



**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA
MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

QARSHI MUHANDISLIK-IQTISODIYOT INSTITUTI

“ISSIQLIK ENERGETIKASI” KAFEDRASI

**“SANOAT QURILMALARIDA ISSIQLIK VA
MASSA ALMASHINUV JARAYONLARINI
JADALLASHTIRISHNING ILMIY
ASOSLARI”
fanidan**

**ELEKTRON O'QUV USLUBIY
MAJMUA**

Qarshi 2022 yil

**O'ZBEKISTON RESPULIKASI OLIY VA O'RTA
MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

QARSHI MUHANDISLIK-IQTISODIYOT INSTITUTI

“ISSIQLIK ENERGETIKASI” KAFEDRASI

**“SANOAT QURILMALARIDA ISSIQLIK VA
MASSA ALMASHINUV JARAYONLARINI
JADALLASHTIRISHNING ILMIY
ASOSLARI”
fanidan tayyorlangan**

ELEKTRON O'QUV USLUBIY MAJMUASI

Bilim sohasi: 700 000 – Muhandislik, ishlov berish va qurilish sohalari

Ta'lim sohasi: 710 000 – Muhandislik ishi

Ta'lim yo'nalishi: 70710503 – Sanoat issiqlik energetikasi)

Qarshi 2022 yil

Ushbu elektron o'quv uslubiy majmua O'zbekiston Respublikasi Oily va O'rta maxsus ta'lim vazirligi Qarshi muhandislik-iqtisodiyot institute Ilmiy kengashning yig'ilishida tasdiqlangan fanning o'quv dasturi asosida ishlab chiqilgan.

Tuzuvchi:

Ibragimov U.X. –

*“Issiqlik energetikasi” kafedrasi dotsenti,
t.f.f.d., PhD.*

Taqrizchilar:

Fayziyev T.A. –

*QMII “Issiqlik energetikasi” kafedrasi
mudiri, t.f.n.,dots.*

Vardiyashvili A.A. –

*QarDU “Muqobil va qayta tiklanuvchi
energiya manbalari” kafedrasi mudiri,
t.f.n.,dots.*

Ushbu elektron o'quv uslubiy majmua institut Uslubiy Kengashning 2022 yil __. __ dagi №__ sonli yig'ilishida ko'rib chiqilgan va o'quv jarayonida foydalanishga tavsiya etilgan.

MUNDARIJA

I. O'quv materiallari	5
Ma'ruzalar matni	5
Amaliy mashg'ulot uchun o'quv uslubiy qo'llanma	180
Laboratoriya mashg'uloti uchun o'quv uslubiy qo'llanama	233
II. Mustaqil ta'lim mashg'ulotlari	264
Mustaqil ta'lim mashg'ulotlari mavzulari	264
Mustaqil ta'lim mashg'ulotlari bo'yicha uslubiy ko'rsatma	265
III. Glossariy	283
IV. Ilovalar	288
Fanning o'quv dasturi	288
Fanning sillabusi	291
Tarqatma materiallar	304
Baholash mezonlari	322
Boshqa materiallar	323

I-BO'LIM. ISSIQLIK VA MASSA ALMASHINUV JARAYONLARINI JADALLASHTIRINING NAZARIY ASOSLARI

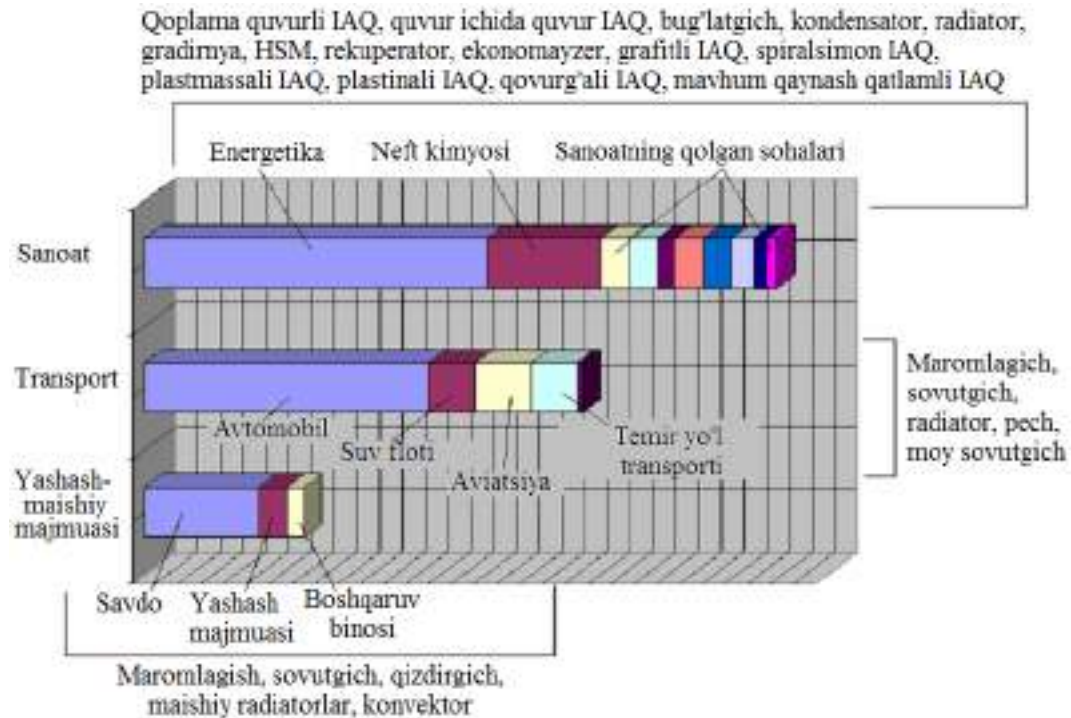
I-BOB. ISSIQLIK VA MASSA ALMASHINUV QURILMALARINING SAMARADORLIGINI OSHIRISHNING DOLZARBLIGI

§1.1. Texnika va texnologiyani rivojlanishida issiqlik almashinuv qurilmalarining o'rni.

Issiqlik almashinuv qurilmalari (IAQ) – issiqlikni bir issiqlik tashuvchidan ikkinchi issiqlik tashuvchiga uzatib berish uchun mo'ljallangan qurilmadir. IAQlari eng ko'p tarqalgan energetik qurilma hisoblanib, ular kondensator, bug'latgich, sovitgich, ekonomayzer va radiator sifatida keng qo'llaniladi. Ushbu qurilmalari asosan energetika, kimyo va neftni qayta ishlash, qog'oz va oziq-ovqat sanoatlarida keng qo'llaniladi. 1970-yillarning o'rtalaridan boshlab dunyo energetika inqirozi boshlandi va IAQlari turli energiya tejamkor issiqlik texnologiyasida qo'llanila boshladi.

Barcha sohalarda qo'llaniladigan ko'pgina IAQlarining konstruksiyasida issiqlik energiyasi qizdiruvchi issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga oraliq qattiq jism (devor) orqali uzatiladi. Bunda qizdiruvchi issiqlik tashuvchi issiqlikni dastlab yuzaning bir tomoniga uzatadi, devor orqali ikkinchi yuzaga o'tgan issiqlikni sovuq issiqlik tashuvchi qabul qiladi, ya'ni barcha holatlarda issiqlik almashinuvi issiqlik tashuvchi va issiqlik almashinuv yuzasi orasida amalga oshadi. Shuning uchun barcha turdagi IAQsining texnik-iqtisodiy ko'rsatgichlari, issiqlik almashinuv yuzasining makro va mikro tuzilishini loyihalashdagi yechimlarning qanchalik asoslanganligi darajasidan aniqlanadi. Bu asosan qoplama quvurli, qovurg'a quvurli, plastinali, plastina-qovurg'ali va boshqa turdagi rekuperativ IAQlariga tegishlidir. **1.1-rasmda** turli sohalarda keng qo'llanilayotgan IAQlarining turlarini taqsimlanishi ko'rsatilgan. Barcha qo'llanilayotgan IAQlarining taxminan 80% qismi qoplama quvurli turga to'g'ri keladi. Shuning uchun qoplama quvurli IAQlari sohasidagi tadqiqot va ishlanmalar katta qiziqish uyg'otadi. Keyingi o'rinlarda plastinali IAQlariga va qovurg'ali IAQlariga qiziqishlar yuqori.

IAQlarini ekspluatatsiya qilishdagi muhim faktlarga uzoq muddat ishlashi, texnologik soddaligini kiritish mumkin. IAQlari bozorida raqobatbardoshlikning asosiy mezoni – bu tayyorlash reputatsiyasi hamda IAQlarini yetkazib beruvchilarni tanlashdagi yana bir mezon – bu qurilma narxi hisoblanadi.



1.1-rasm. Turli xil IAQlarini qo'llanilish sohalari bo'yicha taqsimlanishi.

Yuqorida keltirilganlardan kelib chiqib zamonaviy IAQlari quyidagi texnik talablarga javob berishi kerak:

- talab etilgan issiqlik miqdorini bir muhitdan boshqasiga yuqori jadallik bilan uzatishni ta'minlash;
- ishchi muhitning belgilangan termodinamik parametrlarida (bosim, harorat, hajm) va turli agregat holatlarida ishlash qobiliyati va ishonchligi;
- ishchi muhit bilan yuvilayotgan issiqlik almashinuv yuzasi va qurilma konstruksiyalarining boshqa elementlari tajovuzlar ta'sirlariga kimyoviy bardoshli bo'lishi va oziq-ovqat mahsulotlariga nisbatan inert bo'lishi kerak;
- ekspluatatsiya jarayonida uzoq muddat ishlash qobiliyatini saqlash uchun issiqlik almashinuvini kuzatish imkoniyati va ularni davriy tozalash qulay bo'lishi;
- ishchi muhitlarning bosimi va IAQsining turli qismlarini harorat deformatsiyasi hisobiga yuzaga keladigan zo'riqishlarda xavfsiz holatni kafolatlaydigan va mustahkamlikka yetarlicha zahirasini mavjud bo'lishi;

- belgilangan ishchi parametrlarda kichik tashqi o'lchamlarga va kichik solishtirma metall sig'imiga ega bo'lishi kerak.

Iste'molchilar talablari:

- narxi arzon;
- tayyorlanish sifati yuqori;
- to'liq ish qobiliyati;
- xizmat ko'rsatish va ekspluatatsiyada qulaylik va osonlik;
- ta'mirlashga yaroqlilik;
- o'zgaruvchan unumdorlik va ishlov berilayotgan maxsulotlarni turlari bo'yicha universallik;
- zarur xujjatlarga ega bo'lishi (pasport, sxema, sertifikat) va hokazo.

Aynan yuqorida keltirilgan talablar asosida ekspluatatsiyaning aniq sharoiti uchun aniq IAQlari tanlanadi.

IAQlarining asosiy va muhim xarakteristikalar:

- qaynoq issiqlik tashuvchining harorati;
- ishchi bosim;
- asosiy funksiyalarining soni (qizdirgich, sovitgich, bug'latgich, kondensator; gaz-gaz; suyuqlik-gaz; suyuqlik-suyuqlik; bug'-suyuqlik);
- issiqlik almashinuv xarakteristikasi (issiqlikni uzatish birligi soni yoki issiqlik uzatish koeffitsiyenti).

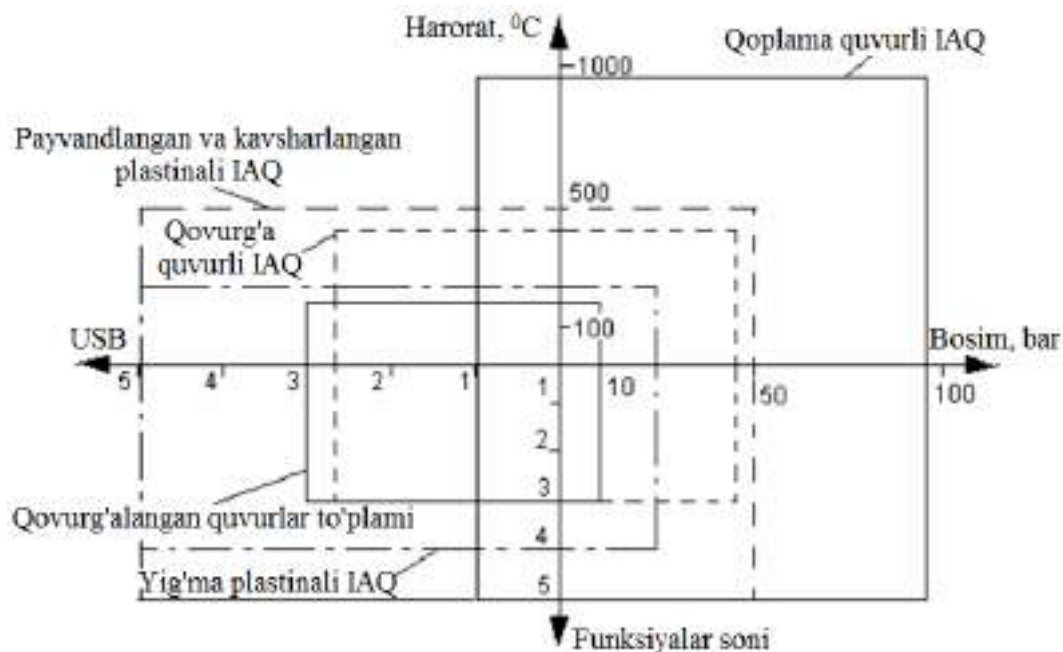
Zamonaviy IAQlari ushbu xarakteristikalarining har biri bo'yicha yuqori ko'rsatgichlarga ega bo'lishi kerak. Biroq ekspluatatsiya qilinayotgan IAQlari faqatgina alohida xarakteristikalar bo'yicha qoniqarli ko'rsatgichlarga ega (1.2-rasm).

Quvurli, plastinali yoki boshqa turdagi IAQlarining jihozlarini tanlashda – texnologik jarayonning xususiyatlarini inobatga olish zarur. Bugungi kunda barcha qo'yilgan talablarga plastinali va quvurli turdagi IAQlari to'liq javob beradi va ular hozirgi bozorda yetakchi hisoblanadi.

Hozirgi vaqtda sanoat va energetikadagi IAQlari bozorining taxminan 80% ulushi qoplama quvurli IAQlarining hissasiga to'g'ri keladi. Faqatgina ushbu IAQlari yuqori harorat va bosimlarda qo'llaniladi. Ulardan yanada keng foydalanish uchun qurilmalarning issiqlik samaradorligini oshirish zarur.

Quvurli IAQlarining rivojlanishi so'nggi yillarda ham to'xtab qolgani yo'q. Ko'pgina hollarda quvurlarda sun'iy turbulizatorlardan foydalanish mahsulotning chegara qatlamini issiqlik uzatuvchi devordan majburiy

uzilishini ta'minlaydi va issiq almashinuvini sezilarli darajada jadallashtiradi. Zaruriyat tug'ilganda (kuzatish, tozalash va ta'mirlash) quvurlar to'plamini korpusdan oson ajratib olish mumkin. IAQlarining bunday konstruksiyasi bir muhitni ikkinchisiga o'tib ketishini to'liq bartaraf etadi.



1.2-rasm. Turli IAQlarining qo'llanilish diapazoni [3].

Qovurg'a quvurli IAQlari ham keng tarqalgan. Issiqlik almashinuv yuzasining rivojlanganligi (qovurg'alash hisobiga issiqlik almashinuv yuzasi maydonining ortishi) hisobiga ularda gaz yoki suyuqlik turidagi issiqlik tashuvchilardan foydalanish ko'proq tavsiya etiladi. Qovurg'a quvurli IAQlari qozon-utilizatorlarida, sanoat maromlagichlarida, transport radiatorlarida, havoli sovitish moslamalarida va gradirnyalarda keng qo'llaniladi.

Yig'ma plastinali IAQlari yaxshi issiqlik-gidravlik xarakteristikaga ega bo'lganligi sababli keng tarqalgan. Qo'llashdagi chegaralanish asosan plastinalar orasidagi qistirma bilan bog'lik. Shuning uchun bunday IAQlari 20 bardan yuqori bosimda va 250°C dan yuqori haroratda qo'llanilmaydi. Ammo 1980-yillarning boshlarida payvandlangan yoki kavsharlangan plastinali IAQlari paydo bo'ldi, natijada plastinali IAQlaridan foydalanish ko'lami kengaydi, ya'ni ularni 40 bar bosimgacha va 500°C haroratgacha ishlatish imkoniyati tug'ildi.

Qolgan innovatsion texnologiyalar IAQlari bozorining maxsus sektorini tashkil etadi. Masalan, keramik va polimer materiallardan

tayyorlangan korroziyaga bardoshli IAQlari, mavhum qaynash qatlamli IAQlari, ularda gaz va qattiq zarracha orasida issiqlik almashinuvi sodir bo'ladi va hokazo.

Yuqorida keltirilganlardan kelib chiqib, yangi IAQlarini ishlab chiqish va ekspluatatsiya qilishdagi muammolarni uchta guruhga birlashtirish mumkin.

Birinchi guruh IAQlarini ekspluatatsiya qilish bilan bog'liq muammolarni tashkil etadi. Ushbu muammolarga issiqlik almashinuv yuzalarini ifloslanishi, IAQlarini korroziyalanishi, IAQlari o'tish rejimlarida ishlaganda yuzaga keladigan termomexanik muammolarni kiritish mumkin. Ushbu muammolar bevosita issiqlik almashinuv xarakteristikasiga ta'sir ko'rsatadi.

Ikkinchi guruh IAQlarining ixchamligini va ularning resurslarini oshirish bilan bog'liq muammolarni tashkil etadi. Esga oladigan bo'lsak, bizning sanoatimizdagi ko'pgina IAQlarining yoshi 30 dan oshgan bo'lib, bu vaqt ichida issiqlik almashinuv sohasidagi ilmiy-tadqiqot ishlari ancha ilgari ketgan va ularni zudlik bilan sanoatga joriy etish zarur. Hozirgi kunda dunyo energetikasi va sanoatida jadallashtirilmagan IAQlari deyarli qo'llanilmaydi.

Uchinchi guruh qaynoq isiqlik tashuvchilarning harorati bo'yicha IAQlari ishlashining yuqori chegarasini oshirish bilan bog'liq muammolarni o'z ichiga oladi.

§1.2. Issiqlik almashinuv qurilmalari jahon bozorining tahlili.

IAQlari bozorining tahlili San-Xoseda (Kaliforniya, AQSH) joylashgan Frost&Sullivan (F&S) kompaniyasi ma'lumotlari asosida o'tkazilgan. Bu kompaniya bozorni strategik o'rganishda va halqaro maslahat (konsultatsiya) xizmatlarida jahonda yetakchi hisoblanadi. F&S kompaniyasining sanoat bo'yicha ekspertlari asosiy bozor tendensiyalari, bozor talabi, ularni o'zgarishi va strategik rivojlanishini nazorat qiladi.

2015-yilning boshlarida Business Trend Analysts Inc. ma'lumotlariga muvofiq IAQlarining jahon bozorida 680 dan ortiq firmalar faoliyat ko'rsatadi. IAQlarining jahon bozorida eng yetakchi firmalar qatoriga Alsa Laval, American Precision Industries, Bell&Gossett, GEA Group Aktiengesellschaft, Hamon Group, Hisaka Works, Modine Manufacturing Company, Sondex and SPX Corporation va boshqalarni kiritish mumkin.

Jahon bozorining holati va uni 2021 yilgacha rivojlanish tendensiyalari Global Industry Analysts Ins. tahlilchilarining "IAQlari: global strategik biznes" nomli ma'ruzasida batafsil keltirilgan. Taxmin qilinishicha IAQlarining jahon bozori 2022 yilga borib 14,7 milliard AQSH dollari darajasiga yetadi.

Yevropa mintaqasida IAQlarini ishlab chiqaruvchilar yetarlicha ko'p, biroq F&S kompaniyasi o'tkazgan tadqiqotlar ma'lumotlari bo'yicha IAQlarining Yevropa bozori tanazzulga yuz tutmoqda, buning asosiy sababi ishchi kuchi arzon bo'lgan mamlakatlar Hindiston, Janubiy Koreya, XXR va boshqa tinch okeani mamlakatlaridan yangi raqobatchilarning paydo bo'layotganidir, ular IAQlari bozoriga yevropalik ishlab chiqaruvchilarning narxidan arzon bo'lgan qurilmalarni taqdim etmoqda. Hozircha arzon IAQlari sotuvda kam ulushni tashkil etadi, biroq asosiy taxminga ko'ra yaqin kelajakda osiyo va tinch okeani ishlab chiqaruvchilari yevropa bozorini sezilarli kasodga uchratadi.

2010 yilda yevropada umumiy ishlab chiqarilgan IAQlari 4,26 milliard AQSH dollarini, 2020 yilda esa 5,25 milliard AQSH dollarni tashkil etgan. IAQlarining Yevropa bozori 2003 yilda 3,02 milliard AQSH dollarini tashkil etgan. F&S kompaniyasining mutaxassislari xulosasiga ko'ra, 2010 yilda Yevropa bozorida IAQlarining sotuvi 3,49 mlrd. AQSH dollarini tashkil etgan. 2020 yilda bu ko'rsatgich 4,13 mlrd. AQSH dollariga yetgan. Taqqoslash uchun ko'rsatish mumkinki, G'arbiy Yevropada IAQlari savdosi 2001 yilda taxminan 2,6 mlrd. AQSH dollarini tashkil etgan.

F&S kompaniyasi mutaxassislarning tadqiqotlari shuni ko'rsatadiki, 1997-2000 yillarda IAQlarining yevropa bozori deyarli rivojlanmagan. "Ushbu davr mobaynida bozorni nisbatan sekin rivojlanishi Osiyodagi inqiroz bilan bog'liq. Bu inqiroz bevosita Osiyo eksport bozorini zararladi va bu Yevropa bozoriga o'z ta'sirini ko'rsatdi. Bu neft bozorini ham zararladi, ya'ni neft-kimyosi majmuasi katta zarar ko'rdi".

Yevropa bozorida ishlab chiqarish va sotuvni ortishi uchun asos bu – resurslardan oqilona foydalanuvchi IAQlari parkini mavjudligidir. Yevropada IAQlari bozori rivojlanishining asosiy yo'nalishi - energiya tejamkorlik asosida qurilmalarning samaradorligini oshirish hisoblanadi. Shuning uchun qoplama quvurli IAQlarining o'rnini yaxshi ekspluatatsion va texnik xarakteristikaga ega bo'lgan yaxlit payvandlangan plastinali IAQli egallamoqda. Atmosferani issiqlik ifloslanishiga qo'yilgan ekologik talablar

gradirnya va havoli sovitish qurilmalarini keng qo'llanilishiga, oqava suvlarni tozalash zaruratini ortishi esa spiralsimon IAQLarini keng qo'llanilishiga olib keldi. Misol keltiramiz, dunyoda ishlab chiqariladigan jami issiqlik energiyasining 80-90% qismi IAQLari hissasiga to'g'ri keladi. Masalan Fransiyada har yili taxminan 200 mln. t.n.e. yoqilg'i iste'mol qilinadi. Bunda 160 mln. t.n.e. issiqlik ishlab chiqariladi yoki IAQLari orqali uzatiladi. Barcha IAQLarining issiqlik samaradorligini o'rtacha 10% ga oshirish har yili 16 mln. t.n.e. tejash imkonini beradi. Bu ancha katta qiymat bo'lib, energiya tejamkorlik siyosati muhim ekanligini ko'rsatadi. Shuni ham ta'kidlash joizki, ko'pgina ekspluatatsiya qilinayotgan IAQLarining issiqlik samaradorligi 40% dan oshmaydi.

Germaniyada IAQLarini sotish 2001 yilda 650 mln. AQSH dollarini tashkil etgan. F&S ma'lumotlariga muvofiq ushbu qiymatning 62% ulushi sanoat va yashash fondiga, 36% ulushi transport va idoralarga to'g'ri kelgan. 2003 yilda Germaniya bozorining rivojlanishi yiliga 2,5% ga to'g'ri kelgan, bunda Germaniyadagi GEA Group eng katta hissa qo'shgan. 2013 yilda Germaniya bozorini o'rgangan F&S tahliliga ko'ra, Germaniya yevropadagi IAQLari bozorining eng oldingi o'rnini egallagan. Germaniya bozori 2013 yilda yevropadagi savdoni 29,1% ulushini tashkil etgan bo'lib, bu 878,8 mln. AQSH dollariga to'g'ri keladi. Ammo so'nggi yillardagi iqtisodiy o'sishlar yevropa IAQLari bozorida Germaniya ulushini kamayishiga olib keldi.

2015 yilda bozorni asosiy ulushini Fransiya, Buyuk Britaniya, Italiya va Ispaniya egalladi. F&S ma'lumotiga ko'ra 2001 yilda Buyuk Britaniyada IAQLarining sanoat uchun savdosi 285 mln. AQSH dollarini tashkil etgan. Buyuk Britaniya bozoridagi holat xuddi Germaniyadagi holat bilan bir xil. Buyuk Britaniyada barcha sotilgan IAQLarining 30% ulushi kimyo sanoatiga, faqatgina 10% ulushi agrosanoat majmualariga to'g'ri keladi.

2001 yilda Italiya bozori 515 mln. AQSH dollarini tashkil etgan bo'lib, 1999-2001 yillarda 10% ga oshgan. Ushbu o'sish yangi maromlash tizimlarini ishlab chiqish, Italiyada keng tarqalgan kogeneratsiya tizimlari uchun plastinali IAQLari va quvurli rekuperatorlar savdosini o'sishi bilan bog'liq. Hozirgi vaqtda ushbu bozorning rivojlanish tendensiyasi deyarli to'xtab turibdi.

2001 yilda Ispaniya bozori 295 mln. AQSH dollarini tashkil etgan. Bu ko'rsatkich bozor iqtisodiyoti inqirozi sababli har yili 10% ga qisqarib bordi. Ispaniya bozori uchun chet el firmalari savdosidagi ulushining kattaligi –

taxminan 55% va sanoat sektoridagi o'rnini kichikligi – taxminan 30% xarakterlidir.

2002 yilda Fransiyaning IAQlari bozori 400 mln. AQSH dollariga teng baholangan. Uning 44% hajmi sanoatga, 41% hajmi transportga va 15% hajmi yashash – maishiy ho'jalikka to'g'ri keladi.

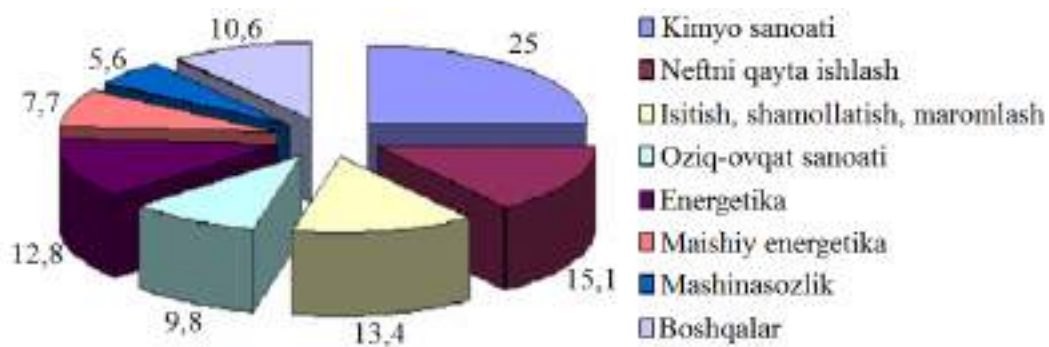
1996 yildan boshlab IAQlari bozori sezilarli kengaydi. 1996 yildan 2001 yilgacha kengayishi 2,5% ni tashkil etdi. Yashash – maishiy ho'jaligi jadal rivojlandi va uning o'sishi 10% ga yetdi. Transport bilan bog'liq sektorni o'sishi 2,5% ni tashkil etdi. Ushbu davrda sanoat uchun IAQlari bozori o'zgarmadi.

Har bir sektorni rivojlanishini ko'rib chiqamiz.

2001 yilda Fransiya sanoatida IAQlari bozori 220 mln. AQSH dollarini tashkil etgan. Sanoatning alohida sohalari bozori turlicha rivojlangan. 2001 yilda kimyo, neft-kimyosi, oziq-ovqat sanoatlarida va mashinasozlikda IAQlari bozori rivojlandi. Bozorni qisqarishi energetika, metallurgiya, qog'oz, shisha va to'qimachilik sanoatlarida kuzatildi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, Fransiya IAQlari bozoridagi eng katta aylanmalar kimyo va neft-kimyosi sohasiga to'g'ri keldi va bir yilda 40 mln. AQSH dollarini tashkil etdi. Oziq-ovqat sanoati va energetikaga taxminan bir yilda 30-33 mln. AQSH dollaridan to'g'ri keldi. Eng kam aylanmalar mashinasozlik, metallurgiya, qog'oz, to'qimachilik va shisha sanoatlarida bo'lib, o'rtacha 20-100 mln. AQSH dollarini tashkil etdi.

Fransiya bozorining transport sohasi 2001 yilda 210 mln. AQSH dollarini tashkil etdi. 1996 yildan keyin har yili 2,5% ga kengaydi. Eng katta hajm avtomobillar uchun radiatorlar sotuviga (52%) va havoli maromlagichlarga (29%) to'g'ri keldi. Yashash-maishiy ho'jaligi sektori 2001 yilda 71,5 mln. AQSH dollarini tashkil etdi. 1996-2001 yillarda bozorning o'sishi 7% dan 10% gachani tashkil etdi. Bu havoli maromlagichlarni va xususiy magazinlar uchun sovitish tizimlarini joriy etilishi bilan bog'liq.

2010 yilda IAQlarining yevropa bozoridagi eng yirik sektor kimyo sanoatiga to'g'ri keldi va u butun bozorning 25% ulushini tashkil etdi (1.3-rasm). Shuning uchun 2010 yilda bozorni o'sishi kuzatilmadi. F&S kelajakda ushbu sektorning ulushi kamayishini taxmin qilmoqda, bunga sabab Yevropada kimyoviy ishlab chiqarishni qisqarishi va sanoatning boshqa sohalarini jadal rivojlanishidir.



1.3-rasm. IAQlarining yevropa bozori.

Yevropa iqtisodiyotining neftni qayta ishlash sektori IAQlari bozorining 15,1% ulushiga to'g'ri keladi. 2007-2010 yillarda ushbu sektor qisqardi, bunga sabab neftni narxi oshgandan so'ng neftni qayta ishlash sohasiga investitsiyalarni jalb etmaganligidir.

2010 yilda isitish, shamollatish va maromlash hamda sovitish tizimlari sektorida IAQlarining sotuvi o'sdi va 13,4% ni tashkil etdi. 2010 yilda IAQlarining 9,8% qismi oziq-ovqat sanoatiga, 12,8% qismi energetikaga, 7,7% qismi maishiy ho'jalik korxonalariga, 5,6% qismi mashinasozlikka va 10,6% qismi qolgan sohalarga sotildi.

Energetika, maishiy ho'jalik va maromlash tizimlarida IAQlari sotuv hajmini o'sishi IAQlari bozorini rivojlanishiga sezilarli ta'sir ko'rsatdi. Agar IAQlari yevropa bozorini IAQlarining turlari bo'yicha qarab chiqsak, u holda 2013 yilda qoplama quvurli IAQlarining bozori umumiy yevropa bozorida eng yetakchi bo'lgan va 926,9 mln. AQSH dollari qiymatida baholangan. Bozorning ushbu segmentini 2013 yil davomida o'sishi 1% ga kam bo'lgan va 2014 yilda bu holat o'zgarmagan.

Global Industry Analysts Ins. mutaxassislari ma'lumotiga ko'ra qoplama quvurli IAQlari 2025 yilgacha ham yetakchilikni saqlab turadi. Ushbu IAQlarining asosiy iste'molchilari isitish va shamollatish tizimlari, neft kimyosi, energetika va kimyo sanoatlari hisoblanadi.

Hozirgi vaqtda qoplama quvurli IAQlarining yevropa bozorida raqobat keskin kuchaydi. Buni katta kompaniyalarning moliyaviy holati bilan baholash mumkin. Italiyadan IAQlarini "arzon" yetkazib beruvchilar shimoliy yevropa hududlariga hukjum qilishmoqda. Osiyo mamlakatlari esa IAQlarining sharqiy yevropa bozorlarini egallamoqda.

Havoli sovitish moslamalari (HSM) IAQlarining yevropa bozorida ikkinchi o'rinni egallaydi. 2013 yilda ushbu IAQlarining sotuvi 650,5 mln. AQSH dollarini tashkil etgan. Yaqin yillarda regeneratsiya va sovitish

tizimlari bozorini o'sishi natijasida yopiq konturli HSMdan foydalanish darajasi ham ortdi.

Global Industry Analysts Ins. ning "IAQlari: global strategik biznes" nomli ma'ruzasida keltirilgan bahoga muvofiq plastinali IAQlarining bozori IAQlari umumiy bozorining eng tez o'sayotgan segmenti hisoblanadi. Bu o'sish 2010-2020 yillarda 7,8% gacha yetgan. Bunda osiyo va tinch okeani hududlari – yevropa bozorining asosiy raqobatchilari hisoblanadi va IAQlarining bozorini o'sishi 2025 yilga borib 9,7% ni tashkil etadi. 2010-2020-yillarda plastinali IAQlari bozorining eng yuqori o'sishi yoqilg'i sanoatiga to'g'ri keldi va 3,2% ni tashkil etdi.

Yevropa – bu plastinali IAQlarining eng katta bozori bo'lib, mutaxassislarning bahosi bo'yicha 2018 yilda dunyoda sotilgan plastinali IAQlarining 45,7% ulushini tashkil etgan. Global Industry Analysts Ins. mutaxassislarning bahosiga ko'ra plastinali IAQlarini eng ko'p sotuvi 2022 yilda kimyo sanoatiga to'g'ri keladi. Bunda jahon savdosining hajmi 3,7 mlrd. AQSH dollariga yetadi. Issiqlik ta'minoti va shamollatish tizimlarida, sovitish texnikasida ishlatilayotgan plastinali IAQlarining savdosi 2022 yilga borib 3,5 mlrd. AQSH dollariga yetadi.

F&S mutaxassislarning bahosiga ko'ra IAQlarining umum yevropa bozorida asosiy ulushni to'rtta yetakchi korporatsiya – GEA va uning filiallari Alfa Laval, SPX va Hamon tashkil etadi. IAQlarini boshqa ishlab chiqaruvchilari orasidan Baltimore Aircoil, Faco, Fincoil, Goedhart, The Guntner Group, Lu-Ve Contardo, Tranter va WTTlarni ko'rsatish mumkin.

AQShdagi IAQlari bozori asosan chet el kompaniyalari hissasiga to'g'ri keladi. Amerikaning o'rta va kichik kompaniyalari IAQlarini chet el tayyorlovchilari bilan raqobatlasha olmaydi, ular asosan osiyo va yevropa kompaniyalaridir. IAQlarini yevropalik tayyorlovchilar AQShdagi raqobatchilarni juda kuchli xatarga ko'yishadi, bu esa amerika bozorini inqiroziga olib keladi, lekin shunga qaramay amerika bozoridagi raqobat oshib bormoqda. F&S kompaniyasi tadqiqotchilari shuni ko'rsatadiki, AQShdagi IAQlari savdosi 2009 yilda 2 mlrd. AQSH dollarini tashkil etgan. Bunda savdoni jadal o'sishi kuzatilgan va 2016 yilga kelib bu ko'rsatkich 3,2 mlrd. AQSH dollarini tashkil etgan.

AQSH IAQlari bozori aloxida korxonalarning rivojlanishi bilan bog'liq. Rivojlanayotgan mamlakatlar bozorida ko'pgina kompaniyalar jadal o'sish holatida bo'lsa ham amerika bozori nisbatan o'zgarmasdan qolmoqda.

2010 yilda F&S kompaniyasi IAQlarini ishlab chiqarish bo'yicha amerika sanoatiga muhim hissa qo'shgan kompaniyalarni Marketing Engineering Awards mukofoti bilan taqdirladi. Yuqori texnologiya, jadal o'sish, savdoni rivojlanish tendensiyasi, bozordagi yetakchilik, eng yaxshi energiya xizmat ko'rsatuvchi kompaniya kabi nominatsiyalar bo'yicha mukofotlar Alfa Laval Thermal Inc., Honeywell Power and Transportation Systems, ITT Industries Inc., Baltimore Aircoil Company, The Burger Cooling Tower Company Inc. va Tranter Inc. kompaniyalari va firmalariga topshirildi.

§1.3. Issiqlik almashinuv qurilmalarining MDH bozori tahlili.

Sanoat bozori holati akademiyasi (SBHA) "MDHda plastinali, qoplama quvurli va spiralsimon IAQlarining bozori" nomli tadqiqotini o'tkazdi.

MDHda hozirgi vaqtda 170 dan ortiq turli maqsadli va konstruksiyali IAQlarini tayyorlovchi korxonalar mavjud. Ulardan 33 tasi Markaziy Federal Okrugda (FO), 28 tasi Privoljsk FO da, 20 tasi Shimoliy-g'arbiy FO da va hokazolarda joylashgan. Korxonalarning asosiy qismi turli konstruksiyali qoplama quvurli IAQlarini ishlab chiqaradi, masalan Markaziy FO da 22 ta, janubiy FO da 7 ta, Privoljsk FO da 17 ta, Shimoliy-g'arbiy FO da 15 ta, Uralsk FO da 14 ta, Sibir FO da 5 ta. Plastinali IAQlari ishlab chiqaruvchi korxonalarning soni ham ortib bormoqda. Ushbu korxonalarning soni 40 dan ortiq. 2017 yilda plastinali IAQlarini ishlab chiqaruvchilar soni Markaziy okrugda 17 ta, Privoljsk FO da 11 ta va Shimoliy-g'arbiy FO da 5 tani tashkil etgan.

2017 yilda MDHda IAQlarini barcha ishlab chiqaruvchilari bo'yicha ishlab chiqarish quvvatlarining o'rtacha yuklanganligi 63,4% ni tashkil etgan. Hozirgi vaqtda MDHda ishlab chiqarilayotgan qoplama quvurli IAQlarining katta hajmini tekis quvurli IAQlari (13,6%) va "quvur ichida quvur" turidagi IAQlari (11,7%) tashkil etadi.

2017 yilda MDHda qoplama quvurli IAQlarini yirik ishlab chiqaruvchilari quyidagi kompaniyalar hisoblanadi:

- "Teplotexnik-Revda", Revda shahri, Sverdlovsk vil. – 14,2%.
- "Salavatneftemash", Salavat shahri, Boshqirdiston Res. – 8,6%.

Hozirgi vaqtda MDHda plastinali IAQlari bozori ham jadal rivojlanmoqda. Biroq hozirda shtamplangan plastinani ishlab chiqaruvchilar bo'yicha raqobatchilarni yo'qligi sababli plastinali IAQlarini

yig'ish amaliyoti rivojlanishi orqada qolmoqda. Hozirda vaqtda faqatgina Moskva viloyati Korolyov shahridagi "Alfa Laval Potok" korxonasi plastina va qistirmalarni ishlab chiqaradi.

Moskva shahri yoqilg'i – energetika ho'jaligi deportamenti va "Rossiyskoye teplosnabjeniyе" ICHBning "Yig'ma plastinali IAQlarini mahalliy va chet el ishlab chiqaruvchilari" nomli ma'ruzasida asosan oltita ishlab chiqaruvchi korxonani ko'rsatgan:

1. Teplotexnika, Moskva shahri (APV – Daniya bilan hamkorlikda).
2. Alfa Laval Potok, Korolyov shahri (Alfa Laval - Shvetsiya).
3. SWEP International, Moskva shahri (SWEP - Shvetsiya).
4. Ridan, Nijniy Novgorod shahri (Sondex – Daniya bilan hamkorlikda).
5. Mashimplex, Moskva shahri (Geo – Germaniya bilan hamkorlikda).
6. Danfoss, Moskva viloyati (Danfoss Daniya-Finlyandiya bilan hamkorlikda).

SBHA tadqiqotchilarining bahosiga muvofiq, ya'ni "MDHda qoplama quvurli IAQlarining bozori: 2018 yil yakunlari, 2019-2022 yillar bashorati" va "MDHplastinali IAQlari: 2018 yil yakunlari, 2019-2022 yillar bashorati" hisobotlarida keltirilgan ma'lumotlarga asosan 2015-yildan 2016 yilgacha MDHda IAQlarini ishlab chiqarish bozorini o'sishi 5,3% ni tashkil etgan. 2017 yilda IAQlarini ishlab chiqarish bozori jadal o'sgan va 41,1% ni tashkil etgan. Bunda 2015 yildan 2016 yilgacha plastinali IAQlarini ishlab chiqarish hajmini o'sishi 18,9% ga yetgan. 2017 yilda plastinali IAQlarini ishlab chiqarishning jadal o'sishi 71,7% ni tashkil etgan.

2016 yilda 100 dan ortiq korxona-importchilar MDH IAQlari bozorida faoliyat ko'rsatgan. Ular asosan Germaniya, Shvetsiya va Italiyadan kelgan yevropalik ishlab chiqaruvchilardir. Osiyo mintaqasidan asosan Xitoy va Koreya mamlakatlari faol ishtirok etgan. Import qilingan IAQlarining asosiy qismi korxonalarning issiqlik ta'minoti tizimlari uchun mo'ljallangan.

MDHda IAQlarilari savdosining asosiy ulushini korxonalarning issiqlik ta'minoti tizimlari, energetika, neft va kimyo sanoatlari tashkil etadi. SBHA tomonidan 2019 yilda o'tkazilgan "Neft kimyosidagi IAQlari" nomli tadqiqotlarida neft sanoati, neftni qazib olish, neft va gazni qayta ishlash, neft kimyosi sanoatlarida IAQlarining ulushi to'liq tahlil qilingan. MDHdagi neftni qazib olish korxonalari sektorida 250 ta kompaniya mavjud. Neftni qazib olish sektorida asosiy funksiyani qoplama quvurli IAQlari bajaradi. Faqatgina 16% neftni qazib olish korxonalari plastinali IAQlaridan

foydalaniladi. Ushbu korxonalarda plastinali IAQlarining ulushi 40% dan 60% gacha tashkil etadi.

Ishlayotgan IAQlarining turlari bo'yicha neftni qazib olish korxonalarini uchta turga ajratish mumkin:

- faqat qoplama quvurli IAQlaridan foydalanuvchi;
- qoplama quvurli qurilmalar bilan birga qisman plastinali IAQlaridan foydalanuvchi;
- qoplama quvurli qurilmalarga nisbatan ko'proq plastinali IAQlaridan foydalanuvchi.

Bunda ishlatayotgan IAQlari bo'yicha neftni qazib olish korxonalarini taqsimlanishi quyidagicha:

Ishlatilayotgan IAQsining turi	Korxonalar umumiy sonidagi ulushi, %
Faqat qoplama quvurli IAQ	84
Asosan qoplama quvurli, qisman plastinali	14
Asosan plastinali	2

Neftni qazib olish sohasida qo'llanilayotgan qoplama quvurli IAQlarining asosiy turlari:

- quvur ichida quvur;
- tekis quvurli;
- U-simon quvurli.

Neftni qazib olish jarayonida IAQlari quyidagi holatlarda qo'llaniladi:

- neftni tuzsizlantirish;
- neftni suvsizlantirish;
- neftni seperatsiyalash.

Bir nechta korxonalarda neftni qizdirish uchun pech o'rnatilgan, ular IAQsiga almashtirilishini talab etadi. Ushbu jarayonlar tashishga "neftni tayyorlash" deb ataladi, keyin neft birlamchi qayta ishlash uchun zavodga yuboriladi. Neftni qazib olish bo'yicha bitta korxonada o'rtacha 40 ga yaqin IAQlari mavjud. Bu ko'rsatgich bitta neft qazib olish qudug'ida 2 ta 100 tagacha IAQsini tashkil etadi. Qurilmalarning soni asosan neftning xususiyatiga bog'liq bo'lib, neftni qayta ishlash jarayonida bir nechta IAQlari ishlatilishi yoki ishlatilmasligi mumkin.

MDHda neftni birlamchi qayta ishlovchi 160 dan ortiq korxona – neftni qayta ishlash zavodlari mavjud. Neftni birlamchi qayta ishlash sohasida plastinkali IAQlari neftni qazib olish korxonalariga qaraganda kam

qo'llaniladi. Ishlab chiqarishda taxminan 37,5% korxonalar plastinali IAQlaridan foydalanadi. Shunga muvofiq 62,5% korxona qoplama quvurli IAQsidan foydalanadi.

Neftni birlamchi qayta ishlash jarayonida IAQlaridan foydalanuvchi korxonalarda 6,1% miqdorida plastinali IAQlari qo'llaniladi. Umuman olganda sanoatning ushbu sohasida bu ko'rsatgich har bir aniq korxonaga bog'liq holda 0,7% dan 17,6% gacha o'zgaradi. IAQlarini iste'moli nuqtai nazaridan ushbu sohada asosan qoplama quvurli IAQlari qo'llaniladi. Bu bitta korxonada neftni qayta ishlash jarayonini ko'p bosqichli ekanligi bilan bog'liq bo'lib, juda ko'p IAQlarini talab etadi.

Neftni qayta ishlash bo'yicha bitta korxonada o'rtacha 406 dona IAQlari qo'llaniladi, bu esa neftni qazib olish korxonasi ko'rsatkichidan 10 marta ko'pdir. IAQlarining soni korxonada neftni qayta ishlash bosqichlari soniga bog'liq. Kichik korxonalar 2 tadan 5-8 tagacha IAQlaridan foydalanadi. Neftni qayta ishlovchi yirik korxonalarda 800-1000 ta qurilmalardan foydalaniladi.

Neftni qayta ishlashda ko'p sonli IAQlaridan foydalanilganligi sababli, ularning juda ko'p turidan foydalaniladi:

- buralgan quvurli;
- tekis quvurli;
- suzuvchan qalpoqchali;
- quvur ichida quvur;
- U-simon quvurli.

Korxonalarda eng ko'p U-simon qoplama quvurli va "quvur ichida quvur" turidagi IAQlari qo'llaniladi. Qoplama quvurli IAQlarining qolgan turlaridan foydalanuvchi korxonalar soni ancha kam. Burama quvurli va spiralsimon IAQlari eng kam qo'llaniladi. Neftni birlamchi qayta ishlash korxonalarida IAQlari quyidagi jarayonlarda ishlatiladi:

- visbreking;
- reforming;
- gidrotozalash;
- rektifikatsiya.

Ushbu jarayonlar neftni qayta ishlash sanoatining asosiy jarayonlari bo'lib, juda ko'p sonli IAQlari ishlatiladi. Neftni birlamchi qayta ishlashda yo'ldosh jarayonlar sifatida quyidagilar uchraydi:

- organik sintez qurilmasi;

- sulfat kislota qurilmasi;
- etilen qurilmasi;
- fenol-atseton qurilmasi.

Tabiiy gazni qayta ishlash gazni qayta ishlash korxonalarida (GQIK) amalga oshiriladi. MDHda bunday korxonalar 54 ta bo'lib, ushbu korxonalarda nafaqat tabiiy gaz, balki yo'ldosh neft gazi ham qayta ishlanadi. Barcha korxonalarda qoplama quvurli IAQlari o'rnatilgan. Neftni qayta ishlash sohasi kabi gazni qayta ishlashda ham jihozlarni modernizatsiyalash jarayoni faol ketmoqda, ya'ni qoplama quvurli IAQlari plastinali qurilmalarga almashtirilmoqda. GQIZlarining faqat 25-27% qismida qoplama quvurli IAQlari qo'llanilmoqda. Shuningdek, MDHdagi gazni qayta ishlash bo'yicha korxonalarning o'rtacha 41-43 tasida plastinali va qoplama quvurli IAQlari qo'llaniladi. Bitta GQIKda o'rtacha 500 ta IAQsi qo'llaniladi. Bu taxminan neftni qayta ishlash korxonalari ko'rsatkichlari bilan bir xil. GQIKlarida IAQlarining soni o'rtacha 300 dan 650 gacha. Korxonadagi barcha IAQlaridagi plastinali IAQlarining ulushi 2% dan 4% gacha tashkil etadi. GQIKlarida qoplama quvurli IAQlarining quyidagi turlari ishlatiladi:

- tekis quvurli;
- quvur ichida quvur;
- U-simon quvurli.

Korxonalarda eng ko'p qo'llaniladigan qurilmalarda U-simon va "quvur ichida quvur" turidagi qurilmalarni kiritish mumkin. Gaz va neftni qayta ishlashda IAQlari quyidagi jarayonlarda qo'llaniladi:

- past haroratli kondensatsiya;
- absorbsiya;
- past haroratli rektifikatsiya;
- past haroratli seperatsiya.

MDHning neft kimyosi sanoatidagi 68% korxonasida plastinali IAQlari, qolgan 32% korxonalarda faqat qoplama quvurli IAQlaridan foydalaniladi.

IAQlaridan foydalanuvchi neft-kimyosi korxonasida o'rtacha 3,1% plastinali IAQlari qo'llaniladi. Umuman olganda sanoatning ushbu sohasida bu ko'rsatkich 0,3% dan 15,4% gacha o'zgaradi. Ushbu sanoatda IAQlarini iste'moli nuqtai nazaridan qoplama quvurli IAQlari yaqqol yetakchi hisoblanadi. Bu bitta korxona miqyosida neft-kimyosi jarayonlarini juda ko'pligi bilan bog'liq.

Bitta neft-kimyosi korxonasida o'rtacha 1500-1600 ta IAQlari qo'llaniladi. IAQlarining soni korxonadagi neft-kimyosi jarayonlari soniga bog'liq. Kichik korxonalarda 10 dan 20 tagacha IAQlari ishlatiladi. Neftni qayta ishlovchi yirik korxonalarda 10000 tagacha qurilma ishlatiladi.

Neft-kimyosida eng ko'p quyidagi turdagi IAQlari qo'llaniladi:

- tekis quvurli;
- suzuvchan qalpoqchali;
- quvur ichida quvur;
- U-simon quvurli.

IAQlarining eng ko'p tarqalgan modellari tekis quvurli, qoplama quvurli va "quvur ichida quvur" turidagi IAQlari hisoblanadi. U-simon va suzuvchan qalpoqchali IAQlari juda kam ishlatiladi.

Neft-kimyosi sanoatida IAQlari quyidagi jarayonlarda qo'llaniladi:

- piroliz qurilmasida;
- polimerlash qurilmasida;
- smolani qaynatish qurilmasida.

Neft-kimyosi sanoati korxonalarida jarayonlar soni neftni birlamchi qayta ishlash korxonasidagi jarayonga qaraganda yanada ko'proq. Shuningdek, turli korxonalarda ushbu jarayonlar turlicha. IAQlari ishtirok etadigan jarayonlardagi mahsulotlarni quyidagi turlarga ajratish mumkin:

- monomerlarni ishlab chiqarish (etilen, propilen);
- polimerlarni ishlab chiqarish (polietilen, polipropilen);
- smolalarni ishlab chiqarish (karbamidoformaldegid smolasi).

Hozirgi kunda sanoat va energetikada IAQlari savdosining 80% ulushi taxminan qoplama quvurli IAQlariga to'g'ri keladi. Maishiy energetikada suv-suvli, sig'imli zmayevikli va qoplama quvurli bug'-bug'li IAQlari asosiy o'rinni egallaydi (1.4-rasm).

Yevropaning yirik korxonalaridan biri – "Nijekamskneftexim" OAJdagi 1000 dan ortiq IAQlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, ularning taxminan 80% qismi qoplama quvurli IAQlari hisoblanadi.

Qovurg'a quvurli IAQlari oilasi qozon-utilizatorlarda, sanoat maromlagichlarida, transport radiatorlarida, HSM va gradirnyalarda keng qo'llaniladi (1.5-rasm). Gradirnyalar eng ko'p energetika va neft-kimyosi sanoatida qo'llaniladi. HSMlar maishiy va sanoat maroilagichlarida, sanoat korxonalarining sovitish qurilmalarida, yirik savdo markazlarida, sanoat ishchi jismlarini sovitish tizimlarida keng qo'llaniladi.



1.4-rasm. Maishiy energetikadagi qoplama quvurli IAQlari.



1.5-rasm. HSM, qozon-utilizatorlar, kalorifer va gradirnyalar.

Yig'ma plastinali IAQlaridan foydalanish tahlillari shuni ko'rsatadiki, ularni keng qo'llanilishi plastinalar orasidagi elastomerlardan tayyorlangan qistirmalarni mavjudligi bilan chegaralanadi, ularni borligi hisobiga IAQlari 20 bardan yuqori bosim va 250°C dan yuqori haroratlarda qo'llanilmaydi, bu esa qurilmalarni sanoatda keng qo'llanilishini ancha cheklaydi. Plastinali IAQlaridan foydalanuvchi asosiy sektorlar – maishiy energetika (1.6-rasm) va sanoat korxonalarining issiqlik ta'minoti tizimlari hisoblanadi.

Keyingi texnologik innovatsiyalar IAQlari bozorini maxsus sektorini tashkil etadi. Masalan, keramik va polimer materiallardan tayyorlangan korroziyaga bardoshli IAQlari, mavhum qaynash qatlamli IAQlari, ularda issiqlik almashinuvi gaz va qattiq zarrachalar o'rtasida amalga oshiriladi, qaynaydigan suyuqliklar uchun zmeyevikli IAQlari va hokazo.

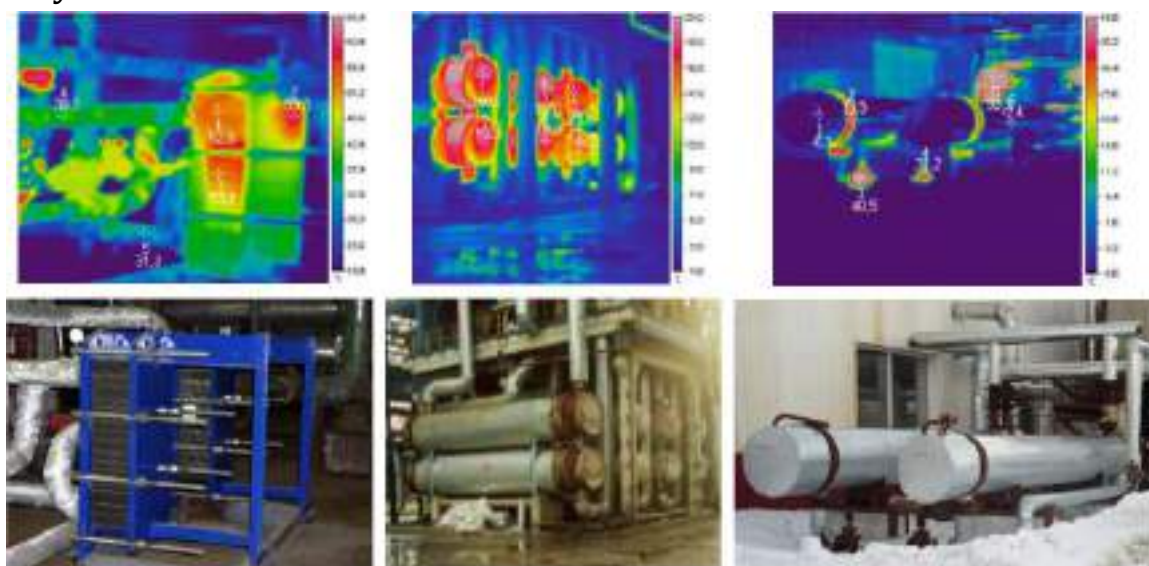
Shuni ta'kidlash joizki, ko'pgina ekspluatatsiya qilinayotgan IAQlarining issiqlik samaradorligi 60% dan oshmaydi. Issiqlik samadorligining past bo'lishini asosiy sababi ekspluatatsiyada rejim parametrlaridan nooqilona foydalanish va issiqlik almashinuv yuzalarini ifloslanishidir. Shu bilan bog'liq ravishda hattoki plastinali IAQlarining issiqlik samadorligi 50-70% ga yetishi mumkin. Issiqlik samadorligini kamayishi esa IAQsining belgilangan issiqlik quvvatini ta'minlash uchun qo'shimcha miqdordagi issiqlik tashuvchini haydashga quvvatni ortishiga yoki quvvatini kamayishiga olib keladi.



