

YADRO REAKTORLARINING ISSIQLIK GIDRAVLIKASIDAGI MUAMMOLARI VA YECHIMLARI

Mashhura Xayitbayeva Shavkat qizi

Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy tadqiqot instituti

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19452864>

Annotatsiya: Mazkur maqolada yadro reaktorlarida issiqlik gidravlikasi bilan bog'liq asosiy muammolar, xususan, issiqlik ajralishi, sovutish suvi oqimining gidrodinamik xususiyatlari, ikki fazali oqim rejimlari, kritik issiqlik oqimi holati hamda bosimdagi yo'qotishlar ilmiy-tahliliy asosda yoritilgan. Tadqiqotda issiqlik almashinuvi va gidrodinamik qarshilik o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash uchun nazariy tenglamalar, soddalashtirilgan hisobiy modellar va muhandislik tahlili qo'llanildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, yadro reaktorlarida xavfsiz ekspluatatsiyani ta'minlash uchun issiqlik yuklamasi, sovutuvchi sarfi, Reynolds soni, Nusselt kriteriyasi va kritik issiqlik oqimi chegaralari o'zaro uyg'un holda boshqarilishi zarur. Shuningdek, issiqlik gidravlikasi muammolarini kamaytirishda optimallashtirilgan oqim rejimi, rivojlangan nazorat tizimlari va zamonaviy hisoblash usullarining ahamiyati asoslab berilgan.

Kalit so'zlar: yadro reaktori, issiqlik gidravlikasi, sovutish suvi oqimi, kritik issiqlik oqimi, bosim yo'qotish, issiqlik almashinuvi, ikki fazali oqim, reaktor xavfsizligi.

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Машхура Хайитбаева Шавкат кизи

Научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики

Аннотация: В данной статье на научно-аналитической основе рассмотрены основные проблемы теплогидравлики в ядерных реакторах, в частности процессы тепловыделения, гидродинамические характеристики потока теплоносителя, режимы двухфазного течения, состояние критического теплового потока, а также потери давления. В исследовании для определения взаимосвязи между теплообменом и гидродинамическим сопротивлением использованы теоретические уравнения, упрощённые расчётные модели и методы инженерного анализа. Полученные результаты показывают, что для обеспечения безопасной эксплуатации ядерных реакторов необходимо согласованное управление тепловой нагрузкой, расходом теплоносителя, числом Рейнольдса, критерием Нуссельта и пределами критического теплового потока. Также обоснована важность оптимизированных режимов течения, развитых систем контроля и современных вычислительных методов в снижении проблем теплогидравлики.

Ключевые слова: ядерный реактор, теплогидравлика, поток теплоносителя, критический тепловой поток, потери давления, теплообмен, двухфазный поток, безопасность реактора.

THERMAL-HYDRAULIC PROBLEMS AND SOLUTIONS IN NUCLEAR REACTORS

Mashhura Xayitbayeva Shavkat qizi

National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy

Abstract: This paper examines the major thermal-hydraulic problems in nuclear reactors, including heat generation, hydraulic behavior of the coolant flow, two-phase flow regimes, critical heat flux conditions, and pressure losses. The study applies theoretical equations, simplified

engineering calculations, and analytical interpretation to evaluate the relationship between heat transfer performance and hydraulic resistance. The results indicate that safe reactor operation requires coordinated control of thermal load, coolant mass flow rate, Reynolds number, Nusselt criterion, and critical heat flux limits. The research also demonstrates that optimized flow conditions, advanced monitoring systems, and modern computational methods play a decisive role in reducing thermal-hydraulic risks and improving the operational safety of nuclear power systems.

Keywords: nuclear reactor, thermal hydraulics, coolant flow, critical heat flux, pressure loss, heat transfer, two-phase flow, reactor safety.

KIRISH

Yadro energetikasi zamonaviy elektr energiyasi ishlab chiqarish tizimida yuqori quvvatga ega bo'lgan strategik tarmoqlardan biri hisoblanadi. Reaktorning aktiv zonasida yadro bo'linishi natijasida juda katta hajmda issiqlik hosil bo'ladi. Ushbu issiqlik o'z vaqtida va yetarli darajada olib chiqilmasa, yoqilg'i elementlarining qizib ketishi, qobiq materialining shikastlanishi, issiqlik almashinuvining yomonlashuvi va ekstremal holatlarda reaktorning aktiv zonasida zararlanishi yuz berishi mumkin.

