a pyrolysis reactor.

Materials and Methods. The k - ε turbulence model, which accounts for turbulent kinetic energy and its dissipation rate, was employed for mathematical modeling. Numerical simulations were performed using COMSOL Multiphysics 6.1 software.

Results. Numerical simulations were conducted to investigate the distributions of temperature, velocity, and pressure of the steam flow along the heating circuit. The results showed that the steam temperature decreased from 812 to 574 K, while the flow velocity decreased from 3.4 to 1.2 m/s.

Conclusion. The obtained results can be used to analyze thermohydrodynamic processes in the heating circuits of pyrolysis reactors and to improve their structural design parameters.

Keywords: pyrolysis reactor, heat transfer, turbulent flow, mathematical modeling, spiral tube, steam flow, temperature distribution, pressure loss, thermohydrodynamic processes.

Kirish

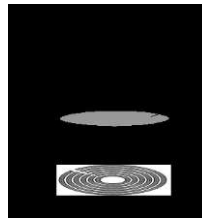
Piroliz qurilmasining reaktorida harakatdagi oqimdan yuza orqali tinch turgan jismga issiqlik berish jarayoni amalga oshiriladi.

Bug' oqimi bosh bug' quvuridan THRSQ ga 5,56 kg/s (20 t/s) sarf, 3,5-7,0 MPa bosim va 540 °C atrofidagi harorat bilan uzatiladi. Bosim va harorat rostlash asboblari va ventillar orqali bug' oqimidan 1,39 kg/s sarf oqimi piroliz qurilmasiga ajratib olinadi, piroliz qurilmasining reaktoriga $d=32$ mm quvur diametri o'zgartirilmasdan beriladi va 0,7 MPa bosim bilan harorati 540 dan 250 °C ga pasayish bilan qizdirish yuzasidan oqib o'tadi.

Usul va materiallar

Jarayonning matematik bayonini yoritish uchun shuni aniqlashtirib olish zarurki, issiqlik almashinishi oqimning kinetik energiyasidan foydalanish bilan amalga oshadi, bunda issiqlikning bir muhitdan ikkinchi muhitga uzatilishi dissipatsiya orqali sodir bo'ladi. Oqim $d=32$ mm quvur diametri chegarasida 1,39 kg/s sarf bilan turbulent tartibda oqadi. Bu tabiiy jarayon hisoblanadi. Turbulent oqim sharoitida bosim, harorat va tezlik o'zgarishlarini tadqiqot qilishni talab qilinadi. Bu jarayonda kinetik energiya o'zgarishini va turbulent oqim sharoitida turbulentlik energiyasining dissipatsiyasi, ya'ni tarqalish tezligini aniqlash masalaning yechimi bo'lishi mumkin. Turbulent oqimlar uchun k - ε modeli asosida oqim parametrlarining o'zgarishini modellashtiramiz [1,2]. k - ε modeli turbulent oqimlar uchun ikki tenglamali differensial modellar sinfiga kiradi. Ushbu modelning asosiy tavsifi shundan iboratki, bu yerda o'rtacha pulsatsion tavsifnomalar uchun ikkita qo'shimcha differensial uzatish tenglamalari tuziladi, keyin bu tenglamalar orqali turbulent qovushqoqlik koeffitsiyenti μ_t aniqlanadi.

Reaktorning tuzilishi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. Piroliz qurilmasining reaktori konstruksiyasi.

1-yuklash qopqog'i; 2-metall list ($d=66$ mm, $\delta=8$ mm); 3-tozalash qopqog'i; 4-qizdiruvchi bug' kirishi; 5-spiralsimon quvur (qizdirish yuzasi, $d=32$ mm, $l=6100$ mm); 6-bug' chiqish quvuri.

Qizdiruvchi bug' 4 reaktor korpusining quyi qismidan kiritiladi. Qizdirish yuzasi 5 spiralsimon o'ram ko'rinishida tayyorlangan.