1.6-rasm. “Alfa-Laval”, “Tranter” va “Ridan” firmalarining plastinali IAQlari.

IAQsi yuzasidan issiqlik yo'qotilishini kamaytirish muhim hisoblanadi. Qoplama quvurli IAQsi uchun issiqlik izolyatsion material sifatida mineral

tola, penopoliuretan va hokazolar qo'llaniladi. **1.7-rasmda** ko'rsatilgan termogrammadan ko'rinib turibdiki, ochiq havoda turgan qoplama quvurli IAQsining izolyatsiyasidagi harorat qiymati hattoki qishda 3-5°C dan, xonada turganda esa 25°C dan oshmaydi. Haroratni ko'tarilishi faqatgina izolyatsiya qilinmagan qismlarda va tayanchlarda kuzatiladi va shu joylardan yo'qotilgan issiqlik 1-5% ni tashkil etadi. Plastinali IAQlarining tashqi yuzalaridagi harorat odatda 50-65°C ni tashkil etadi, biroq plastinali IAQlarining maydoni kichikligi sababli ushbu yo'qotilish 1-3% dan oshmaydi.



1.7-rasm. Turli konstruksiyali IAQlarining tashqi yuzasidagi termogrammalar.

§1.4. Issiqlik almashinuv qurilmalarini ifloslanishi va zanglashi.

Jahonda IAQlarida cho'kmalarni hosil bo'lish muammolari dolzarb hisoblanadi. Aynan yevropa ittifoqida ushbu muammoni yechish uchun yiliga 1,6-2,1 mlrd. yevro ajratiladi. Mamlakatimizda oxirgi isitish mavsumidagi ekspluatatsiya natijalari shuni ko'rsatadiki, issiqlik ta'minoti tizimining eng kam ishonchli qismi issiqlik uzatish qurilmalari bo'lib, mamlakatimiz issiqlik ta'minoti tizimining ishonchliligi yevropa mamlakatlariga qaraganda 2,5 marta kamdir. Issiqlik ta'minoti tizimining IAQlarini va issiqlik tarmoqlarini zararlanishining asosiy sababi quvur metalining korrozion buzilishi hisoblanib, barcha shikastlanishlarning 25% dan ortig'i ichki korroziya bilan bog'liq. Bularning asl sababi eskirgan konstruksion materiallarni uzoq vaqt qo'llash, texnik ekspluatatsiyaning pastligi, shuningdek suvga ishlov berishda texnik va texnologik takomillashmagan usullardan foydalanish hisoblanadi.

Ifloslanish va yemirilish issiqlik uzatuvchi devorlarning termik qarshiligini oshiradi, natijada IAQlarining xarakteristikasi yomonlashadi. Ifloslanish asosan ishchi suyuqliklarni ifloslanishidan, yuzalarga ishlov berishning yomonligi va issiqlik almashinuv yuzasida g'adir-budirlikni yuzaga kelishidan, korroziya esa sifatsiz konstruksion materiallar va tajovuzkor ishchi jismlardan foydalanishdan yuzaga keladi (**1.8-rasm**).



1.8-rasm. Qoplama quvurli IAQlari quvurini va plastinali IAQlari kanalining ifloslanish namunalari.

Qoplama quvurli IAQlarida mexanik, kimyoviy yoki gidromexanik tozalashlar qo'llaniladi (**1.9-rasm**). Quvurlarni mexanik tozalash abraziv konusni quvur ichidan o'tkazishga asoslangan. Bu quvurlarda teshik yuzaga kelishiga olib keladi. Bunda qoplama quvurli IAQlarining quvurli matritsalar resursi 2 yilgacha qisqaradi. Bundan tashqari bunday mexanik tozalash usulini qo'llash issiqlik almashinuvini jadallashtirgichlarning asosiy turlarini qo'llash imkonini bermaydi.



a)



b)



v)

1.9-rasm. Suvni kimyoviy tozalash qurilmalari:

a-natriy-kationitli (AKVA-DUU va standart moslama); b-OEDFK va KKF kompozitsiya; v-suvni elektromagnit qayta ishlash AKVAKODER AK-6.

Gidromexanik tozalash IAQlarining ishchi traktida gidrozarbalarni hosil qilish yoki ishchi traktidan suv-havo aralashmasini yuqori tezlikda o'tkazishga asoslangan. Birinchi holatda o'pirilish va mikroyoriqlar yuzaga kelishi mumkin, bu esa issiqlik tashuvchini sizib chiqishiga sabab bo'ladi. Ikkinchi holatda cho'kma va nakiplarning bir qismiginasi bartaraf etiladi.

Hozirgi vaqtda IAQlari yuzalarida ifloslik va korroziyani kamaytirish uchun quyidagilar tavsiya etiladi:

- tozalangan ishchi muhitlarni qo'llash, suvga magnitli ishlov berish yoki suvga maxsus qo'shimchalarni qo'shish;
- ishchi yuzalarni doimiy mexanik, kimyoviy yoki gidromexanik tozalash;
- yuzalarga ishlov berish va maxsus qoplamalardan foydalanish.

Nakip va korroziyani oldini olishning istiqbolli usullaridan biri ingibitorlardan (susaytirgich) – KKF kompozitdan foydalanish hisoblanadi. Nakip hosil bo'lishini susaytirish embrion hosil bo'lish kinetikasini va kristallarning ortishini o'zgartirish hisobiga amalga oshiriladi. Kritik o'lchamga yetmagan embrionlar tarqatib yuboriladi, kristal o'lchamdan kattalari yoki kristal tuzilishni ortish jarayonida kalsiydan aragonitga o'zgartiriladi yoki kristal tuzilishdan ajratiladi.

Hozirgi vaqtda "Nijnekamskneftexim" AJ da suzuvchan qalpoqchali koplama quvurli IAQlarining quvurlararo bo'shlig'idagi qattiq cho'kmalarni tozalash bo'yicha katta loyiha amalga oshirilmoqda (qurilmaning uzunligi – 7163 mm, diametri – 900 mm, quvurlar panjarasi X18N10T markali zanglamaydigan po'latdan tayyorlangan (**1.10-rasm**)).



**1.10-rasm. Qoplama quvurli
issiqlik almashinuv qurilmasi.**



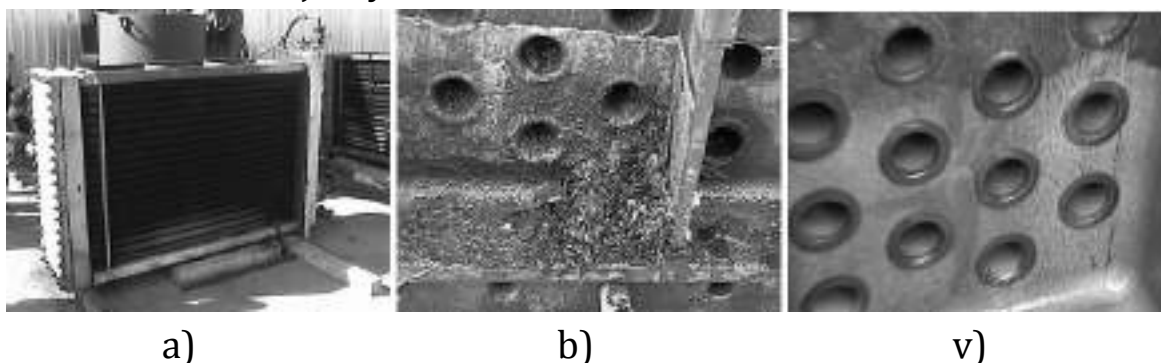
**1.11-rasm. IAQlarining
quvurlar to'plamini
tozalashdan keyingi holati.**

Ushbu loyiha bo'yicha IAQlarini yuvish o'tgan yili ekspluatatsiyadan chiqarildi, bunga sabab u mahsulotni texnologik reglamentda nazarda tutilgan parametrlargacha sovitishni ta'minlay olmadi. Yuvishdan so'ng IAQlari quvurlararo bo'shlig'ining 80% qismi cho'kmalardan to'liq tozalangan. Quvurlararo bo'shliqning harakatsiz zonalarida asosan pastasimon massaga ega bo'lgan bir qancha cho'kmalar qolgan. Ushbu massa sovuq suv oqimi bilan yuvilgan. Qattiq zarrachalarni tutgichda

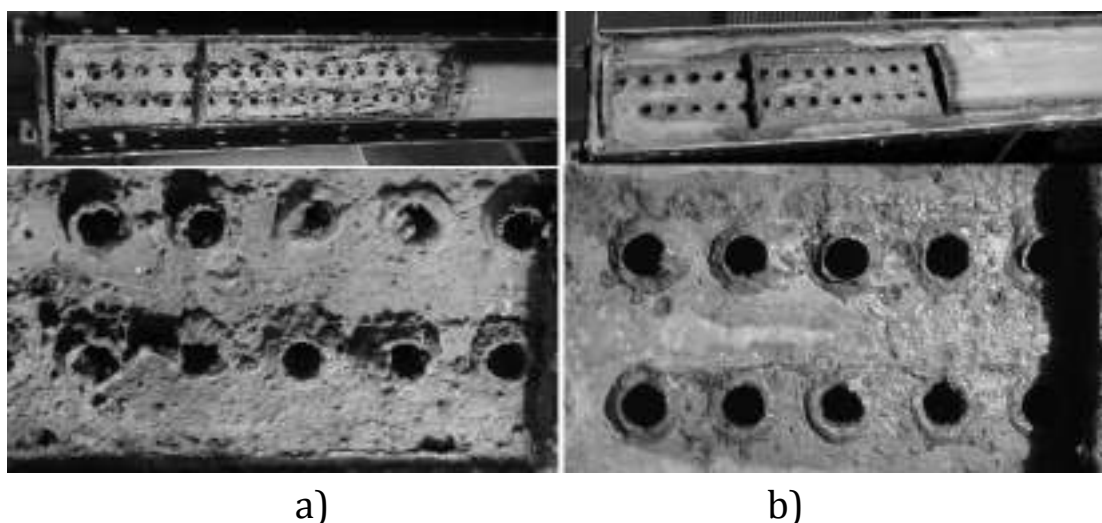
taxminan 1,5 m³ cho'kma yig'ilgan. Tozalangan quvurlarning holati 1.11-rasmda ko'rsatilgan.

Quyida IAQlarini "Komplekson KKF" yordamida tozalash namunasi keltirilgan. 1.12-rasmda chiqib ketuvchi gazlarda ishlovchi GPA 25 MVt li qozon-utilizatorning tozalashdan oldingi va keyingi holati ko'rsatilgan. 1.13-rasmda "KamAZ" AJ quyma zavodining havoni maromlash tizimlaridagi IAQlarining tozalashdan odingi va keyingi holati ko'rsatilgan.

Hozirgi vaqtda sanoatda plastinali IAQlari keng qo'llanilmoqda, ular zanglamaydigan po'latdan tayyorlangan gofrlangan plastinadan yig'ilgan va issiqlik almashinuvida ishtirok etadigan ikkita suyuqlik uchun kanallar hosil qilingan. IAQsining konstruksiyasi shunday tuzilganki, issiqlik almashinuv yuzalarini tozalash uchun u oson va davriy ravishda qismlarga ajratiladi, chunki ushbu yuzalar eng kichik g'adir-budirlikli po'lat listlardan shtamplab tayyorlanadi. Bularning barchasi issiqlik almashinuv yuzalaridan iflosliklarni tozalash jarayonlarini osonlashtiradi.



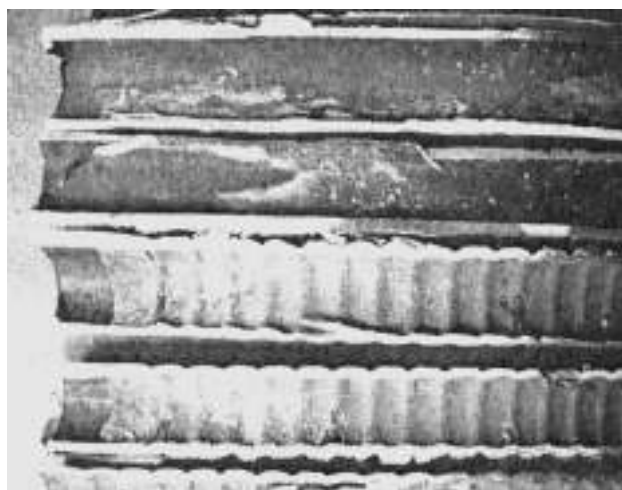
1.12-rasm. Chiqib ketuvchi gazlarda ishlovchi GPA 25 MVt quvvatli qozon-utilizatorning (a) tozalashdan oldingi (b) va keyingi (v) holati.



1.13-rasm. "KamAZ" AJ quyma zavodining havoni maromlash tizimlaridagi IAQlarining tozalashdan odingi (a) va keyingi (b) holati.

IAQlari quvurlarida hosil bo'ladigan cho'kmalar bilan kurashishning eng samarali usullaridan biri turbulizatorlarni qo'llashdir. Uning asosiy mazmuni quyidagicha, quvurning tashqi yuzasida nakatka yordamida belgilangan oraliqlar bilan halqali uymalar hosil qilinadi, natijada quvurning tashqi yuzasida ravon konfiguratsiyali halqali diafragmalar hosil bo'ladi. Cho'kma bilan kurashishning xuddi shunday usuli [4-6] tadqiqot ishlarida keltirilgan. Masalan [6] tadqiqot ishida quvurlarning bir qismi St.20 uglerodli po'latdan, bir qismi X18N10T zanglamaydigan po'latdan va latundan tayyorlangan. Suv quvurlarda 80-115°C haroratgacha qizdiriladi, bunda suv yuqori karbonatli qattiqlikka 20 mg-ekv/l ega. IAQsiga kirayotgan issiqlik tashuvchilarning belgilangan parametrlarida o'tkazilgan tajriba tadqiqotlari 2000 soatgacha davom etgan. Bunda tajriba davomida issiqlik uzatish koeffitsiyentini va cho'kma qatlamining termik qarshiligini o'zgarishi aniqlangan, shuningdek termik qarshilikni suvning tezligiga, haroratiga va turbulizatorlarning parametrlariga bog'liqligi o'rganilgan.

Turbulizator shakli, quvur devorining materiali va issiqlik tashuvchilar tezligining cho'kma hosil bo'lish jarayoniga ta'siri quyidagi qonuniyat bo'yicha namoyon bo'lgan: uglerodli va zanglamaydigan po'latdan tayyorlangan tekis quvurlar uchun cho'kmaning solishtirma miqdori 1,4...4 martagacha farq qilgan, shuningdek cho'kma korroziyani boshlanishi bilan birga hosil bo'lgan va quvur devorida eng ko'p tuz miqdori namoyon bo'lgan. Latun va zanglamaydigan po'latdan tayyorlangan silliq quvurlarda cho'kmani hosil bo'lishi ancha kam, asosan quvur uzunligi bo'yicha "yupqa qatlam" hosil bo'lgan bo'lib, lokal xarakterga ega. Bunda latun quvurlarda cho'kma zanglamaydigan po'latdagiga qaraganda ancha kam (1.14-rasm).



1.14-rasm. Silliq va nakatkali quvurda cho'kmalarni hosil bo'lishi.

Turbulizatorli quvurlarda cho'kma asosan chuqurlarda joylashgan bo'lib, bo'rtiqlarda cho'kmalarni hosil bo'lish jadalligi kamaygan. Silliq va nakatkali quvurlarni taqqoslash shuni ko'rsatadiki, nakatkali quvurlarda silliq quvurlarga nisbatan loyqali cho'kmalar 1,5...2 marta yuqori, tuzli cho'kmalar esa 1,5...2 marta kam. Issiqlik tashuvchining yuqori tezliklarida cho'kmalarni issiqlik almashinuv yuzasi bo'yicha taqsimlanishi bir xil bo'ladi. Shuningdek IAQlarida laminar oqim rejimida nakatkali quvurlardan foydalanish samarasiz, ularda silliq quvurlarga qaraganda ko'p miqdorda qatlam hosil bo'ladi. Turbulent rejimida turbulizatorli quvurlardan foydalanishda cho'kmalarni hosil bo'lishi silliq quvurga qaraganda kam bo'ladi. Chunki suyuqliklarni turbulent harakat rejimida oqimni uyurmаланishi sodir bo'ladi va cho'kmalar yuvilib turadi. Shuni ham esda tutish kerakki, turbulizatorlar nafaqat cho'kmalarni oldini oladi, balki issiqlik almashinuvini jadallashtiradi, bunda issiqlik uzatish koeffitsiyenti va issiqlik almashinuv qurilmasining FIK ortadi.

§1.5. Issiqlik almashinuv qurilmalarigi termomexanik muammolar.

Transport obyektlari uchun mo'ljallangan energetik va kuch qurilmalarining ko'pgina sinflari uchun dinamika masalalari asosiy hisoblanadi. Masalan, o'tish davrining davomiyligi IAQlari ishlashining to'liq vaqtini sezilarli ulushini tashkil etadi. Shuningdek ushbu qurilmalardagi IAQlari juda inersion hisoblanadi va u barcha qurilmalarning dinamik xarakteristikasiga va qurilmani xavfsiz ishlatish muammosi bilan bog'liq, bu ayniqsa o'tish rejimi rejalashtirilmagan tartibda amalga oshirilganda, masalan elektr ta'minoti o'chirilgan vaqtda yaqqol seziladi. Bunday hollarda haroratni keskin o'zgarishida termik zo'riqish, gidravlik zarba natijasida suyuqlik tiqini hosil bo'ladi, bu esa uzatish quvurlari va ularning birikmalarini buzilishiga olib keladi. Maksimal ruxsat etilganga yaqin parametrli ish rejimlarida hisoblangan qurilmalar uchun dinamik xarakteristikaning ishonchlilik qiymati juda zarur hisoblanadi. Misol tariqasida bug' turbina qurilmasining IAQlarini ishonchliligini ko'rib chiqamiz. Zamonaviy bug' turbina qurilmalarining (BTQ) asosiy va yordamchi qurilmalarining ishonchliligi ekspluatatsiyada turlicha shakllarda namoyon bo'ladi. Asosiy jihozlarni (qozon, turbina) ishdan chiqishi BTQsini ishdan chiqishiga olib keladi, shuningdek ayrim holatlarda yordamchi jihozlarni ishdan chiqishi ham BRQsini to'xtashiga olib keladi.

BTQlarining IAQlarini ishlashida to'xtalishlarni sodir bo'lishi bug' turbina qurilmasi ishlashining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarini pasayishiga olib keladi. Shu bilan birgalikda bug' turbina qurilmasining IAQlarini massa o'lcham xarakteristikasi turbina jihozining o'xshash ko'rsatkichlari bilan taqqoslanadi, ma'lumki IAQlari resursi amalda doimo turbina resursidan kam bo'ladi. IAQlarining ishonchliligini bunday kompleks baholash dolzarb vazifa hisoblanadi. Bug' turbina qurilmasining zararlangan IAQlarini tahlili shuni ko'rsatadiki, qurilmaning zararlanishini 70% gacha qismi korrozion va erozion zararlanishga, taxminan 25% ga yaqin qismi quvurlar to'plamini vibratsiyasiga to'ri keladi. Vertikal IAQlari uchun zararlanish sabablarining taqsimlanishi amalda o'zgaradi, ya'ni 70% gacha zararlanish mutaxassislarning fikriga ko'ra quvurlar to'plamidagi quvurlarni vibratsiyasi hisobiga to'ri keladi. Shular bilan bog'liq holda IAQlarining ishonchliligini hisoblash va loyihalash uchun ilmiy asoslangan ma'lumotlarni olish maqsadida vibratsion xarakteristikani o'rganishga yo'naltirilgan tadqiqotlar dolzarb hisoblanadi.

§1.6. Yuqori haroratli issiqlik almashinuv qurilmalari.

Issiqlik texnikasi mutaxassislari IAQlari ishchi haroratini ikkita harorat ko'lamiga ajratishadi: birinchisi $-150...+200^{\circ}\text{C}$, ikkinchisi 1400°C gacha. IAQlarini ekspluatatsiya qilishda birinchi harorat ko'lami qiyinchilik tug'dirmaydi. Yuqori haroratli IAQlari asosan metallurgiya, shisha va neft sanoatlarida keng qo'llaniladi. Bunday IAQlarini loyihalash va tayyorlashdagi asosiy muammo issiqlikni radiatsion uzatishni inobatga olish va issiqlikka bardoshli materialni tanlashdir. Hozirgi kunda asosan keramik materialli IAQlari keng qo'llaniladi (1.15-rasm).



1.15-rasm. Gaz turbina qurilmasidan chiqib ketayotgan gazlarni utilizatsiya qilish uchun plastina-qovurg'ali mikro IAQlari.

Zamonaviy keramik materiallar asosida yuqori samarador ixcham IAQlarini ishlab chiqish imkoniyati mavjud. Masalan [7] tadqiqot ishida gaz

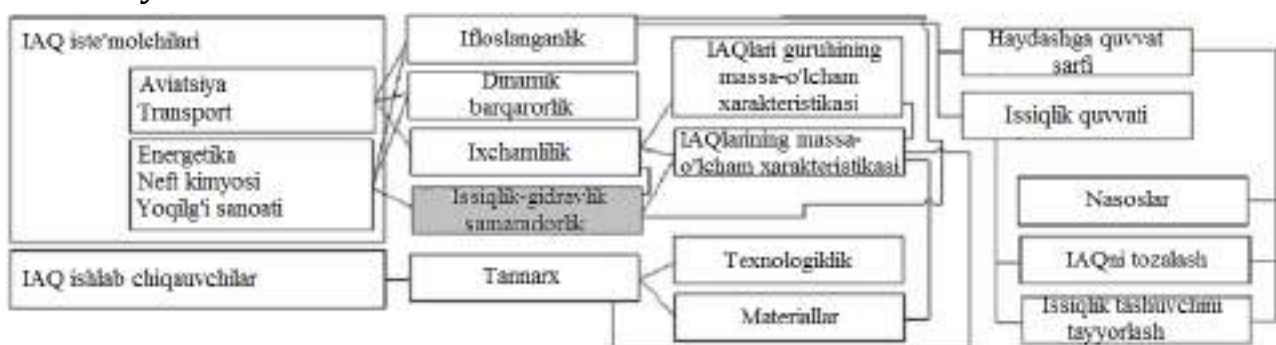
turbina qurilmasidan chiqib ketayotgan gazlarni utilizatsiya qilish tizimi uchun plastina-qovurg'ali mikro IAQlari taklif etilgan. O'lchamlari 0,37x0,37x0,2 m va devorining qalinligi 0,3 mm, qovurg'asining qalinligi 0,2 mm bo'lganda issiqlik quvvati 210 kVt, issiqlik samaradorligi 90%, ishchi muhitning harorati va bosimi – 1300 K gacha va 4 bar gacha. Bunda ikkita cheklovchi omillar mavjud: keramik materialni qimmatligi va keramik IAQlariga taalluqli ilmiy tadqiqotlarni kamligi.

§1.7. Issiqlik almashinuv qurilmalarining ixchamligini oshirish.

Ko'pgina issiqlik-kuch qurilmalarining quvvatlarini ortishi yuqori samarador va ixcham IAQlarini ishlab chiqish zaruriyatini tug'dirdi. Masalan ichki yonuv dvigatellarining radiatorlari dvigatel hajmining 25...30% qismini band qiladi.

1.16-rasmda keltirilgan digaramma shuni ko'rsatadiki, issiqlik-gidrodinamik samaradorlik IAQlarini ishlab chiqarish va ekspluatatsiya qilishda amaldagi barcha asosiy ko'rsatkichlarini aniqlaydi.

IAQlarining samaradorligini va ixchamligini oshirish masalasini IAQlarida issiqlik almashinuvini jadallashtirishning istiqbolli usullarini va IAQlarining yangi sxemalarini qo'llash bilan muvaffaqiyatli yechish mumkin. Turli IAQlarini ishlab chiqish va ekspluatatsiya qilish tajribasi shuni ko'rsatadiki, hozirgi vaqtgacha ishlab chiqilgan issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullari qurilma tashqi o'lchamini 1,5...2 marta kichrayishini ta'minlaydi.



1.16-rasm. IAQlarini ishlab chiqarish va ekspluatatsiya qilishdagi asosiy ko'rsatkichlarning o'zaro bog'liqligi.

Issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha tadqiqotlar turli mamlakatlarda jadal sur'atlar bilan rivojlanib bormoqda. Bizning va MDH mamlakatlarida olib borilgan tadqiqotlar ushbu muammoni yechishda yetarlicha hissa qo'shmoqda. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha

V.M. Antufyev, V.M. Buznik, G.I. Voronin, G.A. Dreyser, Ye.V. Dubrovsk, N.V. Zozulya, E.K. Kalinin, V.K. Migay, V.K. Shukin, D.N. Muxiddinov, G'.N. Uzoqov, R.P. Boboxodjayev, U.X. Ibragimovlar va boshqa soha olimlarini yetarlicha ishlar mavjud. Yuqori samarador IAQlarini sanoat amaliyotida keng qo'llash va metalni tejash bo'yicha chet el ishlanmalarini xalq xo'jaligida qo'llash bo'yicha bizning mamlakatimizda kam qiziqishlar uyg'otmoqda.

Hozirgi vaqtda konvektiv issiqlik almashinuvini jadallashtirishning turli-tuman usullari taklif etilgan va tadqiqot qilingan [8]. Bir fazali issiqlik tashuvchilar oqimida turli konstruksiyali oqim turbulizatorlari qo'llaniladi: g'adir-budir yuzalar, qovurg'alash hisobiga yuzani oshirish, spiral qovurg'alar yordamida oqimni uyurmalash, shnekli uyurmlagich, kanalning kirish qismiga o'rnatilgan uyurmalagichlar, suyuqlik oqimiga gazli pufakchalarni aralashtirish, gaz oqimiga esa – qattiq zarrachalar yoki suyuqlik tomchilarini aralashtirish, issiqlik almashinuv yuzasini aylantirish yoki vibratsiyalash, issiqlik tashuvchilar oqimini pulsatsiyalash, oqimga elektrostatik maydonni ta'sir ettirish, chegara qatlamlaridan oqimni so'rib olish, oqimchali tizimlar va hokazo. Ushbu usullarning samaradorligi turlicha bo'lib, eng yaxshi holatlarda issiqlik berish 2...3 martagacha ortadi, ammo jadallashtirishni turli usullari uchun energiya sarfi ham turlicha bo'ladi. Qaynashda issiqlik almashinuvini jadallashtirish pufakchali qaynashda nafaqat issiqlik berishni jadallashtiradi, balki pufakchali qaynashda issiqlik oqimi maksimal, plyonkali qaynashda minimal bo'ladi. Ko'rinib turibdiki, qaynashda issiqlik almashinuvini jadallashtirish imkoniyati bir fazali oqimlarga nisbatan yuqori. Masalan, plyonkali qaynashda issiqlik berish 10 martagacha ortadi, kritik issiqlik oqimi esa 3 martagacha ortadi. Qaynashda issiqlik berishni jadallashtirish uchun turbulizator, uyurmalovchi moslama va qovurg'alashdan tashqari yuzalarga g'ovak metariallarni surtish, noizotermik qovurg'ani o'rnatish, g'adir-budir yuzalardan foydalanish keng qo'llaniladi.

Kondensatsiyalanishda issiqlik almashinuvini jadallashtirish kondensat plyonkasini buzuvchi turbulizatorlar yoki qovurg'alar, namlanmaydigan qoplama, tomchili kondensatsiyani hosil qilish uchun suyuqlikli stimulyatorlar, oqimni uyurmalash yoki issiqlik almashinuv yuzasini aylantirish keng qo'llaniladi.

Jadallashtirishning kombinatsiyalashgan usullari yuqori samarador hisoblanadi, masalan, turbulizatorlarni qovurg'ali yuza yoki oqim

uyurmalgich bilan kombinatsiyalash, suspenziyaning oqimida uyurmalovchi moslamalarni qo'llash, qaynashda – g'ovak qoplamali turbulizatorlardan foydalanish va hokazo.

Quyida IAQlarini ixchamlashtirishning yangi usullarini va ularda issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullarini ko'rib chiqamiz.

Energetika, neft kimyosi va kriogen texnikada eng keng qo'llaniladigan IAQlaridan biri plastina-qovurg'ali IAQlari hisoblanadi. Ushbu qurilmalarning tashqi o'lchamlari, massasi va tannarxini kamaytirish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi. Uning yechimi dumaloq bo'lmagan quvurlarda issiqlik almashinuvi jadallashtirish jarayonining samarali fizik modelini ishlab chiqish va tajribaviy tasdiqlashni talab etadi. Plastina-qovurg'ali IAQlari bo'yicha oxirgi yillardagi ishlar asosan V.E. Dubrovskga [9] tegishlidir. Tizimli tajribaviy tadqiqotlar natijasida nazariy asoslangan va tajribaviy tasdiqlangan eng samarali usul – bu issiqlik almashinuv jarayonlarini ratsional jadallashtirish hisoblanadi. U quyidagi shart bo'yicha xarakterlanadi:

$$\left(\frac{Nu}{Nu_t}\right)_{Re=idem} \geq \left(\frac{\xi}{\xi_t}\right)_{Re=idem} \quad (1.1)$$

Ushbu baza asosida aviatsiya va kosmos texnikasi, avtomobil transporti uchun yuqori samarador plastina-qovurg'ali IAQlari ishlab chiqilgan va joriy etilgan.

O'tgan asrning 80-yillariga kelib, asosiy e'tibor devor oldi zonalarida issiqlik almashinuvi jadallashtirishga qaratildi. Ushbu usullar oldingi usullarga qaraganda muhim afzalliklarga ega bo'lib [10], ular oqimni faqatgina devor oldi zonalarida turbulizatsiyalash hisobiga yuqori energetik samaradorlikka ega. Bunda oqim haroratning maksimal ko'ndalang gradiyent joyidagina turbulizatsiyalanadi. Buning natijasida trakt orqali issiqlik tashuvchini haydashga energiya sarfi butun oqimni turbulizatsiyalashdagi energiya sarfi bilan solishtirganda ancha kam bo'ladi.

Barcha sohalarda qo'llanilayotgan ko'pgina IAQlarida issiqlik qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga ajratuvchi devor orqali uzatiladi. Shuning uchun barcha turdagi IAQlarining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari issiqlik almashinuv yuzasining makro va mikro tuzilishlari konstruksiyasini loyihalashdagi asoslangan yechimlarning ishonchlilik darajasidan aniqlanadi. Bu asosan qoplama quvurli, qovurg'a quvurli, plastinali, plastina-qovurg'ali va rekuperativ IAQlarining boshqa turlari

uchun taalluqli. Aynan devor oldi qatlamlaridagi gidrodinamik va issiqlik almashinuv jarayonlari IAQlarining samaradorligini va ixchamliligini belgilaydi.

Devor oldi issiqlik almashinuvini jadallashtirgichlar turli konstruksiyada tayyorlanishi mumkin. Ular – silindrsimon, sferik, prizmasimon bo'rtiqlar hamda ko'ndalang, bo'ylama, normal va og'ma holatdagi chuqurchalar shaklida bo'lishi mumkin. Biroq ularda funktsiyani bajarish prinsipi bir xil va ular lokal zona yuzalaridagi chegara oqimini buzilish joylarida uzlukli joylashtiriladi. Ushbu buzilgan devor oldi oqimi chegara qatlamni yangilaydi, uning turbulentlik darajasini oshiradi. Natijada devor yuzasiga normal bo'yicha issiqlik oqimi ortadi.

O'tgan asrning 80-yillarida issiqlik almashinuvi jadallashtirish bilan shug'ullanuvchi mutaxassislar o'rtasida IAQlarining ichki yuzasida hosil qilingan uzlukli halqali bo'rtiqlar ancha mashhur edi. Chunki devor oldi oqimini turbulizatsiyalashning ushbu usuli texnologik sodda va yuqori energetik samaradorlikka ega.

E.K. Kalinin, G.A. Dreyser va boshqalar birinchi marta gidravlik qarshilikni kam ortishi hisobiga issiqlik berishni sezilarli darajada oshirish mumkinligini ko'rsatishdi. Ushbu natija ko'ndalang yarim dumaloq bo'rtikli dumaloq quvurda olingan bo'lib, issiqlik almashinuvini ortishi 2,9 martaga yetgan [8].

Biroq halqali yarim dumaloq bo'rtiqlardan foydalanish issiqlik almashinuvini jadallashtirishning barcha muammolarini hal etmaydi. Uzlukli halqali bo'rtikli quvurdan tayyorlangan IAQlaridan tashqari devor oldi issiqlik almashinuvini jadallashtirishning boshqa usullari ham qo'llaniladi, masalan sferik chuqurchalar. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishning ushbu usuliga qiziqish asosan G.I. Kiknadze tadqiqotining natijalari e'lon qilingandan keyin boshlandi, unda kanal yuzasiga sferik chuqurchalar hosil qilingan tizimni yuqori energetik samaradorlikka ega ekanligi ko'rsatib berilgan. Mualliflar ushbu dalilni sferik chuqurchalarda girdobsimon uyurmaviy tuzilishni hosil bo'lishi bilan izohlaydi. G.P. Nagogo sovitiladigan turbina kurakchalari traktida sferik chuqurchalar tizimidan foydalanish bo'yicha yaxshi natijalar taqdim etgandan keyin bu usulga bo'lgan qiziqish yanada kuchaydi. Bunday kanallarda issiqlik almashinuvini jadallashish darajasi 2...4,5 martagacha yetadi, bunda gidravlik qarshilik dastlabki holaticha saqlanadi. Akademik

A.I. Leontyev fikriga ko'ra, sferik chuqurchalar yordamida issiqlik almashinuvini jadallashtirish istiqbolli hisoblanadi, ammo o'z-o'zidan hosil bo'ladigan girdobsimon uyurmaviy tuzilish sharoitida turbulentli issiqlik almashinuv nazariyasiga yangi yondoshuvni kiritish zarur bo'ladi.

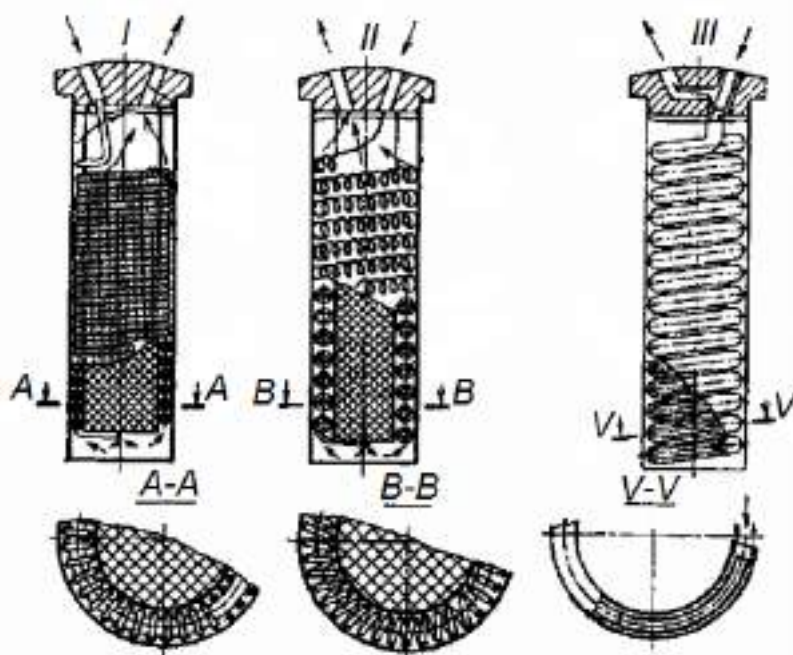
Issiqlik almashinuvini yuqori darajasiga erishish nuqtai nazaridan issiqlik almashinuvi jadallashtirgichlari orasida eng istiqbollisi g'ovaksimon materiallardan foydalanish hisoblanadi, ular yuqori texnologik holatda tayyorlangan bo'lib, issiqlik berishni 10...100 martagacha jadallashtirish imkonini beradi. G'ovak materiallarda yuzani sezilarli darajada ortishi hisobiga issiqlik almashinuv jadallashadi va devor oldi g'ovaklarida issiqlik almashinuvini jadalligi juda yuqori bo'ladi. Bunda quyidagiga e'tibor berish kerak, ya'ni bu jarayonda jadallashtirish gidravlik qarshilikni sezilarli ortishi bilan bog'liq, bu esa o'z navbatida g'ovaksimon jadallashtirgichlarni qo'llashdagi iqtisodiy ahamiyatni pasayishiga olib keladi. Hozirgi vaqtda g'ovaksimon tuzilishni hosil qilish va issiqlik almashinuvi yuqori darajasi saqlanganda kam gidravlik qarshilikka ega bo'lgan g'ovaksimon materiallarni olish usullarini ishlab chiqish bo'yicha tadqiqotlar jadal olib borilmoqda. Hozirgi vaqtda mavjud g'ovaksimon tuzilmalarning ichida eng istiqbollisi – yuqori g'ovaklikli materiallar, tartiblangan g'ovaklikli materiallar, cho'tkali, vafli va yoriqli tuzilishli, kesishuvchi mikrokanalli to'rli va prujinali g'ovak materiallar, donador to'kilmalar hisoblanadi. G'ovaksimon materiallarni IAQlarida foydalanish imkoniyatlari bo'yicha tadqiqot natijalari A.Ye. Bergls, P.Ye. Megerin, K. Uebb, V.V. Xaritonov, V.N. Ansiferov, S.V. Belov, L.L. Vasilyev, Y.A. Zeygarnik, V.A. Mayorov, V.I. Subbotin, V.M. Polyayev va ko'pgina boshqa olimlarning tadqiqot ishlarida keltirilgan.

So'nggi yillarda mikrokanalli IAQlari va moslamalariga qiziqish ortib bormoqda. Bu elektronika va tibbiyotni keskin rivojlanishi bilan bog'liq. Mini va mikrokanallar biologik tizimlarda keng tarqalgan. Mikroelektronika moslamalarini sovitish uchun kichik issiqlik quvurlari, bir va ikki fazali oqimli mikro va minikallar ishlab chiqilgan va foydalanib kelinmoqda. Sanoatda suyuqlik bilan sovutiluvchi shaxsiy kompyuterlar ham ishlab chiqarilmoqda.

Kanallarning bir nechta tasniflari mavjud: S.S. Mexendal, A.M. Yakob va R.K. Shax (2000 y) bo'yicha – diametri 1-100 mkm bo'lgan kanallar mikrokanallar, 100 mkm dan 1 mm gacha – mezokanallar, 1-6 mm –

makrokanallar, 6 mm dan katta bo'lganlari – konvektiv kanallar; S.J. Kandiikar (2001 y) bo'yicha – 50-600 mkm – mikrokanallar, 600 mkm dan 3 mm gacha – minikanallar, 3 mm dan katta – konvektiv kanallar; S.J. Kandiikar va S. Joshi (2003 y) bo'yicha – 10-200 mkm – mikrokanallar, 200 mkm dan 3 mm gacha – minikanallar, 3 mm dan katta – konvektiv kanallar.

Kichik diametrli mikrokanallar yuqori issiqlik berish koeffitsiyentini (suyuqlikning oqimida – $7000 \text{ Vt}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ dan yuqori, gazning oqimida $400-2000 \text{ Vt}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) ta'minlaydi. Mikrokanallarning farqli xususiyati shundaki, ulardan yuqori ixchamlikka ($1500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ dan yuqori) ega bo'lgan mikro IAQlarini ishlab chiqish imkoniyati mavjud. Kichik diametrli kanallarda asosan laminar oqim rejimi tashkil etiladi, ya'ni bosimni yo'qotilishi mikrokanaldagi oqimning o'rtacha sarfiy tezligiga w' proporsionaldir. Hozirgi vaqtda buralgan tekis va qovurg'ali quvurlardan tayyorlangan mikro IAQlari taklif etilgan va ishlab chiqilgan bo'lib (1.17-rasm), mikrokanallar tizimi uchburchak, dumaloq va hokazo kesimlardan iborat (1.18, 1.19 va 1.20-rasmlar).

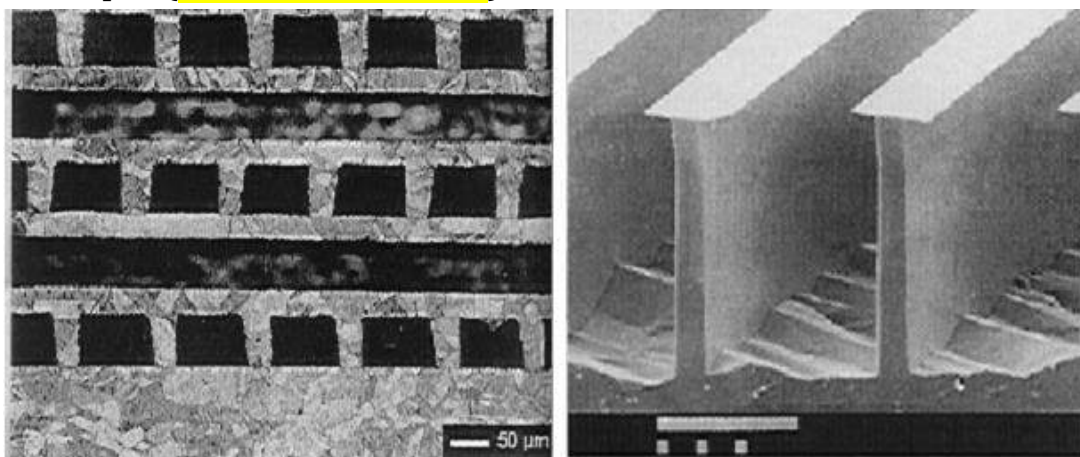


1.17-rasm. Buralgan quvurli mikro IAQlarining sxemalari.

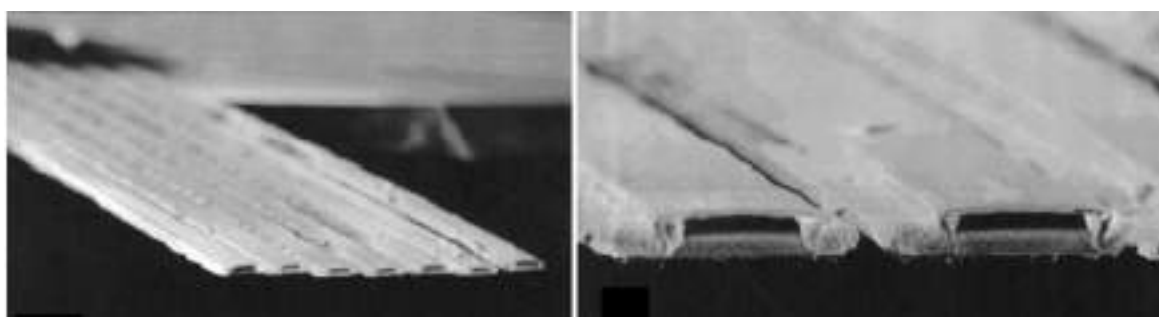
Mikrokanallardagi oqim va gidrodinamika bo'yicha tadqiqotlar Bergls, Kandiikar, Ravigururadjan, Joshi, Peterson Uebb, Choi, Pfaxler, Akost, Vu, Gambil, Lanset va hokazolarning tadqiqot ishlarida keltirilgan.

Mikro IAQlarini ishlab chiqish va ularda issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha talablar mikro va nanog'ovakli tuzilishni ishlab chiqishni va foydalanishni talab etadi. Hozirgi vaqtda turlicha

materiallardan tayyorlangan mikrog'ovakli tuzilishlar ko'plab ishlab chiqarilmoqda (**1.21-1.23-rasmlar**).



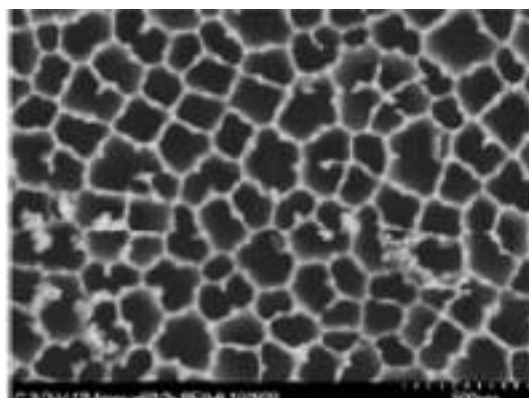
1.18-rasm. G'adir-budir devorli mikrokanallar.



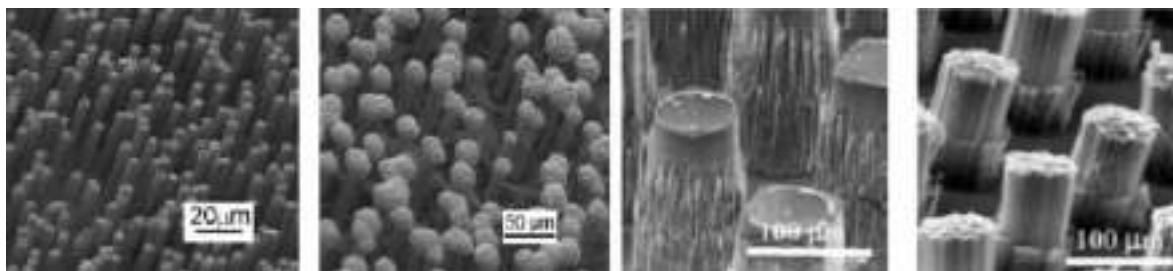
1.19-rasm. Yassi mikroquvurlar.



1.20-rasm. Mikro issiqlik almashinuv qurilmalari.



1.21-rasm. Nanog'ovakli yacheykali keramik tuzilish.



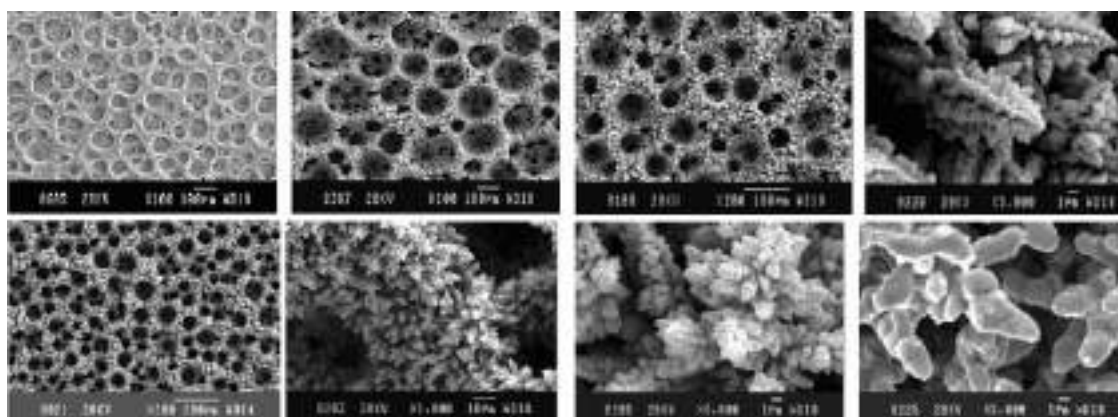
a)

b)

v)

g)

1.22-rasm. Cho'tkali mikrog'ovakli tuzilish: a va b-misli mikroqovurg'a; v-silikonli mikroqovurg'a; g-karbonli nanoquvurlar.



1.23-rasm. Dendrit zarrachalardan tashkil topgan mikrog'ovakli tuzilish (x100-x5000 marta).

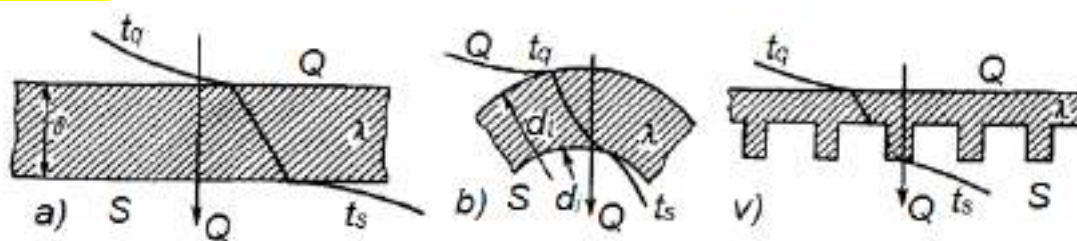
Nazorat savollari.

1.

II-BOB. SANOAT ISSIQLIK VA MASSA ALMASHINUV QURILMALARINING ISSIQLIK ALMASHINUV YUZASI VA UNING SAMARADORLIGI

§2.1. Issiqlik almashinuv yuzasi samaradorligining xarakteristikasi

Issiqlik almashinuv qurilmalarida (IAQ) issiqlik uzatish yuzasining maydoni F asosiy ko'rsatkich hisoblanib, geometrik o'lchamlarni va issiqlik-texnik parametrlarni qurilmaning texnik-iqtisodiy xarakteristikasi bilan bog'laydi. Agar ikkala issiqlik tashuvchi uchun ham F_{yu} bir xil bo'lsa va qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga issiqlikni uzatilishi yuza orqali amalga oshirilsa, u holda F_{yu} ning ahamiyati yana ham ortadi (2.1-rasm, a).



2.1-rasm. IAQlarida qaynoq issiqlik tashuvchidan (Q) sovuq issiqlik tashuvchiga (S) issiqlik uzatishning variantlari:

a – tekis devor orqali; b – silindrik devor orqali (quvurlarda); v – bir tomoni qovurg'alangan devor orqali.

Qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilar turlicha xususiyatga ega bo'lganda issiqlik almashinuv samarasi ham turlicha bo'ladi. Bu issiqlik almashinuv, issiqlik uzatish va issiqlik balans tenglamalaridan aniqlanadi. Agar issiqlik almashinuv yuzasining shakli tekisdan farq qilsa (masalan 2.1, b-rasmdagi quvur devori yoki 2.1, v-rasmdagi quvur yuzasi), u holda qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarning issiqlik almashinuv yuzasi maydoni ham turlicha bo'ladi.

Oddiy holda tekis yuza orqali issiqlik uzatish quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$F = \frac{Q}{k(t_q - t_s)} \quad (2.1)$$

bu yerda k – yuza orqali o'rtacha issiqlik uzatish koeffitsiyenti, t_q va t_s – qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarning o'rtacha haroratlari.

Issiqlik uzatish yuzasi maydonining dF elementi uchun issiqlik miqdori lokal qiymatlar shaklida ifodalanadi:

$$dQ = k(t_q - t_s)dF \quad (2.2)$$

Bundan integrallash yo'li bilan qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarning berilgan o'zaro harakat sxemasi uchun t_q va t_s ning o'zgarish qonuniyatini topamiz.

Issiqlik uzatish koeffitsiyentini hisoblash ifodasi yuzaning shakliga bog'liq. Tekis bir jinsli devor orqali issiqlik uzatiladigan hol uchun issiqlik uzatish koeffitsiyentining o'rtacha qiymati quyidagicha:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_q} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (2.3)$$

bu yerda $\frac{1}{\alpha_q}$ – qaynoq issiqlik tashuvchining issiqlik berishdagi termik qarshilik; $\frac{\delta_d}{\lambda_d}$ – qalinligi δ_d va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ_d bo'lgan devorning issiqlik o'tkazuvchanligini termik qarshiligi; $\frac{1}{\alpha_s}$ – sovuq issiqlik tashuvchining issiqlik berishdagi termik qarshilik; α_q va α_s – qaynoq va sovuq yuzalarning issiqlik almashinuv koeffitsiyentlari.

Ko'pgina amaliy masalalarda F qiymatni aniqlash, qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarning yo'li bo'yicha lokal haroratlarni aniq bog'liqligini inobatga olishni talab etadi [11-13].

Barqaror rejimda issiqlik uzatishda va atrof-muhitga issiqlik yo'qotilishi inobatga olinmaganda IAQlarida uzatilgan issiqlik miqdori Q , qaynoq issiqlik tashuvchining entalpiyasini kamayishiga va sovuq issiqlik tashuvchining entalpiyasini ortishiga teng bo'ladi:

$$Q = -G_q \Delta i_q = G_s \Delta i_s \quad (2.4)$$

yoki

$$Q = G_q(i'_q - i''_q) = G_s(i''_s - i'_s) \quad (2.5)$$

bu yerda i' , i'' - issiqlik tashuvchilarni IAQsiga kirishi va chiqishidagi entalpiyalari.

Ma'lumki $\Delta i = \bar{c}_p \Delta t$, demak:

$$Q = G_q \bar{c}_{p_q}(t'_q - t''_q) = G_s \bar{c}_{p_s}(t''_s - t'_s) \quad (2.6)$$

bu yerda $\bar{c}_{p_q}$ va $\bar{c}_{p_s}$ – ko'rilayotgan harorat intervalida issiqlik tashuvchilarning o'rtacha issiqlik sig'implari.

U holda (2.4) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$-G_q \bar{c}_{p_q} \Delta t_q = G_s \bar{c}_{p_s} \Delta t_s \quad (2.7)$$

Issiqlik tashuvchilarning massaviy sarflarini to'liq issiqlik sig'imi ifodasidan foydalansak:

$$C_q = G_q \bar{c}_{p_q} \text{ va } C_s = G_s \bar{c}_{p_s} \quad (2.8)$$

bu ifodalar "suvli ekvivalent" deb ham ataladi hamda qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarning to'g'ri oqimli parallel harakati holatida haroratlar farqini o'zgarishi quyidagicha:

$$d(t_q - t_s) = -\left(\frac{1}{c_q} + \frac{1}{c_s}\right) dQ \quad (2.9)$$

(2.2) dagi dQ qiymatni (2.9) ga qo'yamiz:

$$d(t_q - t_s) = -\left(\frac{1}{c_q} + \frac{1}{c_s}\right) k(t_q - t_s) dF \quad (2.10)$$

C_q , C_s va k qiymatlar o'zgarmas bo'lganda tenglamani 0 dan F gacha integrallaymiz:

$$-mk \int_0^F dF = \int_{(t_q-t_s)_k}^{(t_q-t_s)_{ch}} \frac{d(t_q-t_s)}{t_q-t_s} \quad (2.11)$$

Bundan to'g'ri oqimli sxema uchun zarur issiqlik almashinuv yuzasini IAQsiga kirish va chiqishdagi haroratlar farqiga bog'liqligini olamiz:

$$F = -\frac{1}{mk} \ln \frac{(t_q-t_s)_{ch}}{(t_q-t_s)_k} \quad (2.12)$$

bu yerda $m = \left(\frac{1}{c_q} + \frac{1}{c_s}\right)$.