Shu sababli yadro reaktorlarida issiqlik gidravlikasi masalalari nafaqat energetik samaradorlik, balki texnologik xavfsizlik nuqtai nazaridan ham ustuvor ahamiyatga ega. Issiqlik gidravlikasi deganda, reaktordagi issiqlik hosil bo'lishi, uni yoqilg'i elementidan sovutuvchiga uzatilishi, sovutuvchining trubo bo'ylab harakatlanishi, bosim yo'qotishlari, qaynash jarayonlari va ikki fazali oqim hodisalari tushuniladi. Mazkur ishning maqsadi yadro reaktorlarida issiqlik gidravlikasi bilan bog'liq eng muhim muammolarni tahlil qilish, asosiy fizik ko'rsatkichlarni formulalar orqali baholash va issiqlik-gidrodinamik xavfsizlikning muhandislik mezonlarini yoritishdan iborat.

Issiqlik gidrodinamikasi quyidagi asosiy jarayonlarni o'z ichiga oladi: Issiqlik uzatish (konveksiya, o'tkazuvchanlik, nurlanish); Suyuqlik oqimi (laminar va turbulent); Qaynash va kondensatsiya jarayonlari; Ikki fazali oqimlar (suyuqlik + bug').

Bu jarayonlar yadro reaktorlarida murakkab o'zaro ta'sirda kechadi va ularni modellashtirish katta ilmiy muammo hisoblanadi.

Tadqiqotning vazifalari:

Reaktorning aktiv zonasidagi issiqlik almashinuvi, sovutish suvi oqimining gidrodinamik harakati, bosimdagi yo'qotishlar va kritik issiqlik oqimi bilan bog'liq fizik jarayonlar. Reaktorning aktiv zonasida issiqlik ajralishi va uzatilish jarayonlarini tahlil qilish; Sovutuvchi (теплоноситель) oqimining gidrodinamik rejimini baholash; Bosimdagi yo'qotishlarni aniqlash; Ikki fazali oqim paydo bo'lishining xavfli jihatlarini yoritish; Xavfsiz ish rejimini ta'minlash bo'yicha takliflar ishlab chiqish.

“Ushbu maqolada qo'llanilgan fizik va gidrodinamik harakat parametrlar issiqlik texnikasi va yadro issiqlik gidravlikasi bo'yicha klassik adabiyotlar hamda xalqaro standart ma'lumotlar bazalariga asoslangan holda tanlandi. Ishqalanish koeffitsienti Moody diagrammasiga asoslangan holda turbulent oqim uchun o'rtacha qiymatda qabul qilindi. Kritik issiqlik oqimi Zuber modeliga asosan baholandi (Tong, 1997). Nasos samaradorligi esa gidrodinamik harakat mashinalar nazariyasiga muvofiq tipik qiymat sifatida qabul qilindi. Oqim tezligi, massaviy sarf va kanal o'lchamlari Todreas va Kazimi (2012) tomonidan keltirilgan PWR tipidagi reaktorlar uchun xos diapazonlardan tanlandi. Issiqlik berish koeffitsienti va o'lchamsiz mezonlar (Re, Nu, Pr) klassik

konveksiya nazariyasiga muvofiq hisoblandi va barcha ma'lumotlar foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidagi ilmiy kitob va maqolalar asosida tahlil qilindi"

ASOSIY QISM

PWR (Pressurized Water Reactor) yengil yadro reaktorining bir turi va dunyodagi eng keng tarqalgan reaktor turlaridan biri hisoblanadi. Quyidagi hisob kitob parametrlar ushbu turdagi suv bilan sovutiladigan reaktorlar uchun xos bo'lgan diapazonlardan tanlanadi (Todreas, 2012; Incropera, 2011).

1. Reaktorda issiqlik hosil bo'lishi va uzatilishi

Yadro reaktorida hosil bo'ladigan *umumiy issiqlik quvvati* quyidagicha ifodalanadi:

$$Q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

bu yerda:

Q – issiqlik quvvati, W;

\dot{m} – sovutuvchining massaviy sarfi, kg/s;

c_p – solishtirma issiqlik sig'imi, J/(kg·K);

T_{out} – chiqish harorati, K yoki C°;

T_{in} – kirish harorati, K yoki C°.

Ushbu tenglama sovutish suvi oqimi orqali reaktordan qancha issiqlik olib chiqilayotganini ko'rsatadi. *Masalan, quyidagi shartli qiymatlarni olaylik:*

Demak:

$$Q = 5000 \cdot 4200(325 - 290) \Rightarrow Q = 735\,000\,000\text{ W} \Rightarrow Q = 735\text{ MW};$$

Bu natija reaktor orqali sovutish suvi oqimi, yordamida **735 MW** issiqlik olib chiqariyotganini bildiradi [1].