Piroliz qurilmasining reaktori konstruksiyasi silindrsimon shaklda, balandligi $h=1000$ mm, diametri $d=700$ mm o'lchamga ega, korpus yuqori qismidan xom ashyoni yuklash uchun qopqog' 1, va yon tomonida tozalash uchun mo'ljallangan qopqog' 3, qizdiruvchi bug'ning kirishi 4 va chiqishi 6 quvurlari bilan ta'minlangan.

Qizdirish yuzasi, yuqorida ta'kidlanganidek, korpusning pastki tubida spiralsimon o'ram 5 ko'rinishida joylashtirilgan, xom-ashyo qoldig'ini qizdiruvchi quvur ichiga tushishini oldini olish uchun uning ustiga metall list 2 kiritiladi.

Modellashtirish jarayonida turbulent qovushqoqlikni aniqlash uchun ikkita skalyar parametr ko'rib chiqiladi: turbulent oqim rejimining solishtirma kinetik energiyasi [3,4].

$$k = \frac{1}{2} \cdot \overline{v' \cdot v'} \quad (1)$$

va turbulent energiyaning qovushqoq tarqalish tezligi:

$$\varepsilon = 2v \cdot t \cdot r \cdot (\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T). \quad (2)$$

Oqim turbulentligining kinetik energiya tenglamasini ketma-ket yaqinlashish usuli bilan, (1) formulani hisobga olgan holda quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = \overline{v' \cdot v'} \text{grad} \vec{v}' + \text{div} \cdot \left(v \text{grad} k - \vec{v}' \left(\frac{p'}{p} + \frac{1}{2} \vec{v}' \cdot \vec{v}' \right) \right) - \\ - 2vtr \cdot (\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T) \end{aligned} \quad (3)$$

Tuzilishiga ko'ra bu tenglama standart o'tkazish tenglamasi hisoblanadi.

(2) tenglamani (3) ifodaga tadbiq qilinsa

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = P_k + \text{div} \cdot \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right) - \varepsilon, \quad (4)$$

bu yerda v_t – turbulent qovushqoqlikning kinematik koeffitsiyenti, σ_k – o'lchamsiz empirik konstanta;

$$P_k = -T_{tr} \cdot \text{grad} \vec{v}, \quad (5)$$

bunda $T_{tr} = \frac{T_t}{\rho}$ – zichlikka meyorlangan turbulent kuchlanish tenzori, shuningdek u (3) va (4)larni taqqoslashdan $T_{tr} = -\overline{v' \cdot v'}$ ga teng bo'ladi. Shunda

$$T_{tr} = \frac{T_t}{\rho} = \frac{2 \cdot \mu_t \cdot D - \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot k \cdot I}{\rho} = \left[v_t = \frac{\mu_t}{\rho} \right] = 2 \cdot v_t \cdot D - \frac{2}{3} \cdot k \cdot I$$

dan $D = \frac{1}{2} \cdot (\text{grad} \vec{v} \cdot (\text{grad} \vec{v})^T)$ ekanligini hisobga olib

$$T_{tr} = v_t \cdot (\text{grad} \vec{v} \cdot (\text{grad} \vec{v})^T) - \frac{2}{3} \cdot k \cdot I. \quad (6)$$

Modelning o'rtacha parametri aniqlangan turbulent qovushqoqlikning kinematik koeffitsiyenti uchun, Kolmogorov-Prandtl gipotezasi ifodasidan foydalaniladi:

$$v_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (7)$$

bu yerda C_μ – o'lchamsiz empirik o'zgarmas son [2].

Devoroldi oqimlarini hisoblash uchun kichik Reynolds raqamli modellari yoki devoroldi funksiyalari kiritilgan k - ε model versiyalari qo'llaniladi, ya'ni ushbu modellarda devorlarning



turbulentlikka ta'siri uchun javob beradigan tenglamalarga qo'shimcha funksiyalar kiritilgan. Umuman olganda, ko'pgina kichik Reynolds raqamli k - ε modellari quyidagicha yozilishi mumkin [3,5].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v} = P_k + \text{div} \cdot \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right) - \varepsilon - f_k, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad} \varepsilon \cdot \vec{v} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k + \text{div} \cdot \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad} \varepsilon \right) - C_2 \cdot f_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} - f_\varepsilon, \quad (9)$$

$$v_t = C_\mu \cdot f_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

Bu tenglamalarga k va ε ga bog'liq bo'lgan to'rtta devoroldi funksiyalari - $f_k, f_2, f_\varepsilon, f_\mu$ kiritilgan.