Issiqlik tashuvchilarning teskari oqimli sxemasi uchun yechim xuddi shunday yo'l bilan aniqlanadi.

IAQlarida issiqlik tashuvchilarning kesishuvchi va ko'p yo'lli sxemalarida issiqlik almashinuv yuzasi uchun yechim juda qiyin yo'l bilan aniqlanadi, masalan harakatning barcha sxemalarini uchastkalarga bo'lish yoki sonli usullardan foydalaniladi. α_q va α_s issiqlik berish koeffitsiyentlarining qiymatlari turlicha bo'lganda F_q va F_s ning optimal qiymatiga erishish uchun xususiy yuzaning xarakteristikasidan, uning makro va mikro tuzilishidan, shuningdek konstruksion-texnologik yechimidan foydalaniladi. Shundan kelib chiqib IAQsida issiqlik almashinuv yuzasining samaradorligi yuzaning materiali va xususiyatini, uning joylashishini, makro va mikro tuzilishini tanlash bo'yicha optimal loyiha-texnologik yechimga yaqinlashish darajasi bilan xarakterlanadi.

Hozirgi vaqtda issiqlik almashinuv yuzasining samaradorligini aniqlashning boshqa usuli ham mavjud. Masalan, bir tekis qovurg'alangan

yuzali variant uchun samaradorlik koeffitsiyenti, barcha yuzadagi harorat bir xil va asosiy qovurg'aning haroratiga teng bo'lganda haqiqiy uzatilgan issiqlik miqdorini Q_h uzatilishi mumkin bo'lgan hisobiy qiymatga nisbatidan aniqlanadi.

Keyingi tahlil yo'nalishini aniqlashda muhim holat bu – real issiqlik tashuvchilarning o'zaro harakatini inobatga olib baholashdir. Ushbu holatda samaradorlik aniq IAQlari uchun va issiqlik tashuvchilarning aniq ishchi parametrlarini uchun aniqlanadi.

§2.2. Issiqlik almashinuv yuzasining makro tuzilishi.

Issiqlik almashinuv yuzasining makrotuzilishi umumiy holatda yuza geometriyasida texnologik jarayon yo'li bilan amalga oshirilgan o'zgarishlarni (gofrlash, chuqurchalash, qovurg'alash, silliqlash va hokazo) mavjud bo'lishidir. Ular bo'lmaganda yuzalar texnik silliq deb ataladi. Texnik silliq yuzalarning makro tuzilish xarakteristikasi shakllarni hisobiy qiymatidan og'ishi bilan chegaralanadi (masalan dumaloq quvurlar uchun kesimi bo'yicha ellipssimon, uzunligi bo'yicha "bochkasimon" va hokazo).

Texnik silliq quvurning to'lqinligi tekislikka nisbatan belgilangan qadam va davriy ravon og'ishi bilan xarakterlanadi hamda uning qiymati 0,08 dan 240 mm gacha oraliqda bo'ladi. Zamonaviy usullar yordamida olinadigan texnik silliq yuza uchun tekislikdan haqiqiy og'ish 250 mm dan oshsa, bu ***shakl xatoligi*** deb ataladi. Shtamplab hosil qilinadigan tekis issiqlik almashinuv yuzalari uchun haqiqiy og'ish to'lqinlik chegarasida joylashadi. Mexanik ishlov beriladigan yuzalar uchun makro tuzilish belgilangan chegaralarda bo'ladi.

Issiqlik almashinuv yuzasini rivojlantirish qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilarni to'qnashish maydonini oshirish maqsadida amalga oshiriladi. Issiqlik almashinuv yuzasini rivojlantirishning eng xarakterli variantlari yuzalarni gofrlash, bir yoki ikki tomonlama qovurg'alashdir (**2.2-rasm**).

Qovurg'aning ta'sirini baholash uchun qovurg'aning issiqlik samaradorligi tushunchasini kiritamiz:

$$\Psi_q = Q_h / Q_\infty \quad (2.13)$$

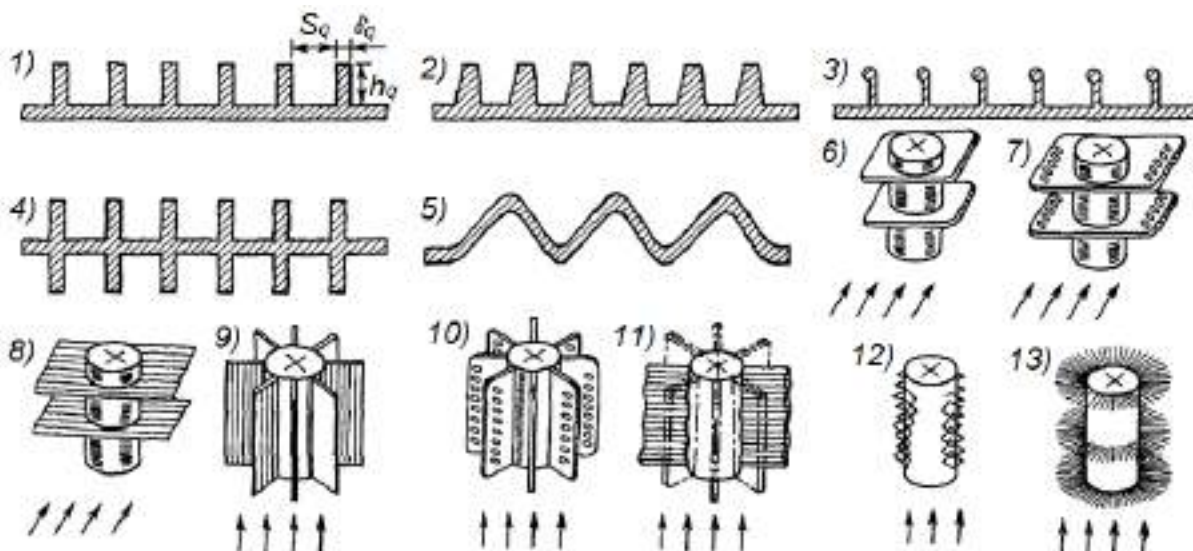
bu yerda Q_h - qovurg'a orqali berilgan haqiqiy issiqlik miqdori:

$$Q_h = \int_F \alpha \Delta T dF \quad (2.14)$$

Q_{∞} - cheksiz issiqlik o'tkazuvchanlikda qovurg'a orqali berilgan issiqlik miqdori bo'lib, agar qovurg'a yuzasidagi barcha nuqatalardagi harorat uning asosidagi haroratga teng bo'lsa, u hoda:

$$Q_{\infty} = \Delta T_0 \int_F \alpha dF \quad (2.15)$$

bu yerda $\Delta T_0 = T_a - T_0$; T_a va T_0 - qovurg'a asosi va atrof-muhit haroratlari.



2.2-rasm. Issiqlik almashinuv yuzasining rivojlangan makro tuzilishi variantlari:

1, 2, 3-bir tomonlama qovurg'alash; 4-ikki tomonlama qovurg'alash; 5-gorflash; 6, 7, 8-ko'ndalang qovurg'a; 7-teshikchalash; 8-gofrlangan, 9, 10, 11-bo'ylama qovurg'a; 10-teshikchali; 11-gofrlangan; 12, 13-sim turbulizatorli: 12-spiralsimon; 13-yelpig'ichsimon.

Uzunligi L_q bo'lgan bo'ylama to'g'ri burchakli (2.3, a-rasm) qovurg'ani ko'rib chiqamiz, bunda asosidan x masofadagi qovurg'aning i -chi kesimi uchun issiqlik miqdori tenglamasini quyidagicha yozamiz: issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga uzatilgan issiqlik:

$$Q_{uza} = \lambda_q F_i (dT/dx) \quad (2.16)$$

konveksiya va issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga olib ketilgan issiqlik:

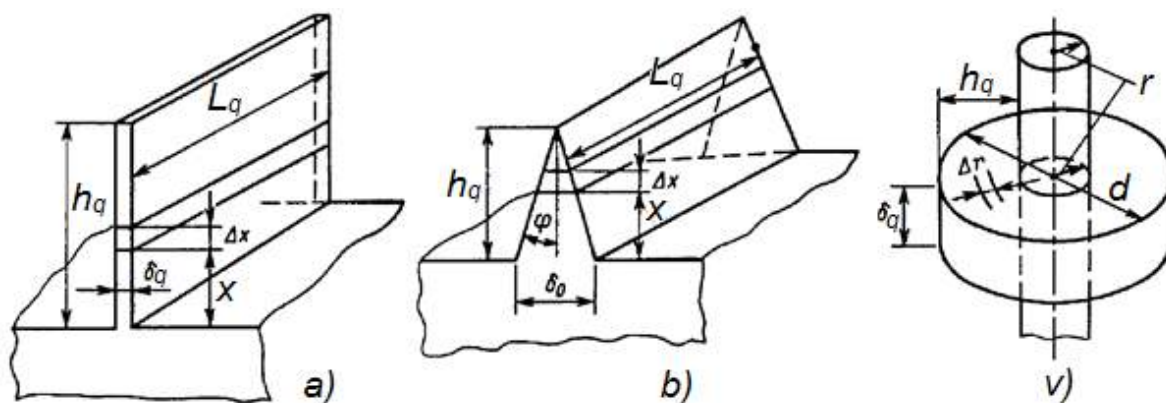
$$Q_{o.k} = \lambda_q F_{i+1} \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\lambda_q F_{i+1} \frac{dT}{dx} \right) dx + 2\alpha \Delta T L_q dx \quad (2.17)$$

Issiqlik balansi tenglamasini tuzamiz:

$$Q_{uza} = Q_{o.k} \quad (2.18)$$

$(F_{i+1} - F_i) \rightarrow 0$ bo'lganda dT bo'yicha differensiallab quyidagini olamiz:

$$\frac{d^2}{dx^2} (T - T_0) - \left(\frac{2\alpha}{\lambda_q \delta_q} \right) (T - T_0) = 0 \quad (2.19)$$



2.3-rasm. Qovurg'alarining samaradorligini hisoblash uchun oddiy shakldagi qovurg'alarining xarakteristikalarini:

a-to'g'ri burchak kesimli bo'ylama qovurg'a; b-uchburchak kesimli bo'ylama qovurg'a; v-to'g'ri burchak kesimli halqali qovurg'a.

$\left(\frac{2\alpha}{\lambda_q \delta_q}\right)^{1/2} = m$ va $(T - T_0) = \Theta$ bo'lganda umumiy yechim quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\Theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (2.20)$$

(2.20) ifodadagi C_1 va C_2 o'zgarmaslar quyidagi chegaraviy shartlardan aniqlanadi:

$x = 0$ bo'lganda qovurg'a asosida:

$$\Theta = \Theta_0 = T_a - T_0$$

$x = h_q$ bo'lganda qovurg'a uchida:

$$d\Theta/dx = 0$$

(2.19) ifodaning xususiy yechimi quyidagicha:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{chm(h_q - x)}{chmh_q} \quad (2.21)$$

$x = 0$ bo'lganda qovurg'a asosi orqali o'tgan issiqlik oqimi quyidagicha ifodalanadi:

$$Q_0 = (d\Theta/dx)_{x=0} \lambda_q \delta_q L_q \quad (2.22)$$

(2.22) ifodaga Θ qiymatni quyib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_q \delta_q L_q \Theta_0}{chmh_q} \frac{d}{dx} [chm(h_q - x)]_{x=0} \quad (2.23)$$

yoki

$$Q_0 = \lambda_q \delta_q L_q m \Theta_0 thmh_q \quad (2.24)$$

(2.15) ifodadan foydalansak:

$$Q_\infty = 2\alpha L_q \Theta_0 h_q \quad (2.25)$$

bundan qovurg'aning samaradorligi uchun quyidagi ifodani topamiz:

$$\Psi_q = \frac{\lambda_q \delta_q L_q m \Theta_0}{2\alpha L_q \Theta_0 h_q} thmh_q \quad (2.26)$$

$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_q \delta_q}}$ qiymatni qo'yamiz:

$$\Psi_q = \frac{thmh_q}{mh_q} \quad (2.27)$$

Uchburchak kesimli bo'ylama qovurg'a uchun yechim (2.3, b-rasm) Besselning modifikatsiyalangan funksiyasi yordamida olinadi:

$$\Psi_q = \frac{I_1(2mh_q)}{mh_q I_{01}(2mh_q)} \quad (2.28)$$

To'g'ri burchak kesimli halqali qovurg'a uchun (2.3, v-rasm) analitik yechimni Besselning turli tartibli funksiyasidan olish mumkin, ammo bunday yechimlar amaliyotda foydalanishni qiyinlashtiradi. Shuning uchun Ψ_q qiymat taxminan jadval yoki qovurg'a geometriyasiga, M va N sonlarga bog'liq holda aniqlanadi:

$$M = \frac{h_q + r_0}{r_0} \Psi_q \sigma T^3; N = mh_q \quad (2.29)$$

2.4 va 2.5-rasmlarda to'g'ri burchak kesimli bo'ylama va halqali qovurg'a samaradorligining aniq qiymatlarini M va N ga bog'liqligi ko'rsatilgan. Ko'pgina amaliy masalalarda rivojlangan issiqlik almashinuv yuzalaridan foydalanish uchun maksimal issiqlik oqimini ta'minlovchi qovurg'aning optimal o'lchamlarini aniqlash zarur.

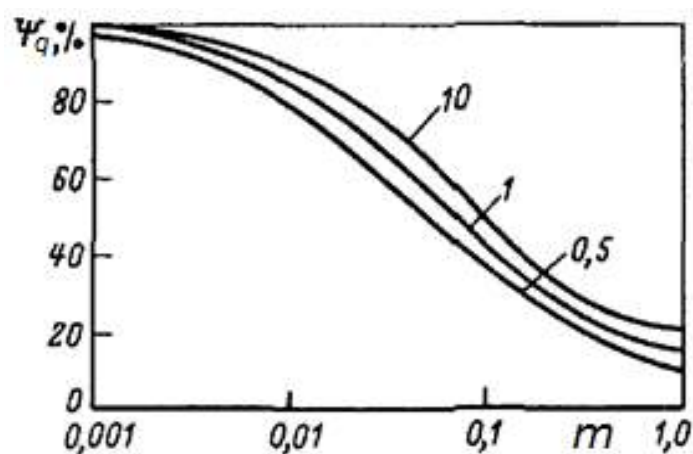
Qovurg'a o'lchamlarini optimallashtirish masalasi qovurg'a qalinligi δ_q va kesim maydonining S_q minimal qiymatlarini qidirish (izlash) sifatida qaraladi, ular quyidagicha ifodalanadi:

$$\delta_q = V^q \quad (2.30)$$

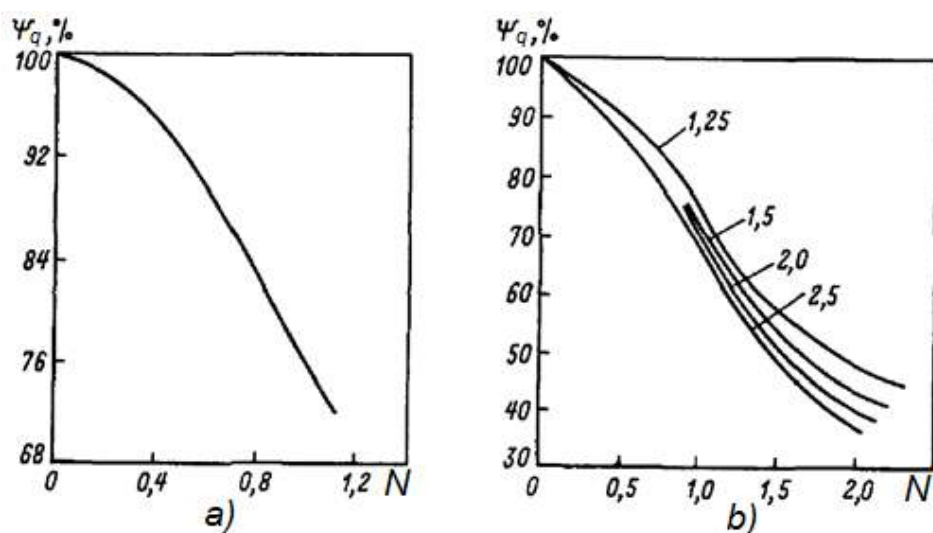
$$S_q = \delta_0 h / (p + 1) \quad (2.31)$$

bu yerda V – qovurg'a hajmi; p – qovurg'a kesimining parametri (2.1-jadval).

Qovurg'a kesimi profilining maydoni va asosdagi issiqlik oqimini Q_0 o'zaro bog'liqligini p va N parametrlar orqali ifodalasak, tekis qovurg'a xarakteristikasining optimal qiymati 2.1-jadvalda, chuqurchalangan yuzalarning xarakteristikasi 2.2-jadvalda ko'rsatilgan kompleks o'zgaruvchan kattalikli funksiya orqali aniqlanadi. Ushbu jadvallarda Besselning n tartibli modifikatsiyalangan funksiyasi I_n mavjud; S_{opt} – qovurg'aning optimal maydoni.



2.4-rasm. $r_{yu}/(r_{ch} - r_{yu})$ nisbatning turli qiymatlarida halqali qovurg'a samaradorligini Ψ_q , M kompleksga bog'liqligi.



2.5-rasm. $(h_q + r_0)/r_0$ nisbatning turli qiymatlarida qovurg'a samaradorligini Ψ_q , N kompleksga bog'liqligi:
a – bo'ylama qovurg'a; b – halqali qovurg'a.

2.1-jadval

Turli shakldagi to'g'ri qovurg'alarining optimal xarakteristikasi

Qovurg'a shakli	Ψ_q	N_{opt}	$\frac{\delta_{0\ opt}}{(1/\alpha\lambda)(Q_0/\Theta_0)^2}$	$\frac{S_{opt}}{(1/\alpha^2\lambda)(Q_0/\Theta_0)^3}$
To'g'ri burchakli	$\frac{thN}{N}$	1,42	0,632	0,504
Qabariq parabolik	$\frac{1}{N} \frac{I_{2/3}(4/3)}{I_{-1/3}(4/3)}$	1,35	0,721	0,391
Uch burchakli	$\frac{1}{N} \frac{I_1(2N)}{I_0(2N)}$	1,31	0,826	0,348
Botiq parabolik	$\frac{2}{1+\sqrt{1+4N^2}}$	2	2	1/3

Turli shakldagi chuqurchalarning optimal xarakteristikasi

Qovurg'a shakli	Ψ_{ch}	N_{opt}	$\frac{\delta_{0\ opt}}{(1/(\alpha\lambda)^{1/3})(Q/\Theta_0)^{2/3}}$	$\frac{V_{opt}}{[(1/\alpha^4\lambda)^{1/3}](Q_0/\Theta_0)^{5/3}}$
To'g'ri burchakli	$\frac{thN}{N}$	0,919	0,915	0,29
Qabariq parabolik	$\frac{3 I_1(4N/3)}{2 I_0(4N/3)}$	1,175	1,03	0,247
Uch burchakli	$\frac{2 I_2(2N)}{N I_1(2N)}$	1,435	1,10	0,237
Botiq parabolik	$\frac{2}{1+\sqrt{(1+4N^2/9)^{1/2}}}$	2	1,175	0,235

Belgilangan issiqlik oqimida Q_0 va haroratlar farqida θ_0 qovurg'a massasini minimallashtirish masalasi qovurg'a kesimining minimum maydonidan S_{min} hamda qiyin funksional turdagi absolyut ekstremumni aniqlashning variatsion usuli yordamida aniqlanadi:

$$S_{min} = \int_0^1 \frac{Q_L dQ_L}{\Theta^2 d\Theta/dQ_L} \quad (2.32)$$

Minimal massali qovurg'a kesimi uchun yechim shuni ko'rsatadiki, u ikkita uchastkadan tashkil topgan: egri chiziqli, $\delta_* = \delta_h$ qiymatgacha quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$\delta_* = \int_0^{\Theta_L} \frac{d\Theta_L}{Q_L} \quad (2.33)$$

va o'zgarmas δ_h qalinlikli uchastka, uning uzunligi quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$h_{1*} = \frac{\sqrt{\delta_h}}{2} \ln \frac{\Theta_1 + Q/\sqrt{\delta_h}}{\Theta_1 - Q/\sqrt{\delta_h}} \quad (2.34)$$

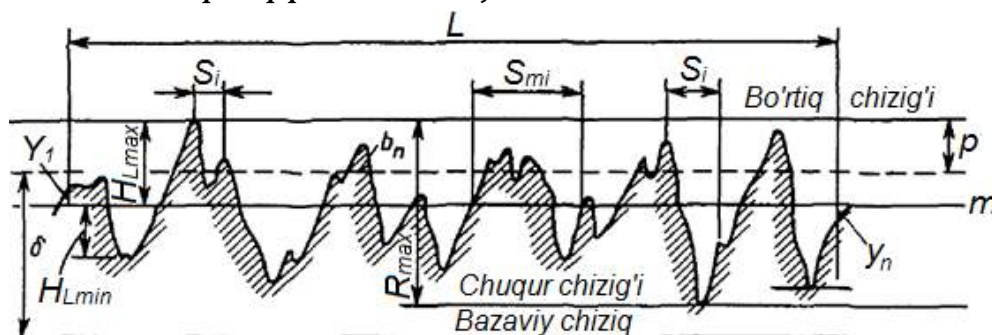
Rivojlangan issiqlik almashinuv yuzalari ichida issiqlik almashinuvining samarador maydoni bir vaqtda ikkita tomondan ham rivojlantirilgan, ya'ni gofrlangan yuzalar katta qiziqish uyg'otadi. Gofrlangan yuzaning samaradorlik koeffitsiyenti deb (qovurg'alach koeffitsiyenti kabi) gofrlangan yuzaning haqiqiy maydonini F_g tekis yuzaning normal maydoniga F_n nisbatiga aytiladi:

$$K_g = F_g/F_n \quad (2.35)$$

Real konstruksiyalar uchun K_g ning imkoniyatli qiymati konstruksion, texnologik va ekspluatatsion talablar jamlanmasidan aniqlanadi.

§2.3. Issiqlik almashinuv yuzalarining mikro tuzilishi.

Qattiq yuzalarning mikrogeometriyasi profilli g'adir-budirlikni va uning stereometrik tasvirini xarakterlaydi. Profilli g'adir-budirlik yuzaning perpendikulyar tekisligi qirqimining tuzilishini geometrik tasviri shaklida ifodalanadi (2.6-rasm). Real profilli g'adir-budirlik mexanik, optik, ultraakustik, rentgen, elektron grafik va magnitometrik usullar yordamida aniqlanadi [14-16]. Ko'pgina hollarda ushbu usullar mikro tuzilish parametrlarini to'liq taqqoslash natijalarini beradi.



2.6-rasm. Qattiq jism yuzasining profilli mikro g'adir-budirlikning asosiy xarakteristikasi.

x , y koordinatalarda profilli g'adir-budirlikning parametrlari quyidagilar: profilning o'rtacha arifmetik og'ishi:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (2.36)$$

yoki taxminan

$$R_a = (1/n) \sum_n |y_i| \quad (2.37)$$

10 ta nuqta bo'yicha profil notekisligining balandligi:

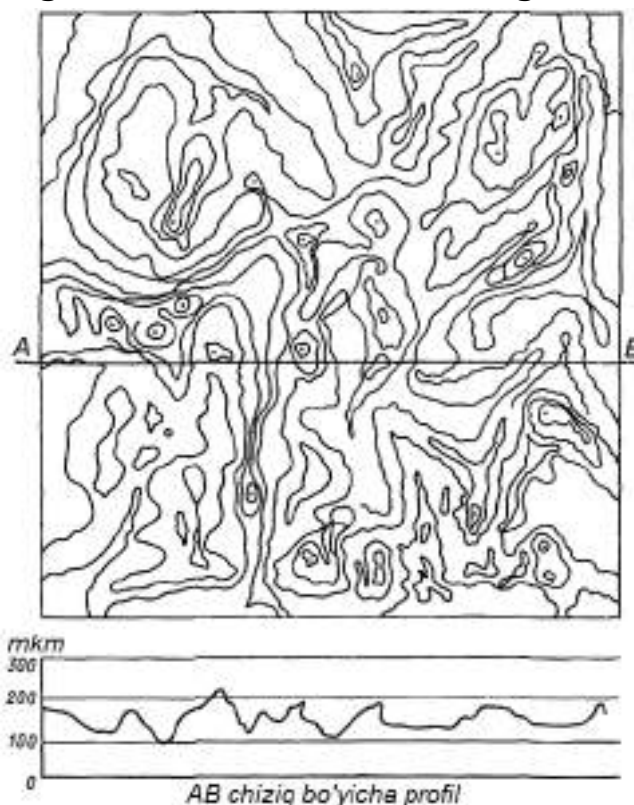
$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_1^5 |H_{i maks}| + \sum_1^5 |H_{i min}|) \quad (2.38)$$

bu yerda bo'rtiq va chuqur chiziqlar orasidagi masofa - R_{maks} ; bazaviy uzunlik $L - S_{mi}$ chegarasida notekis profil qadamining o'rtacha arifmetik qiymati - S_m ; profilning nisbiy tayanch uzunligi - t_q .

Yuzalarni qayta ishlashning har bir shakli uchun R_a , R_z , R_{maks} , S_m va t_q parametrlarning chegaraviy qiymati GOST 2789-73 bo'yicha aniqlanadi, bu yerda H profilni y o'qi bo'yicha o'rta chiziqdan mutloq og'ishi; L - bazaviy chiziqning uzunligi.

Real qattiq jismlar yuzalarining fazoviy tasviri ularning stereometriyasini yoki yuzaning mikrotopografik kartasini qurish bilan xarakterlanadi (2.7-rasm). Bunday kartalar elektronografiya, rentgenografiya, shuningdek golorafiya usullari yordamida olinadi.

Boshlang'ich tekislikka nisbatan "taroq" va "tub" mikrotekisliklar joylashuvini aniqlash, o'zgarmas balandlikli yopiq chiziqlarni qurish imkonini beradi va ular balandlik va chuqurni ifodalaydi. Ushbu yopiq balandlik va chuqurning shakli juda xilma-xil va betartib bo'lib, asosan tekis va egri-bugri chegaralardan iborat. Notekis piramida bo'rtiqlari asoslarining o'lchamlari mikroskopikdan o'nlab mikrongacha oraliqda o'zgaradi. Quyma va prokatlangan metallarning yuzalarida o'lchami bir mikrondan katta bo'lgan chuqurlarning soni 1 sm² da 30 dan 50 tagacha bo'ladi.



2.7-rasm. Qattiq jism yuzasining tipaviy mikrotopografik kartasi.

Bo'rtiq shaklining geometrik modelini aniqlash uchun profilni mikro g'adir-budirlikni mikrotopografik yuza bilan o'zaro bog'liqligini o'rnatish kerak. Masalan, bo'rtiqning kesimi ellipssimon shaklga keltirilsa, ya'ni bo'ylama va ko'ndalang profilogram radiuslari R_{bory} va R_{korn} ellips radiusi hisoblansa, u holda egrilikning hisobiy radiusi:

$$R_{his} = (R_{bory}R_{korn})^{1/2} \quad (2.39)$$

U holda bir qancha h_i sathda ellipsoid kesimi R_{his} radiusli sfera maydoniga teng maydonga ega bo'ladi:

$$F_{his} = 2\pi R_{his} h_i \quad (2.40)$$

Bunday yondoshuv turli geometrik shaklli bo'rtiq va chuqur uchun turli h_i larda haqiqiy maydonni aniqlash imkonini beradi.

Real yuzalarning haqiqiy maydoni g'adir-budir yuza maydoinini $F_{g'.b}$ normal yuza maydoniga F_n nisbatidan aniqlanadi va u g'adir-budirlik koefitsiyenti deb ataladi:

$$K_{g'.b} = F_{g'.b}/F_n \quad (2.41)$$

$F_{g'.b}$ qiymatni analitik yoki aniq tajibaviy aniqlash qiyin. Shuning uchun taxminiy modellardan foydalaniladi.

§2.4. Real issiqlik almashinuv yuzalarining shakli va tuzilishi.

Qattiq jism yuzalarini tahlil qilishning qabul qilingan umumiy sxemasiga muvofiq real yuzalarning shakllarini aniqlovchi jarayonlarning asosiy guruhlarini ko'rib chiqamiz. Yuza geometriyasining shaklini aniqlovchi birinchi guruhi yuzalarga ishlov berishning texnologik jarayonlari tashkil etadi. Biroq yuzalarga ishlov berish usuli g'adir-budirlik parametrini bir xilda aniqlamaydi. 2.3-jadvaldan va [17-19] manbalarda keltirilgan ma'lumotlardan shunday xulosa qilish mumkinki, deyarli ishlov berishning barcha turlari g'adir-budirlik parametrlarini juda keng ko'lamda olish imkonini beradi.

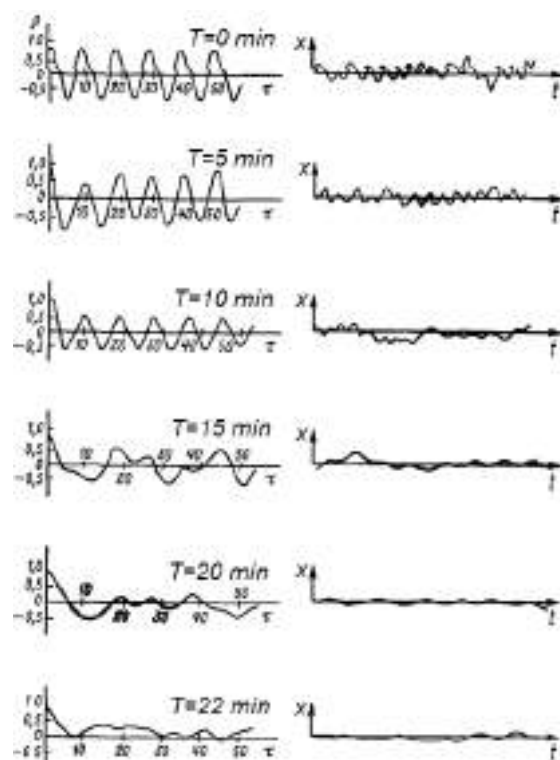
2.8-rasmda keltirilgan xarakterli profilogramm va korelogrammdan ko'rinib turibdiki, ishlov berish rejimining ta'siri asosan elektr sayqallashdir. 2.9-rasmda silliqlangan yuzalarning mikrogeometrik parametrlarini silliqlash jarayoni texnologiyasiga bog'liqligi keltirilgan: metalni olinish tezligi, material shakli, silliqlash aylanasi sifati, detallarni o'rin almashish tezligi va solishtirma radial kuch. Yuzalarga ishlov berish shaklining o'zi hattoki g'adir-budirlik parametrlari bir xil bo'lganda ham yuza tuzilishiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

Mexanik ishlov berishda yuzalarning shakllari metalning bir nechta xususiyatlaridan, ya'ni ishlov berilayotgan yuza, asbob-uskuna jihozlari va ishlov berish rejimidan aniqlanadi. Kesish bilan ishlov berishda u yoki bu ishlov berilayotgan yuza uchun kesuvchi uskunaning tuzilishiga, xususiyatiga va ko'pgina rejimli omillarga bog'liq holda umuman turlicha mikrotuzilishlar hosil bo'ladi: masalan kesuvchi uskuna va yuzani o'zaro o'rin almashinish tezligi, o'zaro ta'sirlashishning kuchayishi, bartaraf etilayotgan qatlam qalinligi va bir tekisligi, to'qnashuv nuqtasidagi muhit va harorat, sovituvchi muhit turi va hokazo. Ushbu barcha omillarning o'zaro ta'sirini qiyinligi universal yechimning noaniqligini belgilaydi.

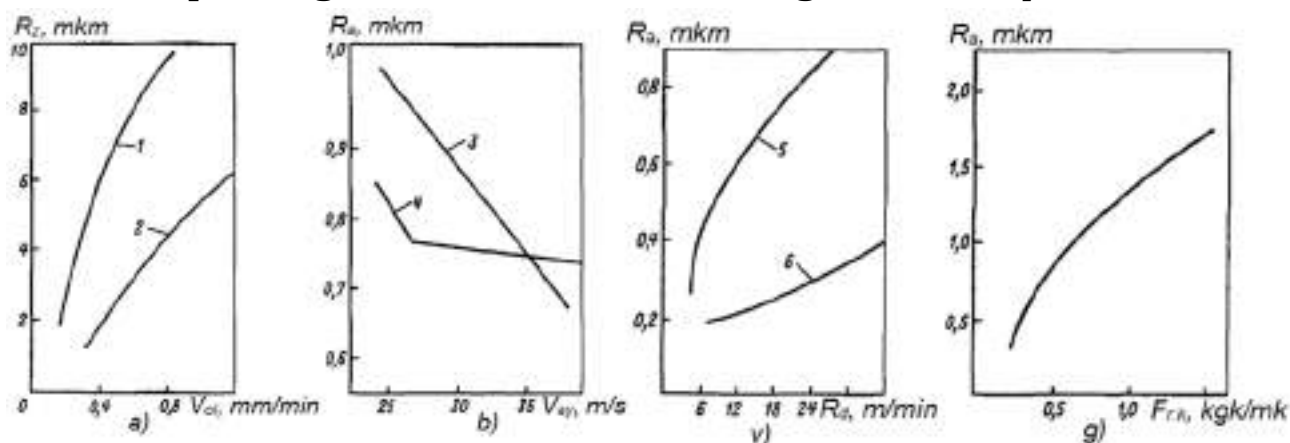
G'adir-budirlik parametrlarini yuzalarga ishlov berish shakliga bog'liqligi

Ishlov berish shakli	Ishlov berish bosqichi*	R_z parametr, mkm	L parametr, mkm
Egovlash	1	125-12,5	-
	2	12,5-1,6	-
	3	1,6-0,63	-
Frezerlash	1	100-18	0,4-0,16
	2	18-3,2	0,16-0,04
	3	3,2-0,4	-
Yo'nish	1	125-6,3	-
	2	6,3-1,6	-
	3	1,6-0,2	-
Parmalash	-	100-6	-
Sidirish	1	4,8-1,2	-
	2	1,2-0,2	-
Silliqlash	1	6,3-1,2	0,14-0,05
	2	1,2-0,4	0,05-0,03
	3	0,4-0,075	0,03-0,017
Ishqalash	1	0,8-0,2	-
	2	0,2-0,05	-
	3	0,05-0,01	-
Yaltiratish	1	1,6-0,4	-
	2	0,4-0,1	-
	3	0,1-0,05	-
Shaberlash	1	6,3-0,8	-
	2	0,8-0,2	-
	3	0,2-0,05	-
Tig'izlamoq	-	2,0-0,06	0,36-0,05
Tekislamoq	-	0,45-0,03	0,016-0,04
Xoninglash	1	0,8-0,1	-
	2	0,1-0,025	-
Yakuniy silliqdash	-	0,8-0,025	-

*1-dastlabki ishlov berish, 2-tozalash, 3-yakunlash.



2.8-rasm. Elektr sayqallashning turli bosqichlarida yuzaning profilogrammalari $x(t)$ va korelogrammalari $p(\tau)$.



2.9-rasm. Yuza g'adir-budirliqi parametrlarini ishlov berish texnologiyasiga bog'liqligi:

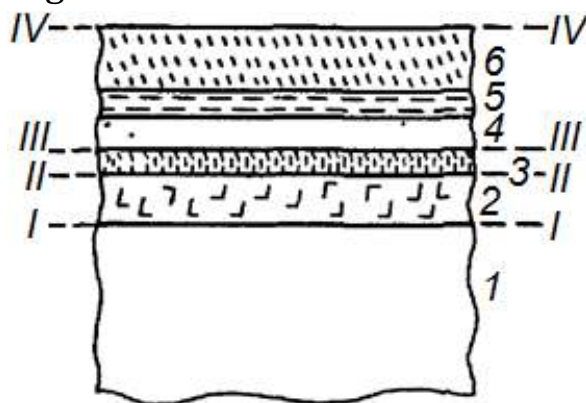
a- R_z ni metalni olinish tezligiga V_o va po'latning sifatiga bog'liqligi: 1-EB-2 po'lat; 2-E12 po'lat; b- R_a ni silliqlash aylanasi va uning sifatiga bog'liqligi: 3-normal silliqlangan aylana; 4-g'ovak silliqlangan aylana; v- R_a ni detallarni o'rin almashinish tezligiga va po'lat sifatiga bog'liqligi: 5-SINSINATTI firmasi po'lati; 6-EI347 po'lat; g-ishlov berilayotgan yuza ustidagi silliqlovchi aylana bosimining solishtirma radial kuchga bog'liqligi.

Yuzalarning xarakteristikasi nafaqat yuzalarga ishlov berish rejimi va turiga bog'liq, balki materialning ham xususiyatiga bog'liq. [19, 20] ishlarda turli metallarga bir xil turda va rejimlarda ishlov berishda yuzalarning

g'adir-budirlik parametrlari turlicha ekanligi keltirilgan. Masalan R_z qiymat cho'yan yuzalar uchun po'lat yuzalarga qaraganda 1,2...1,8 marta kam.

Ishlov berish texnologiyasidan mustaqil ravishda real jismlarning barcha yuzalari "adsorbsion potensialga" ega bo'lib, u atom-molekulyar darajada sodir bo'ladigan jarayonlarni aniqlaydi va qattiq jism yuzasiga ishlov berishning eng katta guruhini tashkil etadi. Umumiy holda ushbu guruhlarini yuzalarga turli moddalar bilan ta'sir etuvchi kimyoviy jarayonlardan ajratish juda qiyin, deyarli imkonsiz. Adsorbsion qatlamli metallarning haqiqiy yuzalarini shakllantirish ifodasiga turlicha yondoshuvlar mavjud.

2.10-rasmda ko'rsatilgan sxema bo'yicha ishlov berilgan yuzalarda metal oksidlari qatlami joylashgan [21]. Ushbu qatlam kristallarning barcha tomonlarini qoplab oladi. Oksidli qatlam qalinligi bitta molekuladan bir necha o'n angstromgacha bo'lishi mumkin. Oksidli qatlamni hosil bo'lishi xemosorbsiya jarayoniga kiradi.



2.10-rasm. Metal yuzasidagi adsorbsion qatlamlarning sifat sxemasi:

1-hajmiy (to'g'ri) kristalli tuzilish; 2-metalning yuzaviy tuzilishi; 3-metal oksidlari; 4-adsorbsiyalangan gazlar; 5-adsorbsiyalangan suv; 6-organik moddaning qutbli molekulalari; I-I-deformatsiyalanmagan kristalli tuzilish chegarasi; II-II-metalga ishlov berish zonasi; III-III-texnologik yuza; IV-IV-haqiqiy yuza.

Xemosorbsiya tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\Gamma = f(\chi) \quad (2.42)$$

bu yerda χ – hosil bo'ladigan birikmani xarakterlovchi stexiometrik koeffitsiyent.

Metal yuzalarida oksidlarni hosil bo'lish reaksiyasining mexanizmi juda qiyin, buning asosiy sababi reaksiya mahsuloti reaksiya komponentlarini fazaviy jihatdan ajratadi, natijada diffuziya va uzatish

hodisasi yuzaga keladi, ushbu hodisalar jarayonni rivojlanishida asos bo'lib, oksidlarning o'sish qatlami xususiyatiga bog'liq bo'ladi.

Bir jinsli yuzada xemosorbsiya tezligi:

$$\partial\Gamma/\partial\tau = f(\chi, M_a, C_a, \delta F) \quad (2.43)$$

bu yerda M_a – xemosorbsiyani faollashtirish energiyasi; C_a – to'qnashuvchi muhitlarda adsorbsiyalanayotgan moddaning konsentratsiyasi; δF – reaksiyaga kirishayotgan yuza maydonining ulushi M_a qiymat juda katta chegaralarda o'zgaradi va bir nechta o'n kaloriya taqsim molga yetadi.

Kristallarni burchaklari, bo'rtiqlari va qovurg'alari yuzada katta valentli to'yinuvchanlikni hosil qiladi, shuning uchun xemosorbsiya yuza bo'yicha turlicha sodir bo'ladi. [22] ishda xemosorbsiya kinetikasi va muvozanati uchun tenglama olingan bo'lib, u xemosorbsiyasining faol markazlarini inobatga oladi, uning asosida Γ ni tuzilishiga bog'liqligini ko'rsatish mumkin.

Oksidli plyonkalarda gazlarning adsorbsion qatlami joylashadi. Gaz va metallarni o'zaro ta'sirining tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki [23, 24], ularni o'zaro ta'sirlashuv xarakteri va mexanizmi juda qiyin bo'lib, ko'p omillarga bog'liq. Misol tariqasida aytish mumkinki, gazlarni metal yuzasiga yutilishi bir necha foizgacha oraliqda o'zgarishi mumkin. Bunda gazlarni yuza bilan bog'lanishdagi energiya ham sezilarli o'zgaradi va haroratga bog'liq bo'lib qoladi [25]. Demak yuzani adsorbsiyalangan gazdan tozalash qiyinligiga ham e'tibor qaratish kerak.

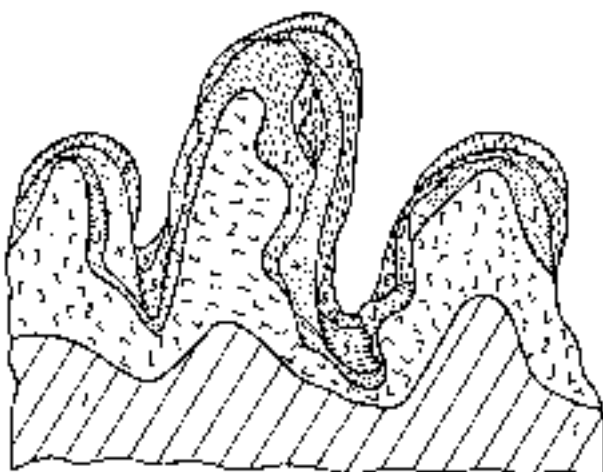
Gazli aralashmalardan tozalash darajasiga bog'liq holda metal yuzalarining holati uch xil bo'ladi: 1) texnik yuza (gazli aralashmalarning miqdori yuzaning xususiyatiga ta'sir ko'rsatmaydi); 2) toza (gazli aralashmalarning tabiati (holati) ideal gazlar uchun qonun bilan ifodalanadi); 3) gazli aralashmalar bo'yicha mutloq toza (nuqsonsiz kristal panjara).

2.10-rasmda keltirilgan sxemadan ko'rinib turibdiki, gaz qatlamlarining yuzasi atmosferadan yutilgan suv bug'larining natijasida hosil bo'lgan suvning adsorbsion qatlamida joylashgan. Ushbu qatlam gazlarni yutilishi bilan taqqoslanganda juda sekin shakllanadi va hosil bo'lish jarayonining mexanizmidan fizik adsorbsiyasiga kiritiladi, ya'ni yuza bilan ta'sirlashishning birinchi momentida suvni metal yoki yuzada adsorbsiyalangan gaz bilan o'zaro ta'sirlashishi sodir bo'lmaydi va kimyoviy birikma hosil bo'ladi.

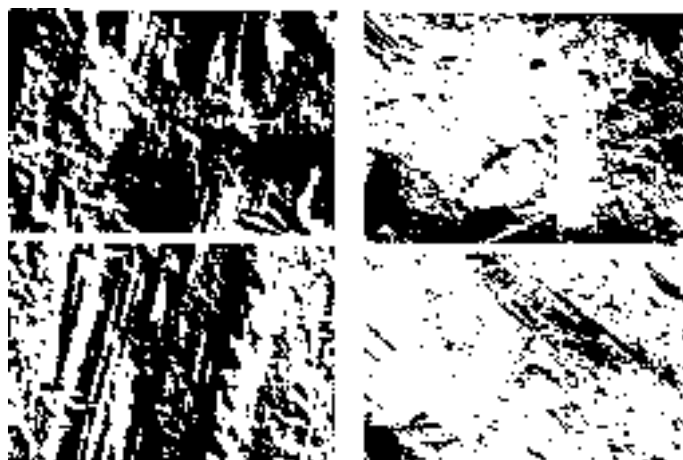
2.10-rasmda keltirilgan sxema bo'yicha eng yuqoridagi yuzada organik moddalarning qutbli va qutbsiz molekulalari qatlami joylashadi. Ushbu qatlam haqiqiy yuzalarning ekspluatatsion xususiyatlarini ko'rib chiqishda katta qiziqish uyg'otadi.

Real sharoitlarda shakl berish sxemasi va adsorbsion qatlamlarni metal yuzalarda joylashuvi unchalik qiyin emas: barcha qatlamlarning qalinligi bir xil emas va yuzaning turli nuqtalarida bir-biri bilan turlicha to'qnashadi, natijada geometrik shakllar va mikrogeometriya ham turlicha bo'ladi.

Metallning haqiqiy yuzasiga shakl berishning gipotetik sxemasining variantlaridan biri **2.11-rasmda** ko'rsatilgan bo'lib, haqiqiy sharoitlarda ushbu jarayonlar bir vaqtda sodir bo'ladi. Ma'lumki suvning qatlamini quritish yo'li bilan organik moddani esa ximikaliyalar yordamida bartaraf etish mumkin.



2.11-rasm. Real yuza tuzilishining gipotetik sxemasi.



2.12-rasm. X18N10T po'latdan tayyorlangan IAQlari real yuzasining mikrostereometrik tasviri, ko'mir-platinali usul yordamida olingan:
a-7 va 8 sinflar (X 12000); b-10 va 12 sinflar (X 10000).

Metal yuzalarining haqiqiy holatini tasavvur qilish uchun 2.12-rasmda X18N10T zanglamaydigan po'latning yuzalariga turlicha ishlov berishdagi rasmlari ko'rsatilgan. Barcha rasmlarda yuzalarning mikrodetallari, alohida bo'rtiqlari va chuqurlari ko'rinib turibdi.

§2.5. Samarador issiqlik almashinuv yuzasini hosil qilish usullari.

Ma'lumki, birinchi IAQlari issiqlik almashinuv yuzasi texnik silliq bo'lgan – quvur, plastina va hokazolardan tashkil topgan. Ularning samaradorligini oshirishga bo'lgan intilish shunga olib keldiki, hozirda ushbu yuzalar silliq yuzadan farqli tayyorlanadi, ya'ni ularda turli qovurg'alar, bo'rtiqlar, chuqurlar, uymalar hosil qilinadi, ularga simli yoki to'rli qovurg'alar payvandlanadi, turli jinsli qoplamalarni surtiladi va hokazo.

Umuman IAQlari to'g'risida gapirilganda, issiqlik almashinuv yuzasining geometriyasi issiqlik tashuvchi oqayotgan kanal geometriyasi bilan uzviy bog'langan bo'lishi kerak. Misol tараqasida quyidagi oddiy holni ko'rib chiqamiz: issiqlik almashinuv yuzasi – dumaloq quvur.

Quvur ichidan oqib o'tayotgan issiqlik tashuvchining belgilangan parametrlarida quvurning diametri, uzunligi va ichki yuzasi geometriyasi ichki yuzadagi gidrodinamika va issiqlik almashinuv jarayonlarini belgilaydi. Ushbu quvurning tashqi yuzasidagi vazifa ancha qiyin holat hisoblanadi. Ushbu yuzalarda sodir bo'ladigan gidrodinamika va issiqlik almashinuv jarayonlarining xarakteri nafaqat quvur geometriyasiga, balki ko'pgina omillarga – issiqlik almashinuv qurilmasi quvurlararo bo'shlig'ining geometriyasiga, kirish va chiqish patrubkalarining konstruksiyasiga, issiqlik tashuvchilarni quvur o'qiga nisbatan harakat yo'nalishiga, qo'shni quvurlarning ta'siriga va issiqlik tashuvchilarning parametrlariga bog'liq bo'ladi.

Masalan tashqi yuzasida dumaloq ko'ndalang yoki spiralsimon qovurg'asi bo'lgan quvurni ko'rib chiqamiz. Ushbu qovurg'alarning balandligi quvurlar orasidagi masofaga mos kelishi kerak, qovurg'alash geometriyasi esa quvurlararo bo'shliqdagi oqim xarakterini inobatga olishi kerak. Ko'ndalang qovurg'ali quvur, quvurlari aniq qadam bilan joylashgan aniq quvurlar to'plamida samarali ishlaydi. Quvurlar to'plamidagi quvurlar joylashuvini o'zgarishi, ularning samaradorligini o'zgartiradi. Shuning uchun quvurchali IAQlarida notekis yuzali quvurlardan foydalanilganda

samarador issiqlik almashinuv yuzasi to'g'risida emas, balki issiqlik almashinuv yuzasi samarador bo'lgan kanallar to'g'risida gapirish yetarli bo'ladi. Boshqacha aytganda notekis yuzalarning geometrik parametrlari kanallarning parametrlari bilan uzviy bog'langan bo'lishi kerak.

Samarali yuza tushunchasini aniqlashtiramiz. Agar ikkita yuza taqqoslanganda bir xil issiqlik quvvatida va issiqlik tashuvchilarni haydashga sarflangan quvvat bir xil bo'lganda eng kichik yuzaga ega bo'lgan qurilma samarali bo'ladi. Ma'lumki, notekis yuza faqatgina quyidagi hollarda qo'llaniladi, bunda juda ixcham IAQsini ishlab chiqish ta'minlanishi kerak, samaradorlik tushunchasini faqat shu yuzagagina qo'llash mumkin.

Keyingi boblarda IAQlarining aniq konstruksiyasini, issiqlik tashuvchilar turini va tayyorlash texnologiyasini inobatga olgan holda samarador issiqlik almashinuv yuzasini ishlab chiqishga qanday yondashish kerakligi to'liq ko'rib chiqiladi. Bu yerda bitta namunaga qisqacha to'xtalamiz: quvur ichida harakatlanayotgan bir fazali issiqlik tashuvchining turbulent oqimida samarador issiqlik almashinuv yuzasini ishlab chiqish.

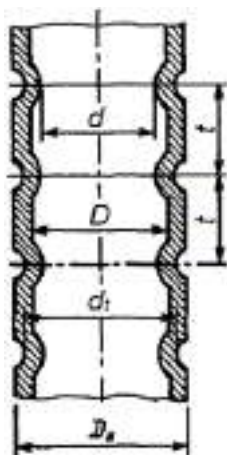
[26] da keltirib o'tilgandek ushbu holatda devor va oqim orasidagi issiqlik berish jarayoniga asosiy termik qarshilik quvur radiusidan 3-5% qalinlikdagi tor devor oldi qatlamida to'planadi. Shuning uchun oqimning xuddi shu tezligida giravlik qarshilik ko'effitsiyentini qisman ortishi hisobiga issiqlik berish ko'effitsiyentini sezilarli oshirish uchun faqatgina mana shu devor oldi qatlamini qo'shimcha turbulizatsiya qilish zarur. Oqim yadrosini qo'shimcha turbulizatsiyalash issiqlik berishni sezilarli oshirish imkonini bermaydi, ammo gidravlik qarshilik sezilarli ortadi.

Devor oldi qatlamni turbulizatsiyalashning samarali usuli devorda uzilish zonalarini hosil qilishdir. Bir xil konfiguratsiyali bo'rtiqlarni davriy joylashuvi devor bo'ylab keng tarqalgan turbulent uyurmalarini hosil bo'lishini ta'minlaydi. Bo'rtiqning balandligi devor oldi balandligi bilan bir xil bo'lishi kerak, bunda oqim va devor orasidagi termik qarshilkining asosiy qismi jamlanadi. Bo'rtiqlar orasidagi masofa juda kichik va juda katta ham bo'lmasligi kerak. Turbulizatorlar yaqin joylashganda ($t/h < 5$) turbulizatorlardan keyin hosil bo'ladigan turbulentli pulsatsiya (o'zgarish) keyingi turbulizatorgacha bo'lgan yo'lda to'liq so'nishga ulgurmaydi va oqim yadrosiga singadi, natijada turbulentli pulsatsiyaning jadalligi ortadi. Bu gidravlik yo'qotilishlarni ortishiga olib keladi. Turbulizatorlar orasidagi masofa yetarlicha uzoq bo'lganda ($t/h > 10$) uyurma zonasida yoki ularni

davriy buzilishida qo'shimcha yuzaga keladigan turbulentli pulsatsiya asosiy oqim bilan devor yaqiniga uzatiladi. Bu eng kam gidravlik yo'qotilish hisobiga issiqlik almashinuvini sezilarli darajada jadallashtirish imkonini beradi. Turbulizatorlar orasidagi masofa juda katta bo'lganda ($t/h > 10$) turbulizatorlardan keyin hosil bo'ladigan qo'shimcha turbulentlik bir qancha masofadan keyin to'liq bo'lishga ulguradi, keyingi turbulizatorgacha qolgan uchastka esa tuzilishi bo'yicha tekis kanaldan kam farq qiladi.

Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, turbulizatorlarning belgilangan shakli va balandligida issiqlik berish va gidravlik qarshilikni maksimal ortishi $t/h \approx 10$ bo'lgandagina erishiladi, chunki gidravlik qarshilikni maksimal ortishi asosan turbulizator shakliga bog'liq bo'lib, ular uch o'lchamli va nobarqaror uyurmaviy tuzilish bilan bog'liq.

Quvurning tashqi yuzasini halqali diafragmalari nakatkalash yo'li bilan quvurning ichida davriy joylashgan halqali diafragmalarni hosil qilish mumkin (2.13-rasm). Bunday quvurlarda issiqlik almashinuv jadallashishi diafragmaning nisbiy balandligiga (h/D) yoki diafragma diametrini quvur diametriga nisbatiga (d/D) va diafragma joylashishining nisbiy qadamiga (t/h yoki t/D) bog'liq. Ushbu parametrlardan tashqari Nu/Nu_s va ξ/ξ_s bog'liqlikka kesim shakli ham ta'sir ko'rsatadi, profil kesimi yarim dumaloq kesim shaklida bo'lganda – turbulizator radiusi yoki R/D o'lchamsiz parametr ta'sir ko'rsatadi.