2. Issiqlik oqimi zichligi va yoqilg'i elementi yuzasidagi yuklama

Reaktorning aktiv zonasidagi issiqlik yuklamasi odatda issiqlik oqimi zichligi bilan tavsiflanadi:

$$q'' = \frac{Q}{A}$$

bu yerda:

q'' = issiqlik oqimi zichligi, W/m²;

A = issiqlik almashinuvi yuzasi m².

$$q'' = \frac{735 \times 10^6}{1500} = 490000\text{ W/m}^2 \Rightarrow q'' = 4.9 \times 10^5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2};$$

Bu qiymat reaktor kanalidagi issiqlik yuklamasining yuqori ekanini ko'rsatadi. Aynan shu yuklama ortib ketganda yoqilg'i sirtida qaynash kuchayadi va kritik holatga yaqinlashish xavfi yuzaga keladi [1].

3. Konvektiv issiqlik almashinuvi

Yoqilg'i elementi sirtidan sovutuvchiga issiqlik uzatilishi Nyuton-Rixman qonuni bilan ifodalanadi:

$$Q = hA(T_s - T_f)$$

bu yerda:

h = issiqlik berish koeffitsienti, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$;

T_s = sirt harorati; agar:

$T_f =$ suyuqlikning o'rtacha harorati.

$$Q = 2500 \cdot 1500(345-315) \Rightarrow Q = 1\,125\,000\,000\text{ W} \Rightarrow Q=1125\text{ MW};$$

Bu yerda hisoblangan quvvat maksimal konvektiv uzatish imkoniyatini ko'rsatadi. Amalda notekis yuklama, qizish va oqim noturg'unligi tufayli real qiymat bundan pastroq bo'lishi mumkin[2]

4. Reynolds soni orqali oqim rejimini aniqlash. Reaktorlardagi oqim odatda turbulent bo'ladi. Oqim rejimi Reynolds soni bilan baholanadi:

$$Re = \frac{\rho \vartheta D_h}{\mu}$$

bu yerda:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{zichlik, kg/m}^3 & \rho &= 700\text{ kg/m}^3; \\ \vartheta &= \text{o'rtacha tezlik, m/s;} & \text{agar:} & \vartheta = 5\text{ m/s}; \\ D_h &= \text{gidrodinamik harakat diametr, m;} & D_h &= 0.012\text{ m}; \\ \mu &= \text{dinamik yopishqoqlik, Pa} \cdot \text{s.} & \mu &= 9 \cdot 10^{-5}\text{ Pa} \cdot \text{s.} \end{aligned}$$

$$Re = \frac{700 \cdot 5 \cdot 0.012}{9 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow Re = \frac{42}{9 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow Re \approx 4.67 \times 10^5;$$

Bu qiymat juda katta bo'lib, oqimning aniq turbulent rejimda ekanini ko'rsatadi. Turbulent oqim issiqlik berishni yaxshilaydi [2].

5. Nusselt soni va issiqlik berish koeffitsienti. Turbulent oqim uchun Dittus-Boelter tenglamasidan foydalanish mumkin:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.04}$$

Faraz qilamiz:

$$Re = 4.67 \times 10^5 \quad \text{unda:} \quad Nu = 0.023 (4.67 \times 10^5)^{0.8} (1.2)^{0.4}$$

$$Pr = 1.2$$

$$\text{Soddalashtirganda} \Rightarrow (4.67 \times 10^5)^{0.8} \approx 34154; (1.2)^{0.4} \approx 1.076;$$

$$Nu \approx 0.023 \cdot 34154 \cdot 1.076 \Rightarrow Nu = 845.4$$

Endi issiqlik berish koeffitsienti:

$$h = \frac{Nu \lambda}{D_h}$$

bu yerda $\lambda = 0.55\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ deb olinadi:

$$h = \frac{845.4 \cdot 0.55}{0.012}$$

$$h \approx 38747.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Natija shuni ko'rsatadiki, reaktordagi intensiv turbulent oqim sirt bilan sovutuvchi orasida juda katta issiqlik almashinuvi yuzaga keltiradi.