Ko'p qo'llaniladigan Launder-Sharmaning kichik Reynolds raqamli k - ε modelida bu funksiyalar quyidagi shaklda beriladi:

$$f_k = 2 \cdot v \cdot (\text{grad} \sqrt{k} \cdot \text{grad} \sqrt{k}), \quad (11)$$

$$f_\varepsilon = -2 \cdot v \cdot v_t \cdot (\text{grad} \cdot (\text{grad} \vec{v}) \cdot \dots \cdot \text{grad} \cdot (\text{grad} \vec{v})), \quad (12)$$

$$f_\mu = e^{\frac{3,4}{(1+0,02 \cdot Re_t)^2}}, \quad (13)$$

$$f_2 = 1 - 0,3 \cdot e^{-Re_t^2}. \quad (14)$$

(12) tenglamadagi “...” belgisi uchinchi darajali tenzorlarning skalyar hosilasini bildiradi.

Mahalliy turbulent Reynolds sonini k va ε qiymatlari orqali aniqlash mumkin:

$$Re_t = \frac{k^2}{v\varepsilon}. \quad (15)$$

Natijalar va muxokama

k - ε modelining afzalliklari erkin kesishuvchi oqimlarini hisoblashda yuqori aniqlikni o'z ichiga oladi. Ular juda universal bo'lib, qo'shimcha parametrlar o'rnatishni talab qilmaydi. Biroq, ularni devorga yaqin hududlarda qo'llash bilan bog'liq qiyinchiliklar tadqiqotchilarni tobora ko'proq yangi modellarni ixtiro qilishga majbur qilmoqda. Biroq, bugungi kunga qadar Reynolds o'rtacha konsepsiyasiga asoslangan modellar orasida hech qanday afzalliklar kuzatilmadi, chunki "universal" turbulentlik modeli mavjud emas [6,7].

k - ε modelini tuzish va piroliz reaktorining qizdirish quvur bog'lamida harorat, bosim va tezlik o'zgarishlarini tadqiqot qilish uchun “Turbulent issiqlik berish” modelidan foydalanildi. Modellashtirish masalasini yechish uchun chegara shartlari quyidagicha qabul qilinadi [8].

1. Statik holat uchun tezlik o'zgarishi $w_{\max}=3,4$ m/s va $w_{\min}=0,21$ m/s oralig'ida, ya'ni $3,4 < w_k < 0,21$ ga ko'ra hisoblanadi. Dinamik jarayonda bu oraliq ancha qisqa ekanligi kuzatiladi $3,4 < w_\varepsilon < 0,25$.

2. Bosim o'zgarishi turbulent issiqlik berishda 1 metr uzunlikdagi o'ram uchun 3,9 kPani tashkil qiladi. Boshlang'ich shart bosim parametri uchun (tezlik yuqori bo'lganda) pasayishning eng kichik qiymati sifatida 0,15 kPa qabul qilindi.

3. Harorat o'zgarishi uchun chegara shartiga ko'ra bu parametr asosiy o'zgaruvchi bo'lib hisoblanadi va hisoblash ishlari uchun uning qiymati o'zgarishi $813 \text{ K} < T_s < 523 \text{ K}$ ni tashqil qiladi.