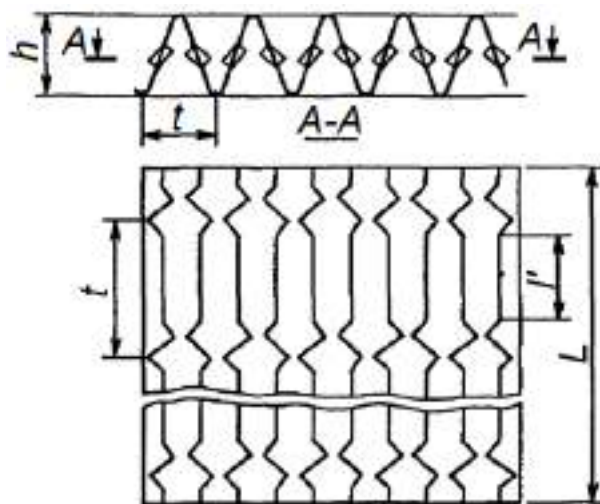


2.13-rasm. Halqali diafragmalari quvurning bo'ylama qirgimi.

Quvurlararo bo'shliqni bo'ylama yuvishda ushbu quvurlar qo'llanilganda Nu/Nu_s va ξ/ξ_s bog'liqlik nafaqat uymaning nisbiy chuqurligiga (h/D_t) yoki d_t/D_t parametriga va ularni joylashuvini nisbiy qadamiga t/D_t , balki quvurlarni quvurlar to'plamida joylashish qadamiga S/D_t ham bog'liq bo'ladi. d_t/D_t va t/D_t qiymatlar va Re soni bir xil bo'lganda

S/D_t ni ortishi bilan issiqlik almashinuvini jadalligi kamayadi, shuningdek uymalar chuqurligini kanalning ekvivalent diametriga d_e nisbati ham kamayadi. Tajriba natijalarini Nu/Nu_s va ξ/ξ_s bog'liqlik shaklida umumlashtirishda h/d_e va t/d_e nisbatdan S/D_t nisbati turlicha bo'lgan quvurlar to'plami uchun yagona bog'liqlikni olish mumkin. d_t/D_t va t/D_t parametrlar issiqlik almashinuvini jadallashtirishda bir xil qiymatga ega bo'lmaydi va ulardan tajriba natijalarini tahlil qilish va umumlashtirishda foydalanilmaydi.

Ko'ndalang kesimi dumaloq bo'lmagan kanallardan foydalanish ancha qiyin holat hisoblanadi. Masalan ko'ndalang kesimining shakli uchburchakka yaqin bo'lgan eng ko'p ishlatiladigan kanalni ko'rib chiqamiz (2.14-rasm). Ma'lumki, kanalning tor qismlarida (burchaklarda), kanalning keng qismlaridagi turbulent oqimida ham laminar oqim saqlanib qoladi, demak kanalning butun perimetri bo'yicha turbulizatorlarni o'rnatishdan ma'no yo'q. Kanalning uchburchak ko'ndalang kesimining katta tomoni o'rtasiga bir xil konfiguratsiyali turbulizatorlarni o'rnatish eng samarali hisoblanadi (davriy joylashgan bo'rtiqlar). Issiqlik berish jadalligining samarasi h/d_e va t/d_e qiymatlar va profil shaklini xarakterlovchi parametrlar yordamida bir xil qiymatli aniqlanadi.



2.14-rasm. Uchburchak kanallardan hosil qilingan lentali qovurg'ali yuza.

Shunday qilib, issiqlik almashinuv jadalligining belgilangan samarasini tiklash uchun yuza, parametrlari (balandligi, qadami, geometrik shakli) tiklanuvchi turbulizatorlar geometriyasiga ega bo'lishi kerak.

Issiqlik almashinuv yuzalari to'g'risidagi zamonaviy qarashlarning qisqacha bayoni shuni ko'rsatadiki, jarayonlarni optimallashtirish va issiqlik

almashinuv samaradorligini oshirish yo'llarini qidirish yuzaning makro va mikro tuzilishini to'liq tizimli ko'rib chiqishni talab etadi.

§2.6. Metall qoplamalar.

IAQlari yuzalarining qoplamalarini turli-tuman variantlarini keng ko'lamda qo'llash, yuzalarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish va yuzalarni himoyalash uchun amalga oshiriladi. Qoplamaning har xil turlari, qoplash usullari va texnologiyasi, xarakteristikasi va xususiyatidan foydalaniladi. Hozirgi vaqtda eng ko'p qo'llaniladigan qoplamalarning asosiy turlariga metalli, organik va kremniy organik qoplamalarni kiritish mumkin.

Metal yuzalarini himoyalovchi metal qoplamalar eng ko'p tarqalgan bo'lib, ular elektrolitik, anodizatsion, termodiffuzion, gazotermik, qaynoq yoki metallizatsion usullar yordamida surtiladi. Qatlamlar surtish usuli, texnologiyasi va shakli bo'yicha turlicha bo'lganda ko'p qatlamli qoplamalar ham qo'llaniladi. Qoplamani surtish usuli va texnologiyasi turli-tuman bo'lganligi sababli bunday yuzalarning qator xususiyatlari mavjud bo'lib, yuzalarni holatini o'rganishda ularni albatta inobatga olish zarur. Masalan elektr cho'ktirishli qoplamalar uchun bu xususiyatlarga cho'kayotgan metalni cho'kish yuzasi, elektr cho'ktirish rejimi va jarayonning elektrik parametrlari bilan o'zaro ta'sirlashuvini kiritish mumkin. Agar cho'kma mikrorelyef bo'rtmalarida qancha tez o'ssa, u holda g'adir-budirlik ham shuncha tez ortadi, agar chuqurlarda tez o'ssa, u holda yuzasini silliq qilinishi – tekislanishi kuzatiladi.

Qoplama yuzalarining mikro tuzilishi parametrlarini ko'rib chiqishda yuzalarning barcha belgilari va parametrlari qoplamaning eng yuqori – tashqi qatlamiga mos keladi. Ularning mikrogeometriyasini baholashda qoplamasiz yuzalar uchun xarakteristika va parametrlardan foydalanish mumkin. Bir nechta elektr cho'ktirishli qoplamalar uchun qoplmalik g'adir-budir yuzalarning parametrlarini $R_{a,q}$ qoplamagacha bo'lgan yuzaning xuddi shu parametrlari R_a bilan o'zaro bog'lanishni o'rnatish mumkin. Masalan, elektrolitik qoplama uchun u quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$R_{a,q} = (R_a^2 + K_q \delta_q)^{1/2} \quad (2.44)$$

bu yerda K_q -qoplamani surtish texnologiyasini aniqlovchi koeffitsiyent; δ_q -qoplamaning o'rtacha muallaq qalinligi.

Shuni ta'kidlash joizki, yuza bo'yicha qoplamani taqsimlanishi bo'yicha o'tkazilgan tajriba tadqiqotlari, qattiq jism yuzasidagi hodisalarni turlicha

bo'lganligi sababli qiyinlashadi. Shuning uchun bunday tajribalarning barcha natijalari tajribalarni o'tkazishning aniq sharoitlarini inobatga olib ko'rib chiqilishi kerak.

Elektr cho'ktirishli yuzalarning holati bo'yicha tadqiqotlar ma'lumoti [27] da umumlashtirilgan bo'lib, uni tahlilidan aytish mumkinki, barcha holatlarda ham yuzani tekislash zarur. G'adir-budirlikni o'zgartirish tokni turiga, ta'sir etish vaqtiga va boshqa omillarga bog'liq. Qoplamasining qalinligi 50 mkm gacha bo'lgan yuzalar mikrogeometriyasi parametrlarining miqdoriy qiymatlari g'adir-budirlikning birinchi-ikkinchi sinflari chegaralarida o'zgaradi.

Qattiq jism yuzalarida adsorbsion polimerli va organik qoplamalarni hosil bo'lishi ushbu moddalarning strukturasini hosil bo'lish xususiyatiga, shakl berishni o'zgarishiga va molekulali agregatlarning o'lchamlariga bog'liqdir. Qattiq jism yuzasiga polimerlarni cho'ktirish jarayonida agregatlangan va agregatlanmagan molekulalar orasidagi muvozanat uzluksiz ravishda o'zgaradi, shuning uchun adsorbsion qatlamlarning qalinligi molekulyar qatlamlar qalinligidan ancha katta bo'ladi. [28] ishda keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra molekulyar agregatlarning o'lchamlari turlicha bo'lganda yuzalar mikrogeometriyasining real konfiguratsiyasining shakli ham turlicha bo'ladi.

Adsorbsion qatlamli to'lish ko'lami bo'yicha molekulyar agregatlarning qo'zg'aluvchanligi nomonoton o'zgaradi: dastlab belgilangan qiymatgacha kamayadi, keyin ortadi. O'tish nuqtasi jarayonni bunday o'zgarishini aniqlaydi, bunda qoplama qatlamiga yuza bilan sekin ta'sirlanuvchi molekulyar agregatlar kiritiladi. Qora va rangli metallar yuzalariga qoplamalar surtishning tez rivojlanayotgan usuli – anod-uchqunli elektroliz hisoblanadi, ular mikroplazmali yoki mikroyoyli oksidlash deb ham nomlanadi [29]. Bu usul anodlashtirishning rivojlangan usuli hisoblanadi, ammo kuchlanish 200 V dan oshgandan keyin oksidli plyonkalarda ko'pgina elektrik teshib chiqishlar yuzaga keladi, natijada elektrolit-oksid va oksid-metallarni ajralish chegarasi orqali o'tayotgan tokning elektron tashkil etuvchilari birdaniga ortadi. Bunda teshikchali kanallardagi harorat keskin ortadi va ularda past haroratli plazma hosil bo'lib, qoplamani o'sishi tezlashadi. Umuman olganda mikroyoyli oksidlash usuli keramika, silikat va boshqa turli materiallardan turli qalinlikdagi qoplamalarni olishning yangi imkoniyatlarini ochib beradi.

§2.7. Kapillyar-g'ovak qoplamalar.

Issiqlik almashinuvini jadallashtirish muammosi boshqa amaliy masalalar (mashinasozlikda ishonchlilikni oshirish va metal sig'imini kamaytirish, yuzaviy mustahkamlik, yemirilishga bardoshlilik, chidamlilikni oshirish va hokazo) bilan bir qatorda issiqlik almashinuv yuzalarida yangi turdagi qoplamalarni – kapillyar-g'ovak tuzilishini rivojlanishiga turtki bo'ldi. Hozirgi vaqtda bunday tuzilishlar, qizdirib biriktirilgan metal matritsalar shaklida ishlatiladi.

Aksariyat hollarda qoplamaning g'ovakligi, g'ovak hajmini V_F tuzilish hajmiga V_T nisbatidan, ya'ni $\Pi_V = V_F/V_T$ ifodasidan aniqlanadi. Hajmiy g'ovaklilik bilan birgalikda yuzaviy g'ovaklilik Π_F tushunchasi ham ishlatiladi, u teshikning samarali yuzasini F_F yuza maydoniga F_T nisbatidan aniqlanadi, ya'ni $\Pi_F = F_F/F_T$.

G'ovak jismning oddiy modeli qattiq yuzada turlicha shaklda namoyon bo'lgan va yetarlicha kichik radiusga ega bo'lgan sferik zarrachalarning "to'kilmasi" shaklida ifodalanadi. Eng kam zichlikka ega bo'lgani – geksagonalli hisoblanadi. Kubsimon taxlamda $\Pi_V = 47,64\%$, geksagonallida 25,95%. Birinchi holda qo'shni teshikchalar orasidagi eng tor o'tish kesimi radiusi $0,41R$, eng keng qismida $0,73R$.

Bir xil o'lchamli sharlardan iborat kapillyar-g'ovak tuzilishning g'ovakliligi sharlarning radiusiga bog'liq emas. Ammo sferoidlarning o'lchamini shardan og'ishi g'ovaklilikni sezilarli o'zgarishiga olib keladi, ya'ni zarrachalarning o'lchamlari kichrayganda g'ovaklilik ortadi.

Yadro texnikasida issiqlik almashinuv yuzalarini rivojlantirishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri gaz bilan sovitiluvchi yadroviy reaktorlarning aktiv zonasida sferik IAELdan (issiqlik ajratuvchi element) yoki "changsimon" yoqilg'idan foydalanish hisoblanadi. Masalan, zarrachalarning diametri 500 mkm ga yaqin bo'lganda 1 sm³ hajmdagi zarrachalar yuzasining maydoni taxminan 100 sm²/sm³ ni tashkil etadi, ya'ni reaktorda issiqlik almashinuv sharoiti bir xil bo'lganda, to'g'ri burchakli kesimi 10x10 mm bo'lgan prizmasimon IAEL bilan taqqoslansa, hosil qilingan issiqlik almashinuv yuzasi maydoni 25 marta yuqori bo'ladi.

[30] va [31] ishlarda ko'rib chiqilgan g'ovak kompozitsion qoplamalarning xususiyati ulardan yadroviy qurilmalarning IAQlarida foydalanishning yangi imkoniyatlarini ochdi.

§2.8. Murakkab qoplamalar.

Pechlar, o'txonalar, yonish kameralari va kimyoviy moslamalarda issiqlik almashinuv yuzalarining samaradorligini oshirish masalasini yechish uchun kombinatsiyalashgan qoplamalar ishlatiladi. Masalan, birinchi qatlamli-metalli qoplama, yuqori qatlami esa metal-keramika bo'lib, undagi metal komponentlarining miqdori doimiy kamayib boradi. Metal ulushini kamayib borishi natijasida kermet qoplamaning yutuvchanlik qobiliyati ortadi. Kerametli qoplamaning issiqlik o'tkazuvchanligi metal ulushini ortishi bilan ortadi. 25 dan 40% gacha Nial qo'shimchali karbid xromdan tayyorlangan qoplama xromli po'latga qaraganda 4,5 marta yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega.

Kermet qoplamali issiqlik almashinuv yuzalarining ekspluatatsion xususiyati (korroziya va eroziyaga chidamliligi, davriy termik yuklamalarga bardoshliligi va hokazo) qoplamasiz yuzalarga nisbatan ancha yuqori. Sanoat sinovlarining natijalariga ko'ra qozon-utilizatorlarining issiqlik almashinuv yuzalari uchun kombinatsiyalashgan qoplamalarining eng ma'qbuli karbid xrom asosidagi kermetlar hisoblanadi [32].

Quyosh nurlanishini (fotoelementlar yoki quyosh batareyalari) fotoelektrik o'zgartgichlardan foydalanish sohalarini kengayishi, fotonlar o'tayotgan oqimdan juda samarali foydalanishga olib keldi. Qoplama bo'lmaganda n-turidagi yarim o'tkazgich yuzasiga tushayotgan fotonlarning 30% gacha qismi qaytariladi. Shaffof qoplama ushbu yo'qotishlarni sezilarli kamaytiradi va fotonlarni r va n-turidagi yarim o'tkazgichlar chegarasiga yo'naltiradi.

Quyosh nurlanishi oqimidagi fotonlarning spektral taqsimlanishidan to'laqonli foydalanishga erishish uchun ko'p qatlamli yupqa plyonkali fotoelementlar qo'llaniladi. Masalan, bunday elementning yuqori qatlami spektrning ko'k qismi (0,4-0,5 mkm) fotonlarini yutadi va spektrning qizil qismi (0,6-0,7 mkm) fotonlarini keyingi qatlamga o'tkazadi [33]. Issiqlik almashinuv yuzasining bir yoki bir nechta qoplamalarining issiqlik almashinuv jarayonlarini jadallashtirish mexanizmi va ko'rsatkichlariga ta'sirini aniq natijalari darslikning keyingi boblarida ko'rib chiqiladi.

§2.9. Ko'p qatlamli yuzalardagi termik qarshilik.

Issiqlik almashinuvining samarali yuzalarini ishlab chiqishda geometrik shakllar va turlicha qoplamalarni rivojlantirish bilan birgalikda

quvur yoki boshqa shakldagi issiqlik almashinuv yuzalarini tayyorlash uchun ko'p qatlamli materiallardan foydalanish istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Bunda issiqlik tashuvchi bilan to'qnashuvchi material qatlamining va qoplamaning xususiyatlari, issiqlik uzatishning optimal samaradorligini ta'minlash shartidan tanlanadi.

Biroq material qatlamlari orasidagi, ya'ni qattiq yuzalarning to'qnashuv chegarasidagi issiqlik oqimi yo'lida qo'shimcha termik qarshilik yuzaga keladi va u kontaktli termik qarshilik R_k deb ataladi. R_k ni miqdoriy aniqlash uchun qatlamlar orasidagi to'qnashuvning aniq maydonini nominal va konturli maydon bilan taqqoslagandagi bo'yicha o'zgarishi ko'rib chiqiladi. Issiqlik oqimining issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan o'tayotgan to'qnashish zonasida yuzaning normal maydonini o'zgarishi kontaktli termik qarshilikni yuzaga keltiradi [34]. Kontaktli termik qarshilik son jihatdan to'qnashayotgan yuzalarning haroratlari farqini ΔT_k issiqlik oqimi zichligiga q_k nisbatan aniqlanadi:

$$R_k = \Delta T_k / q_k \quad (2.45)$$

Ikkita qattiq jism to'qnashgandagi termik qarshilikni hisoblash, kontaktlarning issiqlik o'tkazuvchanligini aniqlash tenglamasi bo'yicha amalga oshiriladi:

$$1/R_k = 1/R_{h.k} + 1/R_{k.a} \quad (2.46)$$

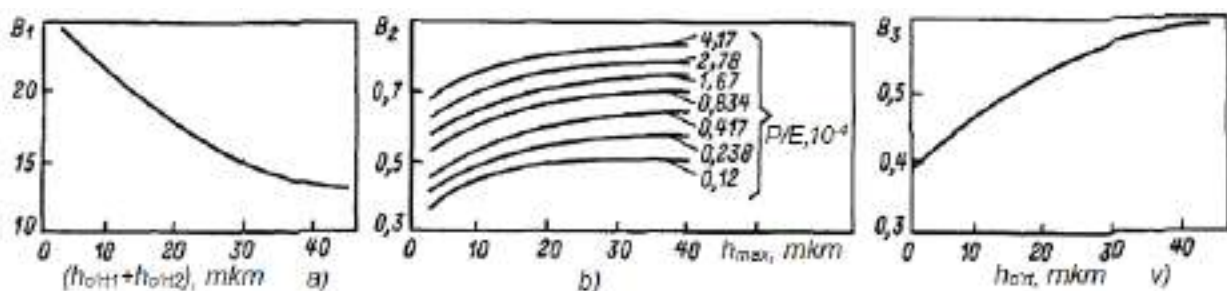
bu yerda $R_{h.k}$ -haqiqiy kontaktning termik qarshiligi; $R_{k.a}$ -kontaktlararo tirqishning termik qarshiligi.

$$R_{h.k} = \frac{1}{2,12 \lambda_m (\frac{p_k B_1}{E})^{0,6 B_2}} \cdot 10^{-4} \quad (2.47)$$

bu yerda λ_m -to'qnashayotgan materiallarning keltirilgan issiqlik o'tkazuvchanligi: $\lambda_m = 2(\lambda_1 \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$; B_1 -2.15, a-rasm bo'yicha aniqlanadigan koeffitsiyent; B_2 -2.15, b-rasm bo'yicha aniqlanadigan koeffitsiyent:

$$R_{k.a} = \frac{h_{max1} + h_{max2}}{\lambda_{gaz}} B_3 (1 - \xi) \quad (2.48)$$

bu yerda λ_{gaz} -kontaktlararo tirqishda gazning issiqlik o'tkazuvchanligi; B_3 -profillarni to'lish koeffitsiyenti, 2.15, v-rasm bo'yicha aniqlanadi; ξ -yuzalarning holatiga bog'liq holda aniqlanuvchi nisbiy yaqnlashish: qo'pol ishlov berilgan yuzalar uchun $\xi = (0,1 p_k / HB)^{0,28}$; silliqlangan yuzalar uchun $\xi = (0,012 p_k / HB)^{0,18}$; sayqallanga yuzalar uchun $\xi = (0,006 p_k / HB)^{0,18}$; HB -Bryunel bo'yicha qattqlik.



2.15-rasm. (2.4) va (2.5) tenglamalar bo'yicha to'qnashayotgan yuzalarning termik qarshiligini hisoblash uchun zarur koeffitsiyentlarni aniqlash grafiklari.

Qattiq jismlar yuzasi sohasida ko'p sonli tadqiqotlar o'tkazilishiga qaramasdan, hozirgi vaqtda kontaktli issiqlik almashinuvini o'rganish va kontaktli termik qarshilikni aniqlashning asosiy usuli tajriba usuli bo'lib qolmoqda [21, 34].

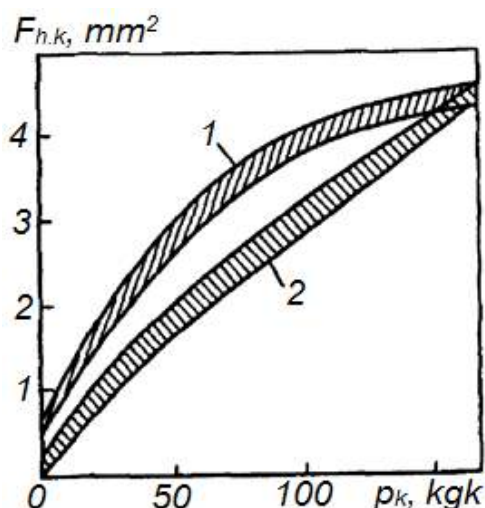
Kontaktning nominal maydoni to'qnashayotgan detallarning geometriyasidan aniqlanadi. Konturli maydon – yuzaning tuzilishi va ishlov berilganligiga bog'liq holda aniqlanadi. Kontaktning haqiqiy maydoni – ikkita qattiq jism real yuzalarining barcha urinish nuqtalari maydoni yig'indisidan iborat. Kontaktning haqiqiy maydoni qiymati yuzani siqish kuchidan – kontakt bosimidan aniqlanadi. Uning ta'siri to'qnashayotgan yuzalar g'adir-budirlikligining bo'rtiqlarini deformatsiyalanishiga olib keladi.

Kontaktning haqiqiy maydoni quyidagi umumiy tenglamadan aniqlanadi:

$$F_h = \frac{P_k}{K_1 \sigma_{m.ch} K_2} + 2,7 \frac{b^{1/\nu} R_b}{H_{max}} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) (K_1 \sigma_{m.ch})^{\frac{1+\nu}{\nu}} p_k^{\frac{1-\nu}{\nu}} \quad (2.49)$$

bu yerda p_k -kontakt bosimi, N/m^2 ; $K_1 = (2,6 \div 3,2)$ -koeffitsiyent; $\sigma_{m.ch}$ -mustahkamlik chegarasi, N/m^2 ; $K_2 = (0,550 - 0,025 H_{max})$ -koeffitsiyent; H_{max} -bo'rtiqlarning maksimal balandligi; R_b -g'adir-budirlik bo'rtiqlarining dumaloqligini o'rtacha radiusi; E -Yung elastiklik moduli; μ -Puasson koeffitsiyenti.

Kontaktning haqiqiy maydonini o'zgartiruvchi asosiy omil turlicha deformatsiya hisoblanib, u turli masshtabli darajalarda to'qnashuvchi yuzalarning real tuzilishi bilan sodir bo'ladi. Alyuminiydan tayyorlangan namuna uchun kontaktning haqiqiy maydonini kontakt bosimiga bog'liqlik xarakteri 2.16-rasmda ko'rsatilgan. R_k ni kamaytirishning keng tarqalgan yo'nalishi to'qnashayotgan yuzalar orasidagi masofani qattiq kukun yoki yuqori qovushqoq suyuq modda bilan to'ldirish hisoblanadi.



2.16-rasm. 4 sinf alyuminiy yuzasi kontaktining haqiqiy maydonini kontakt bosimga bog'liq holda o'zgarishi:

1-yuzani dastlabki siqishda; 2-yuzani qayta siqishda.

Kontaktli termik qarshilikni kamaytirish maqsadida metal qistirmalardan foydalanish tavsiya etilmaydi. Masalan, yuzasining tozaligi 6-sinfgacha va bosimi 250 kg/sm^2 gacha bo'lgan mis yoki dyural folgadan foydalanilganda kontaktning termik qarshiligi ortadi. Bu bittani o'rniga ikkita termik qarshilikni yuzaga kelishiga sabab bo'ladi (metall-folga va folga-metall chegaralari).

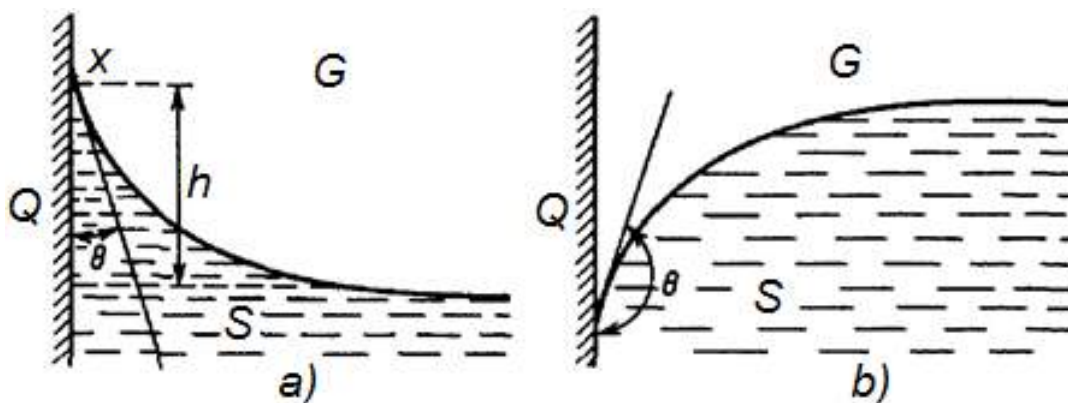
Ushbu maqsadlar uchun texnik moyni va boshqa suyuq muhitlarni qo'llash tavsiya etilmaydi, chunki ular yuqori haroratda bug'lanishi mumkin.

§2.5. Issiqlik almashinuv yuzasini suyuq issiqlik tashuvchi bilan o'zaro ta'sirlashuvi.

Yuzani issiqlik tashuvchi bilan o'zaro ta'sirlashuvining birinchi bosqichi namlanish jarayoni hisoblanadi. Namlanish imersion va kontaktli turlarga bo'linadi. Birinchi holda jarayon faqat ikkita qattiq jism ishtirokida amalga oshiriladi: bir suyuqlik va bir qattiq jism (to'liq botirilgan variant). Ikkinchi holat eng ko'p tarqalgan bo'lib, to'qnashish zonasida uchinchi - gazsimon fazani mavjud bo'lishidir.

Ikkinchi holatda qattiq va suyuq fazalar chegarasi chetki burchak θ (2.17-rasm) bilan bir xil ko'rinishda. θ ning muvozanatli qiymatiga bog'liq holda quyidagilar farqlanadi: qisman namlanish $\theta \in [90^\circ, 180^\circ]$; chegaraviy namlanish $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ to'liq namlanish ($\theta \rightarrow 0^\circ$).

Moddaning molekulyar tuzilishi nuqtai nazaridan namlanganlik suyuq va qattiq jismlar yuzasining adgeziyasidan aniqlanadi.



2.17-rasm. Suyuqlik bilan qattiq jism yuzasi chegarasini o‘zaro ta’sirlashuvini xarakterli variantlari:

a-namlanish $\theta \rightarrow 0^\circ$; b-namlanish yo‘q $\theta \rightarrow 2\pi$.

Namlanish mexanizmining eng keng tarqalgan modeli birinchi marta Guggengeym tomonidan taklif etilgan bo‘lib, unda yuzaviy fazaning mavjudligi hisobiga quyidagicha kimyoviy reaksiya kechadi:



Ushbu reaksiyaning boshlang‘ich holatdan (ikkita A va B modda mavjud bo‘lganda) oxirgi holatigacha (A , B va $AmBn$ muvozanatda bo‘lganda) erkin energiyasi adgeziya ishidan W_a aniqlanadi. Har qanday to‘qnashuvchi tizim uchun adgezion bog‘lanishning yakunlangan nazariyasi hozirgi vaqtgacha ham mavjud emas.

W_a miqdoriy qiymati yuza birligida hisoblanganda suyuq va qattiq faza kontaktlari buzilgandagi izotermik ishdan aniqlanadi. W_a umumiy holatda molekulyar o‘zaro ta’sirlarning yig‘indisidan aniqlanadi:

$$W_a = d + v + dd + i + \pi + da + es \quad (2.51)$$

bu yerda d -dispersli o‘zaro ta’sir (London); v -vodorodli bog‘lanish; dd -dipol-dipolli o‘zaro ta’sir; i -induksion o‘zaro ta’sir; π - π bog‘liqlik; da -donor-akseptor bog‘lanish; es -elektrostatik o‘zaro ta’sir.

W_a dagi turli komponentlarning ulushi turli xil suyuqlik va qattiq jismlar uchun turlicha. Umuman olganda adgezion mustahkamlik molekulyar bog‘liqlikka ta’sir etuvchi barcha kuchlar yig‘indisi natijasini ifodalaydi.

Odatda W_a ikki guruh kuchlarga ajratiladi, ya’ni fizik tabiatli va kimyoviy bog‘langan. Ko‘pgina real tizimlar uchun, ya’ni fazalar orasidagi masofa atom masofasidan oshsa, ularni Van-der-Vaals kuchini inobatga olgan holda chegaralash mumkin. Adgeziya ishi Yung tenglamasi bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi makroskopik xarakteristika bilan o‘zaro bog‘langan:

$$W_a = \sigma_{s-g}(1 + \cos\theta) \quad (2.52)$$

bu yerda $\cos\theta = (\sigma_{q-g} - \sigma_{g-s})/\sigma_{s-g}$.

(2.52) ifoda uchta faza chegarasidagi muvozanatni aniqlaydi, ya'ni o'zaro ta'sirlarni miqdoriy tavsiflash uchun barcha chegaralarda sodir bo'ladigan jarayonlarni inobatga olish zarur.

Suyuqlik va qattiq jismning fazalararo chegarasini tahliliga termodinamik yondashuvda termodinamik tizimning ikkita varianti farqlanadi: muvozanat, bunda fazalarning kimyoviy potentsiallari teng bo'ladi va nomuvozanat. Nomuvozanat tizimda fazalararo energiya to'qnashuvchi jismlarning tabiatiga va tuzilishiga bog'liq bo'ladi.

Umumiy holda quyidagicha yozish mumkin:

$$W_a = W_{a(muv)} + W_{a(nomuv)} \quad (2.53)$$

Suyuq metallar uchun ikkinchi qo'shiluvchining ulushini katta bo'lishi muhim.

A.N. Frumkin [35] chuqur termodinamik tahlil asosida elektr kapillyar hodisaning rolini va namlangan (ho'llangan) maydon chegarasidan keyin qattiq jism yuzasiga suyuqlik molekulalarini adsorbsiyalanishini inobatga olish zarurligini ko'rsatib berdi. Ushbu g'oyani rivojlanishi natijasida hozirgi vaqtda namlanish kinetikasi – suyuqlikni qattiq jism yuzasi bo'yicha tarqalishi to'g'risidagi farazlar kengaydi [36]. tarqalish koeffitsiyenti K_t quyidagi ko'rinishdagi chetki burchakni o'rnatishning dinamik xarakteristikasi deb ataladi:

$$K_t = \sigma_{q-g} - \sigma_{q-s} - \sigma_{s-g} \quad (2.54)$$

Yung tenglamasini inobatga olib K_t ni adgeziya ishi orqali ifodalaymiz:

$$K_t = W_a - 2\sigma_{s-g} \quad (2.55)$$

To'liq namlanganda $K_t > 0$, ya'ni adgeziya ishi σ_{s-g} dan ikki marta yuqori bo'ladi. Suyuqlik tarqalganda qattiq jism yuzasiga suyuqlik molekulalarini adsorbsiyasi sodir bo'ladi, bu esa K_t ni kamayishiga olib keladi. K_t ni qattiq jism yuzasidagi suyuqlik molekulalari adsorbsiyasiga bog'liqligini bir nechta variantlari mavjud. Bunda bosimga ham bog'liqlik mavjud bo'lib, u Gibbsning tenglamasiga mos keladi:

$$\Gamma = \left(-\frac{d\sigma_{q-g}}{dp} \right) \left(\frac{P}{RT} \right) \quad (2.56)$$

bu yerda R -gaz doimiysi.

Adsorbsiyaning maksimal qiymati Γ_{max} Lengmyur tenglamasidan aniqlanadi va u to'yingan monomolekulyar qatlamga mos keladi.

$$\Gamma = \Gamma_{max} [p/(A + p)] \quad (2.57)$$

Qattiq yuza bo'yicha suyuq fazalarni tarqalishini ikkita shakli farqlanadi: quyilish – to'qnashish maydonini oshishi, oqib tushish – to'qnashish maydonini kamayishi. Tarqalishdagi chetki burchaklar dinamik chetki burchaklar θ_d deb ataladi. Dinamik chetki burchakni o'zgarish tezligi tarqalish tezligini belgilaydi. Tarqalish tezligini ifodalash uchun harakatlantiruvchi kuch va tarqalishning qarshilik kuchi munosabatini ko'rib chiqish zarur.

Silliq yuzadagi tarqalishning oddiy sharoitini ko'rib chiqib (2.18-rasm), namlanish perimetrining uzunligi birligiga nisbatan harakatlantiruvchi kuchni quyidagi tenglamadan topamiz:

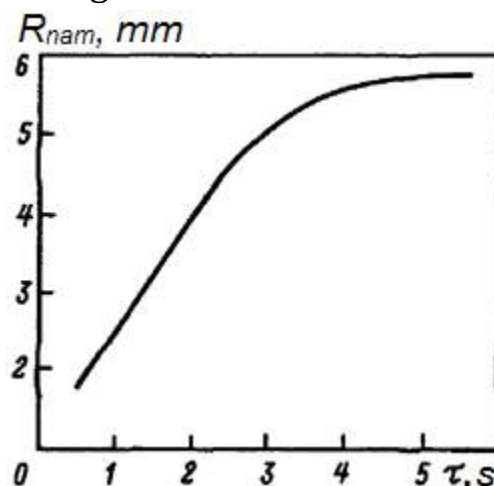
$$\Delta\sigma = (\sigma_{q-g} - \sigma_{q-s}) - \sigma_{s-g} \cos\theta_d \quad (2.58)$$

yoki g'adir-budir yuza uchun:

$$\Delta\sigma = \sigma_{s-g}(\cos\theta_{g'.b} - \cos\theta_d) \quad (2.59)$$

Ma'lumki, suyuqliklarda issiqlik almashinuv jarayonida real qattiq yuzalarda namlanish va tarqalishning turli xil dinamik jarayonlari mavjud bo'lib, ular jarayon mexanizmini belgilaydi.

Tarqalish jarayonlari nazariyasida kinetik va gidrodinamik rejimlar farqlanadi. Tarqalishning kinetik rejimi jarayonning birinchi bosqichi hisoblanadi, bunda tezlik namlanish liniyasi yaqinidagi qarshilik bilan cheklanadi. Kinetik rejimning davomliligi chegaralangan (10^{-2} - 10^{-3} s), tarqalish tezligi esa sekundiga bir nechta o'n santimetrgacha yetadi.



2.18-rasm. Suyuq metalli issiqlik tashuvchi tarqalganda yuzaning namlangan maydoni radiusini R_{nam} vaqtga τ xarakterli bog'liqligi.

Tarqalishning gidrodinamik rejimi aniqlovchi kuchlarga bog'liq holda inersion va qovushqoq turlarga bo'linadi. Real yuzalardagi tarqalish

mexanizmi aksariyat hollarda suyuqlik va qattiq jismlarning o'zaro ta'sirlashuv sharoitidan aniqlanadi. Yuzadagi o'zaro ta'sirlashuvchi molekulyar kuchlar suyuqlik tomchilarining pastki qismidan ingichka qatlamini tortadi, uning xususiyati tomchidagi suyuqlik massasining xususiyatidan sezilarli farq qiladi. Bu molekulyar qatlam juda ingichka (bir necha mikrongacha) bo'ladi. Keyin tomchining barcha massasi harakatga qo'shiladi.

G'adir-budir yuza namlanganda yuzaning haqiqiy maydoni $F_{g'.b} = K_{g'.b}F_n$ ni tashkil etadi va yuza namlangandagi muvozanat sharti quyidagi ko'rinishga o'zgaradi:

$$\cos\theta_{g'-b} = K_{g'-b}\cos\theta \quad (2.60)$$

Ushbu Vensel-Deryaginning tenglamasi shuni ko'rsatadiki, agar suyuqlik yuzani namlantirmasa, g'adir-budirlikni ortishi bilan chetki burchak ortadi ($\theta > 90^\circ$) va namlanganda esa kamayadi ($\theta < 90^\circ$). G'adir-budir yuzalarni namlanganligi to'g'risidagi tajriba natijalari ushbu qonuniyatni tasdiqlaydi.

Qattiq jismlarning yuzalari texnik bir jinsli bo'lmagan holatlarda (turli ishlov berilgan sohalarni mavjudligi, mahalliy cho'kmalar, qisman korroziyalanish va hokazo) muvozanatdagi chetki burchak tenglamasidagi turli tashkil etuvchilarning mavjudligini ham inobatga olish zarur, ya'ni yuzaning birinchi jinsi uchun:

$$\cos\theta' = (\sigma'_{q-g} - \sigma'_{q-s})/\sigma'_{q-s} \quad (2.61)$$

ikkinchisi uchun:

$$\cos\theta'' = (\sigma''_{q-g} - \sigma''_{q-s})/\sigma''_{q-s} \quad (2.62)$$

Agar birinchi va ikkinchi jins yuzalarining ulushlari φ' va φ'' ($\varphi' + \varphi'' = 1$), yuzalarning uchastkalari kichik va bir-biri bilan almashinib tursa, u holda samarali o'rtacha qiymat $\bar{\sigma}_{q-s}$ additiv shartdan aniqlanadi:

$$\bar{\sigma}_{q-s} = \varphi'\sigma'_{q-s} + \varphi''\sigma''_{q-s} \quad (2.63)$$

xuddi shunday:

$$\bar{\sigma}_{q-g} = \varphi'\sigma'_{q-g} + \varphi''\sigma''_{q-g} \quad (2.64)$$

U holda chetki burchakning samarali qiymati quyidagi ifodadan topiladi:

$$\cos\bar{\theta} = [\varphi'(\sigma'_{q-g} - \sigma'_{q-s}) + \varphi''(\sigma''_{q-g} - \sigma''_{q-s})]/\sigma_{s-g} \quad (2.65)$$

Yuzada ko'p turli jinsli uchastkalar mavjud bo'lganda, ularning orasidagi chegarada energetik to'siqlar sodir bo'ladi va muvozanat qiymat $\bar{\theta}$

sezilarli farq qilishi mumkin. Real yuzalar uchun yuzalarning geometriyasi, nuqsonlar mavjudligi va g'ovaklilik inobatga olinishi kerak.

Puazeyl-Xagen qonuniga asosan parallel tekisliklar orasidagi 2d tirqishdagi suyuqlikning o'rtacha tezligi:

$$\bar{u} = \frac{\Delta p}{\Delta x} \frac{d^2}{3\eta} = \frac{p_k}{x} \frac{d^2}{3\eta} \quad (2.66)$$

bu yerda bosim gradiyenti $\Delta p/\Delta x$ o'zgarmas kapillyar bosim p_k orqali ifodalangan.

Ma'lumki

$$\bar{u} = dx/d\tau = a/x \quad (2.67)$$

(2.67) yechimi asosida quyidagiga ega bo'lamiz:

$$x^2 = 2 a\tau \quad (2.68)$$

bu yerda a o'zgarmas m^2/s o'lchov birligiga ega, ya'ni diffuziya koeffitsiyenti bilan bir xil o'lchov birligiga ega.

b og'irlik kuchini sekinlashuvchi harakatini inobatga olsak (2.68) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$\bar{u} = \frac{dx}{d\tau} - b = \frac{a-bx}{x} \quad (2.69)$$

(2.69) ning yechimi quyidagicha:

$$\tau = \frac{a}{b^2} \ln \left(\frac{a}{a-bx} - \frac{x}{b} \right) \quad (2.70)$$

Tirqishda suyuqlik ko'tarilishining maksimal balandligi:

$$x_{max} = a/b \quad (2.71)$$

Ko'rinib turibdiki, fizikaviy mohiyati bo'yicha a doimiy yuzaning og'ish burchagidan aniqlanadi. O'zaro ta'sirlashuvchi suyuq metalli issiqlik tashuvchilarning xususiyatlarini ko'rib chiqishda quyidagi kimyoviy jarayonlar hal qiluvchi rol o'ynaydi: qattiq metalni suyuqlikda erishi; suyuq metalni metal devorida harorat va bosimga bog'liq holda erishi; suyuq metalni devor metali zarrachalari chegarasi bo'yicha devorning zo'riqish holati va haroratiga bog'liq holda to'qnashish darajasi; oksidlarni suyuq metalni devor bilan o'zaro ta'sirlashuviga oksidlarni ta'siri.

Bir nechta tasavvurlarga asosan suyuq metallarni devor bilan kimyoviy o'zaro ta'sirlashuvi ikkita xarakterga ega: 1) asosiy tarkibni suyuq metalda erishi yoki qandaydir legirlovchi element yoki komponentni metall devorining zarrachalari chegaralari bo'yicha erishi; 2) suyuq metalning o'zini yoki uning qandaydir aralashmasini devor materiali bilan kimyoviy reaksiyasi.

Kimyoviy ta'sirlar natijasida metal yuzasida oksidlar yoki ko'p metalli birikmalardan plyonka hosil bo'lishi mumkin. Erishda ikkita ta'sir mexanizmi bo'lishi mumkin: suyuq metaldagi devor metal atomlarining geterogen diffuziyasi va suyuq metaldagi devor metalining zarrachalarini gomogen diffuziyasi. Ushbu jarayonlarning tezligiga bog'liq holda ulardan biri aniqlovchi bo'lishi mumkin. Masalan, temir simobda eriganda birinchi jarayon-temir atomlarini simobga geterogen diffuziylanishidir va u erishning umumiy jarayonini belgilaydi (temir suyuq natriyda eriganda esa aksincha geterogen diffuziya ustunlik qiladi).

O'zaro ta'sirlashish jarayoniga harorat rejimi (harorat gradiyenti) sezilarli ta'sir ko'rsatadi, ammo unga bog'liq bo'lmagan holda konsentratsiyalar gradiyenti va atomlarning turlicha energetik holatlari ham ta'sir ko'rsatadi. Kimyoviy o'zaro ta'sirlashish mavjud bo'lgan bir nechta hollarda ajralish chegarasidagi oraliq fazalarni to'g'ridan-to'g'ri kuzatish mumkin bo'ladi.

Yuqorida keltirilganlarni inobatga olgan holda namlanishning mikroskopik surati quyidagicha tasvirlanadi: absolyut nol haroratda metal va kislorod ionlaridan tuzilgan devor oksidi kristallarida xech qanday aralashma va nuqsonlar bo'lmasa, kristall suyuq metal bilan o'zaro ta'sirlashmaydi, chunki ionlarning elektron qobig'i yopiq va metall atomi devor yuzasiga yaqinlashadi hamda o'zining elektronlarini quyib yuboradi (elektron o'tkazuvchanlik yo'q, demak erkin elektronlar ham bo'lmaydi). Haroratni ortishi bilan elektronlar o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadi va suyuq metalni devor yuzasidagi oksid bilan o'zaro kimyoviy ta'sirlashuvini yuzaga keltiradi. Bu faraz bir nechta tajribalar bilan tasdiqlangan.

Nazorat savollari.

1.

III-BOB. SAMARADOR KONVEKTIV ISSIQLIK ALMASHINUV YUZALARI

§3.1. Samarador yuzalarni hosil qilish usulini tanlashda aniqlovchi shartlar.

Samarador issiqlik almashinuv yuzalaridan foydalanish IAQlarining massasi kamaytirish va tashqi o'lchamlarini kichraytirish muammosini yechish imkonini beradi. Konvektiv issiqlik almashinuv jarayonlari uchun juda ko'p yuzalar taklif etilgan va tadqiqot qilingan [26].

Hozirgi vaqtda bir fazali issiqlik tashuvchilar uchun quyidagi usullar qo'llaniladi: yuzalardagi oqim turbulizatorlari, g'adir-budir yuzalar, qovurg'alangan yuzalar, spiral qovurg'a yordamida oqimni uyurmalash, shnekli uyurmalagichlar, buragichlar va hokazo. Oddiy yuzalarni saqlash uchun oqimga ta'sir ettirishning turli usullari ishlatiladi: suyuqlik oqimiga gaz pufakchalarini aralashtirish, gaz oqimiga esa qattiq zarracha yoki suyuqlik tomchilarini aralashtirish, issiqlik almashinuv yuzasini aylantirish, yuzani vibratsiyalash, issiqlik tashuvchilarni pulsatsiyalash, oqimga elektrostatik maydonni ta'sir ettirish, chegara qatlamdan oqimni so'rib olish va hokazo. Jadallashtirishning kombinatsiyalashgan usullarini qo'llash ancha samarali hisoblanadi (turbulizatorlarni qovurg'ali yuza bilan kombinatsiyalash, spiral qovurg'alarni oqim uyurmalagichlar bilan birgalikda qo'llash; suspenziyaning oqimida uyurmalagich moslamalarini qo'llash, turbulizatorlarni oqim uyurmalagich bilan kombinatsiyalash).

Shuni ta'kidlash joizki, issiqlik almashinuvini jadallashtirishning istalgan usulini amalda qo'llash uchun nafaqat yuzaning samaradorligi, balki ularni tayyorlashdagi osonligi, IAQsini yig'ishni soddaligi, mustahkamlik talablari, yuzalarning ifloslanganligi va ekspluatatsiya xususiyatlari ham inobatga olish zarur. Ushbu barcha holatlar samarador yuzalarni tanlash imkoniyatini sezilarli darajada kamaytiradi.

Aniq maqsadlar uchun issiqlik almashinuvini jadallashtirishning optimal usuli yordamida har qanday IAQsini ishlab chiqishda IAQlarining quyidagi xarakteristikalarini yaxshilash ham qo'shiladi: metal sarfi, tashqi o'lchamlari va yuza haroratlarini kamaytirish, ishonchlilikni oshirish, ishlash resurslarini ko'paytirish va hokazo. Biroq issiqlik almashinuvini jadallashtirishning optimal usulini tanlash ko'p shartlar asosida aniqlanadi. Ushbu shartlardan asosiylari quyidagilar:

1) berilgan aniq IAQsida issiqlik berishni jadallashtirishning maqsadi va vazifalari;

2) issiqlik almashinuvini jadallashtirishga keltirilgan energetik xarajatlar va unga sarflangan energiya;

3) issiqlik berish jadallashtirishi talab etilgan oqimning gidrodinamik tuzilishi, issiqlik oqimi zichligining taqsimlanish xarakteri yoki issiqlik tashuvchidagi xaroratlar maydoni, oqim tuzilishini boshqarishning qulay usullari;

4) issiqlik almashinuvi jadallashgan IAQsini tayyorlash osonligi, ekspluatatsiyada qulay va ishonchliligi.

Ushbu shartlarni to'liq ko'rib chiqamiz.

1. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish masalasi odatda IAQsining tashqi o'lchamlari va massasini kamaytirishga, haroratlar farqini kamaytirishga, masalan issiqlik tashuvchilarning belgilangan haroratida devor haroratini pasaytirishga va devorning belgilangan maksimal haroratida issiqlik tashuvchilar haroratini oshirishga qaratiladi. IAQlarining tashqi o'lchamlarini kichraytirish va haroratlar farqini pasaytirish oddiy yo'llar bilan amalga oshiriladi (oqim tezligini va kanallar o'lchamini o'zgartirish orqali).

2. Obyektni to'laqonli tahlil qilish va konstruktiv takomillashtirish IAQlari orqali issiqlik tashuvchilarni haydashga ruxsat etilgan energiya sarfini aniqlash imkonini beradi (masalan, turbina kuraklarini sovutish tizimlari, atom reaktorlarining IAELlarini sovutish, dvigatel soplosini va yonish kamerasini sovutish). Odatda energiya turi aniq. Bu issiqlik tashuvchini haydash uchun nasos quvvati yoki elektr va magnit maydonini yaratish uchun zarur energiya bo'lishi mumkin.

Amaliyotda bosimning gidravlik yo'qotishlarini ruxsat etilgan chegarasida oqim tezligi oshirilganda IAQlarining zarur tashqi o'lchamlari yoki devorning belgilangan harorati ta'minlanmaganda issiqlik almashinuvini jadallashtirishga ehtiyoj tug'iladi. Shuning uchun IAQlari orqali issiqlik tashuvchilarni haydashga umumiy bosim yo'qotilishi o'zgarmas bo'lganda qurilma tashqi o'lchamlari kichrayishini ta'minlovchi issiqlik almashinuvini jadallashtirish usuli zarur bo'ladi.

Ushbu chegaralanish bilan bog'liqliklarni baholaymiz. Turbulent oqimlarida oqimni sun'iy qo'shimcha turbulizatsiyalash yo'li bilan issiqlik almashinuvini jadallashtirishning barcha ma'lum usullari gidravlik qarshilik

koeffitsentini ortishi bilan bog'liq. Jadallashganlikni baholash uchun oqimni sun'iy turbulizatsiyalash moslamasi bo'lgan va shunday moslamasi bo'lmagan silliq quvurni taqqoslash maqsadga muvofiqdir.

Ko'rilayotgan IAQlari uchun issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulining samaradorlik mezoni sifatida Nusselt mezoni Nu/Nu_s va qarshilik koeffitsientlari ξ/ξ_s xizmat qiladi, bunda jadallashgan kanallar uchun (Nu, ξ) va silliq kanallar uchun (Nu_s, ξ_s). Konstruksiylari turlicha bo'lgan IAQlarida ushbu nisbatlar turlicha bo'ladi. Xuddi shu nisbatni quvurchali IAQsi namunasida ko'rib chiqamiz, bunda birinchi issiqlik tashuvchi quvur ichidan oqadi (1 indeks), ikkinchi issiqlik tashuvchi quvurlar orasidan parallel yo'nalishda (2 indeks) oqadi. Quvur ichidan o'tayotgan issiqlik tashuvchi quvurlardagi gidravlik yo'qotilishining ruxsat etilgan qiymatlarida ΔP kichik issiqlik berish koeffitsientiga ega bo'lsin.

Demak, issiqlik oqimi:

$$Q = F\alpha_1(T_d - T_o) = kF\overline{\Delta T} \quad (3.1)$$

Quvurlarda ishqalanishga bosimni gidravlik yo'qotilishi:

$$\Delta P = \xi Re^2 \frac{l}{2D} \frac{\mu^2}{D^2 \rho} = A\xi Re^2 \frac{l}{D} \quad (3.2)$$

IAQsi quvuri orqali o'tayotgan issiqlik tashuvchi sarfi:

$$G = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\mu}{D} Re n = B Re N \quad (3.3)$$

Ushbu qiymatlarni berilgan deb hisoblaymiz. Bu yerda $\Delta T = (T_{o1} - T_{o2})$ - issiqlik tashuvchilar o'rtasidagi haroratlar farqi.

Quvurlarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish yo'li bilan issiqlik o'zatish yuzasining maydonini kamaytirish masalasi qo'yilgan bo'lib, tanlanagan silliq quvurlar uchun diametr D va quvurlar to'plami qadami o'zgarmaydi, quvurlar soni N va uzunligi l esa o'zgaradi.

$Q = Q_s$; $\Delta P = \Delta P_s$; $G = G_s$, (3.1), (3.2) va (3.3) tenglamalardan ma'lum bo'ladiki, $F/F_s < 1$ holat quyidagi tengsizlik bajarilganda kuzatiladi:

$$\left(\frac{Nu}{Nu_s}\right)^2 > \frac{\xi}{\xi_s} \left(\frac{Re}{Re_s}\right)^3 \left(\frac{T_{d.s} - T_{o.s}}{T_d - T_s}\right)^2 \quad (3.4)$$

(3.4) tengsizlikda Nu va Nu_s , ξ va ξ_s qiymatlar Re ning turli qiymatlariga mos keladi. Ushbu nisbatlarni silliq quvurdagi Reynolds soni bilan bir xil qiymatga keltiramiz, bunda $\xi = Re^{-0.2}$ va $Nu = Re^{0.8}$. U holda

$$\left(\frac{Nu}{Nu_s}\right)_{Re_s}^2 > \left(\frac{\xi}{\xi_s}\right)_{Re_s} \left(\frac{Re}{Re_s}\right)^{1.2} \left(\frac{T_{d.s} - T_{o.s}}{T_d - T_s}\right) \quad (3.5)$$

Ko'rinib turibdiki, IAQsining tashqi o'lchamlarini kamaytirishni nafaqat $Nu/Nu_s > \xi/\xi_s$ qiymatni beruvchi issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullari yordamida, balki $Nu/Nu_s < \xi/\xi_s$ bo'lganda ham (3.5) tengsizlikni qanoatlantiradigan usullar yordamida amalga oshirish mumkin.

(3.1) tenglamadan $T_d - T_o = (k/\alpha_1)\Delta T$ ekanligi ma'lum. Termik qarshilikni va quvur devori egriligini inobatga olmaganda issiqlik uzatish koefitsenti $k = \alpha_1\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2)$. U holda $T_d - T_o = \alpha_2 \Delta T/(\alpha_1 + \alpha_2)$ va (3.5) tengsizlik quyidagi krinishda bo'ladi:

$$\left(\frac{Nu}{Nu_s}\right)_{Re_s}^2 > \left(\frac{\xi}{\xi_s}\right)_{Re_s} \left(\frac{Re}{Re_s}\right)^{1.2} \left(\frac{\alpha_{2s}}{\alpha_2}\right) \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_{1s} + \alpha_{2s}}\right) \quad (3.6)$$

(3.6) tengsizlikdan ko'rinib turibdiki, agar ushbu usul quvurning tashqarisidan issiqlik berishni jadallashtirish bilan kuzatilsa yoki quvur tashqarisidan issiqlik berish koefitsiyenti α_2 quvur ichidan issiqlik berish koefitsiyentiga α_1 qaraganda ancha katta bo'lsa, u holda quvur ichida issiqlik berishni jadallashtirish usulining samaradorligi ortadi.

(3.4)-(3.6) tengsizliklardan foydalanib baholash, issiqlik berishni jadallashtirish usulini dastlabki tanlash uchun foydali. Usulni yakuniy tanlash albatta IAQsini to'liq qiyosiy hisoblash, ularni konstruktiv takomillashtirish, ekspluatatsiya talablari, ishonchliligi va iqtisodiy hisoblar asosida amalga oshiriladi. Ko'pgina maxsus holatlarda IAQlari orqali issiqlik tashuvchilarni haydash uchun ishlatiladigan bosimlar farqi shu qurilmada hosil bo'lishi mumkin bo'lgan gidravlik qarshilikdan doim yuqori bo'ladi. U holda issiqlik almashinuvini jadallashtirishning eng yaxshi usuli Nu/Nu_s ning maksimal qiymatini ta'minlovchi, konstruktiv, texnologik va ekspluatatsion talablarini qanoatlantiruvchi usul hisoblanadi.