6. Bosimdagi yo'qotishlar tahlili

Gidrodinamik harakat nuqtai nazardan eng muhim muammolardan biri — bosim yo'qotishidir. U Darcy–Weisbach tenglamasi bilan baholanadi:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho \vartheta^2}{2}$$

Bu yerda bosimdagi yo'qotishlar quyidagilarga ta'sir qiladi: nasos quvvatiga; energiya sarfiga; tizim samaradorligiga.

$$\begin{aligned}
 f &= \text{ishqalanish koeffitsienti;} & f &= 0.02; \\
 L &= \text{kanal uzunligi;} & L &= 4 \text{ m}; \\
 D_h &= \text{gidrodinamik harakat diametri;} \Rightarrow & D_h &= 0.012 \text{ m}; & \text{bo'lsa:} \\
 \rho &= \text{zichlik;} & \rho &= 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \\
 \vartheta &= \text{tezlik.} & \vartheta &= 5 \text{ m/s.}
 \end{aligned}$$

$$\Delta P = 0.02 \cdot \frac{4}{0.012} \cdot \frac{700 \cdot 25}{2} \Rightarrow \Delta P = 0.02 \cdot 333.33 \cdot 8750 \Rightarrow \Delta P \approx 58333 \text{ Pa}; \Delta P \approx 58.3 \text{ kPa};$$

Bu bosim yo'qotishi nasos quvvatini oshirishni talab qiladi. Demak, issiqlik almashinuvini yaxshilash maqsadida tezlikni cheksiz oshirib bo'lmaydi, chunki gidrodinamik harakat xarajat ortadi.

7. Nasos quvvatini aniqlash

Bosim yo'qotishlariga qarshi sovutuvchini haydash uchun kerak bo'ladigan nasos quvvati:

$$N_p = \frac{\Delta P \cdot V}{\eta}$$

bu yerda:

V = sarf hajmi m^3/s ;

η = nasos FIK.

agar: $\dot{m} = 5000 \text{ kg/s}$; $\rho = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{5000}{700} \approx 7.14 \text{ m}^3/\text{s}$$

agar $\eta = 0.8$ bo'lsa

$$N_p = \frac{58334 \cdot 7.14}{0.8} \Rightarrow N_p \approx 520820 \text{ W} \Rightarrow N_p \approx 521 \text{ kW};$$

Demak, faqat shu kanal parametrlari bo'yicha ham sezilarli nasos energiyasi talab qilinadi.

8. Ikki fazali oqimlar muammosi

Reaktor trubolarida qaynash boshlanganidan keyin suyuqlik va bug' aralashmasi hosil bo'ladi. Ikki fazali oqim quyidagi sabablarga ko'ra murakkab:

- zichlikning keskin o'zgarishi;
- oqim rejimlarining almashishi;
- issiqlik berish koeffitsientining notekis bo'lishi;
- oqimning barqaror emasligi.

Bug' ulushi odatda quruqlik darajasi bilan baholanadi:

$$x = \frac{m_v}{m_l + m_v}$$

bu yerda:

m_v = bug' massasi;

m_l = suyuqlik massasi.

Masalan, agar 1 sekundda 8 kg bug' va 92 kg suyuqlik oqsa:

$$x = \frac{8}{8 + 92} = 0.08$$

Demak, oqimning 8 foizi bug' fazadan iborat. Bug' miqdori oshgani sari issiqlik uzatish rejimi keskin o'zgaradi va kritik holatga yaqinlashish ehtimoli ortadi.

9. Lokal qizish*

**Lokal qizish- sirtning ayrim qismlarida harorat (masalan reaktorning yonilg'i elementi) tizimdagi haroratning o'rtacha qiymatidan sezilarli darajada oshib ketadigan hodisa.*

Reaktorning aktiv zonasida issiqlik ajralishi geometrik, neytron-fizik va gidrodinamik harakat sabablarga ko'ra bir tekis bo'lmaydi. Agar maksimal lokal quvvat koeffitsienti k_q bilan ifodalansa, lokal issiqlik oqimi:

$$q''_{loc} = k_q \cdot q''$$

agar: $k_q = 2.8$; $q'' = 0.49 \text{ MW} / \text{m}^2$ bo'lsa

$$q''_{loc} = 2.8 \cdot 0.49 = 1.372 \text{ MW} / \text{m}^2$$

Ko'rinib turibdiki, lokal issiqlik yuklamasi o'rtacha qiymatdan bir necha marta katta. Real xavfsizlik tahlilida aynan shu lokal maksimumlar hal qiluvchi ahamiyatga ega.

XULOSA

Hisob-kitoblar asosida quyidagi ilmiy natijalar olindi: Birinchidan, reaktorda issiqlik olib chiqish quvvati sovutuvchining sarf massasi va haroratlar farqiga to'g'ridan to'g'ri bog'liq ekanligi aniqlandi. Sarf massasi oshishi issiqlikni yaxshiroq olib chiqadi, lekin energiya sarfini ko'paytiradi.