4. Turbulent jadallik 0,1.

5. Energetik dissipatsiya (tarqalish) qiymati $\varepsilon=0,1$.

6. Qo'shimcha kattaliklar:

Bug'ning kirishidagi issiqlik fizikaviy parametrlari $p_0=7,0$ MPa da - $t_s=285,8$ °C; $v''=0,02734$ m³/kg; $h''=2771,4$ kJ/kg; $s''=5,8126$ kJ/(kg*K); $t_0=540$ °C da $v=0,05116$ m³/kg; $h=3506,4$ kJ/kg; $s=6,9198$ kJ/(kg*K); $c_m=2,385$ kJ/(kg*K); Bug'ning chiqishidagi issiqlik fizikaviy parametrlari $p_0=0,7$ ata da - $t_s=171,4$ °C; $v''=0,3026$ m³/kg; $h''=2760,5$ kJ/kg; $s''=6,7215$ kJ/(kg*K); $t_0=250$ °C da $v=0,3742$ m³/kg; $h=2953,5$ kJ/kg; $s=7,1366$ kJ/(kg*K); $c_m=2,131$ kJ/(kg*K); $c_p=2,131$ kJ/(kg*K); $\lambda=38,2$ W/(m*K); $\mu=18,74$ m²/s; $Pr=1,34$

7. Dasturlash tili – COMSOL Multiphysics-6.1.

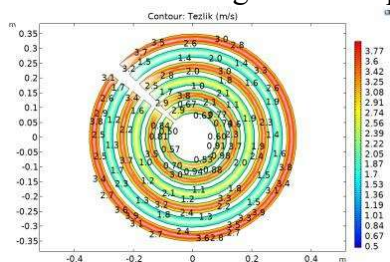


Spiralsimon quvur o'ramini bitta kontur deb hisoblab, COMSOL Multiphysics-6.1 dasturi yordamida modellashirish natijalarini olamiz. Chegara shartlarini berganimizda tezlikning o'zgarishi 1-rasmdagi kabi amalga oshiriladi.

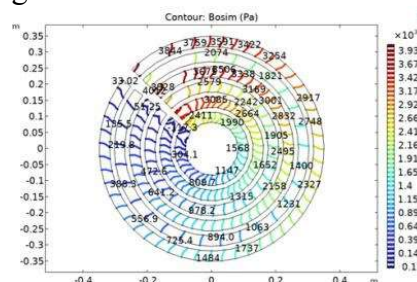
Bu yerda oqim turbulentligining k- ϵ modelini tuzilishida berilgan parametrlar o'ramning kirish va qaytish liniyalariga egaligini, ya'ni parallel quvurlar o'ramidan iborat ekanligini yodda tutish kerak. Chunki diametri 700 mm bo'lgan birinchi xalqadan boshlangan oqim harakat markazga diametri 200 mm bo'lgan oxirgi xalqagacha boradi, keyin orqaga qaytib 580 mm diametrli xalqadan tashqariga chiqarib yuboriladi (2-rasm).

Burilish joylarining silliqiligi statik holatda tezlikning intensiv pasayishini hosil qiladi, lekin dinamik holatda, turbulentlikning doimiyligi tezlik o'zgarishi intensivligini kamayishiga sabab bo'ladi. Natijada tezlikning pasayish ko'rsatkichi qiymati kichiklashadi (2-rasm).

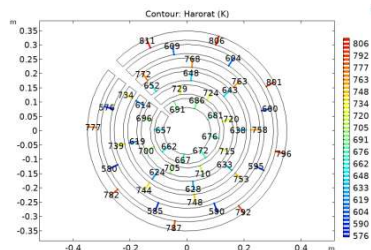
Bosimning o'zgarishi dinamik qovushqoqlik parametrini hisobga olgan holda, quvurning umumiy uzunligi va qaytar o'ramli spiral quvuri bo'ylab harakatlanish davomida 4 kPa atrofida o'zgaradi (3-rasm). Bosim o'zgarishi matematik modelning bayonida tenglamalar orqali yechiladi. Kelvin shkalasida hisoblangan harorat parametrining o'zgarish modelini 4-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Piroliz reaktorining qizdirish quvurida bug oqimi tezligini statik holatdagi o'zgarishi modeli.