Agar issiqlik almashinuvini jadallashtirish usuli elektr energiyasidan foydalanishga asoslangan bo'lsa (tovush tebranishlarini jo'natish, elektr yoki magnit maydoni, issiqlik almashinuv yuzasida vibratsiyani hosil qilish va hokazo), u holda faqatgina konstruktiv xususiyatni va barcha obyektning elektr energiyasi sarfini hisobga olgan holda hisoblash jadallashtirish usulini qo'llashdagi maqbullikni ifodalaydi.

3. Turbulent oqimning gidrodinamik tuzilishi va undagi issiqlik almashinuv xususiyati (issiqlik oqimi zichligini yoki haroratlar maydonini taqsimlanishi) ayrim sohalarni ajratadi, ushbu sohalarda turbulentlik pulsatsiyasi jadalligini ortishi issiqlik berishni jadallashtirishga eng yaxshi

samara beradi. Odatda bu soha devorga juda yaqin bo'ladi. Ularda turbulentli issiqlik o'tkazuvchanlik oqim yadrosidagi qiymat bilan taqqoslanganda ancha kichik, issiqlik oqimining zichligi esa maksimalga yaqin (devor bilan issiqlik almashinuvida).

V.K. Migayning bahosiga ko'ra [37, 38] $Re = 10^4$ bo'lganda turbulent oqimida uch qatlamli sxema bo'yicha alohida qatlamlarning termik qarshiligining ulushi qovushqoq ost qatlam uchun $\left(y^+ = \frac{y}{\nu} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} = 5\right)$ – 32,3%, o'tish qatlami uchun $(y^+ = 5 \div 30)$ – 52% va oqim yadrosi uchun 15,7%. Hattoki silliq quvurlarda ham turbulent oqimida gidravlik yo'qotishlarning asosiy qismi turbulentlikni hosil bo'lishiga sarflanadi, u ham aynan devor oldi zonasida $(y^+ \leq 50 \div 60)$ da sodir bo'ladi.

Biroq katta turbulentlik pulsatsiyasi $y^+ > 60$ zonada sodir bo'ladi, bunga sabab issiqlik tashuvchini devordan oqim yadrosiga ko'chishidir. Keyin tezlikning katta pulsatsiyasi bosim pulsatsiyasi bilan almashinadi, ancha kichik pulsatsiyalarga ajraladi va ularga o'zining energiyasini beradi, oxirida oqimning issiqlik energiyasiga ko'chadi.

Turbulent oqim tuzilishini va unda issiqlikni uzatish mexanizmini o'rganish shuni ko'rsatadiki [39], issiqlik uzatishda katta masshtabdagi pulsatsiyalar asosiy rolni o'ynaydi, ya'ni yirik masshtabli pulsatsiyalar oqim yadrosini devor bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasi bo'lib, ular oqim yadrosidan devorga yo'nalgan bo'ladi. Bunda issiqlik tashuvchining asosiy massasini oqim yadrosidan devorga ko'chishi va qaytishi sodir bo'ladi, natijada turbulentlik hosil bo'lishini stimullovchi devordan tashlamalar miqdori ortadi. Ma'lumki, oqimni har qanday qo'shimcha turbulizatsiyalash energiyaning qo'shimcha sarfi bilan bog'liq bo'lib, issiqlik almashinuvini jadallashtirishning samarali usullarini ishlab chiqishda oqimni qo'shimcha turbulizatsiyalash joyi va usulini tanlash hal etuvchi bosqich hisoblanadi. Yuqorida keltirilganlardan ko'rinib turibdiki, oqim yadrosini turbulizatsiyalash emas, balki suyuqlikning devor oldi qatlamini $(y^+ = 30 - 60)$ qo'shimcha turbulizatsiyalashni ta'minlovchi jadallashtirish usullari eng samarali hisoblanadi. Shundan aytish mumkinki, jadallashtirishning aynan shunday usuli ξ ni kam ortishi hisobiga Nu ni sezilarli ortishiga olib keladi hamda (3.5) tengsizlikni olishni ta'minlaydi.

Tor burchaklari mavjud bo'lgan nodumaloq shakldagi kanallarda, masalan quvur yoki sterjenlar to'plamini bo'ylama yuvib o'tishda,

uchburchakli kanallarda va hokazolarda o'tish va turbulent oqimlarida oqim tuzilishi nafaqat devorga normal bo'yicha, balki kanalning perimetri bo'yicha ham o'zgaradi.

Oqim yadrosi va kanalning keng qismlaridagi devor yaqinida turbulentli oqim bilan birgalikda kam turbulentli yoki laminar oqimli zonalar bo'lishi mumkin. Ushbu zonalarga kanal yuzasining kattagina qismi to'g'ri keladi. Shuning uchun bunday kanallarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullarini ishlab chiqishda nafaqat kanalning keng qismlaridagi devor oldi zonalarida qo'shimcha turbulizatsiyalash yo'llarini qidirish kerak, balki burchakli zonalarda ham oqimni turbulizatsiyalash yo'lini izlash kerak.

4. IAQlarini seriyali ishlab chiqarish uchun issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini tanlashdagi hal etuvchi muhim shart, bu usulning texnologik soddaligi va ekspluatatsiya sifati hisoblanadi. Bunda nafaqat issiqlik almashinuv yuzasini o'zini ishlab chiqarish texnologik osonligi, balki ulardan IAQlarini yig'ish, ishonchliligi va ishlash davomiyligi, ushbu IAQlarining oddiy bazaviy yuzasi bilan taqqoslanganda ifloslanish va cho'kmalarini hosil bo'lishini ta'siri kabi parametrlar ham inobatga olinadi.

Bunda albatta tanlangan issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini qo'llashdagi iqtisodiy samaradorlik (metal sarfi va massasini kamayishi, tashqi o'lchamlarini kichrayishi va hokazo) inobatga olinadi. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishni istalgan usulining samaradorligiga ishonch hosil qilish uchun nafaqat ko'p sonli tadqiqotlar zarur, balki real sharoitlarda IAQlarini ekspluatatsiya natijalari ham zarur bo'ladi. Chunki issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini ishlab chiqishdan boshlab, uni IAQlarida keng qo'llash uchun ancha ko'p vaqt kerak bo'ladi. Boshqa tomondan issiqlik almashinuvini jadallashtirishning ishlab chiqilgan va chop etilgan kam sonli usullari yuqorida keltirilgan shartlarni qanoatlantirishi va maxsus hollarda keng qo'llanilishi mumkin.

§3.2. Uzilish zonasi oqimni to'liq qo'shimcha turbulizatsiyalashning asosiy vositasi sifatida.

Belgilangan kesimli kanalda turbulent oqim tuzilishida issiqlik berishni jadallashtirish talab etilganda quyidagi savol tug'iladi: oqimning belgilangan sohasida turbulent pulsatsiya jadalligini qanday oshirish mumkin va bu qayerda eng yaxshi samara beradi. Savolni o'rganish tahlili

shuni ko'rsatadiki, turbulent oqim tuzilishiga boshqariladigan ta'sirni eng qulay va samarali usuli oqimda uzilish zonalarini yoki boshqa uyurmaviy tuzilishni hosil qilish hisoblanadi.

Uzilish zonalaridan yaxshi foydalanish uchun, ularni asosiy turbulent oqim bilan o'zaro ta'sirlashish mexanizmini va uzilish zonasining o'zidagi jarayonlar mexanizmini bilish zarur. Ushbu jarayonlar juda qiyin. Ammo ushbu jarayonlar yetarlicha o'rganilgan bo'lib, kanallardagi issiqlik berishni jadallashtirish maqsadida uyurmaviy zonalaridan foydalanish mumkin.

Tovush tezligidan past tezlikdagi oqimda uyurmaviy zonalarini asosiy xususiyatlarini va ularni oqim bilan o'zaro ta'sini ko'rib chiqamiz. Uyurmaviy zonalarini hosil qilishning eng ko'p tarqalgan usullaridan biri kanal yuzasida joylashgan ko'ndalang bo'rtiq yoki chuqurlarni hosil qilish hisoblanadi. Bo'rtiq va chuqurlar turli shakllarga ega bo'lishi mumkin. Shuni ta'kidlash kerakki, uzilish zonasining tuzilishi yuzadagi bo'rtiq va chuqurchani tashqi ko'rinishiga sezilarli bog'liq bo'lib, uyurmalanish zonasini hosil qilishning asosiy omili hisoblanadi.

Ablott va Klaynlarning [40] to'ri chuqurchadan keyingi uzilish zonasini tadqiqot qilishgan va ushbu zonani uchta sohaga ajratishgan (3.1 – rasm):

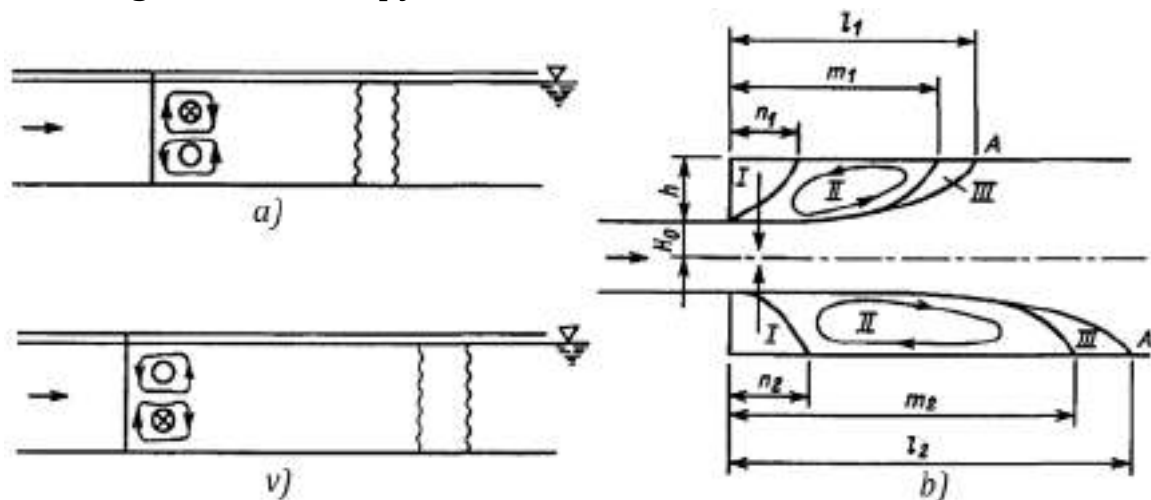
I-uch o'lchamli (uzunlik $x = n$), yon devorga perpendikulyar bo'lgan va o'q bilan bir yoki bir nechta uyurmani mavjud bo'lishi bilan xarakterlanadi. Ushbu uyurmaning o'lchami vaqt bo'yicha o'zgarishi mumkin. Ularning soni bo'rtiqning shakli va o'lchamlariga bog'liq. Tajribalarda ikkitadan oltitagacha uyurma kuzatilgan;

II-ikki o'lchamli ($n < x < m$), amalda ikki o'lchamli uyurmani mavjudligi bilan xarakterlanadi;

III-uch o'lchamli nobarqaror, bunda nobarqaror uyurmalar mavjud bo'lib, asosan ($0.8 < m < 1,25$) zonadagi tugunlarda joylashgan. Ushbu soha $n < x < 1$ oraliqda yotadi.

Odatda asosiy oqimdan ajralgan oqim massasi uzilish zonasiga qo'shilish nuqtasiga *A* yaqin *III* soha chegarasida kiritiladi. Unga mos keluvchi oqim massasi uzilish zonasidan asosiy oqimga o'tib, *I* sohada o'rtachalashadi. Turbulentlikni hosil bo'lishining asosiy ulushi *I* soha chegarasiga to'g'ri keladi. Turbulentlik energiyasi tenglamasining [41] – $\rho w'_x w'_y (\partial w_x / \partial y)$ tashkil etuvchisi odatda turbulentlikni hosil bo'lishi yoki samarasi deb ataladi. U o'rtachalangan oqim energiyasining qancha miqdori oqimning xuddi shu joyidagi turbulentlik pulsatsiyasining kinetik

energiyasiga o'zgarishini inobatga oladi, w'_x va w'_y -kanal o'qi bo'ylab va devorga normal bo'yicha tezlikni pulsatsion tashkil etuvchilari; w_x -o'rtachalangan tezlikni o'qiy tashkil etuvchisi.



3.1-rasm. Yassi kanalni pog'onali kengayishida uyurmali zona strukturalarining sxemasi (burchaklarda uyurmalarini aylanish yo'nalishi o'ng qo'l qoidasi bo'yicha):

a-orqa tomondan ko'rinishi; b-yuqoridan ko'rinishi; v-old tomondan ko'rinishi; $n_1, n_2, m_1, m_2, l_1, l_2$ -kanalning ikkita devori uchun uzilish zonalarini sohasining chegarasi; *I, II, III*-uzilishning uch o'lchamli, ikki o'lchamli va uch o'lchamli nobarqaror sohalari; *A*-qo'shilish nuqtasi.

Chuqurchaning balandligi h katta, ya'ni $h/H_0 > 0,5$ (H_0 -kanal o'qidan kanalning tor qismi devorigacha bo'lgan masofa) bo'lganda, uzilish zonasi o'lchamlari bir xil bo'lmaydi va ular orasida o'zaro ta'sirlar mavjud bo'lib, u nobarqaror sohada uyurmalarini teskari aylanishi natijasida yuzaga keladi.

Katta uzilish zonasidagi statik bosim yuqori va u uzilish zonasining har bir kesimida o'zgaruvchan bo'ladi. Barcha katta zonalar kichik zonalarga qaraganda ancha nobarqaror. Ular uchun m, n va l qiymatlar vaqt bo'yicha juda kichik chastota bilan o'zgaradi. Statik bosimni to'g'rilash massa oqimi bilan amalga oshiriladi, ushbu massa oqimi *I* sohadagi uyurma o'qi bo'yicha ancha jadal hisoblanadi. Bayon qilingan tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, uyurma zonasi juda qiyin tuzilishga ega.

Chuqurchaning gidravlik qarshiligini yengishga oqim energiyasining qaytmas sarfi uyurma zonasini quvvatlashga, oqimning turbulentligini oshirishga hamda yangi pulsatsiyalarni hosil qilish yo'li bilan turbulentlik pulsatsiyasining energiyasini ortishiga sarflanadi. Ushbu pulsatsiyalarning energiyasi navbat bilan juda ko'p kichik pulsatsiyalarga uzatiladi va oxirida

issiqlik energiyasiga o'zgaradi. Dissipatsiyaning bir qismi uyurmaviy zonaning o'zini chegarasida sodir bo'ladi. Ammo energiyaning asosiy qismi turbulentlik pulsatsiyasining kinetik energiyasi shaklida I sohadagi uyurma zonasining yuqori chegarasi bilan asosiy oqimga kiritiladi va oqim liniyasi bo'ylab asosiy oqimga uzatiladi. **3.2-rasmdagi** tajriba natijalarini qayta ishlash natijasida olingan ma'lumotlarda chuqurchadan uzoqda turbulentlik hosil bo'lishining qanday o'zgarishi ko'rsatilgan:

$$I = - \int_0^{w_0} \frac{w'_x w'_y}{w_{x_0}^2} \frac{\partial(w_x/w_{x_0})}{\partial(y/w_{z_0})} \frac{\partial y}{w_{z_0}}$$

3.2-rasmdan yaxshi ko'rinib turibdiki, turbulentlikni hosil bo'lishi aynan I sohada maksimal, u yerda suyuqlik yuqori zonadan oqimga oqib tushadi. III soha yaqinida ham kichikroq maksimum mavjud bo'lib, u yerdan suyuqlik uyurmaviy sohasiga oqib kiradi.

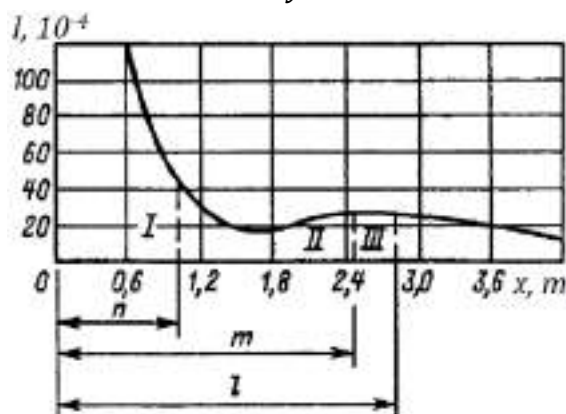
3.3-rasmda chuqurchadan turlicha uzoqlikda turbulentlik pulsatsiyasini kesim bo'yicha taqsimlanishi ko'rsatilgan. Rasmdan yaxshi ko'rinib turibdiki, uyurma zonasining yuqori chegarasida $\sqrt{w_x'^2}/w_0$ maksimal va oqim liniyasi bo'ylab uzatiladi (w_0 -kanal o'qidagi tezlik). Bu shuni anglatadiki, turbulentlikni hosil bo'lishi asosan uyurma zonasini asosiy oqim bilan kuchli o'zaro ta'sirlashish sohasida sodir bo'ladi, ya'ni I sohaning yuqori chegarasida (3.1-rasmga qarang). Aynan shu joyda turbulentli urinma kuchlanish- $\rho w'_x w'_y$ eng katta qiymatga yetadi. Bu yerda tezlik gradiyentining $\partial w_x / \partial y$ qiymati ham maksimal bo'ladi. Bunda $\sqrt{w_x'^2}/w_0$ uyurma yuqori chegarasidan o'tayotgan oqim liniyasida saqlanadi va kuchli pulsatsiyalar sohasi kengayadi, bunda I sohaning yuqori chegarasida yuzaga keladigan turbulentlik pulsatsiyasi o'rtachalangan oqim bilan oqim liniyasi bo'ylab uzatiladi, asta – sekin so'nadi va diffuziyalanadi (**3.3-rasmga** qarang).

Oqim bilan uzilish zonasini o'zaro ta'sirlashuvining sifat jihatidan o'xshash mexanizmi ravon kengayuvchi devorda hosil bo'ladigan uzilishni yuzaga kelishida kuzatish mumkin. Ammo u yerda uyurma zonasining o'lchamlari ancha kichik, turbulentlikni hosil bo'lish jadalligi esa aksincha, yuqori. Bunga sabab uyurmaning yuqori chegarasida tezlik gradiyenti va turbulentli urinma kuchlanishni kattaligidir, demak, asosiy kirish uchastkasida oqimning o'rtacha tezligi yuqori. Chunki tezlik gradiyenti, urinma kuchlanish va turbulentliklarni hosil bo'lishini maksimumi

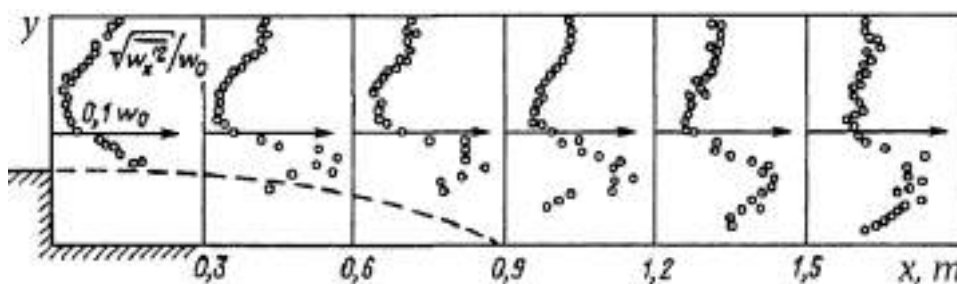
uyurmaning yuqori chegarasiga mos keladi. Bunda devorning ta'siri inobatga olinmaydi va Prandtl gipotezasiga muvofiq barcha uchta kattalikning maksimumi yoki tezlik gradiyenti maksimumidan yoki turbulentli urinma kuchlanishi maksimumidan aniqlanadi:

$$-\rho w'_x w'_y > \rho l^2 \frac{\partial w_x}{\partial y} \left| \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|$$

bu yerda l -uyurma zonasida kam o'zgaruvchi turbulentlik masshtabi, turbulentlikni hosil bo'lishi esa $-\rho w'_x w'_y (\partial w_x / \partial y)$ ifodadan aniqlanadi.



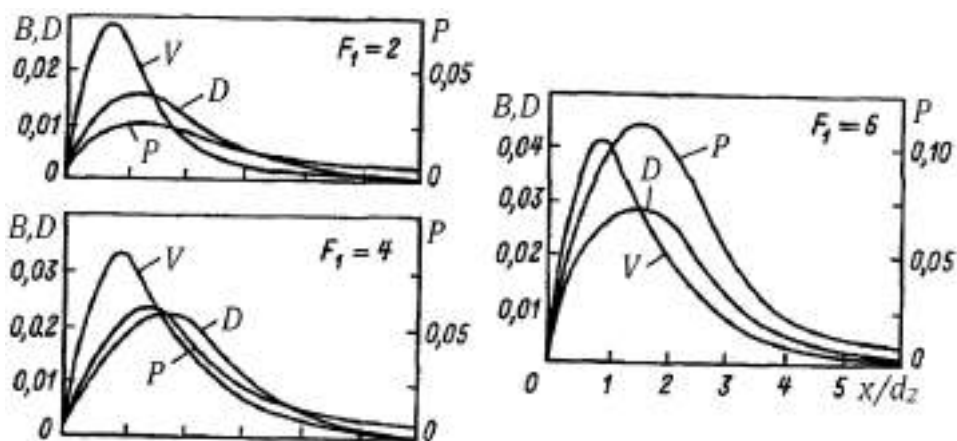
3.2-rasm. Turbulentlik hosil bo'lishini uzilish zonasining uzunligi bo'yicha o'zgarishi.



3.3-rasm. $h/H_0 > 0,5$ qiymatli bitta chuqurchadan keyin turbulentlik jadalligini $\sqrt{w_x'^2}/w_0$ taqsimlanishi (uzilish zonasining chegarasi uzlukli chiziq bilan belgilangan).

Ravon kengayishdan keyin kanalning turli kesimlarida o'rtachalangan tezlik maydoni va pulsatsion xarakteristika [42] ishda keltirilgan. Turbulentlik xarakteristikasi bo'yicha tajriba ma'lumotlarini qayta ishlashdagi qiziqarli natijalar 3.4-rasmda keltirilgan. Ma'lumotlarning tahlili quyidagi asosiy xulosalarni beradi.

1. Turbulentlikni eng ko'p hosil bo'lishi uyurma zonasining yuqori chegarasida kuzatiladi. Ushbu joylarda o'rtacha tezlik gradiyenti va tezlikni pulsatsion tashkil etuvchilari ham maksimumga yetadi. Turbulentlikni hosil bo'lishining ikkinchi maksimumi devorda kuzatiladi.

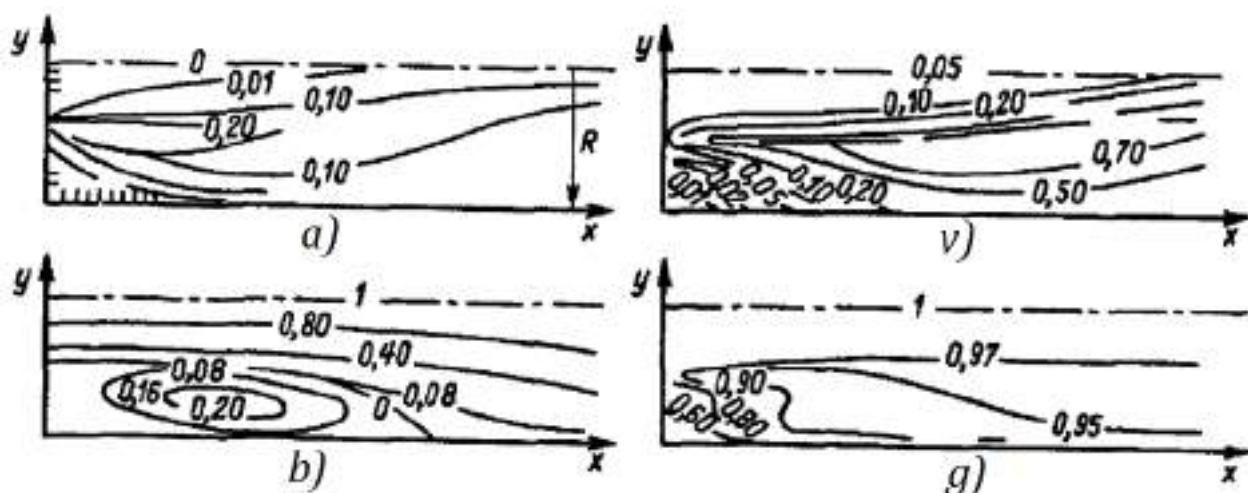


3.4-rasm. Ravon kengayishdan keyin turbulentlik hosil bo'lishini (V), turbulent energiyasi ko'chishini (D) va uni Frudning turli sonlarida $F_1 = w_{x1}/\sqrt{gd_1}$ konvektiv uzatilishini (P) kanal uzunligi bo'yicha taqsimlanishi (w_{x1} - havoning kanalning tor qismidagi tezligi; d_1 - kanal tor kesimining balandligi; d_2 - kanalning keng kesimi balandligi; x - chuqurchagacha masofa).

2. Uyurma zonasining boshlang'ich qismida turbulentlik hosil bo'lishi uning ko'chishidan ko'proq bo'ladi. Shuni ta'kidlash kerakki, bu faqatgina uyurmaning yuqori chegarasidagina sodir bo'ladi. Yuqori chegaradan devorga tomon harakatlanishda turbulentli pulsatsiyani hosil bo'lishi va energiyani ko'chishi orasidagi farq birdaniga pasayadi. Uyurma zonasining devorga tegib turgan asosiy uchastkasida ko'chish ortib boradi.

3. Uyurma zonasida pulsatsion harakat bilan bog'liq kinetik energiya oqim bo'yicha o'rtacha oqim bo'yicha pastga uzatiladi va oqim bo'yicha pastga ko'chadi, natijada uyurmadan anchagina masofada turbulentlikni jadalligi ortadi.

Diametri ikki marta keskin kengaygandan keyin quvurlarda turbulent oqimida tuzilish va issiqlik almashinuvini sonli hisoblar L.K. Runshal tomonidan bajarilgan bo'lib, uning natijalari **3.5-rasmda** ko'rsatilgan. Uyurmalilikni taqsimlanishi (**3.5, a-rasm**) katta urinma kuchlanish bilan aralashish zonasi mavjudligini ko'rsatadi. U uzilish nuqtasida boshlanadi va uyurmaning yuqori chegarasi bo'ylab joylashadi. Ushbu sohada turbulentlik pulsatsiyaning kinetik energiyasi maksimal bo'ladi (**3.5, v-rasm**). Demak uyurmaning yuqori chegarasi bo'ylab turbulentlikni hosil bo'lishi yuqori bo'lib, keyin u o'rtachalangan tezlik bilan devorga uzatiladi. **3.5, g-rasm** dan ko'rinib turibdiki, bu soha issiqlikni turbulentli uzatish koeffitsientining qiymatini yuqoriligi bilan xarakterlanadi.



3.5-rasm. Quvur $R/2$ dan R gacha keskin kengayganda oqim parametrlarining taqsimlanishi ($Re = 2R_w\rho/\mu = 10^4$):

a-uyurmalilik; b-oqim funksiyasi; v-turbulentlik pulsatsiyasining kinetik energiyasi; g- $Pr = 1$ va $Pr = 0,7$ bo'lgandagi haroratlar.

Issiqlik berishini hisoblash sifat jihatdan L.K. Runshal tajribalari bilan yaxshi mos keladi, ammo miqdoriy og'ish 30% ga yetadi. L.K. Runshal miqdoriy og'ishni tajriba va hisoblashlarda chegaraviy shartlar bir qancha farq qilganligini, eng asosiysi-bunday oqimlar tuzilishini o'rganishga bilimlarni yetishmasligidir deb tushuntiradi. Bunga yana bir faktni kiritish mumkin, ya'ni hisoblash uyurmali zonalardagi uch o'lchamli oqimni inobatga olmaydi, bu esa katta rol uynaydi. Kanallar va chegara qatlamida issiqlik almashinuvini jadallashtirish uchun uyurmali zonalardan foydalanish yuzalarda davriy joylashgan bo'rtiq yoki chuqurchalar bilan bog'liq. Shuning uchun turbulizatorlarning shakli, o'lchami va o'zaro joylashuvi oqim tuzilishiga qanday ta'sir etishini bilish kerak.

Gradiyentsiz chegaraviy qatlamda suvning oqimida, o'zaro joylashgan to'g'ri burchak shaklidagi turbulizatorlarni uzilish zonasi strukturasi ta'siri Lin, Kleyn va Djonstonlar tomonidan tadqiqot qilingan. To'g'ri burchakli bo'rtiqlardan keyingi va oldingi uyurmaviy zonaning tuzilishi bo'rtiqlarni o'zaro joylashuvining keng diapazonlarida $2 < S_L/h < 96$ o'rganilgan (S_L -bo'rtiqlarni joylashish qadami, $h=6,4$ mm-bo'rtiqlarning balandligi). Ushbu tadqiqotning natijalari 3.6-rasmda keltirilgan. $S_L/h = 2$ (3.6, a-rasm) bo'lganda bitta katta uyurma B va burchaklarda ikkita kichik A va C uyurmalar kuzatiladi.

3.7-rasmdan ko'rinib turibdiki, katta uyurma ikki o'lchamli emas va butun uzunlik bo'yicha barqaror. U yacheykali uch o'lchamli tuzilishga ega.

Demak, turbulizatorlar bunday zich joylashganda turbulentlikni hosil bo'lishi ikkita yo'l-tezlikning katta gradiyentlarini uch o'lchamli tashlamalari va uyurmaning yuqori chegarasida turbulentli kuchlanish bilan sodir bo'ladi.

Ko'ndalang chuqurchalarda oqim tuzilishini o'rganishga bag'ishlangan Maull va Est ishida to'g'ri burchakli chuqurchada ikki o'lchamli uyurmaviy oqim faqatgina chuqurcha kengligini L chuqurligiga h nisbati 1,12 dan kam va 2.2 dan katta bo'lgandagina sodir bo'lishi ko'rsatilgan. $1,2 \leq L/h \leq 2,2$ oraliqda chuqurchadagi uyurmaviy oqim uch o'lchamli bo'ladi.

To'g'ri burchakli bo'rtiqlarning qadami $S_L/h = 2$, $S_L/h = 1$ bo'lgan to'g'ri burchakli chuqurchaga mos keladi, ya'ni chuqurchada barqaror ikki o'lchamli uyurma chegarasiga yaqin qiymatga ega bo'ladi (3.6, a-rasmga qarang). Shuning uchun ikki o'lchamli uyurma davriy ravishda uch o'lchamli tashlamalar bilan buzilib turadi.

Qadam $S_L/h = 4$ gacha ortganda (3.6, b-rasmga qarang) asosiy uyurma B kengayadi, uyurma A uzayadi va burchakda yangi kichikroq A' uyurma hosil bo'ladi. Bunda uyurma B $S_L/h = 2$ ga qaraganda kam barqaror bo'lib qoladi. Shuningdek turbulizatorning oldingi yuqori burchagidan keyin turbulizatorning yuqori chegarasida oqimni qisman uzilishi kuzataladi. Qadamni $S_L/h = 8 \div 96$ gacha ortib borishida yuqori oqimni tuzilishi, ya'ni $S_L/h = 8$ bo'lganda oqimning holati 3.6, v-rasmda ko'rsatilgan. Turbulizator yuqori qirrasining orqa chetidan oqimni qaytishi sodir bo'lganligini ko'rish mumkin.

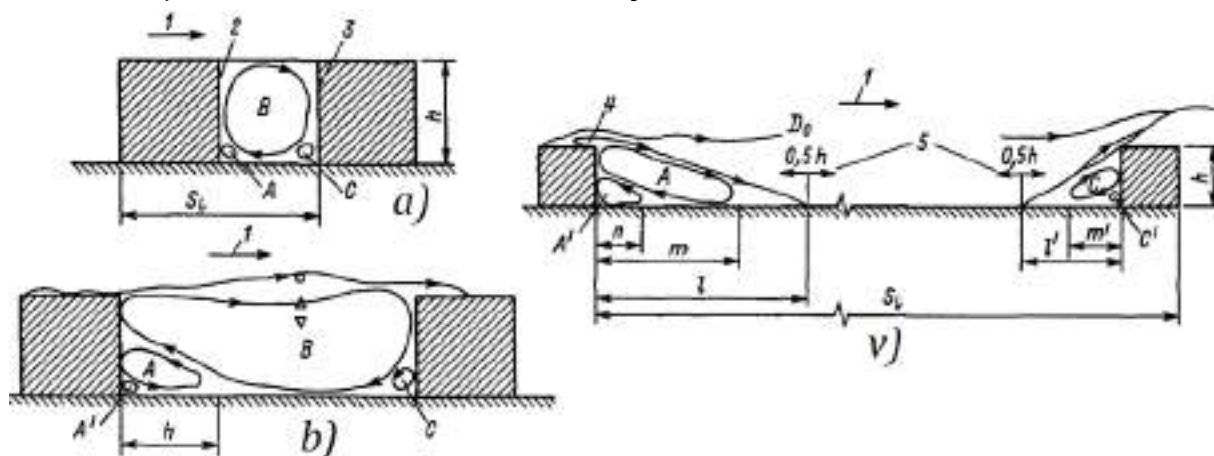
Yuqorida keltirilgan bitta chuqurchadan keyingi oqimdagi uzilish zonasidagi kabi uchta xarakterli soha kuzatiladi.

1. Uzilishning asosiy zonasi. Uning uzunligi l ulanish kesimigacha bo'lib, unda uzilish zonasiga qaytish oqimi ham mavjud. Ushbu zonaning uzunligi nobarqaror va $\pm 0,5h$ chegarasida o'zgarib turadi.

2. Uzilishning ikki o'lchamli zonasi. Uning uzunligi m kesim bilan aniqlanadi, ushbu kesimda devor oldi qatlamining lokal oqimini uzilish zonasidan oqim bo'ylab pastga oqishi kuzatiladi. Cho'zilgan ikki o'lchamli uyurma turbulizator orqa devorining yuqori qismigacha yetadi va turbulizatorning yuqori qirrasidagi qaytar oqimini ta'minlaydi.

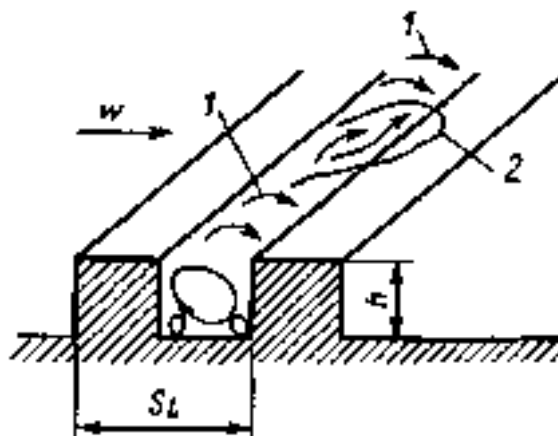
3. n uzunlikdagi kichik nobarqaror uyurma A' . Ushbu zonada uch o'lchamli uyurma kuzatilmaydi. Turbulizatoridan oldin l uzunlikdagi uzilish zonasi qaytadan hosil bo'ladi, u ham nobarqaror bo'lib, $\pm 0,5h$ oraliqda

o'zgarib turadi. Zonaning tashqi chegarasida jadal turbulent aralashuvi sodir bo'ladi. Uzilish zonasining ichida m uzunlikdagi ikki o'lchamli uyurma sohasi mavjud. Burchakda esa kichik uyurmali C' uchinchi soha kuzatiladi.



3.6-rasm. Gradiyentsiz chegaraviy qatlamda turbulizatorlar orasidagi uyurmaviy zona tuzilishining sxemasi:

a- $S_L/h=2$; b- $S_L/h=4$; $\bigcirc$ - $y=6,4$ mm; $W_x/W_{x\infty}=0,176$; ∇ - $y=5,12$ mm; $W_x/W_{x\infty}=0,103$; ∇ - $y=3,84$ mm; $W_x/W_{x\infty}=0,085$; v- $S_L/h=8$ (A', A, B, C, C' -uyurmalar; n, m, l, m', l' -uzilish zonalari chegaralari); 1-oqim yo'nalishi; 2-orqa devor; 3-old devor; 4-qaytgan oqim; 5-nobarqaror tebranish sohasi.



3.7-rasm. Bo'rliqlar orasidagi uyurmaning yacheykali uch o'lchamli sxemasi:

1-uyurmaning ikki o'lchamli yacheykasi; 2-uch o'lchamli tashlama.

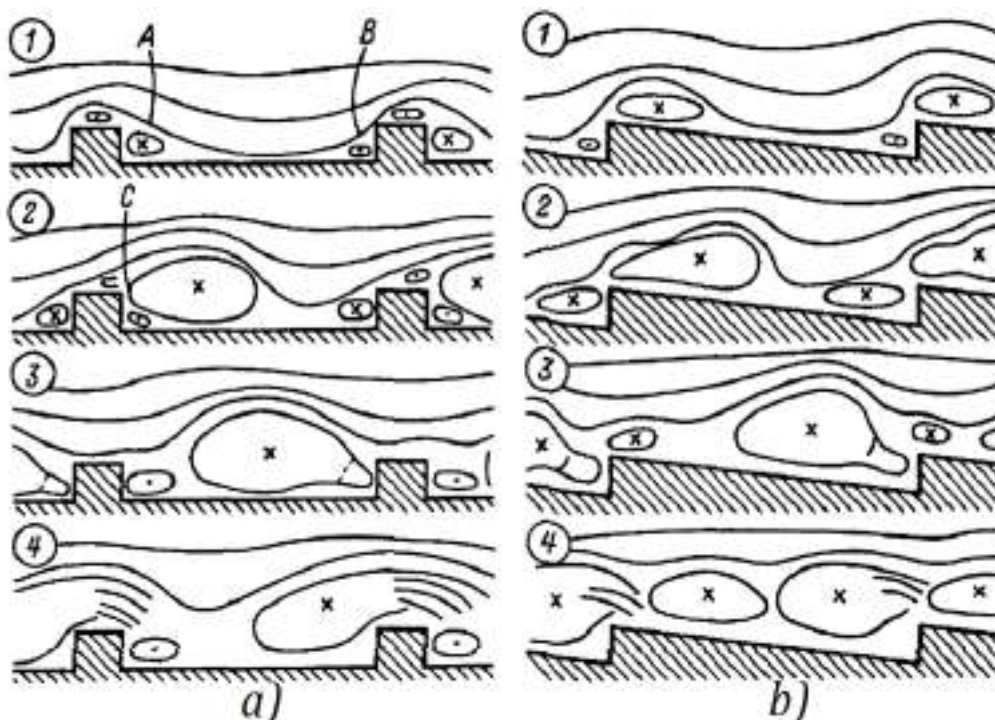
Uzilish zonalari orasida turbulentlikni hosil bo'lishi xuddi silliq devordagi kabi bir xil bo'ladi. Tezlikni katta gradiyentlari zonasidagi devor yaqinida oqim chidamliligini yo'qolishi natijasida uyurmali tuzilishni hosil bo'lishi kuzatiladi, keyin ular qovushqoqli va buferli qatlamga tashlanadi. Bu natijalar Klayn, Reynolds va Shtraublar tomonidan silliq quvurda o'rganilgan turbulentlikni hosil bo'lishi bilan mos keladi.

S_L/h qadamni o'zgarishi uyurma zonalarining sanab o'tilgan sohalari o'lchamlarini $S_L/h = 48$ gacha ortishiga olib keladi. Qadamni yanada ortishi amalda uyurma zona tuzilishini o'zgarishiga ta'sir etmaydi.

Uyurma zonasining barcha sohalarini nisbiy o'lchamlari Re qiymatlarini o'zgarishiga sezgir emas, bu Lin, Klayn va Djonstonlarning tadqiqotlarida o'z tasdig'ini topgan.

To'g'ri burchakli kanalda suvning oqimida $Re=1,7 \cdot 10^4$ bo'lganda Vilyams va Uatt [43] tomonidan vizual tadqiqotlar olib borilgan bo'lib, ushbu sharoitlarda barcha uyurmaviy tuzilish umumiy nobarqaror ekanligi isbotlangan.

Qadam $S_L/h = 7$ va bo'rtiqlarning ikkita shakli uchun natijalar 3.8-rasmda ko'rsatilgan. To'g'ri burchakli bo'rtiqlarda (3.8, a-rasm) A va B nuqtalarda ikkita uyurma hosil bo'ladi va tez rivojlanadi.



3.8-rasm. To'g'ri burchakli kanalda suvning oqimida uyurmaviy tuzilishlarning rivojlanish dinamikasi:

a-to'g'ri burchakli bo'rtiqlar; b-arrasimon bo'rtiqlar; x-uyurmani soat strelkasi bo'yicha aylanishi; $\odot$ -uyurmani soat strelkasiga teskari aylanishi; 1-4 vaqtning turli momentlari.

A uyurma balandligi taxminan $2h$ ga yetgunga qadar uzayadi. Bu vaqtda B uyurma taxminan h ga teng diametrغا ega bo'ladi. Keyin C nuqtada ancha kuchsiz uyurma hosil bo'ladi, A uyurma esa keyingi turbulizatorga almashinadi, u yerda B uyurma bilan birikadi. Birikkan uyurma

turbulizatoridan yumalab o'tadi va parchalanadi. Undan keyin A va B nuqtalarda yangi uyurmalar hosil bo'ladi va jarayon takrorlanadi. Arrasimon shakldagi turbulizatorlarda teskari aylanmali uyurma bo'lmaydi va uymarlarni o'rin almashinish chastotasi esa ikki marta yuqori bo'ladi. Shuni ta'kidlash joizki, hattoki bo'rtiqning shakli va o'lchamini birozgina o'ozgarishi uyurmaviy zona tuzilishiga va uni rivojlanishiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

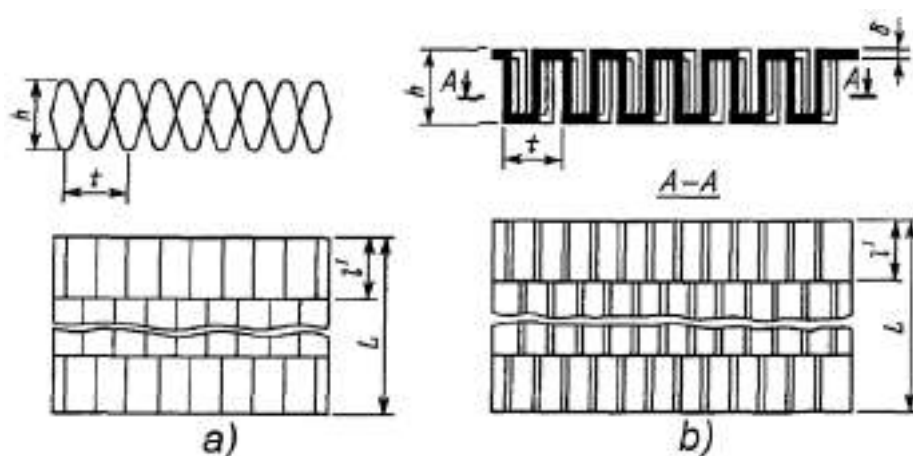
Kanallardagi turbulizatorlardan keyingi uyurmaviy oqimning nobarqarorligi, $S_L/h = 5 \div 20$ va $Re = 10^4 \div 10^5$ bo'lganda yarim dumaloq bo'rtliq to'rtburchak kanalda suvning oqimida olingan natijalar [42] bilan ham tasdiqlangan.

Ravon tizilgan bo'rtiqlarni yuvilishini vizual kuzatish shuni ko'rsatdiki, bo'rtiq konturlarining ravonligiga bog'liq holda bo'rtiqdan oldin hatto keyin ham ko'rinadigan ikki o'lchamli uyurma hosil bo'lmaydi. Ravon tizilgan bo'rtiqni bostirib keluvchi oqim burilganda uch o'lchamli vintsimon uyurmalar tizimi yuzaga keladi. Ularning o'qi devorda ekvidistantli joylashgan bo'lib, qo'shni uyurmalar turli tomonga aylanadi. Bu turdagi uyurmaning eng ko'p tadqiqotlari L.N. Pirson [44] tomonidan bajarilgan. Shunday qilib, ravon tizilgan bo'rtiqlarda turbulentlikni hosil bo'lishi yoki faqatgina uch o'lchamli uyurmalar tizimidan yoki uni bo'rtiqdan keyingi birorta kichik uyurma bilan o'zaro ta'siridan aniqlanadi.

G.I. Voronin va Ye.V. Dubrovsklarning [26, 45] tadqiqotlarini ko'rsatishicha uzilish zonasi turli shakldagi yoriqli kanallarda issiqlik almashinuvini jadallashtirishda muhim rol o'ynaydi, ularda aniqlovchi sifatida qovurg'aning uzunligi bo'yicha qisqa joylarda yangi chegaraviy qatlamni hosil bo'lishi hisoblanadi. Ushbu kanallar plastina-qovurg'ali IAQlarida qo'llaniladi. Yoriqli kanallarning old qirrasida (3.9-rasm) ko'ndalang uyurmalar hosil bo'ladi. Boshqa bir xil sharoitlarda ularning jadalligi va o'lchamlari qovurg'aning kengligiga δ bog'liq. Shuning uchun qovurg'aning nisbiy kengligini δ/d_e kamayishi bilan gidravlik qarshilik kamayadi, issiqlik berish esa ortadi, shuningdek uyurmalar kam bo'ladi va kam energiya sarfi talab etiladi, turbulentlik esa oqim bilan devor yaqiniga uzatiladi va issiqlik almashinuvi jadallashadi.

Qovurg'a qalinligini δ/d_e issiqlik berishga ta'siri $Re < 2000$ sohada, qarshilik koeffitsiyenti esa $Re > 2000$ sohada eng kuchli namoyon bo'ladi. Buni quyidagicha izohlash mumkin, ya'ni oqimning o'tish rejimida issiqlik

berish uyurmaning o'lchamiga, joylashuviga va jadalligiga juda sezgir bo'lib, ular devorda oqimni juda erta turbulizatsiyalanishini ta'minlaydi. Hidravlik qarshilik oqimni juda erta turbulizatsiyalanishidagi umumiy yo'qotishlardan aniqlanadi. Turbulent sohasida ($Re > 2000$) ingichka qovurg'ada hosil bo'ladigan juda kuchli uyurmalar ξ ni sezilarli oshiradi, Nu ni ortishiga kam ta'sir ko'rsatadi, natijada oqimning yuqori chegarasida turbulentlikni hosil bo'lishi devordan yiroqda qolib ketadi. Bundan tashqari, δ/d_e qalinlik ortishi bilan ingichka qovurg'adan keyingi qirrali uyurmalar yuqori qotilishlar hisobiga ξ koeffitsiyent ortadi, qirrali uyurmalar keyingi qisqa kanaldagi oqim yadrosini turbulizatsiyalaydi va issiqlik berishga kam ta'sir etadi.



3.9-rasm. Plastina-qovurg'ali IAQlarining konstruksiyalari:

a-kanalining ko'ndalang kesimi uchburchak bo'lgan yoriqli yuzalar; b-kanalining ko'ndalang kesimi to'g'ri burchak bo'lgan yoriqli yuzalar.

Yuqorida keltirilganlarga asosan quyidagi xulosalarni keltirish mumkin:

1. Uzilish zonasi va umumiy tashkil etilgan uyurmali tuzilish oqimda turbulentlikni qo'shimcha ishlab chiqarishning samarali vositasi hisoblanadi.

2. Bo'rtiqgacha va bo'rtiqdan keyingi uyurmaviy zonaning tuzilishi bo'rtiq va chuqurchaning shakli va o'lchamiga kuchli bog'liq.

3. Ko'chishdan sezilarli oshadigan turbulentlikni hosil bo'lishi asosan devordan uzoqda bo'lgan uyurmaviy zona chegarasida sodir bo'ladi, u yerda tezlik gradiyenti va turbulentli kuchlanish maksimal yoki bir vaqtda yuqori qiymatga ega bo'ladi.

4. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish uchun tashqi ko'rinishi birdaniga o'zgaradigan turbulizatorlardan (to'g'ri burchakli, uchburchakli

va hokazo) foydalanmaslik zarur. Turbulizatorgacha va undan keyin yuzaga keladigan kuchli uyurmalarda energiyani ko'chishi turbulentlikni hosil bo'lishi bilan bir xil qiymatga ega va hattoki undan yuqori bo'lib, u gidravlik yo'qotilishni kattaligi bilan bog'liq. Ikki o'lchamli uzilish zonasini hosil qilmaydigan yoki turbulizatoridan keyin kichik uzilish zonali uch o'lchamli uyurmaviy tuzilishni hosil qiluvchi ravon tizilgan turbulizatorlarni qo'llash maqsadga muvofiqdir. Bunday turbulizatorlardan keyin turbulentlik hosil bo'lishining maksimumi taxminan bo'rtiqning yuqori chegarasi sathida joylashadi. Ravon va turlicha tizilgan turbulizatorlarda turbulentlikni bir xilda hosil bo'lishi turlicha gidravlik yo'qotilishlarda sodir bo'ladi. Ravon tizilgan turbulizatorlarda ushbu yo'qotilishlar oqim bo'ylab yo'nalgan o'q bilan vintsimon uch o'lchamli uyurmaning tartiblangan tizimi hisobiga anchagina kam bo'ladi [46]. Bundan tashqari, bevosita devor yaqinida joylashgan uch o'lchamli uyurmaviy tizimning o'zi issiqlik berishni jadallashtiradi.

5. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha keyingi tadqiqotlarda uyurmaviy tuzilish, energiya almashinuvi va turbulentlik hosil bo'lishini turbulizatorlarning joylashishiga va o'lchamlariga, kanallardagi oqimning rejim parametrlariga bog'liqligiga hamda uyurmaviy tuzilishning o'zini issiqlik almashinuvidagi rolga e'tibor qaratish kerak.

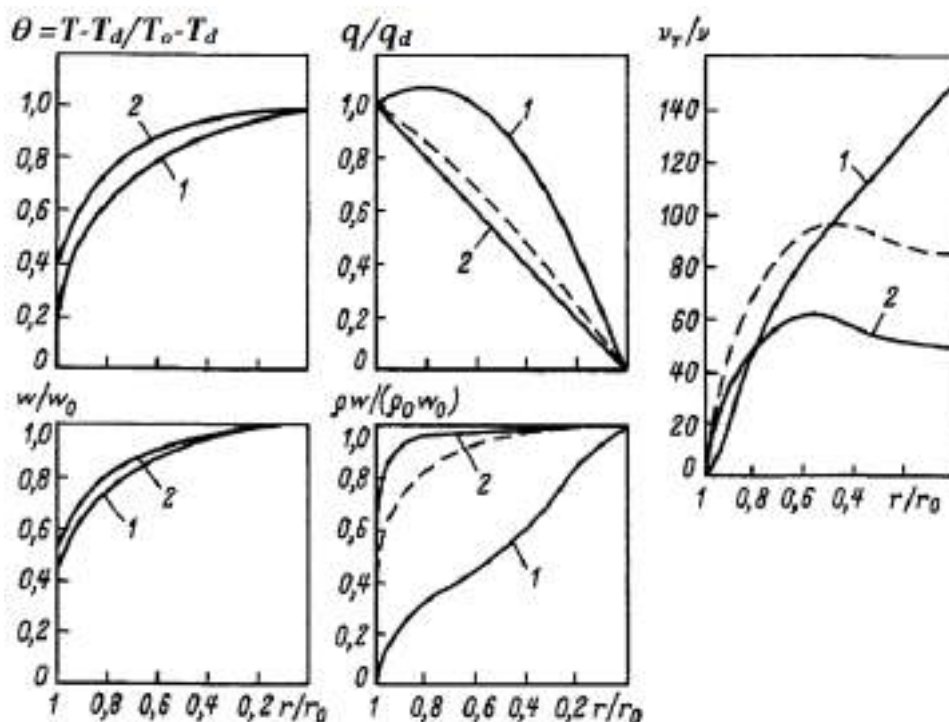
6. Yoriqli kanallarda qovurg'aning qalinligi va oldingi qirrasining shakli katta rol o'ynaydi hamda u uyurmaning shakli, jadalligi va o'lchamlarini aniqlovchi va qovurg'ani yuvuvchi oqimning devor oldi qatlamini qo'shimcha turbulizatsilovchi hisoblanadi.

§3.3. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishning turli usullari tahlili.

Issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini tanlashdagi umumiy yondoshuvni havoning dumaloq quvurdagi turbulent oqimi misolida ko'rib chiqamiz. Ta'kidlanganidek, birinchi navbatda turbulentlik jadalligini sun'iy ortishida oqimning qaysi nuqtalarida energiya kam yo'qotilib issiqlik berish maksimal ortishini bilish zarur. 3.10-rasmda uzunlik bo'yicha $q_g = \text{const}$ va $\varepsilon_q = \varepsilon_\tau$ bo'lganda quvurda havoning oqimi uchun olingan oqimning o'lchamsiz parametrlarini taqsimlanishi ko'rsatilgan.

Ma'lumki

$$q = (\lambda + \rho C_p \varepsilon_q)(\partial T / \partial r) \quad (3.7)$$



3.10-rasm. Havoni qizdirishda (1- $T_d=1000\text{K}$, $T_o=154\text{K}$) va havoni sovitishda (2- $T_d=300\text{K}$, $T_o=902\text{K}$) fizik xususiyati o'zgarmas (---) va fizik xususiyatlari inobatga olinganda (-) o'lchamsiz haroratni, tezlikni, issiqlik oqimi zichligini, massaviy tezlikni va impulsni turbulentli uzatish koeffitsiyentini taqsimlanishi; $Re_d=4,3 \cdot 10^4$; $Pr=0,7 \div 0,71$ (B.S. Petuxov [47] ma'lumotlari bo'yicha)

Issiqlik berish koeffitsiyenti

$$\alpha = q_d(T_d - T_o) \quad (3.8)$$

bu yerda

$$T_o = \int_0^{r_0} \rho C_p T w r dr / (\int_0^{r_0} \rho C_p w r dr)$$

biroq xulosa qilish qiyin, chunki bevosita devor yaqinida ε_q ni ortishi α ni ga eng ko'p ta'sir ko'rsatadi. Biroq Re ning belgilangan qiymatida qalinligi $(0,05 \div 0,1)r_0$ bo'lgan devor oldi qatlamida ε_q ning o'rtacha qiymati maksimaldan 10% ga oshmaydi, issiqlik oqimi esa maksimalga yaqin bo'ladi. Shuning uchun qalinligi $(0,05 \div 0,1)r_0$ yoki $y^+ = y/\nu(\tau_d/\rho) = 60 \div 160$ bo'lgan devor oldi qatlamida 60-70% foydali haroratlar maydoni hosil bo'ladi. Tabiiyki, Re soni qancha katta bo'lsa, juda ingichka qatlam ham shuncha tez ta'sir qiladi.