Ikkinchidan, Reynolds sonining yuqori bo'lishi oqimning turbulent rejimda ekanini ko'rsatdi. Bu esa issiqlik almashinuvini kuchaytiradi. Shu bilan birga, bosimdagi yo'qotishlar va nasos quvvatiga bo'lgan talab ham sezilarli ortadi.

Uchinchidan, soddalashtirilgan hisob bo'yicha kritik issiqlik oqimi bilan ishchi issiqlik oqimi o'rtasida ma'lum xavfsizlik zaxirasi mavjudligi ko'rindi. Ammo lokal qizish zonalarini, oqim notekisligi va ikki fazali rejimlar bu zaxirani amalda kamaytirishi mumkin.

To'rtinchidan, ikki fazali oqimlarning paydo bo'lishi issiqlik gidravlikasi barqarorligini murakkablashtiradi. Bu hodisa ayniqsa yuqori quvvatli rejimlarda va favqulodda holatlarda muhim xavf omiliga aylanadi.

Yadro reaktorlarida issiqlik gidravlikasi muammolari ko'p omilli va o'zaro bog'langan tizim sifatida qaralishi zarur. Issiqlik almashinuvini kuchaytirish uchun oqim tezligini oshirish mumkin, biroq bu gidrodinamik harakat qarshilik va nasos energiyasi talabining ortishiga olib keladi. Aksincha, oqim tezligi pasayganda bosim yo'qotish kamayadi, ammo issiqlik olib chiqish sifati yomonlashadi.

Shuning uchun optimal ish rejimi quyidagi uchlik (issiqlik xavfsizligi, gidrodinamik harakat tejamkorlik va ekspluatatsion barqarorlik) muvozanatiga asoslanishi kerak.

Yadro qurilmalarida issiqlik gidravlikasi masalalarini oddiy tenglamalar bilan to'liq tavsiflab bo'lmaydi. Chunki amalda neytron maydoni notekisligi, material xususiyatlarining haroratga bog'liqligi, qaynash jarayonining murakkabligi va kanallar bo'yicha sarf taqsimotining notekisligi mavjud. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlarda CFD modellashtirish, ko'p fazali oqim modellari, RELAP, TRACE, CATHARE kabi maxsus kodlar keng qo'llaniladi. Mazkur tadqiqotda keltirilgan hisoblar soddalashtirilgan bo'lsa-da, ular muammoning fizik mohiyatini ochib beradi.

Yadro reaktorlarida issiqlik gidravlikasi muammolari reaktorning xavfsiz, barqaror va iqtisodiy samarali ishlashini belgilovchi asosiy omillardan biridir. Tadqiqot davomida issiqlik quvvati, issiqlik oqimi zichligi, konvektiv issiqlik almashinuvi, Reynolds va Nusselt mezonlari, bosim yo'qotishi, nasos quvvati hamda kritik issiqlik oqimi soddalashtirilgan formulalar asosida

hisoblab chiqildi. Hisobiy tahlil shuni ko'rsatdiki, issiqlik almashinuvini yaxshilash va gidrodinamik harakat yo'qotishlarni kamaytirish o'rtasida murakkab muvozanat mavjud. Bundan tashqari, lokal qizish zonalari, ikki fazali oqimlar va kritik issiqlik oqimiga yaqinlashish holatlari yadro reaktori xavfsizligining eng nozik nuqtalaridan biri hisoblanadi.

Adabiyotlar

1. Todreas N. E., Kazimi M. S. Nuclear Systems I // Thermal Hydraulic Fundamentals. — 2nd ed. — Boca Raton // CRC Press // 2012.
2. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. // Fundamentals of Heat and Mass Transfer. — 7th ed. // Hoboken Wiley // 2011.
3. El-Wakil M. M. // Nuclear Heat Transport // San Francisco // International Textbook Company // 1978.
4. Duderstadt J. J., Hamilton L. J. // Nuclear Reactor Analysis // New York: Wiley // 1976.
5. Zohuri B., Fathi N. // Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors. // Cham: Springer
6. Collier J. G., Thome J. R. // Convective Boiling and Condensation. 3rd ed. // Oxford // Clarendon Press // 1994.
7. Tong L. S., Tang Y. S. // Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow. — 2nd ed. // New York: Taylor & Francis // 1997.
8. Lahey R. T., Moody F. J. // The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor. — 2nd ed. // La Grange Park: American Nuclear Society // 1993.
9. OECD/NEA. Nuclear Thermal-Hydraulics and Safety Studies. // Paris: OECD Publishing.
10. IAEA. Advances in Reactor Thermal Hydraulics. — Vienna: International Atomic Energy Agency.