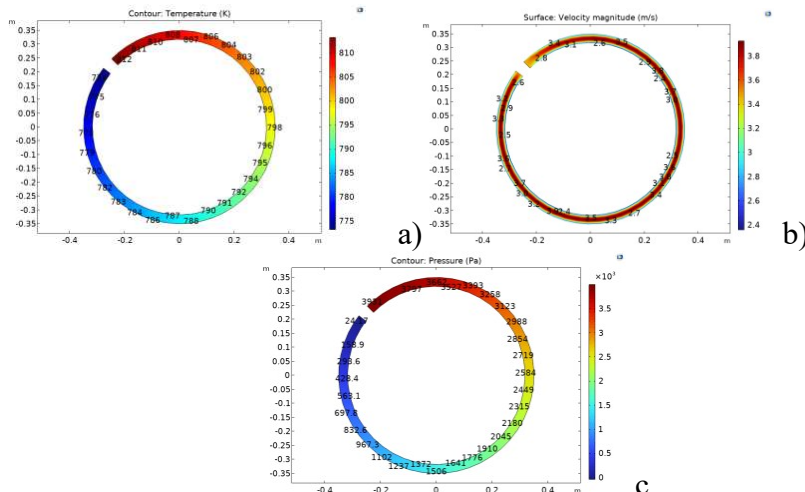


3-rasm. Qizdirish quvuri konturida bosim o'zgarishi modeli

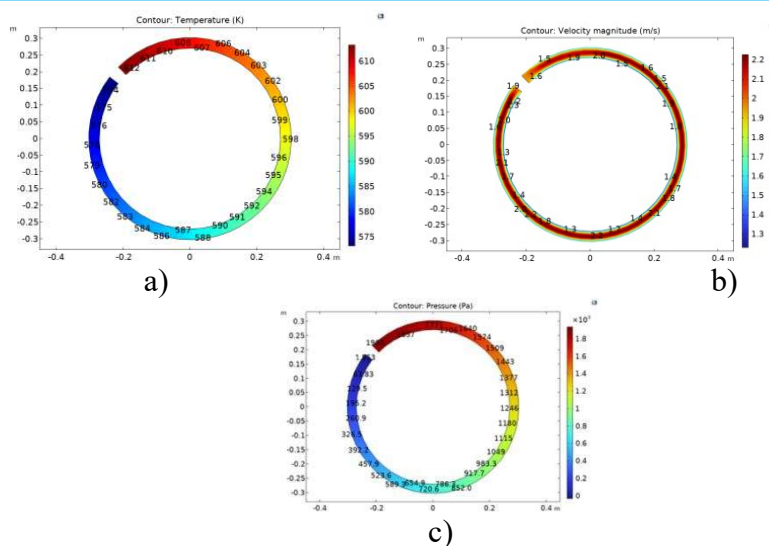


4-rasm. Qizdirish quvuri konturida harorat rejimi modeli.

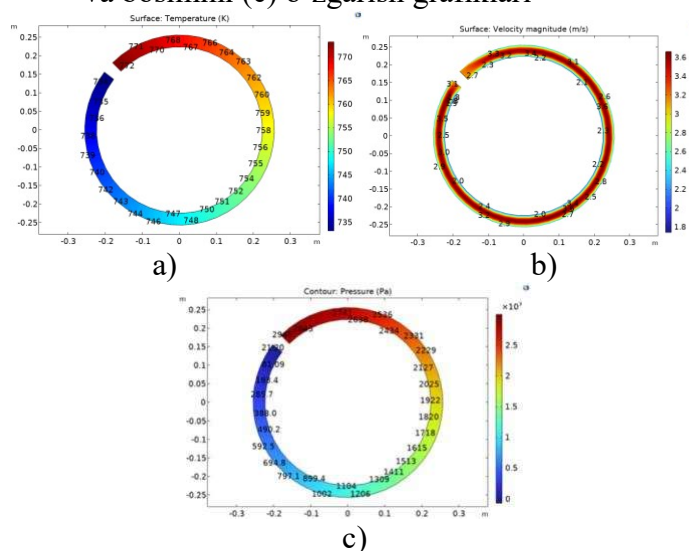
Rasmda kontur ichida devor oldi va oqim markazidagi umumiy issiqlik almashinish jarayonidagi harorat ko'rsatkichini 811 K dan 576 K gacha pasayishini ko'rish mumkin (5-10-rasmlar).