Demak, aynan devor oldi zonalarida ε_q ni oshirish bilan issiqlik berishni jadallashtirishda eng yuqori samaraga erishish mumkin. Ushbu vaqtda oqim yadrosini qo'shimcha turbulizatsiyalash issiqlik berishni kam

oshiradi va gidravlik qarshilikni ko'p ortishiga olib keladi. Shunday qilib faqatgina bitta, ya'ni devor oldi qatlamida ε_q ni qaysi yo'l bilan oshirish vazifasi qoladi. Yuqorida keltirilgan materiallarga asosan issiqlik berishni jadallashtirishning samarali usuli quvurda davriy joylashgan ravon tizilgan bo'rtiqlar-turbulizatorlar hisoblanib, ushbu qatlamning qalinligi $y^+ = 50 \div 150$ balandlik tartibida bo'ladi. Ular juda yaqin joylashtirilmasligi kerak.

Turbulizatorlar yaqin joylashganda ($S_L/h = 5 \div 10$) turbulizatorlardan keyin hosil bo'ladigan turbulentli pulsatsiya keyingi turbulizatorgacha bo'lgan yo'lda so'nishga ulgurmaydi. Ushbu holatda ular yadroda diffuziylanadi, u yerda turbulentli pulsatsiyaning jadalligi ortadi, bu g'adir-budur quvurlarda ham sodir bo'ladi. Bu nooqilona yo'l hisoblanadi, chunki yadroda qo'shimcha turbulizatsiylanish hisobiga gidravlik yo'qotilish juda katta bo'ladi va issiqlik berish kam ortadi. Turbulizatorlar orasidagi masofa yetarlicha katta bo'lganda ($S_L/h \geq 5 \div 10$) uyurmaviy zonada yoki uyurmaning o'zi davriy buzilganda qo'shicha hosil bo'ladigan turbulentli pulsatsiya asosiy oqim bilan devor yaqiniga uzatiladi. Ular yetarlicha uzoq yo'ldan o'tadi va o'zining kinetik energiyasini ancha kichik pulsatsiyalarga uzatib diffuziylanadi. Ushbu yo'lda ε_q qiymat amalda faqatgina devor yaqinida ortadi. Demak, issiqlik almashinuvini jadallashtirish kichik gidravlik yo'qotilish evaziga sodir bo'ladi.

Turbulizatorlar orasidagi masofa ancha katta ($S_L/h \geq 100 \div 500$) bo'lganda turbulizatorlardan keyin hosil bo'ladigan qo'shimcha turbulentlik, turbulizatorlardan keyin bir qancha masofaga borib so'nishga ulguradi va kanalning keyingi turbulizatorgacha qolgan uchastkasidagi oqim tuzilishi bo'yicha silliq kanaldan kam farq qiladi. Tajribalar tahlili shuni ko'rsatadiki, turbulizatorlarning belgilangan shakli va balandligida h (qatlamning $y^+ = 50 \div 150$ chegarasida) Nu/Nu_s va ξ/ξ_s nisbatlar $S_L/h \approx 10$ bo'lganda maksimal qiymatga yetadi. Ma'lumki, ξ/ξ_s nisbat maksimumi turbulizator shakliga, ulardagi uch o'lchamli va nobarqaror uyurmaviy tuzilishga bog'liqdir.

Yuqorida ko'rsatilgan muvofiq, $S_L/h \approx 10$ qiymatli to'g'ri burchakli bo'rtiqlar uchun ikkita uyurmani mavjudligi mos keladi (bo'rtiqdan keyin va oldin). Uyurmaning yuqori chegarasida va ular orasida, ya'ni bevosita devor yaqinida turbulentlik yuqori jadallashgan zona mavjud. Uyurmaviy yuvib o'tishda bo'rtiqdan oldin vintsimon uyurmalar tizimi hosil bo'ladi. Ravon

tizilgan turbulizatorlarni yuvilishida (masalan, to'g'ri burchakli bo'rtiqdan oldin va keyingi uyurmaning yuqori chegarasi bo'yicha tizilgan) ikki o'lchamli uyurma bo'lmaydi. Demak, ushbu uyurmalarini ta'minlash va ulardagi energiya ko'chishini kompensatsiyalashga ham energiya yo'qotilmaydi. S_L/h ni kamayishi uyurmalarini bittaga quyilishiga olib keladi, natijada kichik lokal issiqlik berishli burchakli zonalarning katta solishtirma ta'siri hisobiga issiqlik berish yomonlashadi. S_L/h ni ortishi uyurmalar orasidagi yuza ulushini solishtirma ortishiga olib keladi va uyurmalar orasida qo'shimcha turbulizatsiya anchagina so'nishga ulguradi.

Turbulizatorlar qadami va balandligining aniq qiymatlari har bir masala shartidan kelib chiqib, hisoblashlar asosida tanlanishi kerak. Nodumaloq kesimi kanallarda, masalan, quvurlar va sterjenlar to'plamini bo'ylama yuvishda jadallashtirish usulini tanlashda tor burchakli zonalar mavjudligini inobatga olish zarur. Quvurlar katta qadami katta bo'lgan $S/D_t \geq 1,2 \div 1,3$ quvurlar to'plamida bunday burchaklar bo'lmasa, u holda tizilgan bo'rtiqlar yordamida jadallashtirish usuli quvurlarda ham samarali bo'ladi. Burchakli zonalar mavjud bo'lganda (quvurlar to'plami $S/D_t \geq 1,2$ bo'lganda) ushbu tor zonalarda aynan ε_q ni oshirish kerak, chunki u yerda ε_q oqim yadrosiga qaraganda ancha kichik.

S/D_t birga yaqin bo'lganda bo'rtiq turbulizatorlarni qo'llash mumkin emas yoki ular burchakli zonalardagi kesimni tiqilinch qilib qo'yadi. Ushbu holatlarda ko'ndalang ariqchali turbulizatorlarni qo'llash maqsadga muvofiqdir. Ularda hosil bo'ladigan uyurmaviy zonalar turbulentlik hosil bo'lishini ta'minlaydi va o'rtachalangan oqim bilan devor yaqiniga uzatiladi, natijada devor oldi sohasida ε_q ortadi. Shuning uchun ariqchali turbulizatorlar ham bir – biriga yaqin joylashtirilmaydi.

Uchburchak, to'rtburchak, yassi, halqali va boshqa shakldagi tekis kanallarda ham oqimning devor oldi qatlamini turbulizatsiyalovchi ko'ndalang bo'rtiq yoki ariqchalarni davriy joylashuvini qo'llash maqsadga muvofiqdir. Ular oqimning o'tish sohasida Re ning kichik qiymatlarida ham turbulent oqimga juda erta o'tishini ta'minlaydi, o'tkir burchakli kanallarda esa tor zonalarga turbulent oqimi kirib kelishini kuchaytiradi. Bir qator holatlarda siljuvchan qovurg'ali yoriqli kanallarni, turbulizatorlar sifatida davriy joylashgan chuqurchalar, bo'rtiqlar va ariqlar, konfuzor va diffuzorlarni qo'llash ham samarali hisoblanadi.

Asosan devor oldi sohasida turbulentlik jadalligini oshirish maqsadida devorda joylashgan turbulizatorlardan tashqari jadallashtirishning boshqa usullari ham qo'llaniladi. Ularning orasida quvurlarda oqimni uyurmashning turli usullari asosiy o'rinni egallaydi. Ularga quyidagilarni kiritish mumkin: quvurning butun uzunligi yoki bir qismida o'rnatiluvchi turli shakldagi vintsimon o'rnatmalar (buralgan lenta, shnek); issiqlik tashuvchini quvurga tangensial uzatish; kirishda yoki davriy joylashgan kurakchali uyurmalagich. Uyurmalagichli quvurlarda issiqlik almashinuvi va gidravlik yo'qotilish tadqiqotining yetarlicha to'liq tahlili V.K. Shukinning [48] adabiyotida keltirilgan.

Ko'pgina hollarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish usuli sifatida majburiy oqimga bosim yoki sarf tebranishini ta'sir ettirish ishlatiladi. Kanalda akustik rezonans mavjud bo'lganda issiqlik berish sezilarli ortadi [49]. Bosim va tovushni tebranishi erkin konveksiya sharoitida issiqlik almashinuvini jadallashtirishning samarali vositasi hisoblanadi. Tovushli maydonda issiqlik almashinuvini to'liq tahlili [39] ishda keltirilgan. Kanallarda issiqlik berishni jadallashtirish usuli sifatida egri chiziqli kanallardan anchadan buyon qo'llanilmoqda (zmeyevikli va spiralsimon IAQlari, ko'p yo'lli IAQlari va hokazo).

IAQlari va moslamalarida quvur yoki issiqlik ajratuvchi sterjenlarni ishonli ishlatish, shuningdek bir xilda qizdirilmaslikni to'g'rilash uchun quvurlararo bo'shliqda oqimni yaxshi aralashtirish muhim muammolardan biri hisoblanadi. Ushbu muammolarni va issiqlik almashinuvini jadallashtirishning bir vaqtda yechimiga buralgan quvurlarni zich taxlangan to'plamini bo'ylama va ko'ndalang yuvish orqali erishish mumkin [50], bunda quvurlar to'plamining ko'ndalang kesimi ellipssimon shaklga yoki burchaklari dumaloqlangan to'g'ri to'rtburchak shaklga ega bo'ladi.

Quvurlar to'plamini ko'ndalang yuvishda jadallashtirishning samarali usuli quvur yuzasiga bo'ylama ravon tizilgan davriy joylashgan bo'rtiqlarni hosil qilish (oqim uchun ko'ndalang) yoki oddiy g'adir-budirlikni qo'llash hisoblanadi.

G'adir – budir quvurlar uchun o'tkazilgan tadqiqotlar [26] shuni ko'rsatadiki, bunda laminar chegaraviy qatlamdan turbulentga erta o'tishga, uzilish nuqtalarini oqim bo'yicha aralashishiga va chegaraviy qatlamni qo'shimcha turbulizatsiyalanishiga olib keladi.

Issiqlik berishni jadallashtirishning turli usullari bo'yicha o'tkazilgan tahlillar bir fazali oqimlarga tegishli edi. Biroq bir fazali oqimlar uchun eng samarador usullar, ikki fazali oqimlarda plyonkasimon qaynashda va kondensatsiyalanishda hamda kanallarda pufakchali qaynashda ham eng samarador hisoblanadi.

Issiqlik almashinuvini jadallashtirishning turli usullarini ko'rib chiqish natijasida asosiy xulosa sifatida shuni aytish mumkinki, har bir aniq hol uchun issiqlik berishni jadallashtirishning samarali usulini tanlashda §3.1 da keltirilgan shartlarga qat'iy amal qilinishi shart.

§3.4. Tekis quvurlarda va quvurlar to'plamini bo'ylama yuvishda issiqlik almashinuvini jadallashtirishning ratsional usulini tanlash.

Jadallashtirish usulini tanlashni haqiqiy misolda ko'rib chiqamiz. 1950-yillarning o'rtalarida FA Dvigatellar instituti oldiga yopiq siklli transport gazturbina qurilmasini ishlab chiqish vazifasi qo'yiladi. Ishlab chiqilgan loyiha shuni ko'rsatdiki, qurilma faqatgina belgilangan tashqi o'lchamda tayyorlanishi, ya'ni quvurchali sovitgich va regeneratorning tashqi o'lchamlarini kamida 1,5 martagacha kichraytirish kerak edi.

Konturda gaz (geliy) bosimi va bosimlar farqi kattaligi hisobiga quvurchali IAQlari tanlandi. Bunda quvur diametrini kamaytirish va ularning komponovkasini zichligini kamaytirishning barcha texnologik imkoniyatlari hamda qurilmaning foydali ish koeffitsiyentiga ta'sir etuvchi barcha parametrlarini optimallashtirish imkoniyatlari inobatga olindi (jumladan IAQlarida ruxsat etilgan yo'qotilishlar va IAQlarining samaradorligi).

Shunday qilib, quvurchali gaz-gaz va gaz-suv IAQlari uchun gazni haydashga (gidravlik yo'qotilishlarga) quvvat, issiqlik tashuvchilarning harorati va issiqlik quvvatining belgilangan qiymatlarida issiqlik berishni jadallashtirish usulini ishlab chiqish masalasi qo'yildi, ushbu usul IAQlarining tashqi o'lchamlarini 1,5 martagacha kamaytirish imkonini berishi kerak edi.

Issiqlik almashinuvini bunday jadallashtirishning nazariy imkoniyati va usulining mohiyati 1958 yilda E.K. Kalinin tomonidan asoslandi [51], bu esa institutda gaz turbina qurilmalarini kengaytirish bo'yicha ishlarni muvaffaqiyatli rivojlanishiga olib keldi. Quvurlar va quvurlar to'plamini bo'ylama yuvishda E.K. Kalinin, G.A. Dreyser, S.A. Yarxo [2.24] tomonidan

olingan oxirgi tajribalarning natijalari, taklif etilgan usul berilgan sharoitlarda gaz turbina qurilmasi IAQsining tashqi o'lchamlarini 1,5 martagacha kamaytirish imkonini beradi.

Usulni ishlab chiqish quvurlar va quvurlararo bo'shlig'ida turbulent oqimning gidrodinamik tuzilishini, haroratlar maydoni va issiqlik oqimlarini, oqimning turbulentli tuzilishiga ta'sir etuvchi uzilish zonasi va uyurmaviy tuzilishini chuqur o'rganishga asoslangan.

Ushbu nazariy tahlillar asosida quyidagi xulosalarga kelingan.

1. Gaz va suvning turbulent oqimida faqatgina qalinligi $y^+ = 50 \div 200$ oraliqda bo'lgan devor oldi qatlamini sun'iy turbulizatsiyalash maqsadga muvofiqdir.

2. Ushbu devor oldi qatlamini sun'iy turbulizatsiyalash uchun quvurlarda davriy joylashgan ko'ndalang bo'rtiqli turbulizatorlardan foydalanish maqsadga muvofiqdir. Ushbu bo'rtiqlardan keyin hosil bo'ladigan uyurmaviy zonalar qo'shimcha turbulizatsiyalash manbai bo'lib xizmat qiladi. Ushbu zonalarning yuqori chegarasida hosil bo'lgan turbulentlik o'rtachalangan oqim bilan devor bo'ylab uzatiladi, natijada bo'rtiqdan keyin sezilarli uzunlikdagi yupqa devor oldi qatlamida ε_q ortadi. Diffuziya natijasida oldingi bo'rtiqning turbulizatsiyalovchi ta'siri so'nishni boshlaganda yangi bo'rtiqni o'rnatish zarur.

To'g'ri burchakli kanallarda suvning oqimida yarim dumaloq bo'rtiqlarni yuvilishida o'tkazilgan vizual tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, uyurmalar tizimi nobarqaror, turbulizatsiyalangan zona esa bo'rtiq balandligiga mos keladi. Shuningdek qalinligi taxminan $y^+ = 200$ bo'lgan qatlamda $0,5H$ uzunlikda turbulentlik jadalligi va ε_q qiymat, taxminan qatlam qalinligiga teng bo'lgan bo'rtiqlarda 3 marta katta bo'rtiqlarga qaraganda ancha yuqori. Keyinchalik shakli turlicha, ammo balandlik bir xil bo'lganda ravon tizilgan bo'rtiqlar eng samarador ekanligi aniqlandi. Undan foydalanilganda devor oldi qatlamini turbulizatsiyalash eng kichik gidravlik yo'qotilishlarda amalga oshiriladi. Ta'kidlanganidek, bo'rtiqning ravon shaklida yoki faqatgina uch o'lchamli vintsimon uyurmalar tizimi yoki bo'rtiqdan keyin qo'shimcha kichik nobarqaror ikki o'lchamli uyurmalar tizimi hosil bo'ladi. Ushbu tizimlarning hosil bo'lishiga gidravlik yo'qotilish va energiyani ko'chishi to'g'ri burchakli, uchburchakli va yarim dumaloq bo'rtiqlardagi uyurmaviy tuzilishga qaraganda ancha kichik bo'ladi.

3. Quvurlarning tor to'plamini bo'ylama yuvishda ($S/D_t \leq 1,2 \div 1,3$) quvurlararo bo'shliqda turbulizatorlar sifatida ko'ndalang ariqchalardan foydalanish maqsadga muvofiqdir. Buning uchun amaliyotda quvurlarni ariqchalashning seriyali texnologiyasi ishlab chiqilgan. Ushbu texnologiya bo'yicha quvurlarga vintli rolik bilan ishlov berilganda quvurning tashqi yuzasida t/D_t belgilangan qadamli davriy joylashgan ariqchalar va quvurning ichki yuzasida belgilangan balandlikdagi ravon tizilgan bo'rtiqlar hosil bo'ladi. Quvurlarni bunday ariqchalashning narxi silliq quvurning narxini bir necha foizini tashkil qiladi.

Ariqchalangan quvurli IAQlarini tayyorlash texnologiyasi silliq quvurli IAQlarini yig'ish texnologiyasidan deyarli farq qilmaydi. Ammo jadallashgan IAQlarida quvurning umumiy uzunligi tekis quvurli IAQlarinikiga qaraganda ancha kam bo'ladi. Shuning uchun ko'rilayotgan usul yordamida issiqlik berishni jadallashtirish nafaqat IAQlarining tashqi o'lchamlari va massasini $1,5 \div 2$ marta kamayishini ta'minlaydi, balki uning narxini ham sezilarli arzonlashtiradi. Ariqchalangan quvurlarni vibratsiyaga, termik kuchlanishga va boshqa sinovlarga sinashning maxsus tadqiqotlari shuni ko'rsatdiki, ariqchali quvurlar barcha ko'rsatkichlar bo'yicha silliq quvurlardan qolishmaydi. Jadallashtirish usulini tanlash bo'yicha o'tkazilgan tahlillar aniq turdagi IAQlari uchun bo'rtiq balandligi yoki ariqcha chuqurligi va ularni joylashish qadamlari turlicha bo'lganda, gidravlik yo'qotilish va issiqlik berishni aniqlash hamda ularning optimal qiymatini tanlash imkoniyatini bermaydi.

Katta masofada joylashgan (bo'rtiqning balandligi 10 dan 200 gacha o'zgarganda) turbulizatorlar uchun ushbu bog'liqliklarni nazariy yo'l bilan aniqlashning hozircha imkoniyati yo'q. Shuning uchun jadallashtirish usulining asosiy holati tanlangandan keyin yetarlicha keng ko'lamli tajriba tadqiqotlarini o'tkazish zarur: 1) turbulizatorlarning nisbiy balandligi va qadami, Re va Pr sonlari, issiqlik tashuvchilarning fizik xususiyatlarini haroratga bog'liq holda o'zgarishi va kanalning diametri turlicha bo'lganda empirik bog'liqliklarni olish uchun turbulizatorli kanallarda o'tish va turbulent sohalarida issiqlik berish va gidravlik qarshilikni aniqlash; 2) turbulizatorli kanallarda laminar oqimdan turbulent oqimga o'tish.

Ushbu tadqiqotlarning natijalarini taqqoslash shuni ko'rsatdiki, oqim tuzilishini dastlabki o'rganish asosida ishlab chiqilgan jadallashtirish usuli qolgan usullarga nisbatan anchagina afzallikka ega.

§3.5. Oqim uzlukli turbulizatsiyalanuvchi quvurlarning devorlarida issiqlik berishni o'zgarish qonuniyatlari.

Oldingi paragrafda keltirilgan issiqlik almashinuvini jadallashtirish usuli ancha samarali hisoblanadi (IAQsining tashqi o'lchami va metal sig'imi 1,5 marta kamayadi), shuning uchun faqat devor oldi qatlamida oqimni turbulizatsiyalash quyidagi munosabatni amalga oshirish bilan ta'minlanadi:

$$Nu/Nu_s \geq \xi/\xi_s \quad (3.9)$$

Ushbu usulni ishlab chiqish va asoslashning boshlang'ich davrida (1958 yil) (3.9) tengsizlikni olish imkonsiz hisoblanardi. U vaqtda Reynolds analogiyasiga tayanilardi va Prandtlning turbulent soni birga teng yoki butun oqim bo'yicha o'zgarmas deb qaralardi, natijada:

$$Nu/Nu_s < \xi/\xi_s \quad (3.10)$$

O'sha vaqtda ma'lum bo'lgan barcha issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullari ustida o'tkazilgan tajriba natijalari bu munosabatni tasdiqladi. Turbulent oqimda issiqlik uzatish va harakat miqdori mexanizmlari bir xil ekanligi to'g'risidagi Reynolds taklifiga asoslangan issiqlik almashinuvining gidrodinamik nazariyasi bazasida shunday hisoblanardi, ya'ni issiqlik almashinuvini faqatgina ishqalanish qarshiligini oshirish yo'li bilan oshirish mumkin, uyurma hosil bo'lishi bilan bog'liq bosim qarshiligini ortishi esa issiqlik almashinuviga ta'sir ko'rsatmaydi. Shunday qilib, (3.10) tengsizlikka asoslangan nazariy taxminlar tadqiqotchilarni issiqlik almashinuvini jadallashtirishning yanada samarador usulini izlashda muammoga noto'g'ri yondoshtirdi va chalg'itdi. Keyinchalik ushbu sohada juda chuqur tahlil va tajribaviy tadqiqotlar olib borilib quyidagi xulosalarga kelindi.

A. Issiqlik almashinuvining gidrodinamik nazariyasi uzilishli turbulent oqimlari uchun o'zini oqlamaydi, shuningdek ularni xulosalashdagi cheklashlar ham ushbu oqimlar uchun buziladi.

Ushbu cheklashlar: 1) jarayon barqaror 2) suyuqlik siqilmaydigan; 3) fizik xususiyatlar o'zgarmas; 4) chegaraviy qatlam turbulent, kanallardagi oqim esa gidrodinamik barqaror; 5) issiqlik berish ko'effitsiyenti plastina (quvur) uzunligi bo'yicha o'zgarmas; 6) Prandtlning turbulent soni $Pr_t = \nu_t/a_t = 1$. Ta'kidlash joizki, davriy uzilishli oqimda 4 va 5 cheklashlar bajarilmaydi. Tajriba natijalari ham shuni ko'rsatdiki, Pr ning turbulent qiymat quvur radiusi bo'yicha o'zgaradi va Re qiymatiga bog'liq bo'ladi, ya'ni

6) cheklash to'g'ri emas. Shuningdek, v_t va a_t qiymatlar ham vektorli xarakterga ega.

B. Keng tarqalgan tasdiqning yana bir xatosini ko'rsatish mumkin, ya'ni bosim qarshiligi uyurma zonasini hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lib, issiqlik almashinuviga ta'sir etmaydi. Vaholanki bu aksincha, ya'ni aynan uyurmaviy zonalar oqimni qo'shimcha turbulizatsiyalash va issiqlik almashinuvini jadallashtirish manbai hisoblanadi.

V. Quvurdagi yakka diaqramadan keyin qarshilik va lokal issiqlik berish bo'yicha olingan tajriba natijalarini qayta ishlash shuni ko'rsatdiki, diafragma qadami $t/D = 14$ va $d/D \geq 0,9$ bo'lganda (3.9) tengsizlikni olish mumkin.

G. Oqim tuzilishini va oqimni qo'shimcha turbulizatsiyalash manbai bo'lgan uyurmaviy zonaning rolini o'rganishdan shunday xulosa qilish mumkin, ya'ni davriy joylashgan uyurmaviy zonalarini hosil qilish yordamida oqimning faqatgina devor oldi qatlamida qo'shimcha turbulizatsiyalash orqali (3.9) tengsizlik amalga oshadigan issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini ishlab chiqish mumkin.

Shu xulosalar asosida quvurlarda, quvurlar to'plamini bo'ylama yuvishda, plastina-qovurg'ali kanallarda va qovurg'a-quvurli IAQlarida issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullari taklif etildi va amalga oshirildi. Ushbu usullar ustida juda ko'p sonli tajriba tadqiqotlari o'tkazildi. Ushbu tadqiqotlar nazariy tahlillar xulosasini va (3.9) tengsizlikni olish imkoniyati mavjudligini to'liq tasdiqladi. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishda nazariy asoslangan va tajribaviy olingan dalillarda (3.9) tengsizlik "Majburiy konveksiyada oqim uzlukli turbulizatsiyalanuvchi kanallar devorida issiqlik berishni o'zgarish qonuniyati" ilmiy yangiligining predmeti hisoblanadi va quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi: ilgari noma'lum bo'lgan majburiy konveksiyada oqim uzlukli turbulizatsiyalanuvchi kanallarning devorlarida issiqlik berishni o'zgarishining ilgari noma'lum bo'lgan qonuniyati o'rnatildi, ya'ni turbulizatorlarni o'lchamlari va joylashuvi nisbatlarining belgilangan ko'lamida issiqlik berishni ortishi gidravlik qarshilikni ortishiga qaraganda yuqori [53].

3.6. Turbulent oqimga o'tish sohasida issiqlik almashinuvini jadallashtirish.

Reynolds sonining kritik qiymatgacha bo'lgan sohasida issiqlik almashinuvini jadallashtirish katta qiziqish uyg'otmaydi. Shu bilan birga

kritik qiymatdan anchagina oshadigan Reynolds soni sohasida kanalga kirishdan ancha uzoqda laminar chegaraviy qatlam mavjud bo'lishi mumkin. Shuning uchun laminar chegaraviy qatlamni sun'iy turbulizator bilan o'zaro ta'sirlashuv xarakteri to'g'risidagi va qovushqoq hamda qovushqoq-gravitatsion oqim rejimlarida issiqlik almashinuv jarayonlari to'g'risidagi ma'lumotlar mustaqil amaliy ahamiyat kasb etadi.

Qovushqoqli rejim sohasida ariqchali quvurlarda issiqlik berish silliq quvurga qaraganda kamroq, bunga sabab diafragmalar orasidagi harakatsiz zonada termik qarshilikni mavjudligi hisoblanadi (3.1-jadval va 3.11-rasm). Rivojlangan qovushqoq-gravitatsion rejim sohasida sun'iy turbulizatorlar issiqlik berish darajasiga ta'sir ko'rsatmaydi (3.12-rasm), masalan gazlar uchun quyidagi tenglama bo'yicha hisoblash tavsiya etiladi:

$$Nu = 0,045 Re^{0,8} \quad (3.11)$$

O'tish sohasida sun'iy turbulizatorlar oqimga ikki marta kuchliroq ta'sir ko'rsatadi. Bir tomondan, ular g'alayonlanish manbai sifatida turbulentli g'alayonlarni yuzaga kelish o'chog'i hisoblanadi. Ikkinchi tomondan, turbulizatorlar takrorlanib turuvchi oqimning turbulent uchastkalari bilan o'zaro ta'sirlashadi [54, 55] va turbulentli tiqinlarni (g'alayonlanish o'tish kesimining o'lchamigacha rivojlanadi) tez rivojlanishini ta'minlaydi. Tabiiyki, ushbu hodisa turbulizatorlarning belgilangan balandligiga erishilganda ham ancha sezilarli hisoblanadi.

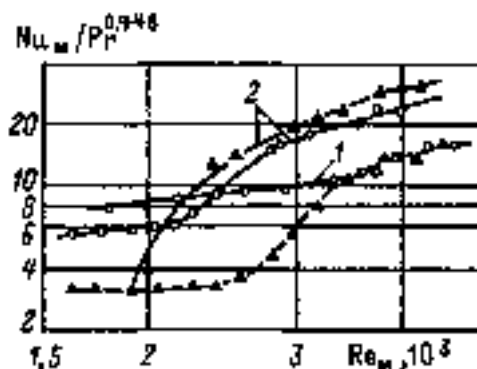
3.1-jadval

Diafragmalar orasidagi harakatsiz zona qalinligini issiqlik berish koeffitsiyentiga ta'siri

d/D	0,875	0,90	0,92	0,94	0,97	0,98
α/α_s	0,63	0,675	0,725	0,78	0,87	0,91

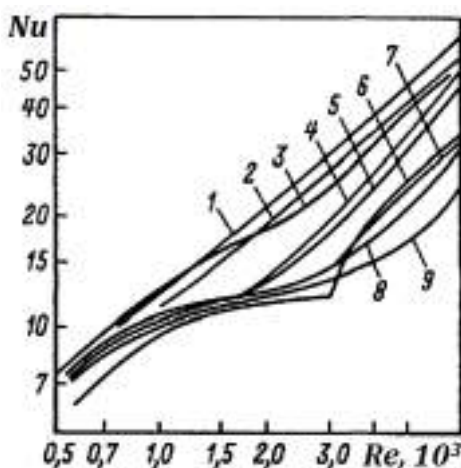
O'tish sohasida oqimni takrorlanib turishi, ya'ni laminar va turbulent tuzilishli uchastkalarining o'rin almashinuvi kanalning qayd qilingan kesimida issiqlik sig'imi sharoitini o'zgarishiga va issiqlik berish koeffitsiyenti tebranishiga olib keladi. Issiqlikni rostlangan holatda uzatishda (berilgan issiqlik oqimida) ushbu tebranishlar devor haroratini tebranishida namoyon bo'ladi. Devor haroratini tebranish amplitudasi quyidagilarga bog'liq: Re ning qayd etilgan qiymatida oqimning laminar va turbulent sohasiga mos keluvchi issiqlik berish koeffitsiyentining chegaraviy qiymatlariga; suyuqlik va devor issiqlik sig'implarining qiymati va

nisbatiga; tebranish chastotasiga ($Sh = fD/w$); issiqlikni uzatish usuliga va issiqlik yuklamasi qiymatiga.



3.11-rasm. Qovushqoq va o'tish oqim rejimlari sohasida mahalliy issiqlik berish koeffitsiyentini Re_m soniga bog'liqligi:

1-silliqliq quvur; 2- $d/D=0,91$ va $t/D=1,0$ bo'lgan diafragmali quvur;
 $\circ$ - $x/D=10$, $\blacktriangle$ - $x/D=110$.

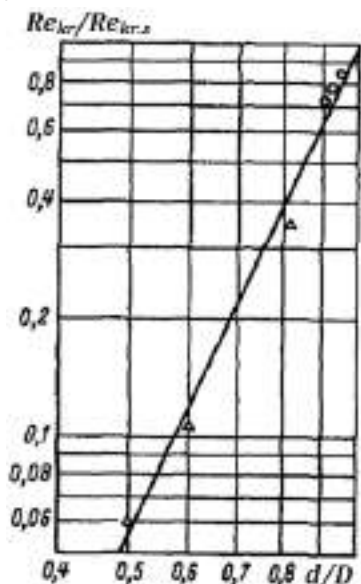


3.12-rasm. Qovushqoq-gravitatsion va o'tish rejimlarida quvurning uzunligi bo'yicha o'rtacha issiqlik berish koeffitsiyentini Re soniga bog'liqligi (Kox va Nunner ma'lumotlari bo'yicha):

1-asosi 4 mm bo'lgan segment ($d/D=0,84$; $t/D=0,15$); 2-asosi 4 mm bo'lgan segment ($d/D=0,84$; $t/D=0,13$); 3-asosi 4 mm bo'lgan segment ($d/D=0,84$; $t/D=0,41$); 4-to'g'ri burchakli kesim ($d/D=0,92$; $t/D=0,82$); 5-yarim dumaloq kesim ($d/D=0,92$; $t/D=3,27$); 6-asosi 4 mm bo'lgan segment ($d/D=0,84$; $t/D=0,82$); 7-yarim dumaloq kesim ($d/D=0,92$; $t/D=0,82$); 8-asosi 18 mm bo'lgan segment ($d/D=0,92$; $t/D=3,27$); 9-silliqliq quvur.

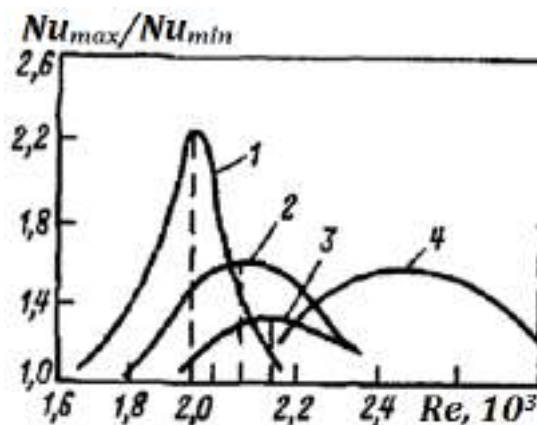
O'tish sohasida turbulizatorlarni oqim bilan o'zaro ta'sirlashuvini tashqi namoyon bo'lishi quyidagicha: reynoldsning kritik sonini kamayishi (3.13-rasm); oqimni takrorlanib turishni ancha oldin sodir bo'lishi va

takrorlanib turishda Reynolds soni ko'lamining juda kichikligi (3.14-rasm); quvurning laminar oqim uchastkasida issiqlik berish ko'effitsiyentini vaqt bo'yicha o'rtachalangan qiymatini pasayishi va kuchsiz rivojlangan turbulentli tuzilish uchastkasida jadallashish samarasi (3.11-rasmga qarang).



3.13-rasm. Quvurlardagi turbulizatorning balandligini Reynoldsning kritik soniga ta'siri:

O-E.K. Kalinin va boshqalar;
 Δ -Kox; $\square$ -Nunner.



3.14-rasm. O'tish sohasida quvurlarda issiqlik berishning maksimal va minimal

ko'effitsiyentlari nisbatini Nu_{min}/Nu_{max} Reynolds soniga bog'liqligi:

1- $d/D=0,91$; $t/D=1$; $x/d=103$;

2- $d/D=0,91$; $t/D=1$; $x/d=58$;

3- $d/D=0,91$; $t/D=1$; $x/D=22$;

4-silliqlik quvur.

Tajriba tadqiqotlarida Re_{kr} ni baholash uchta mustaqil usullarda o'tkazilgan: 1) qizdirilayotgan uchastkaning oxirida mahalliy issiqlik berishni vaqt bo'yicha o'rtachalangan qonunini o'zgarishi bo'yicha; 2) qizdirilayotgan uchastkaning oxiridagi kesim uchun pulsatsion xarakteristikaning $\frac{\Delta T_{maks}}{\Delta T_{min}} = \frac{Nu_{maks}}{Nu_{min}} = f(Re)$ maksimumiga mos keluvchi Re soni bo'yicha; 3) izotermik rejimlarda qarshilik qonuniyatini o'zgarishi bo'yicha. Uchta usul ham bir-biriga yaqin ma'lumotlar bergan. $d/D=0,92$ bo'lgan quvurlar uchun Re_{kr} ni kamayishi kuzatilgan.

O'tish sohasida issiqlik berishni jadallashtirish samarasi xuddi shunday ikkita hodisa yordamida aniqlanadi. Birinchisi-sun'iy turbulizatorlarni Reynoldsning kritik sonini jadallashtirishga ta'siri. Ikkinchisi-kuchsiz rivojlangan turbulent tuzilishli oqimni sun'iy turbulizatsiyalash. Ikkala hodisa ham turbulizatorlarning balandligiga

sezilarli bog'liq: Re_{kr} ni kamayishining sezilarli samarasini $d/D < 0,92$ bo'lganda olish mumkin.

Kuchsiz rivojlangan turbulentli oqimda sun'iy turbulizatsiyalash samarasini quyidagicha tushuntirish mumkin. Re ning kichik sonlaridagi turbulent oqimida tezliklar profili ancha kam bo'lib, rivojlangan turbulent oqimi sohasida esa juda ko'p, xuddiy shunday kuchsiz rivojlangan sohada harorat profili ham ancha kam. Shuning uchun kuchsiz rivojlangan turbulentli oqimda asosiy termik qarshilik juda tor devor oldi qatlamida mahalliyashtiriladi va juda ingichka devor oldi qatlamlarida tarqaladi. Demak, sun'iy turbulizatsiyalashda yaxshi samaraga erishish uchun nisbatan katta balandlikli diafragmalardan foydalanish zarur, bunda diafragmalarning balandligi devor oldi qatlamining balandligi bilan bir xil o'lchamda bo'lishi kerak. Shu bilan bog'liq holda aytish mumkinki, o'tish sohasida issiqlik berishni jadallashtirishning eng yaxshi samarasi diafragmaning balandligi $d/D < 0,92$ bo'lganda olinadi, ya'ni aynan shu balandliklarda juda ertachi o'tish sodir bo'ladi va oqimning ingichka devor oldi qatlamlari turbulizatsiyalanadi.

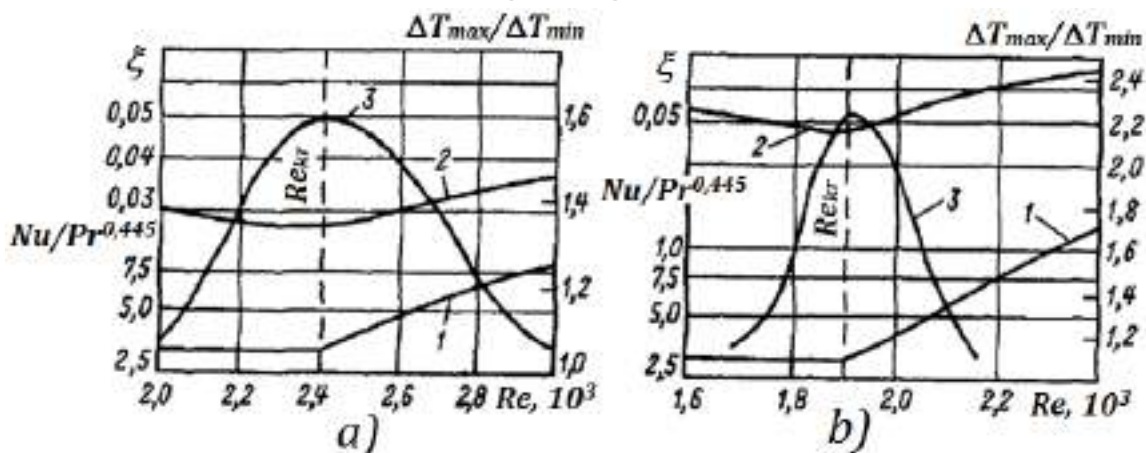
Quvur uzunligi bo'yicha o'rtacha issiqlik berish. O'tish va kuchsiz rivojlangan turbulent sohasida issiqlik berishni jadallashtirish juda kam o'rganilgan. O'tish sohasida quvurlarda issiqlik berishni jadallashtirish bo'yicha birinchi natijalar Koup [56] tomonidan olingan bo'lib, u piramida shaklidagi sun'iy turbulizatorli quvurlarda suvni qizdirishda issiqlik almashinuvini va gidravlik qarshilikni tadqiqot qilgan. Piramidaning o'lchamlari $d/D = 0,978; 0,933; 0,882$; $Re = (2...60) \cdot 10^3$. Issiqlik berishni jadallashtirishning eng yaxshi samarasi $Re = (2...60) \cdot 10^3$ oraliqda olingan, shuningdek $d/D = 0,978$ piramidali quvur ushbu sohada samara bermagan. Shuningdek $d/D = 0,888$ bo'lgan quvurlar uchun Nu/Nu_s qiymat 1,4; 2,0; 1,75, Re esa mos ravishda 2000, 6000, 10000 ga teng. Re qiymatini yanada ortishi bilan jadallashtirish samarasi yomonlashadi va $Re = 6 \cdot 10^4$ bo'lganda $Nu/Nu_s = 1,2$.

Mualliflar [57] tomonidan olingan keyingi ma'lumotlarning xulosasiga ko'ra, o'tish sohasida issiqlik berishni jadallashtirish samarasi turbulent oqimnikiga qaraganda ancha yaxshi ekanligini tasdiqlaydi, masalan turbulizatorning balandligi $d/D = 0,92$ bo'lganda eng yaxshi samara olish mumkin. Shu bilan birga, turli sabablarga ko'ra (ishlar sonini cheklanganligi, quvur va halqali kanallardagi oqimga erkin konveksiyaning kuchli ta'siri)

o'tish sohasida quvurlarda issiqlik berishni jadallashtirish bo'yicha tajriba natijalarini miqdoriy umumlashtirish amalga oshirilmagan.

[57, 58] tadqiqot ishlarida keltirilgan natijalaridan foydalanib o'tish sohasida issiqlik berishni jadallashtirishning asosiy miqdoriy va sifat qonuniyatlarini ko'rib chiqamiz, ushbu tadqiqotlar silliq quvur va halqali diafragma davriy joylashgan quvurda suv va suv-glitserin aralashmasi qizdirilganda o'tkazilgan. Tajribalar qizdiriladigan uchastkasining uzunligi 114 kalibrli va diametri 10 mm bo'lgan zanglamaydigan gorizontal quvurda issiqlik oqimi uzunlik bo'yicha o'zgarmas bo'lganda o'tkazilgan; gidrodinamik barqaror uchastka 16 kalibrli.

3.15-rasmda silliq va ariqchali quvur uchun uzunlik bo'yicha o'rtacha issiqlik berish koeffitsiyentini Re ga bog'liqligi ko'rsatilgan. Tajriba nuqtalarini chetlashishi $\pm 10\%$ dan oshmaydi. Re_{kr} atrofida Pr va harorat omilining ta'siri atayin tadqiqot qilinmagan, biroq quvurning uzunligi bo'yicha suyuqlikning o'rtacha harorati aniqlovchi sifatida qabul qilinganda hamda $Pr^{0,445}$ va $(\mu_d/\mu_o)^{m=0}$ qiymatlar kiritilganda nuqtalarni chetlashishi eng kichik bo'lishi ta'kidlangan. Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, silliq quvurlar uchun $Re_{kr}=2400$, $0,983 \geq d/D \geq 0,92$ bo'lgan ariqchali quvur uchun $Re_{kr}=2200=const$, d/D parametr 0,91 va 0,875 ga teng bo'lganda Re_{kr} mos ravishda 1900 va 1580 ga teng.

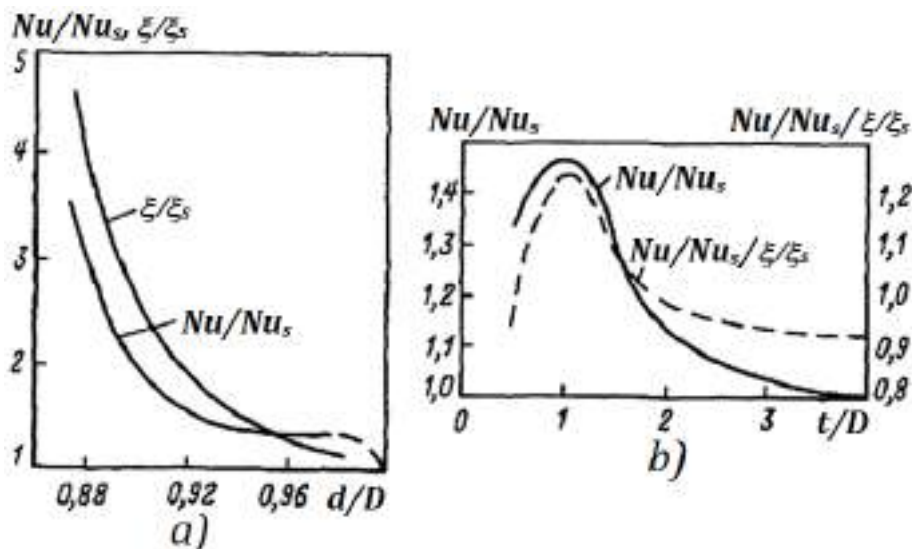


3.15-rasm. Re_{kr} atrofida issiqlik almashinuvi va gidravlik qarshilik:

a-silliq quvurda; b-diafragmali quvurda; 1-issiqlik berish; 2-gidravlik qarshilik; 3-amplitudali xarakteristika.

3.16-rasmda jadallashtirish samarasini diafragma balandligiga va uning qadamiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Diafragma balandligini ortishi bilan jadallashtirish samarasini birdaniga ortishi aniq ko'rinib turibdi. Bu holat o'tish sohasida oqimning juda ingichka devor oldi qatlamlarini

turbulizatsiyalash maqsadga muvofiqligi to'g'risida guvohlik beradi. Diafragma qadamining ta'siri to'g'risida shunday xulosa qilish mumkinki, $d/D=0,91$ bo'lganda t/D qadam 0,5 dan 1 gacha ortganda Re_{kr} sezilarli kamayadi va jadallashtirish samarasi ortadi. Shunga ham e'tibor berish kerakki, tomchili suyuqliklarning rivojlangan turbulent oqimida esa aksincha, ya'ni kichik balandlikli va kichik qadamli turbulizatorlarni qo'llash maqsadga muvofiqdir.



3.16-rasm. O'tish sohasida issiqlik berish jadalligiga ta'sirlar:
a-diafragma balandligi ($Re=2510$); b-diafragma qadami ($Re=3160$).

Shunday qilib, issiqlik berishni jadallashtirish nuqtai nazaridan o'tish sohasi istiqbolli hisoblanadi. Aynan shu sohada issiqlik berishni ortish samarasi 3,5 martaga yetadi, bu tomchili suyuqliklar uchun turbulent sohadagi samaradan sezilarli ortadi.

Ushbu samara quvurchali spiralsimon issiqlik almashinuv qurilmasida qo'llanilganda [59], ya'ni quvur ichidagi oqim sohasi o'tish sohasida bo'lganda xuddi shu gidravlik qarshilikda issiqlik berishning o'rtacha koeffitsiyenti 2 martagacha ortadi, bunga mos ravishda quvurlar va quvurlararo bo'shliqda gazni haydashga energiya sarfi qo'shimcha oshmasdan issiqlik uzatish koeffitsiyenti 30...35% ga ortadi. Natijada IAQsining hajmi va massasi 35...40% ga qisqaradi.

Shu bilan birga $Nu/Nu_s = f(Re, d/D, t/D)$ egri chiziq xarakteri juda qiyin, issiqlik almashinuvini amaliy hisoblari uchun 3.2-jadvalda keltirilgan ma'lumotlardan foydalanish maqsadga muvofiqdir. Bunda Nu_s quyidagi tenglama bo'yicha hisoblanadi:

$$Nu_s = 0,11(Re^{2/3} - 125)Pr^{0,445} \quad (3.12)$$

bunda aniqlovchi parametr sifatida quvurning uzunligi bo'yicha suyuqlikning o'rtacha harorati qabul qilinadi.

3.2-jadval

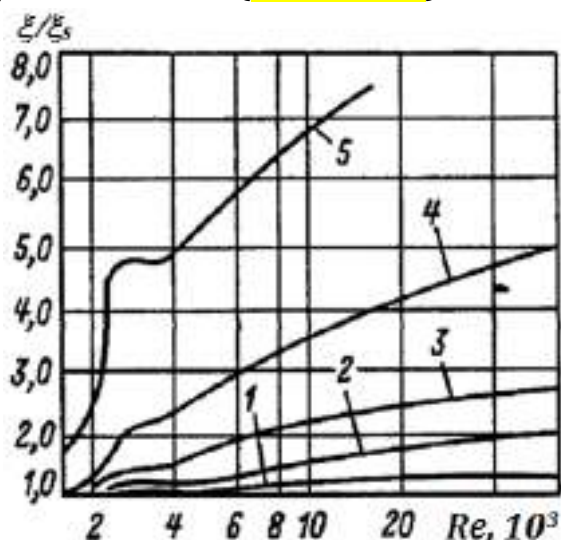
**Quvurlarda tomchili suyuqliklarni oqimida issiqlik almashinuvini
jadallashtirish ($Pr=2...50$)**

Quvur nomeri		<i>Re</i>													
		1580	2000	2510	3160	3980	5000	6300	7950	10000	12600	15800	20000	25100	31600
1	a	0,96	1,07	1,34	1,19	1,11	1,10	1,10	1,10	1,11	1,19	1,25	1,26	1,29	1,31
	b	1,07	1,12	1,08	1,10	1,12	1,14	1,15	1,17	1,18	1,19	1,19	1,19	1,20	1,216
2	a	0,94	1,00	1,34	1,19	1,10	1,13	1,10	1,20	1,28	1,35	1,43	1,52	1,61	1,63
	b	1,00	1,00	1,23	1,22	1,27	1,32	1,37	1,41	1,48	1,53	1,59	1,65	1,73	1,77
3	a	1,00	1,07	1,40	1,34	1,34	1,43	1,55	1,65	1,87	1,98	2,10	2,17	2,17	2,17
	b	1,05	1,07	1,44	1,41	1,53	1,72	1,83	1,97	2,10	2,21	2,32	2,38	2,42	2,51
4	a	1,03	1,00	1,50	1,88	2,00	2,08	2,12	2,17	2,20	2,26	2,27	2,27	2,27	2,27
	b	1,12	1,15	1,83	2,14	2,42	2,75	3,00	3,26	3,48	3,65	3,82	4,00	4,18	4,40
5	a	1,00	2,88	3,52	2,93	2,60	2,43	2,33	2,27	2,27	2,28	2,29	2,30	2,30	2,30
	b	1,62	2,85	4,55	4,50	4,95	5,43	5,78	6,11	6,52	6,94	7,34	7,80	8,26	8,78
6	a	0,94	1,41	2,06	2,05	1,99	1,93	1,90	1,85	1,85	1,83	1,80	1,75	1,70	1,65
	b	1,26	1,48	2,01	1,95	2,09	2,28	2,42	2,55	2,70	2,82	2,96	3,07	3,16	3,24
7	a	0,96	0,84	1,47	1,47	1,43	1,46	1,50	1,50	1,60	1,62	1,63	1,63	1,63	1,58
	b	1,00	1,05	1,24	1,17	1,24	1,32	1,40	1,48	1,58	1,70	1,74	1,78	1,79	1,81
8	a	0,73	0,81	1,03	1,14	1,13	1,14	1,15	1,19	1,22	1,26	1,29	1,32	1,33	1,34
	b	1,05	1,07	1,25	1,16	1,17	1,23	1,27	1,32	1,38	1,45	1,50	1,51	1,52	1,54
9	a	-	0,91	1,12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,08	1,15	1,17	1,20	1,18	1,16
	b	1,05	1,05	1,12	1,07	1,08	1,13	1,18	1,21	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31	1,32
10	a	1,00	1,00	0,93	1,00	1,01	1,02	1,02	1,06	1,07	1,14	1,19	1,23	1,27	1,26
	b	1,00	1,00	1,16	1,07	1,12	1,16	1,18	1,19	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,33
11	ξ_s	0,040	0,032	0,034	0,039	0,038	0,036	0,034	0,033	0,030	0,029	0,027	0,026	0,024	0,023

Gidravlik qarshilik ko'effitsiyenti. O'tish sohasida silliq va ariqchali quvurlarda o'rtacha gidravlik qarshilik ko'effitsiyenti bo'yicha tajriba ma'lumotlarini qayta ishlashda mumkin bo'lgan gidrodinamik nobarqarorlikka tuzatma kiritilmagan. Boshqacha aytganda, agar quvurning kirish qismida laminar chegaraviy qatlam mavjud bo'lsa, u holda 16 kalibrli gidrodinamik barqaror uchastka tezliklar profilini barqarorlash uchun yetarli bo'lmaydi. Qovushqoq oqimda gidravlik qarshilik bo'yicha olingan tajriba natijalariga ishlov berish shuni ko'rsatdiki, oqimning gidravlik nobarqarorligi S.S. Filimonov va B.A. Xrustalevlar [60] tavsiyasi bo'yicha to'liq inobatga olinishi kerak. O'tish sohasida bunday tuzatmani qo'llashda B.S. Petuxov [61] tavsiyasi bo'yicha qovushqoq rejimli uchastka uzunligini dastlabki baholashni ham kiritish kerak. Barcha quvurlar uchun hisobiy diametr sifatida diafragmaning balandligiga bog'liq bo'lmagan silliq

quvurning diametri qabul qilingan. Oqimning noizotermikligi $(\mu_d/\mu_o)^n$ harorat omilini kiritish bilan inobatga olingan, bunda n turbulent sohasida olingan tajriba ma'lumotlari bo'yicha qabul qilinadi. Sun'iy turbulizatorli quvurlar uchun $n = f(d/D, t/D)$, demak har bir quvur uchun n ning mos keluvchi ko'rsatkichlari qabul qilinadi.

Gidravlik qarshilik koeffitsiyentini Re soniga bog'liqligini ko'rib chiqib quyidagicha xulosa qilish mumkin (3.17-rasm).



3.17-rasm. Qadam $t/D=0,5$ bo'lganda ariqchali quvurlarda nisbiy qarshilik koeffitsiyentini Re soniga bog'liqligi:

Egri chiziq raqami	1	2	3	4	5
d/D	0,983	0,965	0,943	0,920	0,875

1. Qarshilik qonuniyatini o'zgarishi quvur oxirida o'tishni sodir bo'lishi bilan bir vaqtda sodir bo'ladi.

2. $Re > Re_{kr}$ bo'lganda qarshilik koeffitsiyentini ortish jadalligi, issiqlik berish koeffitsiyenti kabi ariqchali quvurlarda silliq quvurga nisbatan yuqori bo'lib, d/D ni kamayishi bilan ortib boradi.

3. $Re > Re_{kr}$ sohasida diagrammaning barcha balandliklarida $\xi/\xi_s = f(Re)$ bog'liqlik uchun gorizontall "maydon" xarakterli bo'lib, undan keyin ξ/ξ_s nisbat monoton ortadi. Bog'liqlikni bunday xakteri $Re > Re_{kr}$ bo'lganda ξ_s ni birdaniga ortishi bilan tushuntiriladi. O'tish sohasida qarshilik koeffitsiyentining maksimal ortishi $d/D=0,875$ diafragmali quvurga mos keladi va $\xi/\xi_s = 4,5$ ni tashkil etadi.

O'tish sohasida gidravlik qarshilik koeffitsiyentini 3.2-jadvaldagi ma'lumotlardan foydalanib hisoblash mumkin. Shuni yodda tutish kerakki, 3.2-jadvaldan olingan ξ/ξ_s qiymat izotermik qarshilik koeffitsiyentlarining

haqiqiy qiymati hisoblanadi. Shuning uchun sun'iy turbulizatorli quvurlarda tomchili suyuqliklarni qizdirishda harorat omili ta'sirini inobatga olish uchun ariqcha balandligi va qadamini harorat omilidagi daraja ko'rsatkichiga ta'siri bo'yicha ma'lumotlarni ham inobatga olish kerak.

3.2-jadvaldan ko'rinib turibdiki, o'tish sohasida issiqlik berish va gidravlik qarshilik koeffitsiyentlarini ortishi orasidagi eng yaxshi samarali nisbatga erishiladi, ya'ni $Nu/Nu_s = 2,88$, $\xi/\xi_s = 2,85$.

§3.7. Turbulent oqimda issiqlik almashinuvini jadallashtirishning nazariy usullari.

Kanallarda turbulent oqimda issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha nazariy tadqiqotlar juda kam sonli bo'lib, ular asosan g'adir-budir kanallarda yoki bir-biriga yaqin joylashgan turbulizatorlarga taaluqli va yarim empirik xarakterga ega. Ushbu holatning asosiy sababi kanallarda uzilishli turbulent oqimlarini hosil bo'lish mexanizmini kam o'rganilganligi hisoblanadi.