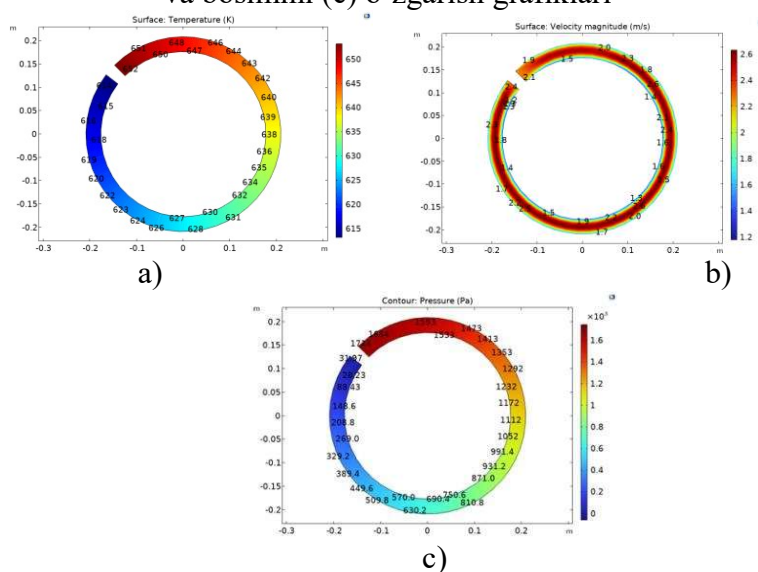
5-rasm. Qizdirish quvuri konturining 1-qator quvuri bo'ylab bug harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o'zgarish grafiklari.



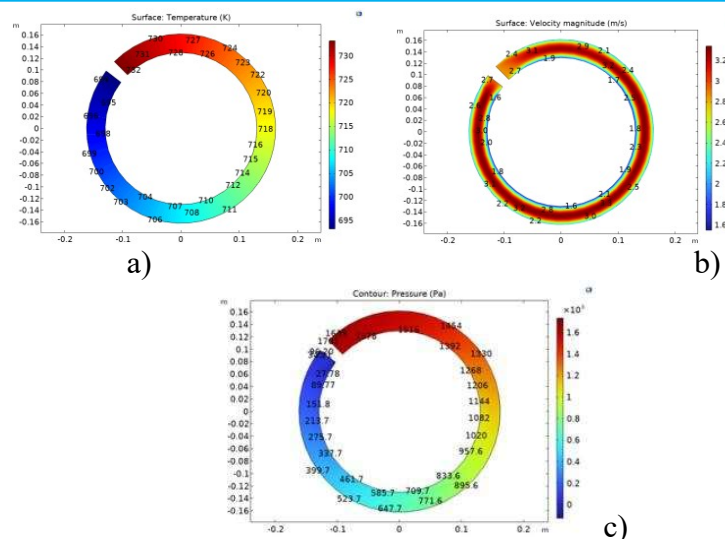
6-rasm. Qizdirish quvuri konturining 2-qator quvuri bo‘ylab bug‘ harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o‘zgarish grafiklari



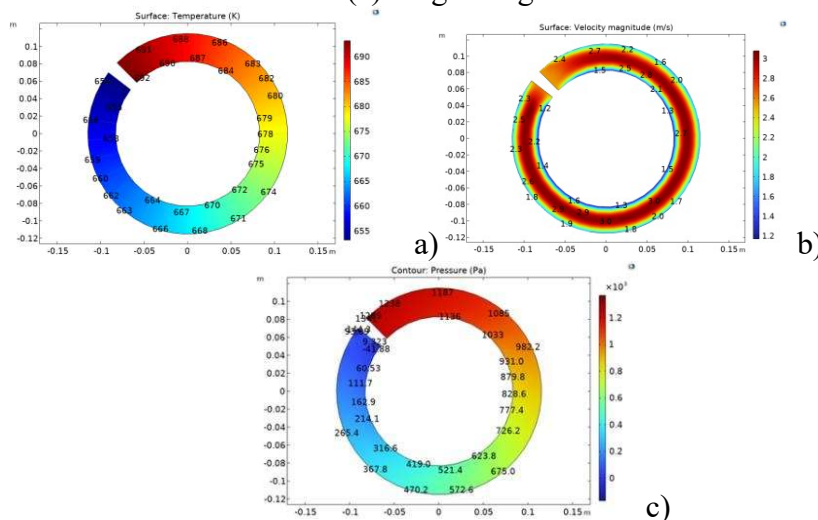
7-rasm. Qizdirish quvuri konturining 3-qator quvuri bo‘ylab bug‘ harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o‘zgarish grafiklari



8-rasm. Qizdirish quvuri konturining 4-qator quvuri bo‘ylab bug‘ harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o‘zgarish grafiklari.



9-rasm. Qizdirish quvuri konturining 5-qator quvuri bo‘ylab bug‘ harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o‘zgarish grafiklari.



10-rasm. Qizdirish quvuri konturining 6-qator quvuri bo‘ylab bug‘ harorati (a), tezligi (b) va bosimini (c) o‘zgarish grafiklari

Kontur berk tizimni hosil qilganligi sababli bosim pasayishi dinamik qovushqoqlik sharoitida ham kichik ko‘rsatkichga ega bo‘ladi. Quvur konturida harorat o‘zgarishi boshqa parametrlarga nisbatan katta qiymatga o‘zgaradi. Bizning holatimizda, qizdirish quvurlari konturida harorat pasayishining qiymati taxminan $\Delta t=310\text{ }^{\circ}\text{C}$ tashkil qiladi. Harorat o‘zgarishini chegara shartlarini belgilashda konturning konstruktiv tuzilishi, qalinligi, burilish darajasi, shuningdek model uchun kinetik energiya ko‘rsatkichi va uning tarqalish darajasi o‘zgarmas deb qabul qilinadi (5-rasm).

Xulosa

Piroliz reaktorining qizdirish yuzasi bir qatorli xalqasimon o‘ram shaklidagi konturdan iborat bo‘lib, konturdagi xalqasimon o‘ramlar soni 6 ta, quvurning umumiy uzunligi 6,1 m ni tashkil qiladi. Kontur reaktorning 0,76 metr diametrli silindrining tub qismiga joylashtirilgan. Uning ustidan reaktor devorlariga tegib turadigan list qoplamasi o‘rnatilgan (1-rasm).

Bug‘ oqimi konturdagi quvur xalqalarini 1-3-5-6-4-2 sxemasi bo‘yicha yuvib o‘tadi. COMSOL Multiphysics-6.1 dasturi vositasida olingan natijalarga ko‘ra, yuqorida keltirilgan 1-3-5-6-4-2 sxemaga asosan:

- xalqalar bo‘ylab harorat o‘zgarishi (812-774)-(772-734)-(732-694)-(692-651)-(651-614)-(612-574) K ga (3.16-3.21),a-rasm);

- xalqalar bo‘ylab tezlik o‘zgarishi (3,4-3,2)-(3,2-3,1)-(3,1-2,7)-(2,7-2,3)-(2,1-1,8)-(1,8-1,2) m/s ga (3.16-3.21),b-rasm);



- xalqalar bo'ylab bosim o'zgarishi (3,9-2,9)-(2,9-2,4)-(2,4-1,7)-(1,5-1,3)-(1,3-0,8)-(0,8-0,63) MPa ga teng (pasayadi) (3.16-3.21), c-rasm).