Nunner, Kox, Paumard, V.K. Migay [62, 63], N.M. Galinlarning [64] nazariy tadqiqotlari tahlilidan quyidagicha xulosa qilish mumkin. Barcha taklif etilgan hisoblash usullarida Reynolds analogiyasidan foydalaniladi. Ushbu analogiya amal qiladigan cheklashlarning tahlilidan aytish mumkinki, bu analogiya uzilishli oqimlar uchun o'rinli emas. Shuningdek, uzilish zonasida va uning yaqinida tezlik va harorat profillarining qanday o'xshashligi borligi to'g'risida ham ma'lumot yo'q. Biroq bir-biriga yaqin joylashgan g'adir-budirlik uchun uyurmaning tashqarisida taxminan shu analogiya ishlatilishi mumkin. Shuning uchun yuqorida keltirilgan hisoblash usullarida cheklashlar va yarim empirik koeffitsiyentlardan foydalanib g'adir-budir quvurlarda issiqlik berishni ulardagi qarshilik bo'yicha hisoblash mumkin.

G'adir-budir quvurlarda turbulentlik asosan uyurmaning yuqori chegarasida sodir bo'ladi va u yerdan oqim yadrosiga ko'chadi. Bu gidravlik yo'qotishlarni ham aniqlaydi. Ushbu sharoitda bo'rtiqning shakli ahamiyatga ega emas.

Nisbatan siyrak joylashgan turbulizatorlarda turbulentlikni hosil bo'lishi ikkita sohada bir vaqtning o'zida sodir bo'ladi: 1) uyurmaning yuqori chegarasida, u yerda urinma kuchlanish $\rho w'_x w'_r$ va tezlik gradiyenti $\partial w_x / \partial y$ yuqori; 2) qo'shilish nuqtasi va keyingi turbulizator orasidagi devor

yaqinida. Ushbu holatda turbulent oqimining tuzilishi, uzilish zonasining o'lchami va uning holati (issiqlik berish va gidravlik yo'qotish) nafaqat turbulizatorning balandligiga, balki turbulizatorlarning shakliga va ular orasidagi masofaga ham bog'liq.

Oqimni sun'iy trbulizatsiyalash hisobiga quvurlarda issiqlik almashinuvini jadallashtirishning chegaraviy qiymatlarini baholashda V.K. Migay [37, 38] taqdim etgan ma'lumotlar katta qiziqish uyg'otadi. Unda oldingi tadqiqotlardan farqli ravishda turbulent oqimning uch o'lchamli sxemasi ko'rib chiqilgan. $Pr=0,7$ bo'lganda $Re=10^4$ uchun $Nu/Nu_s=4,06$ chegaraviy qiymat, $Re=10^5$ uchun $Nu/Nu_s=3,62$ chegaraviy qiymat olingan, bunda gidravlik qarshilik ko'effitsiyentini maksimal ortishi mos ravishda 3,89 va 4,67 ga teng, ya'ni $Re=10^4$ da $Nu/Nu_s > \xi/\xi_s$ bo'lishi mumkin. V.K. Migayning fikricha keltirilgan qonuniyat quvurlar uchun olingan tajriba ma'lumotlari bilan juda mos keladi va issiqlik almashinuvini jadallashtirish nuqtai nazaridan o'tish sohasi eng afzal hisoblanadi. Keltirilgan tahlil turli usullar yordamida issiqlik almashinuvi jadalligini oshirishning imkoniyatli zahirasini baholash uchun foydali hisoblanadi.

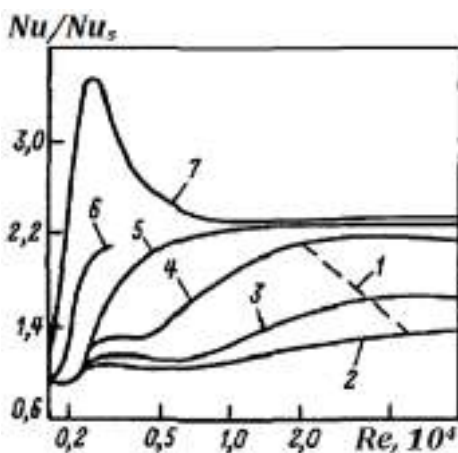
§3.8. Reynolds sonining ta'siri.

Re sonining tahliliga o'tishdan oldin mavjud holat xususida to'xtalib o'tish zarur: Reynolds soni o'zgarganda sun'iy turbulizatorli quvurlarda oqim tuzilishini o'zgarishi to'g'risidagi miqdoriy ma'lumotlar yo'q. Shuningdek Re soni o'zgarganda devor oldi zonalarida oqim tuzilishini o'zgarishiga turbulizator shakli, balandligi va qadamini ta'siri to'g'risidagi ma'lumotlar ham yo'q. Hozirgi vaqtda bunday ma'lumotlarni yo'qligi hisobiga issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha ko'p sonli tajriba natijalarini, ayniqsa Re sonini jadallashtirish samarasiga ta'sirini nazariy umumlashtirish qiyin hisoblanadi. Sun'iy turbulizatorli quvurlarda issiqlik almashinuvi va gidravlik qarshilikka Re sonining ta'siri turbulizatorlarning balandligi, qadami va shakliga hamda issiqlik tashuvchilarning turiga (gaz, suyuqlik) bog'liq. Ayrim tajriba natijalarini ko'rsatishicha Re sonini ortishi bilan issiqlik berish Nu/Nu_s ortishi, o'zgarmasdan qolishi yoki kamayishi mumkin, bunda qarshilik qonuniyati o'zgarishi bilan bog'liqlik kuzatilmaydi. $Re \rightarrow \infty$ hol uchun issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha qo'yilgan savol ham katta qiziqish uyg'otadi. Ushbu barcha faktlar va boshqa qator savollar aniq nazariy tahlillar asosida qanoatlantiruvchi ma'lumotlarni olish

imkoniyatini bermaydi. Shuning uchun turli omillarning ta'sirini, ayniqsa Re sonini jadallashtirish samarasiga ta'sirini tajriba natijalarining tahlili asosida ko'rib chiqamiz va natijalarni nazariy xulosalar bilan taqqoslaymiz.

Agar Re ning kichik qiymatlari sohasida erkin konveksiyaning ta'sirini ko'rib chiqadigan bo'lsak, u holda issiqlik berishni jadallashtirishning xarakterli samaralariga va ularni o'zgarishiga mos keluvchi qonuniyatlarga bog'liq holda Re sonini uchta sohaga ajratish mumkin: 1) $Re < Re_{kr}$, bu sohada sun'iy turbulizatorli quvurlarda issiqlik almashinuvini ortishi sodir bo'lmaydi; 2) $Re_{kr} < Re < Re^*$, bu sohada Re ni ortishi bilan Nu/Nu_s ni birdaniga ortishi sodir bo'ladi, bu sohaning chegarasi turbulizatorlarning balandligi, qadami va shakliga, shuningdek Pr soniga bog'liq; 3) $Re > Re^*$, bu sohada $Nu/Nu_s = const > 1$, biroq shunday hol ham uchraydiki, ya'ni Re ortishi bilan Nu/Nu_s ortadi yoki pasayishni boshlaydi.

Suv va suv-glitserin aralashmasida issiqlik berish bo'yicha tajriba ma'lumotlari olingan. **3.18-rasmda** jadallashtirish samarasini Nu/Nu_s , Re soniga bog'liqligi ko'rsatilgan. Re^* sonining chegarasi uzlukli chiziq bilan ko'rsatilgan, bunda turbulizatorning ko'rilayotgan $t/D = 0,5$ qadami o'zgarmasdan qolganda issiqlik almashinuvini ortishi silliq quvurna qaraganda yuqori bo'ladi.



3.18-rasm. Ariqchali quvurlarda issiqlik berishni jadallashtirishga Re sonining ta'siri:

1- Re^* sonining chegarasi; 2- $d/D=0,983$; 3- $d/D=0,966$; 4- $d/D=0,943$; 5- $d/D=0,92$; 6- $d/D=0,912$ (qadam 1,0); 7- $d/D=0,875$ (qadam 0,5).

$Re > Re_{kr}$ bo'lganda silliq quvurda Re sonini ortishi, oqim yadrosida turbulent almashinuvini jadal ortishi bilan kuzatiladi, bunda termik qarshilik barcha ingichka devor oldi qatlamlarida o'rtachalanadi, u yerda issiqlikni turbulentli uzatish ε_q kichik, issiqlik oqimi esa maksimal. Re soni

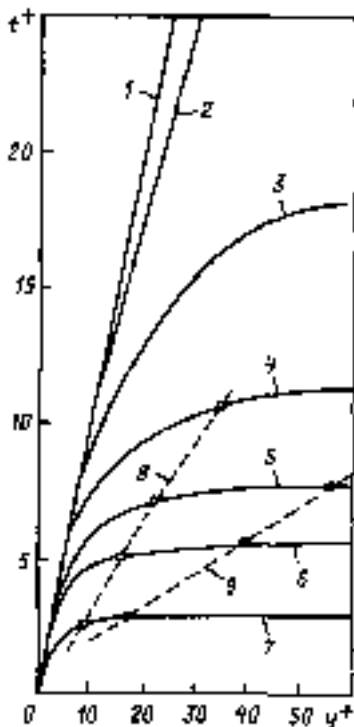
oshganda turbulizatorning belgilangan balandligi, qadami va shakli uchun maksimal Nu/Nu_s nisbatga erishish faqatgina quyidagi holatda sodir bo'ladi, bunda turbulizatorlarning balandligi silliq quvurning devor oldi qatlami qalinligi bilan bir xil bo'lishi va oqimning asosiy termik qarshiligi (99%) o'rtachalashishi kerak. Shuning uchun Re^* ni turbulizator balandligiga bog'liqligining tajriba natijalarini hisobiy bilan taqqoslash qiziqish uyg'otadi. Bunda silliq quvur uchun energiya tenglamasidan foydalanish mumkin:

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\varepsilon_q + a) \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (3.13)$$

$Pr_\tau=1$ va $q_d = const$ шартда асосида девор олди соҳасида тенгламани интеграллаб қўйидагига эга бўламиз:

$$\frac{T_d - T}{q_d \frac{D}{\lambda}} = 4 \int_0^y \frac{\int_0^y \frac{w_x}{w} \left(\frac{D}{2} - y \right) d\left(\frac{y}{D}\right)}{\left(\frac{D}{2} - y \right) \left(1 + \frac{Pr \varepsilon_\tau}{v} \right)} d\left(\frac{y}{D}\right) \quad (3.14)$$

3.19-rasmda (3.14) ni $t^+ = \frac{t_d - t}{q_d d / \lambda} - \frac{y}{\sqrt{\tau / \rho}}$ dan y^+ gacha bog'liqlik shaklida grafikli integrallash natijalari keltirilgan, $\frac{\varepsilon_\tau}{v} = f(y)$ bog'liqlik Shleyxerning tajriba ma'lumotlari bo'yicha olingan. Absissa o'qiga devordan o'lchamsiz masofa kiritilgan:



3.19-rasm. Pr ning turli qiymatlarida silliq quvur devori yaqinida haroratlar profili:

1- $Pr=0$ ($t^+ = y^+$); 2- $Pr=0,1$; 3- $Pr=0,7$; 4- $Pr=2,5$; 5- $Pr=5$;
6- $Pr=10$; 7- $Pr=50$; 8- y_{90}^+ ; 9- y_{99}^+ .

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}{\nu} = \frac{y \sqrt{\frac{\xi}{8} \frac{\rho w^2}{2}}}{\nu} = \frac{y}{D} \frac{Re^{0,875}}{5} \quad (3.15)$$

3.19-rasmdan quvurning o'qi va devori orasidagi umumiy haroratlar farqini 99% qismi "hosil bo'luvchi" devor oldi qatlamining o'lchamsiz qalinligi ifodasini olish mumkin:

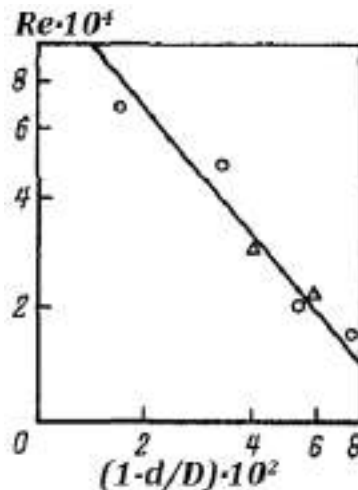
$$\left(\frac{y}{D}\right)_{99} = \frac{575}{Re^{0,875} Pr^{0,5}} \quad (3.16)$$

Diafragmaning balandligini devor oldi qatlamining qalinligiga tenglashtirib quyidagini olamiz:

$$Re^* = \frac{3150}{(1-d/D)^{1,14} Pr^{0,57}} \quad (3.17)$$

bu yerda d -halqali diafragramaning ichki diametri.

(3.17) formula bo'yicha hisoblangan natijalarni [58, 65] ishlardagi tajriba natijalari bilan taqqoslanishi keltirilgan **3.20-rasmdan** ko'rinib turibdiki, mos kelish qoniqarli. Shu bilan birga $Re_{kr} < Re_{kr.s}$ bo'lgan turbulizatorli quvurlarda Re^* chegara Re ning kichik qiymatlari tomoniga og'adi va bu holatda, aftidan, Re ning qisqarishiga nima sabab bo'lganligi muhim emas: diafragmaning balandligini ortishi yoki qadamini o'zgarishi (**3.21-rasmdagi** 5 va 7 egri chiziqlar). Shuningdek, N.M. Galin [64] ishining ma'lumotlariga muvofiq havoda Re^* chegara Re sonining katta sohasiga og'ishi kerak. Biroq bizga ma'lum ishlarda bunday holat kuzatilmadi.

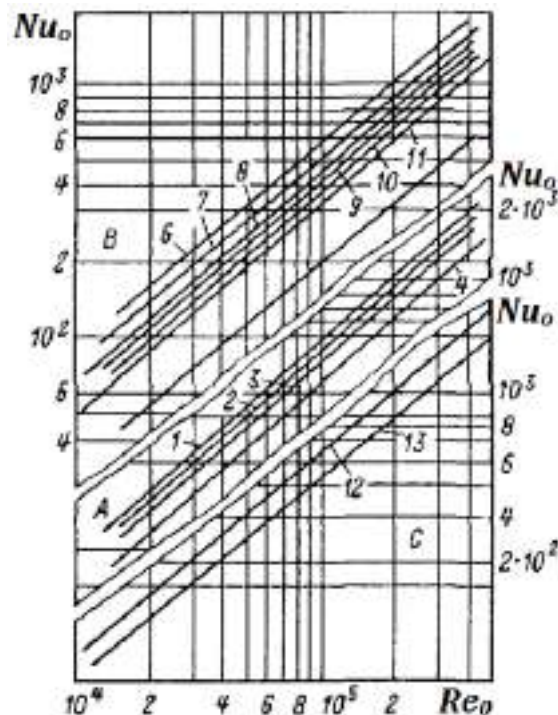


3.20-rasm. Turbulizator qadami $t/D=0,5$ bo'lganda Re^* ni diafragma balandligiga bog'liqligi:

– (3.17) tenglama bo'yicha; 0-[58]; Δ -[65].

3.21-rasmda ariqchali quvurlarda havoning oqimida issiqlik berish bo'yicha o'tkazilgan tajriba natijalari keltirilgan [66-69]. Re soni va diafragma balandliklarining barcha tadqiqot diapazonlarida issiqlik berish

qonuniyatlari o'zgarmasdan qoladi. Quvurlarda havoning oqimida issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha ishlar natijalarini umumlashtirib aytish mumkinki, Reynolds sonining $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$ diapazonida issiqlik almashinuv qonuniyati yoki o'zgarmaydi yoki juda kam o'zgaradi va turbulizatorlarning har qanday balandligi va qadamida $Nu \sim Re^{0,8}$ qonuniyatga yaqin bo'ladi.



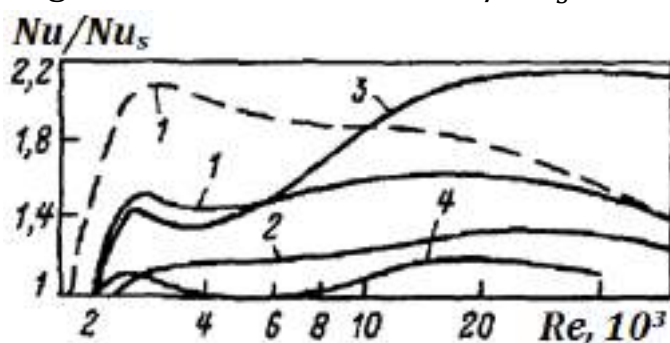
3.21-rasm. Diafragmali quvurlarda havoning oqimida issiqlik almashinuvini bog'liqligi:

A- $t/D=0,25$; 1- $d/D=0,88$; 2- $d/D=0,894$; 3- $d/D=0,935$; 4- $d/D=0,964$;
 B- $t/D=0,5$; 5-silliqlik quvur; 6- $d/D=0,880$; 7- $d/D=0,905$; 8- $d/D=0,925$;
 9- $d/D=0,945$; 10- $d/D=0,957$; 11- $d/D=0,967$; C- $t/D=1$;
 12- $d/D=0,858$; 13- $d/D=0,915$.

Tomchili suyuqliklar harakatida quvurlarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish bo'yicha tajriba natijalari va tadqiqotlarning soni chegaralanganligiga qaramasdan rivojlangan turbulent oqimi sohasidagi issiqlik almashinuv qonuniyatida farqlarni aniq ifodalanib xulosa qilish mumkin. V.P. Isachenko, S.G. Agababov, N.M. Galin [70] tadqiqot ishlarini tahlil qilib, Re^* qiymatiga turbulizatorlarning shakli sezilarli ta'sir etishini xulosa qilish mumkin. Masalan, uchburchak rezba shaklidagi g'adir-budurlik uchun $Re = (2 \dots 20) \cdot 10^4$ oraliqda barcha tajriba quvurlari uchun Nu/Nu_s ortadi. Ravon kesimli rezba shaklidagi g'adir-budurlik aniq ifodalanuvchi Re^* sonining chegarasiga ega, biroq juda chuqur ariqchada $Re > Re^*$

bo'lganda $Nu/Nu_s = \text{sonst}$, kam chuqur ariqchada ushbu sohada Nu/Nu_s kamayadi, $Re = 2 \cdot 10^5$ ga yetganda qiymat 1 ga teng bo'ladi.

Shuningdek boshqa bir xil sharoitlarda (bo'rtiqning balandligi va shakli, Pr) $Nu = f(Re)$ bog'liqlik xarakteriga turbulizatorlarning qadami sezilarli ta'sir ko'rsatadi. 3.22-rasmda quvurlarda suvning oqimida olingan tajriba ma'lumotlari ko'rsatilgan bo'lib, bunda diafragmaning balandligi bir xil, ammo qadami turlicha bo'lgan holat tadqiqot qilingan. 3.18 va 3.21-rasmlardagi grafiklarni taqqoslashdan ko'rinib turibdiki, $t/D > 0,5$ qadamni ortishi $Re > Re^*$ bo'lganda issiqlik almashinuv qonuniyatini o'zgarishi bilan kuzatiladi: agar $t/D = 0,5$ da $Nu/Nu_s = \text{sonst}$ bo'lsa, u holda $t/D > 0,5$ bo'lganda Re ortishi bilan Nu/Nu_s sezilarli kamayadi.



3.22-rasm. Diafragmaning qadamlari turlicha bo'lganda suvning oqimida issiqlik almashinuvini jadallashtirishga Re sonining ta'siri:

— $d/D=0,94$; --- $d/D=0,91$; 1- $t/D=1$; 2- $t/D=2$; 3- $t/D=0,5$; 4- $t/D=4$.

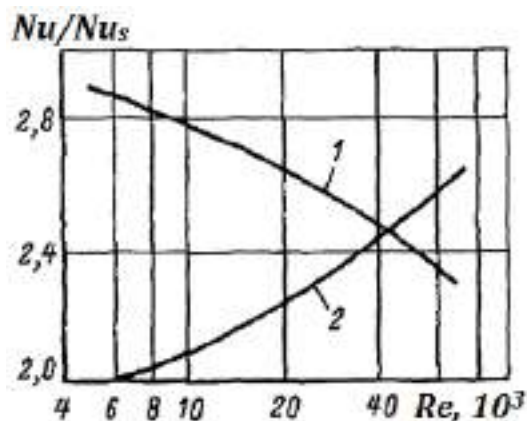
Yana bir jiddiy holatni ko'rib chiqamiz. Ma'lumki, Re sonini ortishi bilan oqimning termik qarshiligi barcha juda ingichka devor oldi qatlamlarida o'rtachalanadi, u holda rivojlangan turbulent oqimida issiqlik berishni jadallashtirishning eng yaxshi samarasi o'tish va kuchsiz rivojlangan turbulentlik sohasidan farqli ravishda turbulizatorlarning kichik balandligiga mos keladi. Bu tabiiy holat: agar turbulizatorning balandligi devor oldi qatlamining qalinligidan oshsa, u holda asosiy termik qarshilik devor oldi qatlamida o'rtachalanadi, bu o'z navbatida oqim yadrosi sohasida qo'shimcha turbulizatsiyalanishga olib keladi, biroq bunda turbulentli uzatish yuqori, issiqlik oqimi esa kam bo'ladi. Shuning uchun issiqlik berish kam (ayniqsa $Pr < 1$ bo'lganda), gidravlik qarshilik esa keskin ortadi.

Yuqorida ta'kidlanganidek, sun'iy turbulizatorli quvurlarda oqimning tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlarni kamligi hisobiga Re sonini issiqlik almashinuviga ta'siri to'g'risidagi savolni nazariy tahlil qilish ancha qiyin.

Tabiiyki, tuzilish to'g'risidagi yetarlicha ma'lumot bilan mustahkamlanmagan taklif etilgan hisoblash usullari turbulizatorning balandligi, qadami va shakliga bog'liqliklarni va tajriba natijalarini to'liq qamrab ololmaydi. Bundan tashqari, keltirilgan hisoblashning yarim empirik usullari issiqlik almashinuvini Re ga bog'liqligini silliq quvur uchun o'rinli qonuniyatga yaqin $Nu \sim Re^{0,8}$ yoki $Nu/Nu_s = const > 1$ bog'liqlik shaklida olish imkonini beradi. Istisno tariqasida 1955-yilda Nunner tomonidan olingan hisobiy bog'liqlikni keltirish mumkin. Ushbu ma'lumot bizning, jumladan chet el adabiyotlarida ham uchraydi. Nunnerning fizik modelini xatoligi V.I. Gomelauri [71, 72] va bir nechta olimlarning ishlarida ko'rsatilgan va biz bunga to'xtalmaymiz. Faqatgina shuni aytish mumkinki, Nunner tomonidan taklif etilgan hisobiy formula nafaqat tabiiy fizik hodisalarga teskari bo'lgan natijalarni beradi, balki Nunnerning tomonidan olingan tajriba ma'lumotlari bilan ham mos kelmaydi. Bu faqatgina Pr ni issiqlik berishni jadallashishiga ta'siriga mos keladi.

3.23-ramda Nunnerning tajriba ma'lumotlari va uning hisobiy bog'liqligi (3.18) bo'yicha $\xi/\xi_s = const$ bo'lganda issiqlik almashinuvini jadallashish samarasi Nu/Nu_s va Re ga bog'liqligi ko'rsatilgan:

$$\frac{Nu}{Nu_s} = \frac{\xi}{\xi_s} \frac{1 + 1,5Re^{-\frac{1}{8}}Pr^{-\frac{1}{6}}(Pr+1)}{1 + 1,5Re^{-\frac{1}{8}}Pr^{-\frac{1}{6}}\left(\frac{\xi}{\xi_s}Pr+1\right)} \quad (3.18)$$



3.23-rasm. Diafragmali quvurlarda issiqlik almashinuvini jadalligiga Re sonining ta'siri:

1-tajriba; 2-(3.18) ifoda natija.

Grafiklardan ko'rinib turibdiki, Nu/Nu_s hisobiy qiymat Re ni ortishi bilan ortmoqda, bu fizik mantiqsiz, ya'ni $\xi/\xi_s = const$ bo'lganda Re ni ortishi bilan ξ kamayishi kerak. Boshqacha aytganda $\xi/\xi_s = const$ shart Re ni ortishi bilan turbulizatorni yoki kichik balandlikka yoki katta qadamga

o'tishini bildiradi. Shubhasiz har qanday holatda ham Nu/Nu_s ortishini olib bo'lmaydi.

Quvurlardagi gidravlik qarshilikka Re ni ta'sirini qisqa ko'rib chiqamiz. Agar tajriba quvurida o'lchangan bosimlar farqi $\Delta p = p_1 - p_2$ bo'lsa, u holda uzunlik bo'yicha zichlik o'zgarishini inobatga olmasdan taxminan quyidagicha yoziz mumkin:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \xi_{ishq} \frac{L_q}{D} \frac{\rho w^2}{2} + \sum_{i=1}^n \xi_m \frac{\rho w^2}{2} \quad (3.19)$$

bu yerda ξ_{ishq} -quvurning silliq uchastkalarida ishqalanishning o'rtacha kuchlanishi natijasida yuzaga keladigan gidravlik qarshilik koeffitsiyenti; L_q -quvurdagi silliq uchastkalarining umumiy uzunligi; w -silliq uchastkalar kesimidagi o'rtacha tezlik; ξ -yakka turbulizatorning (diafragma) mahalliy gidravlik qarshilik koeffitsiyenti.

(3.19)-tenglamani yana quyidagicha yozish mumkin:

$$\xi \frac{L}{D} \frac{\rho w^2}{2} = \xi_{ishq} \frac{L_q}{D} \frac{\rho w^2}{2} + \frac{L}{t} \xi_m \frac{\rho w^2}{2} \quad (3.20)$$

yoki

$$\xi = \frac{L_q}{D} \xi_{ishq} + \frac{\xi_{max}}{t/D} \quad (3.21)$$

bu yerda ξ -sun'iy turbulizatorli quvurda umumiy gidravlik qarshilik koeffitsiyenti; t -diafragma qadami.

Ma'lumki, rivojlangan turbulent oqimida o'tkir qirrali yakka diafragmaning ξ_m qarshilik koeffitsiyenti Re ga bog'liq emas (yoki juda kam bog'liq). Devor bilan ishqalanishda yuzaga keladigan, umumiy holda g'adir-budir quvurlar uchun gidravlik qarshilik koeffitsiyenti Re soniga, turbulizatorlarning balandligi, qadami va shakliga bog'liq. Kox ishlarining ma'lumotlariga muvofiq halqali diafragma bo'rtiqlari orasidagi ishqalanish kuchlanishining taqsimlanishi termoanemometr yordamida o'lchangan va ushbu uchastkalardagi ishqalanishning o'rtacha kuchlanishi quyidagi qonuniyatga bo'ysunadi:

$$\tau_{ishq} = A Re^{1,75} \quad (3.22)$$

yoki

$$\xi_{ishq} = B/Re^{0,25} \quad (3.23)$$

Boshqacha aytganda Re ning ta'siri xuddi silliq quvurniki kabi, ammo A va B o'zgarmaslar turbulizatorning balandligiga sezilarli bog'liq bo'lib, balandlikni ortishi bilan ortadi va turbulizatorning qadamiga deyarli bog'liq emas. Shunday xulosa qilish mumkinki, $d/D=0,5...0,8$ va $t/D=2...6,5$

bo'lganda ishqalanish ko'effitsiyentining ulushi umumiy qarshilik ko'effitsiyentining 1,5...20% ini tashkil etadi, biroq d/D va t/D larning ortishi bilan ushbu ulush yana ortadi.

(3.21) formuladan ko'rinib turibdiki, baland va zich joylashgan turbulizatorlar uchun gidravlik qarshilik to'liq mahalliy qarshilikdan aniqlanganda, umumiy qarshilik ko'effitsiyenti amalda Re soniga bog'liq bo'lmaydi-bu qarshilik qonuniyatining avtomodel sohasi deb ataladi. Agar ishqalanish ulushi umumiy qarshilikda yuqori, ya'ni d/D va t/D yuqori hamda turbulizatorlarning profili yassi bo'lsa, u holda umumiy gidravlik qarshilik ko'effitsiyenti Re soniga bog'liq bo'lishi kerak va Re ni ortishi bilan qarshilikning qiymati kamayadi. Shunday qilib quyidagicha xulosa qilish mumkin, ya'ni issiqlik almashinuvini jadallashtirishda qarshilik ko'effitsiyentlarining nisbiy ortishi ξ/ξ_s , Re ortishi bilan ortadi, bu ortish turbulizatorli quvurlarda qarshilik qonuniyatini avtomodelga yaqinlashishiga qaraganda kuchliroq bo'ladi.

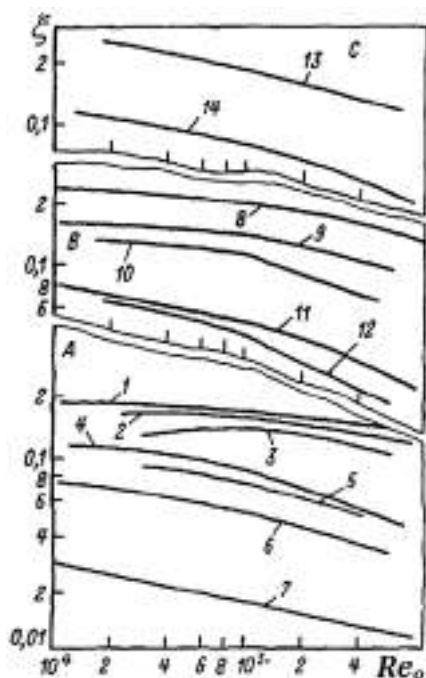
Istisno tariqasida shunday holat bo'lishi mumkinki, diafragmadan keyingi oqim tuzilishining sifati belgilangan Re soniga yetgandagina o'zgarishi mumkin. Bu faqatgina ravon profilli bo'rtiqlar uchun xarakterli bo'lib, shakllarning qarshiligi Re ni ortishi bilan birdaniga kamayadi. Bunda umumiy qarshilik ko'effitsiyenti $\xi \sim Re^{-m}$ qonuniyati bo'yicha kamayadi, bu yerda $m > 0,25$. Biroq ξ qiymat ξ_s qiymatga erishmaydi va Re sonini ortishi bilan yana ortadi.

Diafragmali quvurlarda gazning oqimida umumiy gidravlik qarshilik ko'effitsiyentini Re ga bog'liqligi 3.24-rasmda ko'rsatilgan [67-69]. Grafikdan umumiy xulosa sifatida aytish mumkinki, barcha quvurlar uchun qarshilik ko'effitsiyenti Re ortishi bilan kamayadi, bu esa jadallashtirish samaradorligiga yaxshi ta'sir ko'rsatadi. Bundan tashqari, $Re = 10^5$ sohasida qarshilik qonuniyatini sezilarli o'zgarishi ham xarakterlidir.

Diafragmaning shaklini qarshilik qonuniyatiga qanday darajada ta'sir etishi $\xi = f(Re)$ bog'liqlik shaklida 3.25-rasmda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, o'tkir qirrali diafragma uchun qarshilik qonuniyati avtomodel, ravon tizilgan turbulizatorlar uchun esa qarshilik ko'effitsiyenti Re sonini ortishi bilan kamayadi, bunda ξ/ξ_s ham kamayishi mumkin.

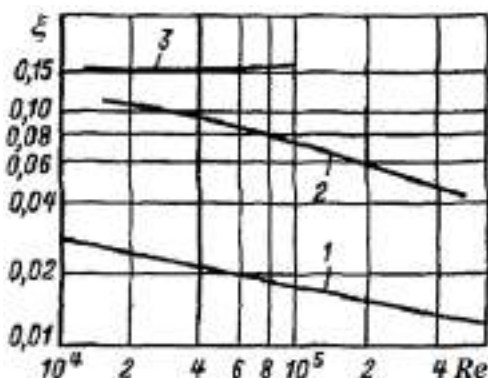
Xulosa sifatida aytish mumkinki, issiqlik almashinuvini jadallashtirish masalalari yoritilgan ishlarning aksariyatida tadqiqot qilingan quvurlardagi gidravlik qarshilik qonuniyati amalda avtomodelli. Faqatgina ayrim ishlarda

[68, 73] avtomodellidan sezilarli farq qiladigan qonuniyatlar olingan, shuningdek aynan shu holatlarda issiqlik almashinuvini jadallashtirishning eng yaxshi samarasiga erishilgan.



3.24-rasm. Ariqchali quvurlarda gidravlik qarshilik koeffitsiyentini Re soniga bog'liqligi:

A- $t/D=0,25$; 1- $d/D=0,887$; 2- $d/D=0,894$; 3- $d/D=0,905$; 4- $d/D=0,935$; 5- $d/D=0,943$; 6- $d/D=0,964$; 7-silliqlik quvur; B- $t/D=0,5$; 8- $d/D=0,880$; 9- $d/D=0,905$; 10- $d/D=0,925$; 11- $d/D=0,945$; 12- $d/D=0,967$; C- $t/D=1$; 13- $d/D=0,968$; 13- $d/D=0,915$.



3.25-rasm. Turli shakldagi diafragmalik quvurlarda gidravlik qarshilik qonuniyatlarini taqqoslash:

1-silliqlik quvur; 2- $d/D=0,915$; $t/D=1$, ravon shakl [69]. 3- $d/D=0,92$; $t/D=0,82$, to'g'ri burchakli shakl, Nunner ma'lumoti.

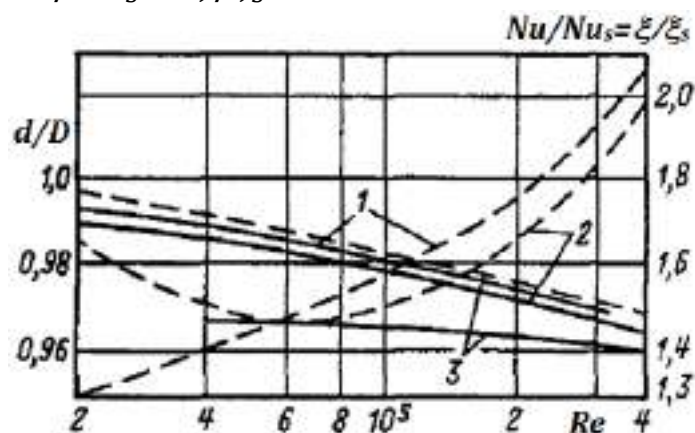
Taqdim etilgan ma'lumotlar issiqlik berish va gidravlik qarshilik koeffitsiyentlarini sillikli quvurga qaraganda nisbiy ortishini taqqoslash

imkoniyatini beradi. Bu muammo sezilarli darajada ilmiy va amaliy qiziqish uyg'otadi.

Kanallarda turbulent oqim tuzilishini va oqimda turbulentlikni oshirish manbai bo'lgan uzilish zonasi tahlili va o'tkazilgan tajriba tadqiqotlarining kompleksi oddiy silliq kanalga nisbatan taqqoslanganda gidravlik qarshilikni ortishiga nisbatan issiqlik berish sezilarli ortganini ko'rsatdi. Aytib o'tilganidek, turbulizatorli kanallardagi turbulent oqimining bunday xususiyati quyidagicha izohlanadi, ya'ni oqimning devor oldi sohalaridagi uzlukli manbalarda hosil bo'ladigan turbulentli uyurmalar, oqim yadrosida kuchsiz diffuziylanish bilan kanal devori bo'ylab tarqaladi. Turbulentli uyurmalarining bunday uzlukli manbalari, kanal devori bo'yicha belgilangan qadam bilan joylashgan ravon tizilgan bo'rtiqlar yoki ariqchalar bo'lishi mumkin.

Rivojlangan turbulent oqimi sohasida eng samarali natijalarga kichik diafragmalarda ($d/D > 0,94$) va kichik qadamda ($t/D = 0,25 \dots 0,5$) erishish mumkin. Ushbu sohada diafragmani kattalashishi bilan (d/D ni kamayishi bilan) Nu/Nu_s nisbat dastlab birdaniga ortadi, keyin issiqlik berishni ortishi barqarorlashadi. Diafragma balandligini ortishi bilan gidravlik qarshilik dastlab bir tekis, keyin esa birdaniga ortadi. Diafragma balandligi kichik bo'lgan sohalarda ($d/D = 0,96 \dots 0,993$) t/D ni o'zgarish diapazoni mavjud bo'lib, unda issiqlik berishni ortishi gidravlik qarshilikka nisbatan yuqori, ya'ni $Nu/Nu_s > \xi/\xi_s$.

$Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$ bo'lganda d/D qiymat Re sonini va t/D qadamni ortishi bilan kamayadi (3.26-rasm). d/D katta bo'lganda $Nu/Nu_s > \xi/\xi_s$, kichik bo'lganda $Nu/Nu_s < \xi/\xi_s$.



3.26-rasm. Quvurda havoning oqimida t/D ning qiymatlari turlicha bo'lganda d/D va $Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$ ni Re soniga bog'liqligi:

1, 2, 3- $t/D = 0,25; 0,5; 1$; --- d/D ; --- $Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$.

$t/D=0,25$ bo'lganda $Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$ qiymat Re ortishi bilan ortadi, $Re = 4 \cdot 10^5$ bo'lganda qiymat taxminan 2 ga erishadi. $t/D=0,5$ uchun $Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$ ni Re ga bog'liqligi 1,4...1,5 tartibli minimum orqali o'tadi, $t/D=1$ uchun esa $Nu/Nu_s = \xi/\xi_s$ qiymat Re ortishi bilan kamayadi, $Re = 2 \cdot 10^5$ bo'lganda maksimal qiymat 1,78 ga yetadi. $\frac{d}{D} > 1,077 - 0,01 \lg Re - (0,373 \lg Re + 9,01) \exp \left[(5,52 \left(\frac{t}{D} - 0,25 \right)) \right] \cdot 10^{-4}$ munosabat o'rinli bo'lganda issiqlik berish eng ko'p ortadi. Ushbu munosabat $t/D=0,25...1$ va $Re=2 \cdot 10^4...4 \cdot 10^5$ bo'lganda o'rinli.

§3.9. Prandtl sonining ta'siri.

Qaysi turdagi issiqlik tashuvchilarda (suyuq metal, gaz yoki tomchili suyuqlik) jadallashtirishning eng yaxshi samarasini olish mumkin degan savolga javob topish bo'yicha urinishlar nazariy tahlil asosida amalga oshirilgan. Nunner sun'iy turbulizatorlarni devor oldi bo'ylab turbulentli almashinuvi ga faol ta'sir etishini o'rganib quyidagi xulosaga kelgan, ya'ni bir xil sharoitlarda issiqlik berishni ortishining eng yaxshi natijalariga suyuq metal uchun $Pr \ll 1$ bo'lganda erishish mumkin. Keyingi barcha ham tajribaviy [58, 70, 71] ham nazariy tadqiqotlar Nunnerning xulosasini tasdiqlamadi. Prandtl soni o'zgarganda sun'iy turbulizatorlarni oqim bilan o'zaro ta'sirlashish mexanizmini ko'rib chiqamiz.

Issiqlikni turbulentli uzatishning nisbiy koeffitsiyenti:

$$\frac{\xi_q}{a} = \frac{\varepsilon_\tau}{v} = \frac{Pr}{Pr_t}$$

quvur devoridan belgilangan masofada Re ortishi bilan Pr ortadi. Boshqacha aytganda turbulent oqimida harorat maydoniga ikkita mezonni sifat ta'siri bir xil. Bundan shunday xulosa qilish mumkinki, ikkita mezonni issiqlik almashinuvi jadallashishiga ta'siri sifat nuqtai nazardan bir xil bo'ladi.

Ma'lumki, kam rivojlangan turbulentlik sohasida, ya'ni asosiy termik qarshilikli devor oldi qatlamining qalinligi turbulizatorlarning balandligidan ancha katta bo'lsa va Nu/Nu_s nisbatni Re sonini ortishi bilan ortishi aniq bo'lsa, u holda Pr soni Nu/Nu_s ga ta'sir ko'rsatadi. Aksincha, rivojlangan turbulent oqimida, turbulizatorlar balandligi devor oldi qatlami qalinligi bilan bir xil yoki katta bo'lganda Re jadallashish samarasiga ta'sir ko'rsatmaydi, ya'ni $Nu/Nu_s = \text{sonst} \neq f(Re)$, Pr qiymati ham sezilarli

ta'sir ko'rsatmasligi kerak ($Pr > 0,7$). Biroq ushbu sohada Re qiymati bir nechta detallarga ega.

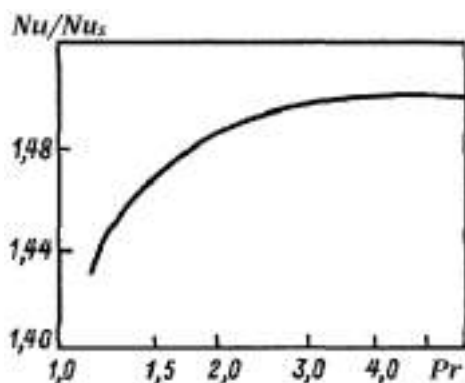
Birinchidan, turbulizatorlarning qadami va Re o'zgarmas bo'lib, turbulizator balandligi ortganda gazlar va tomchili suyuqliklarda faqatgina belgilangan chegaralarda issiqlik berishni bir xil ortishi kuzatiladi. Shu bilan birga devor oldi qatlamini sun'iy turbulizatsiyalash nafaqat bo'rtiqdan keyingi uyurma zonasida, balki uyurmaning yuqori chegarasidan uzilgan turbulent oqim energiyasini ko'chishi hisobiga oqimning pastki qismining bir qancha masofasida ham sodir bo'ladi. Agar turbulizatorning balandligi qancha katta bo'lsa, ya'ni uyurmaning o'lchami katta bo'lsa va turbulizatsiyalangan oqim devor bo'ylab o'tsa, u holda issiqlik berishni yanada ortishi kuzatilmaydi. Demak, Pr qiymati yetarlicha katta va bo'rtiqning balandligi yetarlicha kichik bo'lsa, issiqlik berish koefitsiyentining chegaraviy qiymatiga erishish mumkin, ya'ni Pr soni qancha kichik bo'lsa, issiqlik berishning chegaraviy koefitsiyenti shuncha katta bo'ladi.

Ikkinchidan, $Re \rightarrow \infty$ bo'lgandagi chegaraviy holatda issiqlik berish koefitsiyentining nisbiy ortishi Nu/Nu_s birga intilishi kerak. Bunda Re ning maksimal qiymatlarida Pr ning qiymatini ortishi faqatgina Nu/Nu_s ni kamayishi bilan kuzatiladi. Bu holat turbulizator qadamini ortishi bilan kuchli namoyon bo'ladi.

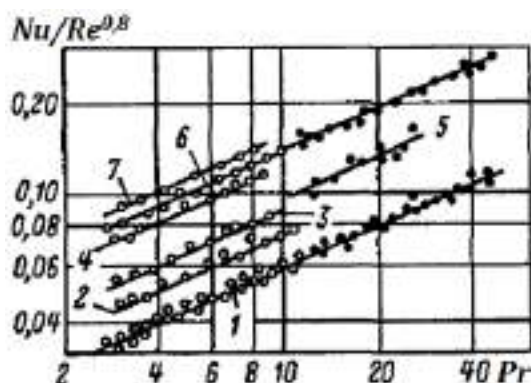
Uchinchidan, Pr ortganda asosiy termik qarshilikli devor oldi qatlami qalinligining kamayishi va barcha yupqa devor oldi qatlamida turbulentli almashinuvni oshirish zaruriyati kuzatilmaydi, ya'ni turbulizatorlarning ancha kichik balandliklarida tomchili suyuqliklarda gazga nisbatan Nu/Nu_s nisbatning bir xil qiymatini olish mumkin. Gap shundaki, juda kichik balandliklarda ($d/D \approx 0,99$) uyurma quvvati amalda juda kichik, ravon profillarda esa uyurmalar umuman bo'lmaydi. Shuning uchun ayniqsa katta qadamlarda bo'rtiq zonasida turbulentli almashinuvning sezilarli ortishi sodir bo'lmaydi. Ushbu xulosaning eng ishonarli isboti [57, 73] ishlarning natijalari hisoblanadi, bunda $d/D=0,99$ bo'lgan bo'rtiqli kanallarda suvning oqimida jadallashtirish samarasi umuman kuzatilmaydi.

Tajribaviy dalillarga murojaat qilamiz. Pr sonini issiqlik almashinuv jadalligiga ta'sirini tadqiqotiga bag'ishlangan tajriba ishlari [74] da keltirilgan. Tajribalar diametri 9,5 mm bo'lgan silliq quvurda $q_d = \text{sonst}$ bo'lganda suvni isitishda va balandligi 0,2 mm (qadam bo'yicha ma'lumotlar

keltirilmagan) bo'lgan piramida shaklidagi cun'iy turbulizatorli quvurda o'tkazilgan. $Re = 4 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$ oraliqda Pr qiymat 1,15 dan 6,7 gacha o'zgaradi. $Re = 1,5 \cdot 10^5$ bo'lganda issiqlik berishning nisbiy koeffitsiyentini Pr ga bog'liqligi 3.27-rasmda ko'rsatilgan. Pr ni ortishi bilan jadallashish samarasi $Pr = 1 \div 3$ sohasida atigi 5% ga yaxshilangan va $Pr > 3$ bo'lganda $Nu/Nu_s = \text{sonst}$ bo'lgan. Re soni $4 \cdot 10^4$ dan $4 \cdot 10^5$ gacha ortganda va $Pr = 2,6 = \text{sonst}$ bo'lganda jadallashish samarasi 25% ga yomonlashgan.



3.27-rasm. Pr ni issiqlik almashinuvini jadallashish samarasiga ta'siri.



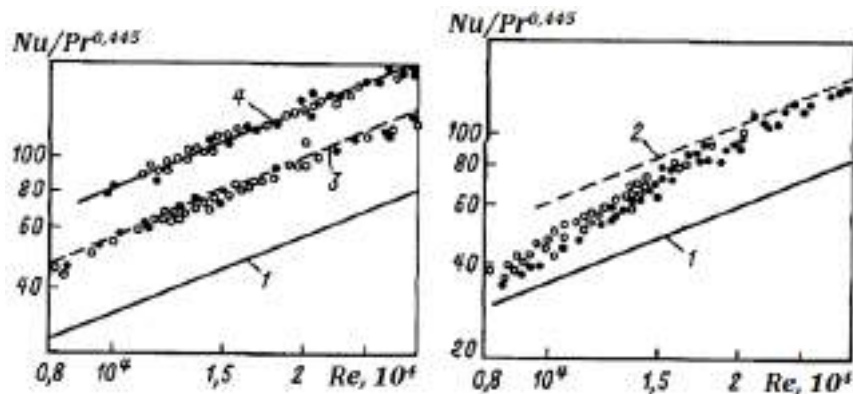
3.28-rasm. Pr ni silliq va ariqchali quvurlarda issiqlik almashinuviga ta'siri:

1-silliq quvur; 2- $d/D=0,983$; 3- $d/D=0,966$; 4- $d/D=0,943$; 5- $d/D=0,946$ (qadam 1,0); 6- $d/D=0,92$; 7- $d/D=0,875$ qadam 0,5;
○-suv; ●-suv-glitserin aralashmasi.

Pr qiymatning juda keng diapazonida davriy halqali diafragmali quvurlarda issiqlik almashinuvini jadallashishiga Pr ni ta'sirini tadqiqotlari havo, sulfat kislota, suv va suv-glitserin aralashmalarini (40% glitserin) qizdirishda o'tkazilgan bo'lib, tadqiqotlarda Pr ning qiymati 0,7 dan 50 gacha o'zgargan. Tajribalar dasturida nafaqat $Nu = f(Re)$ bog'liqlikni, balki $Re = \text{sonst}$ bo'lganda $Nu = f(Pr)$ bog'liqlikni olish ko'zda tutilgan. Tajribalar natijalari 3.28 va 3.29-rasmlarda ko'rsatilgan. Grafiklardan ko'rinib turibdiki, $Re > Re^*$ sohasida Pr qiymatini 0,7 dan 50 gacha o'zgarishi jadallashish samarasiga ta'sir ko'rsatmaydi. $Re < Re^*$ bo'lganda va suvdan suv-glitserin aralashmasiga o'tilganda Nu/Nu_s nisbat 12% ga ortadi, bunda havo oqimiga Re ni ta'siri o'zgarmaydi.

V.I. Gomelauri tomonidan [71, 72, 75] halqali kanalda suv va transformator moyining oqimida bajarilgan tajriba ishlari seriyasida, Pr

sonini ortishi bilan issiqlik almashinuvini jadallashish samarasini ortishi kuzatilgan. Pr 5 dan 80 gacha o'zgarganda Nu/Nu_s nisbat 13% ga ortgan. Bu ta'sirni turbulizatorli kanallar uchun Pr sonining daraja ko'rsatgichini o'zgartirish bilan inobatga olish tavsiya etiladi: silliq quvur uchun $Nu \sim Pr^{0,43}$, turbulizatorli quvur uchun $Nu \sim Pr^{0,47}$.



3.29-rasm. Quvurlarda issiqlik berishni bog'liqlilari:

1-silliq quvur; 2- $d/D=0,966$, $t/D=0,498$; 3- $d/D=0,946$, $t/D=0,998$; 4- $d/D=0,922$, $t/D=0,523$; ○-suv; ●-suv-glitserin aralashmasi; ---havo.

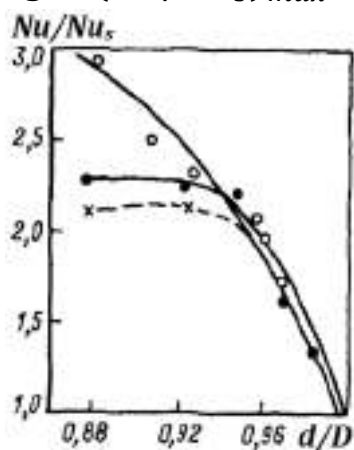
O'tish va kuchsiz rivojlangan turbulentlik sohasida jadallashish samarasiga Pr ta'siri kattaligi Smit va Gouen [76] tajribalarida ma'qullangan bo'lib, tajribalar quvurlarda suv va polialkilen-glikol oqimida o'tkazilgan. Turbulizator piramida shaklida tayyorlangan (Dippriy va Sabersklarnikiga o'xshash [73]). G'adir-budirlikni Re_{kr} ga ta'siri kuzatilmagan. Pr ni Nu/Nu_s ga ta'sirini miqdoriy baholashni imkoniyati bo'lmagan, shuningdek Re qiymati ortganda Prandtl soni sezilarli kamaygan.

Shunday xulosa qilish mumkinki, rivojlangan turbulent oqimida Pr qiymat $Pr = 0,7 \div 80$ oralig'ida jadallashish samarasiga kam ta'sir ko'rsatadi. Shu bilan birga ayrim tajribalarda Pr ni ortishi bilan samara yaxshilanganligi ta'kidlangan. Pr sonini jadallashish samarasiga ta'sir etmasligi to'g'risidagi xulosa V.K. Migay [77] tomonidan ham ma'qullangan. Faqatgina o'tish va kuchsiz rivojlangan turbulent oqimida Pr ni sezilarli ta'sir joyi mavjudligi ta'kidlangan.

Suyuq metallarni oqimida issiqlik almashinuvini jadallashtirish to'g'risidagi ma'lumotlar yo'q. Biroq aytish mumkinki, suyuq metalli oqimlarni sun'iy turbulizatsiyalash juda kichik samaradorlikka ega.

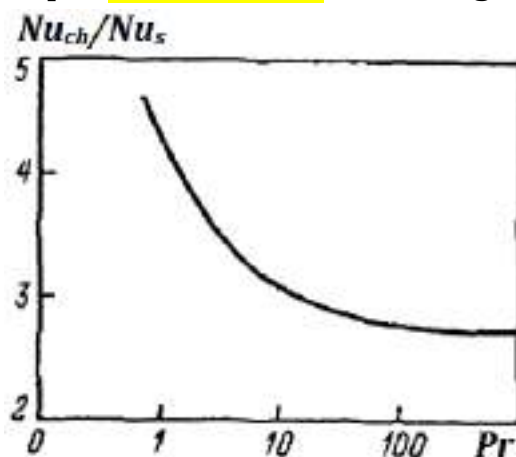
Suv va havoning oqimida diafragmaning qadami o'zgarmas bo'lganda issiqlik berishning nisbiy koeffitsiyentini Nu/Nu_s diafragmaning balandligiga bog'liqligi 3.30-rasmda ko'rsatilgan. Grafiklardan aniq ko'rinib

turibdiki, diafragmaning balandligi d/D ni 0,98 dan 0,94 gacha ortganda issiqlik berishni bir xil ortishi kuzatiladi. Biroq $d/D < 0,94$ bo'lganda suv uchun issiqlik berish o'sishdan to'xtaydi, havo uchun esa o'sishda davom etadi. Shunday xulosa qilish mumkinki, issiqlik berishni chegaraviy ortishiga erishish Pr ga bog'liq bo'lib, bu [77] dagi nazariy ishda tasdiqlangan, hamda unda keltirilgan $(Nu/Nu_s)_{max} = f(Pr)$ bog'liqlik 3.31-rasmda ko'rsatilgan.



3.30-rasm. Dafragma balandligini issiqlik almashinuvini jadallashishiga ta'siri ($Re = 4 \cdot 10^4$; $t/D = 0,5$):

○-havo; ●-suv; x-suv, qovurg'a samarasi inobatga olingan.



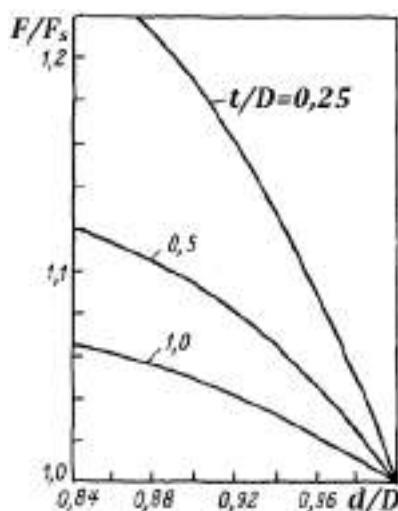
3.31-rasm. Issiqlik berish koeffitsiyentini chegaraviy ortishini Pr soniga bog'liqligi.

Yuqorida ta'kidlandiki, turbulizatorlarning balandligi juda kichik bo'lganda, hattoki $Pr \gg 1$ bo'lganda ham suyuqliklarda issiqlik berishni yuqori ortishini olish qiyin. Shu bilan birga V.P. Isachenko, S.G. Agababova, N.M. Galinlar [70] tomonidan ichki rezkali quvurda suvning oqimida olingan bir nechta kutilmagan natijalarni ko'rsatish mumkin. Masalan, ichki rezbasi uchburchak kesimli ($d/D = 0,978$, $t/D = 0,0286$) bo'lgan quvurda, $Re = 10^5$ bo'lganda $Nu/Nu_s \approx 2$ bo'lgan. Biroq, quvurda ichki qovurg'a o'rnatilganda issiqlik almashinuv yuzasi taxminan 40% ga ortishi inobatga olinsa, u holda sun'iy g'adir-budirlik hisobiga issiqlik almashinuvini ortishi qisqaradi.