6-10 rasmlarda keltirilgan k-ε modeli natijalariga ko'ra harorat pasayishi o'rtacha 38 °C ni tashkil qiladi (38-38-38-41-37-38). Tezlik o'zgarishi esa 1-3-5 xalqa diametri torayib borishi bilan o'zgarmasdan 0,2 m/s turib, diametr kattalasha boshlagandan keyin, xususan 2 xalqada keskin pasayadi (0,6 m/s). Bosim pasayishi xalqaga kirgan oqim burilishni boshlashi bilan 1 xalqada 1 MPa ni tashkil qiladi, bosimning pasayish intensivligi 3,5,6,4 xalqalarda 0,5-0,4 MPa oralig'ida bo'lib, 2 xalqada 0,17 MPa ni tashkil qiladi. Bu holat egri chiziqli uyurmaviy harakat yo'nalishida bosim yo'qotilishi kattaroq bo'lishini ko'rsatadi.

Adabiyotlar

- [1]. Xujakulov S. M., Pardayev Z. E., Sherqulov B. G'. Kondensatsiyalanish jarayonlarini modellashtirishda k-ε modelidan foydalanish // Raqamli sanoat va avtomatlashtirish: texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishni boshqarish tizimlarida innovatsion yechimlar: Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – Qarshi, 2025. – 18–19 aprel. – B. 134–140.
- [2]. Кузьминов А. В., Лапин В. Н., Черный С. Г. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной (k-ε)-модели // Вычислительные технологии. – 2001. – Т. 6, № 5. – С. 73–86.
- [3]. Черный С. Г., Шашкин П. А., Грязин Ю. А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе (k-ε)-моделей // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4, № 2. – С. 74–94.
- [4]. Xiao M. et al. Direct numerical simulation of drag reduction in rotating pipe flow up to $Re_\tau \approx 3000$ // Journal of Fluid Mechanics. – 2024. – Vol. 996. – P. 1–17. – DOI: 10.1017/jfm.2024.811.
- [5]. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.
- [6]. Xuan A., Ren Z., Shen L. Accelerating simulations of turbulent flows over waves leveraging GPU parallelization // Computers & Mathematics with Applications. – 2025. – Vol. 183. – P. 1–19. – DOI: 10.1016/j.camwa.2025.01.031.
- [7]. Wang G. et al. Predicting turbulent flow over a backward-facing step using grid-adaptive simulation method // Aerospace Science and Technology. – 2025. – Vol. 158. – Art. 109913. – P. 1–16. – DOI: 10.1016/j.ast.2024.109913.
- [8]. Kadivar M., Garg H. Turbulent heat transfer over roughness: A comprehensive review of theories and turbulent flow structure // International Journal of Thermofluids. - 2025. - Vol. 26. - Art. 100967. - P. 1–37. - DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100967.
- [9]. Xujakulov S. M., Uzokov G. N., Pardayev Z. E., Almardanov H. A., Shodiyev T. O'. Qattiq materiallarni pirolizlash uchun qurilma: foydali modelga patent № FAP 2932. -05.02.2026.
- [10]. Pardaev Z. E., Khuzhakulov S. M., Toshmamatov B. M. Application of modern technologies in the development of energy-efficient technologies // American Journal of Applied Science and Technology. - 2025. - Vol. 5, Issue 2. - P. 56-60.
- [11]. Pardaev Z. E., Xujakulov S. M. Issiqlik elektr stansiyalaridagi bug' tashlamalari issiqligidan foydalanish usulini ishlab chiqish // Muqobil energetika ilmiy-texnik jurnali. - 2025. - № 1 (16). - B. 125-131.
- [12]. Khuzhakulov S., Pardaev Z., Muradov I., Shodiev T. Research of the physical basis of heat transfer in heat exchanger devices // Springer Proceedings in Physics. - 2025. - Vol. 318. - P. 167–182.
- [13]. Pardaev Z. E., Xujakulov S. M., Fayzullayev I. M. Issiqlik elektr markazining asosiy texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarini hisoblash // Muqobil energetika ilmiy-texnik jurnali. - 2025. - № 4 (21). - B. 100-106.
- [14]. Pardaev Z. E., Xujakulov S. M., Yusupov M. A. Muborak issiqlik elektr markazi sxemasiga tatbiq qilinadigan piroliz qurilmasining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari // Muqobil energetika ilmiy-texnik jurnali. - 2025. - № 4 (21). - B. 107-112.