Bu yerda sun'iy turbulizatorlardan foydalanilganda issiqlik almashinuv yuzasi ortishini issiqlik berishni ortish samarasiga ta'siri to'g'risidagi savolga to'xtalamiz. Ichki qirg'ilgan rezkali va tashqi ariqchali turbulizatorlar zich o'rnatilib hosil qilingan quvurning ichki yuzasi silliq quvurning yuzasidan doimo katta bo'ladi. Issiqlik berish koeffitsiyentining tajriba natijalari odatda silliq quvurning yuzasiga nisbatan

umumlashtiriladi, g'adir-budir va silliq quvurlarda issiqlik berishni taqqoslashda esa sun'iy turbulizatsiyalash va yuzani oshirish samarasi hisobiga issiqlik berishni umumiy ortishi baholanadi.

Amaliy nuqtai nazardan yuzaning o'zgarishini inobatga olish noprintsipial: haqiqatdan ham agar aniq turdagi turbulizator o'rnatilgan quvur ichida issiqlik berish ko'effitsiyentini qanchadir ortishiga erishilsa, u holda IAQsini hisoblash uchun bunday ortish qaysi samara hisobiga erishilganligi hech qanday ahamiyatga ega emas. Boshqacha aytganda jadallashtirish usullarini ishlab chiqishda issiqlik berishni ortishiga turbulizatorlarni o'lchami va joylashuvini miqdoriy ta'sirini baholash to'g'risida gap ketganda yoki issiqlik almashinuvi va qarshilikni ortishi orasidagi bog'liqlikni ko'rib chiqilayotganda, barcha holatlarda asosiy qiziqish yuzani ortish samarasini baholashga qaratiladi. Yuqoridagilarga asosan aytish mumkinki, qovurg'alash va sun'iy turbulizatsiyalash samarasi bir xil qiymatli. Masalan tashqi ariqchalash yordamida hosil qilingan halqali diafragma shaklidagi turbulizatorlarning balandligi va qadami yuzani ortishiga qanday darajada ta'sir etishini ko'rsatuvchi misol keltiramiz. **3.32-rasmda** F/F_s nisbatni diafragmaning balandligi va qadamiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Yuzaning maksimal ortishi 22% ni tashkil etadi.



3.32-rasm. Ariqchali quvurlarda issiqlik uzatish yuzasini diafragma qadami va balandligiga bog'liq holda o'zgarishi.

§3.10. Oqimni sun'iy turbulizatsiyalash sharoitida harorat omilining ta'siri.

Silliq va sun'iy turbulizatorli quvurlarda turbulent oqimi noizotermikligini issiqlik almashinuv va gidravlik qarshilikka ta'siri turlicha bo'ladi. Shuning uchun issiqlik almashinuvini jadallashtirishni tadqiqot

qilishda sun'iy turbulizatsiyalash sharoitida noizotermiklik ta'sirini o'rganish muhim masalalardan biri hisoblanadi. Ariqchali quvurlarda oqim noizotermikligini gidravlik qarshilik koeffitsiyentiga ta'sirini baholash uchun suvning oqimida o'tkazilgan tadqiqot natijalarini namuna sifatida ko'rib chiqish mumkin [78].

Quvurlarda sun'iy turbulizatorlarni mavjud bo'lishi umumiy holda harakat miqdorini yig'indi uzatilishidagi turbulentli tashkil etuvchilarning ulushini oshiradi. Bunda molekulyar uzatish ulushi kamayadi. Chegaraviy holatlarda (to'liq g'adir-budir quvurlarda) avtomodellik qonuniyatiga erishiladi va qarshilik koeffitsiyenti Re ga bog'liq bo'lmaydi. Tabiiyki, ushbu sharoitlarda haroratlar maydoni tezliklar maydoniga ta'sir etmaydi.

Hozirda qarshilik qonuniyati Blazius qonuniyatidan (gidravlik silliq quvurlar) avtomodel qonuniyatigacha (to'liq g'adir-budirlik) o'zgaradigan quvurlarda, oqimning noizotermikligini qarshilik koeffitsiyentiga ta'siri to'g'risidagi savol ko'p qiziqish uyg'otadi.

E.K. Kalinin va boshqalarning [42] tajribalarida noizotermiklikka $q_d = \text{sonst}$ bo'lganda suvning turbulent oqimiga $q_d = 0 \dots 4,5 \cdot 10^5 \text{ Vt/m}^2$ oraliqda issiqlikni uzatish yo'li bilan erishiladi, bunda $Re = 10^4 \dots 10^5$ oraliqda nisbat $\mu_o/\mu_d = 1 \dots 2,5$ qiymatlarda o'zgaradi. Izotermik sharoitda silliq quvurdagi dastlabki o'lchashlardan olingan natijalar amalda Blazius qonuni bilan mos keladi, bunda tajriba nuqtalarining og'ishi $\pm 3,5\%$:

$$\xi_s = \frac{0,316}{Re^{0,254}} \quad (3.24)$$

Silliq quvurlarda gidravlik qarshilik bo'yicha olingan tajriba ma'lumotlari $\xi_s/\xi_{os} = f(\mu_o/\mu_d)$ bog'liqlik shaklida umumlashtirilgan va tajriba nuqtalarining $\pm 5\%$ ga og'ishida quyidagi bog'liqlik olindi:

$$\frac{\xi_s}{\xi_{os}} = \left(\frac{\mu_o}{\mu_d}\right)^{n_o} = \left(\frac{\mu_d}{\mu_o}\right)^{1/3} \quad (3.25)$$

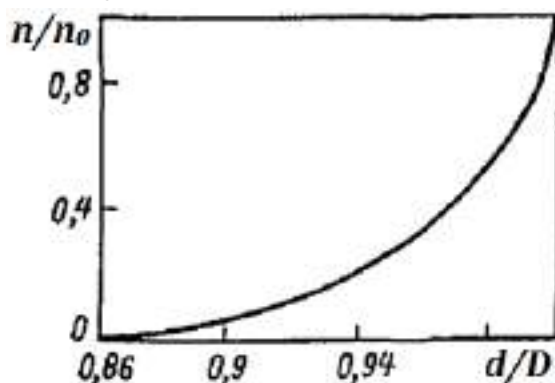
yoki

$$\xi_s = \left(\frac{0,316}{Re^{0,254}}\right) \left(\frac{\mu_d}{\mu_o}\right)^{1/3} \quad (3.26)$$

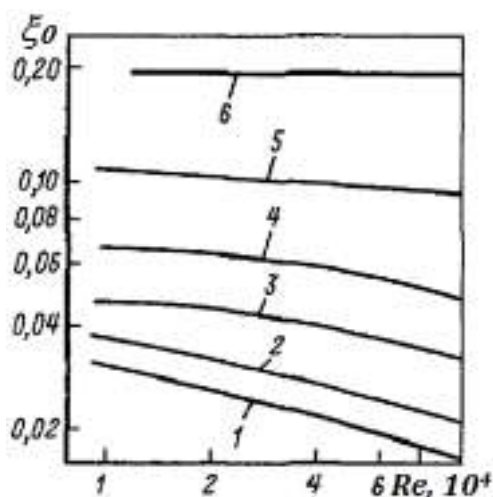
Balandligi turlicha va qadami $t/D = 0,5$ o'zgarmas bo'lgan diafragmali ariqchali quvurlarda olingan tajriba ma'lumotlarini qayta ishlash natijalari 3.33-rasmda keltirilgan.

Turbulizatorlarning balandligini ortishi bilan oqimning noizotermikligini gidravlik qarshilik koeffitsiyentiga ta'siri birdaniga kamayadi. 3.34-rasmdan ko'rinib turibdiki, qarshilik qonuniyati

avtomodellikka yaqinlashadi. Shuningdek, $d/D = 0,875$ va $t/D = 0,5$ diafragmalı quvur $Re = 10^4 \dots 10^5$ oraliqda to'liq g'adir-budirli, undagi gidravlik qarshilik ko'effitsiyenti esa noizotermiklikka bog'liq bo'lmaydi.



3.33-rasm. μ_o/μ_d dagi daraja ko'rsatkichini $t/D = 0,5$ qadamli diafragma balandligiga bog'liqligi.



3.34-rasm. Diafragmaning balandligi turlicha bo'lgan quvurlarda gidravlik qarshilikning izotermiklik ko'effitsiyentini bog'liqliklari:

Egri chiziq nomeri	1	2	3	4	5	6
d/D	silliqlik	0,983	0,965	0,943	0,922	0,875

μ_o/μ_d nisbatdagi daraja ko'rsatkichini $t/D = 0,5$ qadamli diafragmaning balandligiga bog'liqligi $d/D = 0,87 \dots 1$ oraliq uchun quyidagi tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$\frac{n}{n_o} = \left(\frac{d}{D}\right)^{26,4} \quad (3.27)$$

Qadamni kamayishi bilan qashilik qonuniyati avtomodelliga yaqinlashadi, natijada $d/D = 0,94$ va $t/D = 0,5 \dots 4$ uchun noizotermiklikning ta'siri kamayadi:

$$\frac{n}{n_o} = 10^{\frac{0,369}{t/D} (1,217 + \lg \frac{t}{D})} \quad (3.28)$$

Shunday qilib, umumiy holatda sun'iy turbulizatorli quvurlarda suyuqliklarni noizotermik turbulent oqimida gidravlik qarshilik koeffitsiyentini quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$\xi = \xi_0 \left(\frac{\mu_d}{\mu_o} \right)^n \quad (3.29)$$

yoki

$$\frac{\xi}{\xi_s} = \left(\frac{\xi_0}{\xi_{os}} \right) \left(\frac{\mu_d}{\mu_o} \right)^{n_0(n/n_0-1)} \quad (3.30)$$

bu yerda $\xi_0 = f_1(d/D, t/D, Re)$; turbulizatorlarni aniq shakli uchun $n/n_0 = f_2(d/D, t/D)$.

(3.27), (3.28) va (3.30) tenglamalarni solishtirish asosida quyidagini aytish mumkin, ya'ni g'adir-budir yuzali yoki sun'iy turbulizatorli quvurchali IAQlarining gidravlik qarshiligini hisoblashda, shuningdek jadallashtirish usulining samaradorligini baholashda gidravlik qarshilikka noizotermiklikni tasnifiy ta'sirlarini inobatga olish zarur. Ushbu holatni inobatga olmaslik sezilarli xatoliklarga olib kelishi mumkin, misol uchun tomchili suyuqliklarni qizdirishda ikkinchi tomonda gidravlik qarshilikni kamayishini aytish mumkin. Masalan $d/D = 0,9$ va $t/D = 0,5$ diafragmali quvurlar uchun $\mu_d/\mu_o = 0,3$ ga mos keluvchi issiqlik rejimlarida, silliq quvur uchun (3.25) tavsiya bo'yicha noizotermiklik ta'sirini inobatga olish haqiqiy qarshilikni 50% ga pasaytiradi. Keltirilgan natijalar sun'iy turbulizatsiyalash sharoitida oqim noizotermikligining ta'sirini o'rganishda zarur hisoblanadi.

Nazorat savollari.

1.

IV-BOB. ISSIQLIK ALMASHINUV QURILMALARINING QUVURLARIDA ISSIQLIK ALMASHINUVINI JADALLASHTIRISH

§4.1. Konvektiv qizdirish yuzalarining energetik samaradorligi.

Issiqlik almashinuv yuzasida issiqlikni uzatish jarayoni doimo energiya ko'chishi bilan kuzatiladi, bunda issiqlik tashuvchini haydashga zarur miqdorda energiya sarflanadi. Oddiy holatda bunday ko'chish qizdirish yuzasi yaqinida turbulentli ishqalanish natijasida yuzaga keladi, bu esa issiqlik va impuls uzatilishi bilan bevosita bog'liq. Bu bog'liqlik Reynolds analogiyasi deb ataladi: $Pr_{tur} = Pr = 1$ bo'lganda $St = C_f/2$ (quvurlar uchun $St = \xi/8$). Reynolds analogiyasi bajarilgan holatda harakat va issiqlik almashinuv jarayonlarini amalga oshirish uchun sarflangan zarur energiya miqdori minimal bo'ladi. Umumiy holatda nafaqat qizdirish yuzasi yaqinida, balki yuza bo'ylab energiyani ko'chishi (tarqalishi) sodir bo'ladi.

Issiqlik tashuvchilarni haydash bilan bog'liq gidrodinamik yo'qotilishlar umumiy sarflangan energiyadan aniqlanadi. Bunday baholash Reynolds analogiyasini buzadi (masalan, silindr va quvurlar to'plamini ko'ndalang yuvishda). Ushbu tasavvurlar asosida prof. A.A. Guxman [79] energetik takomillashgan yuza tushunchasini kiritgan bo'lib, u quyidagicha aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{St}{\left(\frac{\Delta p}{\rho w^2}\right)} \quad (4.1)$$

ε -kattalik konvektiv yuzaning energetik samaradorlik ko'rsatkichi. Shubhasiz, Reynolds analogiyasi bajarilgan holatda $\varepsilon = 1$. Agar $\varepsilon > 1$ yoki $\varepsilon < 1$ bo'lsa, u holda Reynolds analogiyasi buziladi. Bunda ε qancha katta bo'lsa, yuza shunchalik energetik samarador hisoblanadi. Yuza sifatini issiqlik va gidrodinamik baholash uchun akademik M.V. Kirpichev energetik koeffitsiyentdan foydalanishni taklif etgan:

$$E = \frac{Q}{N} \quad (4.2)$$

Energetik samaradorlik ko'rsatkichi turli konvektiv qizdirish yuzalarini taqqoslash uchun muhim hisoblanadi. Konvektiv qizdirish yuzalarini taqqoslashning bir nechta metodikalari mavjud. Biroq issiqlik almashinuv yuzalarining samaradorligini qiyosiy baholashning barcha metodikalari asosida A.A. Guxman va M.V. Kirpichevning g'oyalari yotadi.

Issiqlik almashinuv yuzasini to'rtta kattalik yordamida xarakterlash mumkin: issiqlik oqimi Q [Vt], issiqlik tashuvchini haydashga sarflangan quvvat N [Vt], issiqlik almashinuv yuzasi F [m^2] va issiqlik almashinuv yuzasining hajmi V [m^3]. Agar solishtirma xarakteristikaga o'tilsa, u holda:

$$q = \frac{Q}{F} = \alpha \Delta t \quad (4.3)$$

$$n = \frac{N}{F} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{V}{F} \quad (4.5)$$

bu yerda β -issiqlik almashinuv yuzasining ixchamliligi.

Agar haroratlar farqi Δt ma'lum va o'zgarmas bo'lsa, u holda samaradorlik q bilan emas, balki issiqlik berish koeffitsiyenti α bilan xarakterlanadi. Ushbu solishtirma xarakteristikalar issiqlik almashinuv yuzasida kechadigan jarayonlarning jadalligini to'liq xarakterlaydi va ular yordamida energetik samaradorlikni baholash mumkin. α , n va β lardan tuzilgan turli munosabatlar ko'p sonli savollarga javob berishni talab etadi. Masalan, $\alpha = f(n)$ bog'liqlik yordamida $n = idem$ bo'lganda issiqlik berish jadalligi bo'yicha va $\alpha = idem$ bo'lganda solishtirma energetik harajatlar bo'yicha yuzalarni taqqoslash mumkin.

Energetik samaradorlik koeffitsiyenti E belgilangan haroratlar farqida Δt , α va n kattaliklar bilan bir xil ma'noli:

$$E = \frac{\alpha}{n} \quad (4.6)$$

Biroq E koeffitsiyentni tezlikka bog'liqligi ushbu mezonni turlicha ma'noli qiladi (α va n ga kiruvchi tezlik ko'rsatkichlarini turlichaligi hisobiga). Boshqacha aytganda, turli yuzalar uchun hisoblangan E koeffitsiyentning katta qiymati uning shubhasiz afzalligini bildirmaydi. Chunki E issiqlik tashuvchilarning tezligini kamayishi bilan ortadi. Bunday bog'liqlik issiqlik tashuvchilarning kichik tezliklarini maqbulligi to'g'risidagi noto'g'ri tasavvurga olib keladi (bunda ham issiqlik almashinuv yuzasi ham kapital harajatlar katta bo'lib, iqtisodiy foydasiz hisoblanadi).

E koeffitsiyent bo'yicha energetik samaradorlikni baholashda turlicha ma'nolilikdan qochish "boshqa bir xil" tamoyili bo'yicha samaradorlik ko'rsatkichlarini hisoblash metodikasini ishlab chiqishga turtki bo'ldi, ushbu metodika birinchi marta A.A. Guxman tomonidan ilmiy asoslandi va V.A. Kirpikov tomonidan rivojlantirildi. Ushbu metodikaning asosida ham qaralayotgan konvektiv qizdirish yuzasi uchun issiqlik-gidravlik bog'liqlikdan foydalanish yotadi.

Kanallarda issiqlik tashuvchilarning harakatida issiqlik berish va qarshilik uchun darajali munosabatlardan kelib chiqib quyidagicha:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = C Re^n Pr^{0,4} \quad (4.7)$$

$$\xi = \frac{c_p}{Re^k} \quad (4.8)$$

Yuqoridagilardan kelib chiqib, fizik xususiyatlar o'zgarmas, diametrlar bir xil va haroratlar farqlari teng bo'lganda, shuningdek $n = idem$ va $k = idem$ bo'lganda:

$K_F = 1, K_N = 1$ bo'lganda

$$K_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}}{\left(\sqrt[3]{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1} \left(\frac{c_{p,2}}{c_{p,1}}\right)^{\frac{k}{3-k}}}\right)^n} = \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}^{\frac{n}{3-k}}}{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1}^{\frac{n}{3-k}}} \quad (4.9)$$

$K_Q = 1, K_N = 1$ bo'lganda

$$K_F = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}^{\frac{3-k}{3-n-k}}}{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1}^{\frac{n}{3-n-k}}} \quad (4.10)$$

$K_Q = 1, K_F = 1$ bo'lganda

$$K_N = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}^{\frac{3-k}{n}}}{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1}^{-1}} \quad (4.10)$$

“Boshqa bir xil” shartlardan ko'rsatkichlarning har biri uchun Reynolds sonlarining nisbati aniqlanadi. $K_F = 1, K_N = 1$ shartdan K_Q uchun quyidagini olamiz:

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \left(\frac{c_{p,2}}{c_{p,1}}\right)^{-\frac{1}{3-k}} \quad (4.11)$$

$K_Q = 1, K_N = 1$ shartdan K_F ko'rsatkich uchun:

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{\left(\frac{c_{p,2}}{c_{p,1}}\right)^{-\frac{1}{3-k}}}{K_F^{\frac{1}{3-k}}} \quad (4.12)$$

$K_Q = 1, K_F = 1$ shartdan K_N ko'rsatkich uchun:

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \left(\frac{c_{p,2}}{c_{p,1}}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (4.13)$$

1 indeksli kattalik etalon kanalga (odatda silliq kanal), 2 indeksli kattalik jadallashtirilgan kanalga taalluqli. Odatda kanallarda turbulent oqimida $n = 0,8$, $k = 0,25$. U holda, masalan K_Q ga mos keladigan $\frac{Re_2}{Re_1}$ quyidagiga teng bo'ladi:

$$K_Q = \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}}{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1}^{0,267} \left(\frac{C_{p,2}}{C_{p,1}}\right)^{0,024}} \approx \frac{\left(\frac{Nu_2}{Nu_1}\right)_{Re_1}}{\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)_{Re_1}^{0,267}} = f(Re_1) \quad (4.14)$$

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \left(\frac{C_{p,2}}{C_{p,1}}\right)^{-0,36}$$

Yuqorida ko'rsatilgan formulalar jadallashgan va silliq kanallarni taqqoslash uchun [38] ishda foydalanilgan. Darajali munosabatlardan kelib chiqib, silliq quvurli shaxmatsimon to'plamda issiqlik berish va qarshilik [80]:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = C_s C_z Re^n Pr^{0,33} \quad (4.15)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{\rho w^2}{2}} = C_p Re^k (Z_2 + 1) \quad (4.16)$$

(4.15) va (4.16) tenglamalardan foydalanib, K_Q , K_N va K_F uchun analitik bog'liqliklarni olish mumkin, ular silliq quvurli shaxmatsimon to'plam uchun issiqlik oqimi, haydashga quvvat miqdori va qizdirish yuzasiga mos keluvchi energetik samaradorlikning nisbiy ko'rsatkichlarini ifodalash imkonini beradi:

$K_F = 1, K_N = 1$ bo'lganda

$$K_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{C_{s2} C_{z2}}{C_{s1} C_{z1}} \frac{Re_2^{n2}}{Re_1^{n1}}$$

$K_Q = 1, K_N = 1$ bo'lganda

$$K_F = \frac{F_2}{F_1} = \frac{C_{s1} C_{z1}}{C_{s2} C_{z2}} \frac{Re_1^{n1}}{Re_2^{n2}}$$

$K_Q = 1, K_F = 1$ bo'lganda

$$K_N = \frac{N_2}{N_1} = \frac{C_{p2}}{C_{p1}} \frac{Re_2^{k_2+2}}{Re_1^{k_1+2}} \frac{(Z_{2,2}+1)G_2}{(Z_{2,1}+1)G_1}$$

1 indeksli kattaliklar xuddi shu harorat ($\Delta t_1 = \Delta t_2$), diametr ($d_1 = d_2$) va issiqlik tashuvchi ($Pr_1 = Pr_2$) shartidagi "etalon" shaxmatsimon to'plamga taalluqli. 2 indeksli kattaliklar tadqiqot qilinayotgan shaxmatsimon to'plamga taalluqli. Reynolds sonlarining mos nisbatlari (Re_2/Re_1) "boshqa bir xil" shartdan aniqlanadi. $G_1 = G_2$, ya'ni $G = idem$ bo'lganda tadqiqot qilinayotgan va "etalon" to'plam uchun quyidagicha [81]:

$$K_F = \frac{C_{S1}C_{Z1}}{C_{S2}C_{Z2}} \left[\frac{C_{p2}}{C_{p1}} \right]^{\frac{n_2}{k_2+2}} \left[\frac{K_F^{\frac{n_2-1}{n_2}} \left[\frac{C_{S1}C_{Z1}}{C_{S2}C_{Z2}} \right]^{\frac{1}{n_2}} Re_1^{\frac{n_1-n_2}{n_2}} \left(\frac{a_2-1}{a_1-1} \right)^{Z_{2,1}+1}}{Z_{2,1}+1} \right]^{\frac{n_2}{k_2+2}} \quad (4.17)$$

$K_Q = 1, K_N = 1$ bo'lganda

$$\frac{Re_2}{Re_1} = K_F^{\frac{1}{n_2}} \left[\frac{C_{S1}C_{Z1}}{C_{S2}C_{Z2}} \right]^{\frac{1}{n_2}} Re_1^{\frac{n_1-n_2}{n_2}} \quad (4.18)$$

$$\frac{Z_{2,2}+1}{Z_{2,1}+1} = \frac{K_F \left(\frac{a_2-1}{a_1-1} \right)^{\frac{Re_2}{Re_1} Z_{2,1}+1}}{Z_{2,1}+1} \quad (4.19)$$

$$\frac{(B \times L)_2}{(B \times L)_1} = K_F \frac{a_2}{a_1} \left[\frac{Z_{2,2}}{Z_{2,1}} \right]^{-1} \quad (4.20)$$

K_Q va K_N uchun ham xuddi shunday ifodalarni olish mumkin. Shubhasiz, K_F va K_N kichik va K_Q katta bo'lsa konvektiv qizdirish yuzasi samarador hisoblanadi. K_Q , K_N va K_F ko'rsatkichlar qiymatlari “etalon” yuzani tanlashga bog'liq bo'lib, “etalon”ning issiqlik-gidravlik xarakteristikasi qancha yomon bo'lsa, tadqiqot qilinayotgan yuzaning samaradorligi shuncha yuqori bo'ladi. Boshqacha aytganda, K_Q , K_N va K_F ko'rsatkichlar nisbiy hisoblanadi va ikkita yuzaning samaradorligini ularning qiymatlari bo'yicha tahlil qilish faqatgina bir xil “etalon”ni tanlash bilan amalga oshiriladi.

Shuningdek K_Q , K_N va K_F qiymatlar Re_1 ning dastlabki qiymatiga ham bog'liq, shuning uchun yuzalarning samaradorligi “etalon”dagi Reynolds soniga bog'liq holda turlicha bo'lishi mumkin. Agar “etalon” sifatida taqqoslanayotgan konvektiv yuzalardan birortasi tanlansa, u holda K_Q , K_N va K_F larning hisoblangan qiymatlari bo'yicha qaysi yuza energetik samaradorlik nuqtai nazaridan eng yaxshi ekanligini birdaniga aniqlash mumkin.

§4.2. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish to'g'risida umumiy ma'lumot.

Hozirgi vaqtda energotexnologik qurilmalarning energiya va resurs tejamkorligini oshirishning asoslangan texnik va iqtisodiy yo'llaridan biri-IAQlarini takomillashtirish hisoblanadi [82].

Hozirgi vaqtda sanoat va energetika sohasidagi issiqlik almashinuv qurilmalarining taxminan 80÷90% qismini asosan quvurchali IAQlari tashkil etadi. Ularning asosiy afzalligi-ishchi harorat va bosim ko'lamining

kengligi, sanoatning turli sohalarida foydalanish imkoniyati, konstruksiyasini soddaligi va xizmat ko'rsatishda osonligi hisoblanadi. Ammo sanoatda qo'llanilayotgan quvurchali IAQlarining aksariyat qismini energetik ko'rsatkichlari talab darajasida emas [83, 84].

IAQsining issiqlik xarakteristikalarini ortishiga, energiya va resurs tejalishiga, qurilma narxini arzonlashishiga hamda ekologiyaga ta'sirini kamayishiga quyilgan texnik talablar, IAQlarida issiqlik almashinuvini jadallashtirishning turli usullarini ishlab chiqishga va foydalanishga olib keldi. Ushbu usullar issiqlik almashinuvini jadallashtirish deb nomlandi [85]. Demak, IAQlarining quvurlarida issiqlik almashinuvini jadallashtirish-IAQsining tashqi o'lchamlarini kichraytirish va massasini kamaytirishning eng oqilona usuli hisoblanadi [86].

Dunyo amaliyotida issiqlik almashinuvini jadallashtirish bilan IAQlarining energiya samaradorligini oshirish bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borilgan. Dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalari, jumladan University of Michigan (AQSH), Moskva energetika instituti (Rossiya), Moskva aviatsiya instituti (Rossiya), Kazan davlat texnika universiteti (Rossiya), Toshkent davlat texnika universiteti (O'zbekiston), Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti (O'zbekiston) shuningdek ilmiy ishlab chiqarish birlashmalarida «Babcock Wanson» (AQSH), «Omnimat» (Germaniya), «HRS Group» (Ispaniya), «Blue-Ridge Company» (AQSH), «Energy Transfer MDE» (AQSH), «UK Exchangers Ltd» (Buyuk Britaniya), «Osaka Steel Tube» (Yaponiya), shuningdek Rossiyada «Gidrotermal» MCHJ, «Uralkotlomash» YOAJ, «Biyskenergomash» MCHJ va boshqalarda keng qamrovli ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda.

Dunyoning yetakchi olimlari, jumladan B.A. Veyya, V.K. Shukin, A.F. Kovalnogov, V.K. Migaylar shnekli oqim buragichlarni ishlab chiqishgan, A. Klachak, Ye. Smitberg, A.Ye. Bergles, V.K. Yermolin, M.X. Ibragimovlar buralgan lentali jadallashtirgichlarni ishlab chiqishgan, D.K. Kern, A.D. Kraus, A.R. Gay, V.K. Migay, I.F. Novojilovlar plastinali spiralsimon o'rnatmalarni ishlab chiqishgan, O. Kumar, A. Klachak, Y.G. Nazmeyev, N.V. Zozulyalar spiralsimon simli prujinani taklif qilishgan, E.K. Kalinin, G.A. Dreyser, Y.A. Kuzma-Kichta, S.A. Yarxolar quvur yuzasini ko'ndalang va spiralsimon nakatkalash usulini ishlab chiqishgan, Y.F. Gortishev, I.A. Popov, V.V. Olimpiyev, A.A. Xalatovlar quvur yuzasini chuqurlash orqali issiqlik almashinuvini jadallashtirish usulini ishlab chiqishgan.

O'zbekistonda issiqlik va massa almashinuv qurilmalarining energiya samaradorligini oshirishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqotlarga muhim hissa qo'shganlar: R.A. Zohidov, N.R. Yusupbekov, D.N. Muxiddinov, R.R. Avezov, S.G. Zokirov, Z.S. Salimov, Yo.S. Abbosov, G'.N. Uzoqov, R.P. Babaxodjayev, U.X. Ibragimov va boshqalar. IAQsinining energiya samaradorligini oshirish uchun lokal turbulizatoridan foydalanish D.N. Muxiddinov, R.P. Babaxodjayev va U.X. Ibragimovlar tomonidan tadqiqot qilingan va ilmiy natijalarga erishilgan.

Hozirgi vaqtga qadar konvektiv issiqlik almashinuvini jadallashtirishning juda ko'p usullari taklif etilgan va tadqiqot qilingan [87]. Issiqlik almashinuvini jadallashtirishning o'n olti xil usullari tasniflangan hamda passiv va aktiv usullarga ajratilgan [88]. Ushbu ikkita kategoriyaga kiruvchi issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullari 4.1-jadvalda keltirilgan.

4.1-jadval

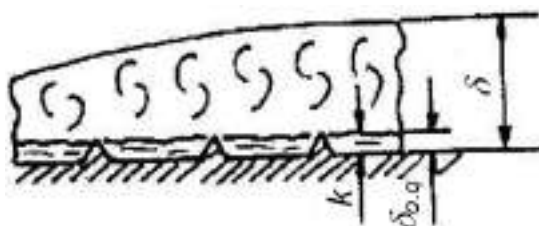
Issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullarining tasnifi

Passiv usullar	Aktiv usullar
1. Ishlov berilgan yuzalar	1. Mexanik aralashtirish
2. G'adir-budir yuzalar	2. Yuzalarni vibratsiyalash
3. Rivojlantirilgan yuzalar	3. Oqim pulsatsiyasi
4. Aralashtiruvchi moslamalar	4. Elektrostatik maydon
5. Oqimni burovchi moslamalar	5. Injeksiya
6. Zmeyeviklar	6. So'rish
7. Sirt taranglik moslamasi	7. Purkovchi moslamalar
8. Suyuqliklar uchun qo'shimchalar	
9. Gazlar uchun qo'shimchalar	
Kombinatsiyalashgan usullar	
Bir vaqtda ikki yoki undan ko'p passiv yoki aktiv usullardan foydalanish	

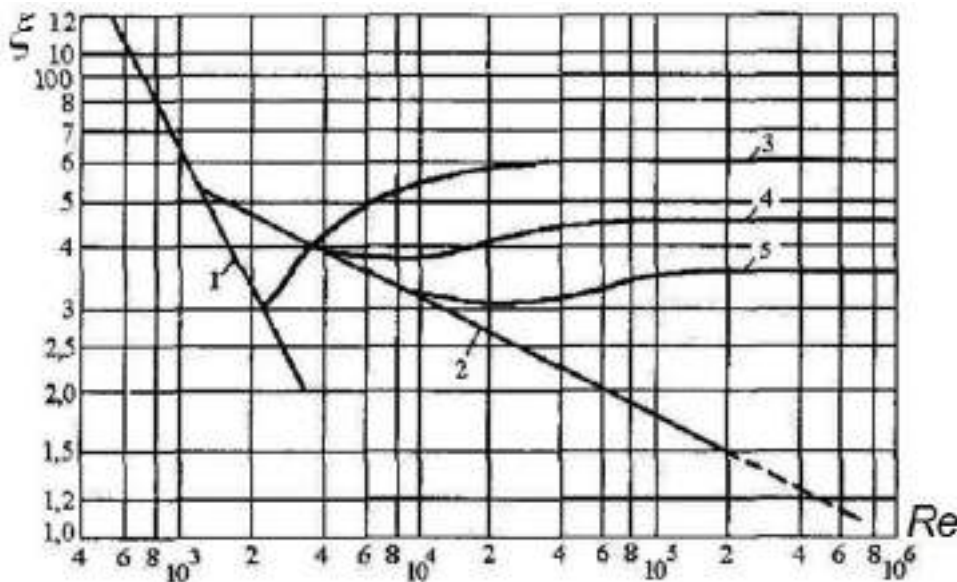
Usullarning asosiy farqi shundaki, passiv usullar jadallashtirish uchun tashqi energiya uzatilishini talab etmaydi. Aktiv usullarda tashqi energiya uzatish orqali oqimga ta'sir etiladi va quvurlarda issiqlik almashinuvi jadallashtiriladi. Issiqlik almashinuvini jadallashtirish usullarini qo'llab har qanday IAQsini ishalb chiqish natijasida quyidagilarga erishiladi: metall sig'imi kamayadi, tashqi o'lchamlari kichrayadi, yuzalardagi haroratlar pasayadi, ishonchlilik va moslamaning ishlash davomiyligi ortadi.

§4.3. Yuza relyefini o'zgartirish hisobiga issiqlik almashinuvini jadallashtirish.

Sanoat IAQlarida ishlatiladigan quvur va kanallarning ichki yuzasi hech qachon silliq bo'lmaydi. Amaliyotda har doim yuza relyefini ideal sillqlikdan og'ish joyi mavjud. Ushbu og'ishning (g'adir-budirlik) balandligi – k odatda kichik va qovushqoq ost qatlam qalinligi bilan bir xil o'lchamli ($k \approx \delta_{o.q.}$) (4.1-rasm). G'adir-budirlik tabiiy (ishlab chiqarish texnologiyasi va ekspluatatsiya sharoitiga bog'liq holda) va sun'iy (quvurning ichki yuzasida maxsus rezba, ariqcha, ko'ndalang bo'rtiqlar va hokazolarni hosil qilish). Umumiy holda g'adir-budirlik balandlik k , bo'rtiqlarning shakli, ularning yuza birligidagi soni va o'zaro joylashuvi bilan xarakterlanadi. Sun'iy turbulizatsiyalashning eng sodda shakli – bu qum shaklidagi g'adir-budirlikdir. Qum shaklidagi g'adir-budirlikli quvurlarda oqim va qarshilik koeffitsiyenti ξ Nikuradze tomonidan tadqiqot qilingan.



4.1-rasm. G'adir-budir yuzani yuvilish sxemasi, $k \approx \delta_{o.q.}$.



4.2-rasm. G'adir-budir quvurlarning qarshilik qonuniyati:

1-laminar oqimdagi qarshilik qonuniyati $\xi = 64/Re$ (Puazeyl qonuniyati);

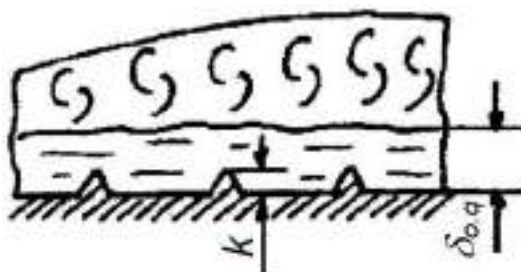
2-silliq quvurda turbulent oqimidagi qarshilik qonuniyati

$\xi = 0,3164/Re^{0,25}$ (Blazius qonuniyati); 3-5-qum shaklidagi g'adir-budirlikli quvur uchun tajribaviy egri chiziqlar ($k/r_0 = 0,002 - 0,07$).

$Re \leq 2 \cdot 10^3$ bo'lganda quvurda laminar oqim rejimi kuzatiladi, bu rejimda ξ va ΔP qiymatlar k kattalikka bog'liq emas hamda tajriba nuqtalari 4.2-rasmdagi (1) bog'liqlikka mos keladi. $Re \geq 2 \cdot 10^3$ bo'lganda quvurda turbulent oqim rejimi kuzatiladi, bu rejimda ξ va ΔP qiymatlar k kattalikka bog'liq (tajriba nuqtalari (2) bog'liqlikdan og'adi).

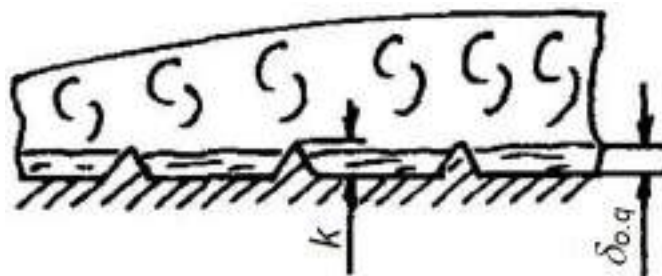
Bunda quyidagi oqim rejimlari farqlanadi:

1. G'adir-budirlik namoyon bo'lmaydigan rejim (gidravlik silliq quvur rejimi). Ushbu rejimda tajriba nuqtalari 2 hisobiy bog'liqlik bilan mos keladi va quvurning g'adir-budirlik qarshiligi xuddi silliq quvurniki kabi bir xil bo'ladi. Buni quyidagicha izohlash mumkin, ya'ni g'adir-budirlik bo'rtiqlari qovushqoq ost qatlamning ichida ($k < \delta_{o.q}$) joylashgan bo'lib, uzluksiz yuvib o'tish sodir bo'ladi (4.3-rasm).



4.3-rasm. G'adir-budir yuzani yuvilish sxemasi, ($k < \delta_{o.q}$).

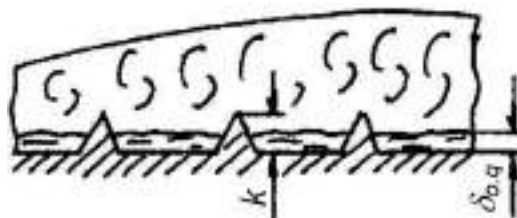
2. O'tish rejimi (g'adir-budirlik qisman namoyon bo'ladigan rejim). Ushbu rejimda tajriba nuqtalari 2 hisobiy bog'liqlikdan og'adi. Buni quyidagicha izohlash mumkin, ya'ni g'adir-budirlik elementlari qovushqoq ost qatlam qalinligidan chiqib ketadi ($k > \delta_{o.q}$). Chiqib qolgan qismi uzlukli yuviladi, bu esa ξ , (Δp) ni ortishiga olib keladi. Ushbu rejimda Re ni ortishi bilan ξ ortadi (4.4-rasm).



4.4-rasm. G'adir-budir yuzani yuvilish sxemasi, ($k > \delta_{o.q}$).

3. G'adir-budirlik to'liq namoyon bo'ladigan rejim (avtomodel rejim). Ushbu rejimda tajriba nuqtalari abssissa o'qiga parallel to'g'ri chiziq bo'yicha yotadi, ya'ni ξ qiymat Re ga bog'liq bo'lmaydi (qarshilik koeffitsiyenti Re soniga nisbatan avtomodelli). Buni quyidagicha izohlash

mumkin, ya'ni g'adir-budirlik elementlari to'liq qovushqoq ost qatlamdan tashqarida joylashgan bo'lib, ost qatlamni buzadi ($k \gg \delta_{o,q}$), natijada ξ qiymat Re ga bog'liq bo'lmasdan faqatgina k kattalik bo'yicha aniqlanadi. Ushbu rejimda ishqalanish qarshilikgi emas, balki g'adir-budirlik elementlarining shaklini qarshiligi asosiy rol ni uynaydi (4.5-rasm).



4.5-rasm. G'adir-budir yuzani yuvilish sxemasi, ($k \gg \delta_{o,q}$).

Avtomodel rejimda g'adir-budir quvurda tezliklar profili silliq quvurniki kabi bir xil bo'lib, logarifmik qonunga bo'ysunadi. Bunda quvur kesimi bo'yicha o'rtacha tezlik uchun quyidagi munosabat o'rinli:

$$\frac{w}{v_*} = 2,5 \ln \frac{r_0}{k} + 4,75 \quad (4.21)$$

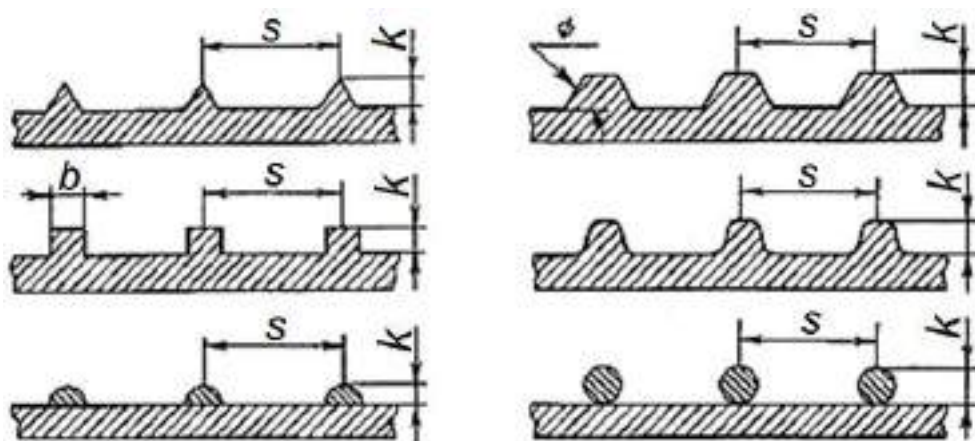
Agar $v_* = \sqrt{\frac{\tau_d}{\rho}}$, $\tau_d = \frac{\xi}{8} \rho w^2$ ekanligi inobatga olinsa, u holda (4.21) ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\xi = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{r_0}{k} + 1,68\right)^2} \quad (4.22)$$

Nikuradze o'lchashlari bilan taqqoslash shuni ko'rsatdiki, tajribaga eng yaxshi mos kelish uchun 1,68 sonini 1,74 ga o'zgartirish kerak. Shunday qilib, avtomodelli rejimda ishqalanish qarshiligi koeffitsiyenti quyidagicha:

$$\xi = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{r_0}{k} + 1,74\right)^2} \quad (4.23)$$

Sun'iy uzlukli g'adir-budirlikni hosil qilish, nafaqat kanallarda, balki yassi va silindrsimon yuzalarda ham issiqlik berishni oshirishning eng samarali usullaridan biri hisoblanadi. Sun'iy g'adir-budirlikni oshirish konstruktiv jihatdan turlicha bo'lishi mumkin (4.6-rasm). Sun'iy uzlukli g'adir-budirlikning har qanday shakli uchun yuvilish xarakteri har bir detal uchun farqlanadi. Agar g'adir-budirlik elementlari zich joylashgan bo'lsa, u holda ular orasida turib qolish zonalar hosil bo'lib, kam jadallashgan uyurmaviy harakatni xarakterlaydi (4.7-rasm). Turbulent oqimida uzlukli g'adir-budirlik elementini yuvilishi, oqimni uzilishi, uni devorga qayta birikishi va muvozanatli oqim sharoitiga intilishi bilan kuzatiladi. (4.8-rasm).



4.6-rasm. Sun'iy uzlukli g'adir-budirlikning turlari:
b-g'adir-budir yuzaning qalinligi; *s*-g'adir-budirlik qadami; *k*-g'adir-budirlik balandligi.



4.7-rasm. S/k ning kichik qiymatlarida sun'iy uzlukli g'adir-budirlikni yuvilish sxemasi.



4.8-rasm. S/k ning katta qiymatlarida sun'iy uzlukli g'adir-budirlikni yuvilish sxemasi.

G'adir-budir kanalda tezliklar profili silliq quvurga qaraganda kam to'ladi. Ishqalanish qarshiligi koeffitsiyenti kanalda o'rtacha tezlikni taqsimlanish qonuniyatidan topiladi:

$$\xi = \frac{8}{(5,75lg\frac{Y}{k} + 5,5 + D - G)^2} \quad (4.24)$$

bu yerda Y -devordan kanalning o'qigacha masofa (dumaloq quvurda $Y = r_0$, kengligi H bo'lgan yassi tirqishda, $Y = \frac{1}{2}H$); G -kanalning ko'ndalang kesimi shaklidan aniqlanuvchi geometrik parametr (dumaloq quvurda $G = 3,75$; yassi tirqishda $G = 2,5$); D -geometrik shakl va g'adir-budirlik qiymatidan aniqlanadi.

Kichik $b \left(\frac{k}{b} > 5 \div 10 \right)$ holatda ko'ndalang to'g'ri burchakli bo'rtiqlar shaklidagi g'adir-budirlik uchun:

$S/k \geq 10$ bo'lganda

$$D = 0,97 \left(\frac{S}{k} \right)^{0,53} - 5,5 \quad (4.25)$$

$S/k < 10$ bo'lganda

$$D = 4,45 \left(\frac{S}{k} \right)^{-0,13} - 5,5 \quad (4.26)$$

Sun'iy turbulizatorli quvurlarda barcha uchta rejimlar uchun qarshilik koefitsiyenti Kolebruk va Uayt tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{k}{r_0} + \frac{18,7}{Re \sqrt{\xi}} \right) \quad (4.27)$$

$k/r_0 \rightarrow 0$ bo'lganda (4.27) tenglama gidravlik silliq quvurlar uchun Prandtl formulasiga o'zgaradi:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 2 \lg(Re \sqrt{\xi}) - 0,8 \quad (4.28)$$

G'adir-budir kanallarda issiqlik berishni hisoblash.

1. $Re \leq 2000$ – laminar oqim rejimi. G'adir-budirlik bo'rtiqlari tinch laminar oqimi bilan yuviladi. Biroq g'adir-budirliklarni hosil qilinishi qizdirish yuzasi F va issiqlik oqimini Q ortishiga olib keladi.

2. $Re \geq 2000$ – aralash va turbulent oqim rejimi. Issiqlik uzatish yuzasi yuvib o'tuvchi suyuqlik bilan o'zaro ta'sirlashganda issiqlik almashinuvining asosiy termik qarshiligi chegara qatlamida o'rtachalanadi.

Bundan tashqari, turbulentli chegara qatlamda g'adir-budirlik elementini yuvilishi oqimni uzilishi, keyin uni devorga birikishi bilan kuzatiladi. Ko'p sonli o'lchashlarga muvofiq maksimal issiqlik berish oqimni birikish zonasida kuzatiladi. Shuning uchun g'adir-budirlik bo'rtiqlari orasidagi nisbiy masofa α kattalikka sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Umumiy holda quyidagicha yozish mumkin:

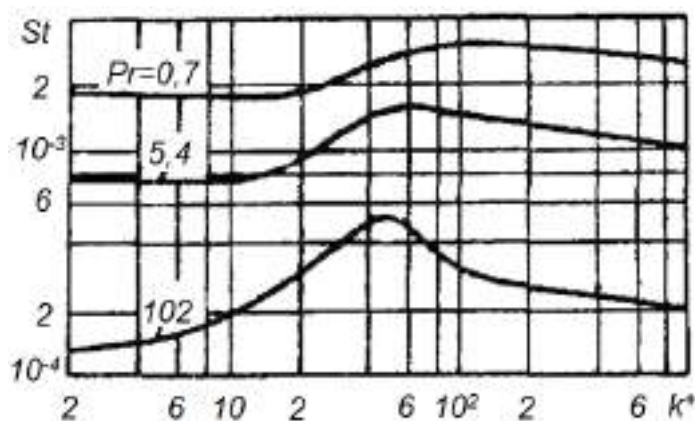
$$\alpha = f \left(k, F, \frac{S}{k}, Re, Pr \right)$$

Devordagi g'adir-budirlik balandligi, shakli va joylashish zichligini tanlashda muammo yuzaga keladi. Qovushqoq ost qatlamda haroratlar farqini Pr soniga bog'liqligini hisoblari shuni ko'rsatadiki, havo oqimida ($Pr = 0,7$) devor va harakatdagi oqim orasidagi haroratlar farqini 25% qismi qovushqoq ost qatlamga to'g'ri keladi, transformator moyini ($Pr = 55$) oqimida – 90%. Boshqacha aytganda, havo oqimida termik qarshilikning

asosiy qismi turbulentli chegara qatlamining o'tish sohasida o'rtachalanadi, suyuqliklarda esa ($Pr \gg 1$) – qovushqoq ost qatlamda sodir bo'ladi.

Shunday qilib, gazlarda issiqlik almashinuvini jadallashtirish samarasini olish uchun barcha devor oldi sohasini turbulizatsiyalash, Pr soni katta bo'lgan suyuqliklarda faqatgina qovushqoq ost qatlamni turbulizatsiyalash zarur.

Sun'iy g'adir-budirlikni xarakterlash uchun o'lchamsiz balandlikdan $k^+ = \frac{kv_*}{\nu}$ foydalaniladi. Issiqlik berishni k^+ ga bog'liqligi quyidagi ko'rinishda (4.9-rasm).



4.9-rasm. Transformator moyi, suv va havo oqimlarida g'adir-budir plastinadan issiqlik berish.

4.9-rasmdan ko'rinib turibdiki, transformator moyining ($Pr = 102$), shuningdek suvning ($Pr = 5,4$) oqimida $k^+ \leq 70$ bo'lganda issiqlik berishni maksimal ortishi o'tish rejimida kuzatiladi (g'adir-budirlikni qisman namoyon bo'lishi). k^+ ni yanada ortishi $St = \alpha / (\rho C_p w)$ sonini kamayishiga olib keladi. Havo oqimida esa k^+ ni ortishi bilan issiqlik berishni bir tekis ortishi kuzatiladi.

G'adir-budirlikni minal balandligini, ya'ni g'adir-budirlikni to'liq namoyon bo'lishini ta'minlovchi samarani quyidagi munosabatdan aniqlash mumkin:

tomchili suyuqliklar uchun:

$$k_{min}^+ = \frac{k_{min} v_*}{\nu} \approx 70 \quad (4.29)$$

Bundan quvurlar uchun quyidagicha:

$$k_{min} \cong \frac{70d \sqrt{\frac{8}{\xi_{g'.b}}}}{Re} \quad (4.30)$$

$0,3 \leq k/b \leq 15$ oraliqda S/k ning optimal nisbati:

$$\left(\frac{S}{k}\right)_{opt} = 9,9 \left(\frac{k}{b}\right)^{-0,345} \quad (4.31)$$

G'adir-budirlik to'liq namoyon bo'lgan rejimda g'adir-budir yuzalarning o'rtacha issiqlik berish koeffitsiyenti Diprey-Sabersk formulasi yordamida hisoblanishi mumkin:

$$St = \frac{\alpha}{(\rho c_p w)} = \frac{\xi/8}{(g-8,48)\sqrt{\xi/8+1}} \quad (4.32)$$

bu yerda $g = 5,19(k^+)^{0,2}Pr^{0,44}$ -qum shaklidagi g'adir-budirlik uchun; $g = 4,5(k^+)^{0,24}Pr^{0,44}$ -turli ko'rinishdagi ko'ndalang bo'rtiqlar shaklidagi ikki o'lchamli g'adir-budirlik uchun ($25 < k^+ < 300$).

Shuningdek quyidagi empirik bog'liqlikdan ham foydalanish mumkin [89]:

$$Nu = 0,022Re^{0,8}Pr^{0,47} \left(\frac{Pr_s}{Pr_d}\right)^{2,25} \varepsilon_{g'.b} \quad (4.33)$$

bu yerda $S/k > 13$ bo'lganda $\varepsilon_{g'.b} = e^{\frac{11}{S/k}}$; $8 < S/k < 13$, $Re = 5 \cdot 10^3 - 10^5$, $Pr = 1 - 80$ bo'lganda $\varepsilon_{g'.b} = e^{0,065 \frac{S}{k}}$.

G'adir-budirlik shakli turlicha bo'lgan va bir-biriga yaqin joylashgan sun'iy g'adir-budirlikli quvurlarda issiqlik berishni aniqlash uchun A.M. Yaglom va B.A. Kader [90] tomonidan quyidagi tenglama taklif etilgan:

$$Nu = \frac{\sqrt{\xi/8} Re Pr}{2,12 \ln \frac{r_0}{k} + 0,55 (Pr^{2/3} - 0,2) k_+^{1/2} + 10 - \frac{3,2}{\left(1 - \frac{k}{r_0}\right)^2 + 6,6 \sqrt{\xi/8}}} \quad (4.34)$$

bu yerda $k_+ = \frac{k}{d} Re \sqrt{\xi/8}$.

Kanallarda laminar oqim rejimida sun'iy g'adir-budirlikni issiqlik almashinuviga ta'siri. Ma'lumki, nisbatan kichik g'adir-budirlikda quvurlarda issiqlik almashinuvi va ishqalanish sun'iy g'adir-budirlik omiliga bog'liq bo'lmaydi. Buni quyidagicha izohlash mumkin, oqimning kichik tezliklarida devor oldi sohalarida g'adir-budirlik elementlari uzluksiz yuviladi va uyurma hosil bo'lmaydi. Biroq g'adir-budirlik k/r_0 ortganda, g'adir-budirlik elementlari yuqori tezlik bilan yuvilishni boshlaydi va Re ning mahalliy soni uzluksiz yuvilish diapazoniga mos kelmaydi. Shillarning ma'lumotlari bo'yicha bo'rtiq uchun $Re=50$ bo'lganda uyurma hosil bo'lishni boshlaydi va ushbu sharoit inobatga olinganda nisbiy g'adir-budirlikni kritik qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$(h/R_0)_{kr} \approx 5/\sqrt{Re} \quad (4.35)$$

Shunday qilib, nisbiy g'adir-budirlik kritikdan katta bo'lganda, devor oldi sohasida uyurmaviy harakat yuzaga keladi, biroq issiqlik uzatish jarayonida uning hissassi juda kichik bo'ladi.

To'lqinli g'adir-budirlik uchun (4.35) formula o'rinsiz bo'lib, $Pr \gg 1$ (qovushqoq muhitlar) bo'lgan muhitlar uchun g'adir-budirlikni qo'llash issiqlik almashinuvini sezilarli oshiradi.

Sappa va boshqalarning tadqiqotlarida sun'iy g'adir-budirlik qo'llanilgan halqali kanallarda transformator moyini oqimida va Reynolds sonining 180-600 diapazonida issiqlik berish 83% ga oshgan. Xaruelidagi ilmiy-tadqiqot markazida taram-taram yuzali quvurlarni ishlab chiqishgan. Ichki g'adir-budirlikli bunday quvurlar Re soni kichik bo'lgan qovushqoq suyuqliklar uchun qo'llanilganda issiqlik almashinuv yuzasi sezilarli kamayadi. Issiqlik almashinuvi 2-2,5 marta ortadi. [91] da keltirilgan ma'lumotlarga asosan bosimni ortishi quvur diametrini ortishi bilan qoplanadi.

$Pr \approx 1$ uchun oqim qalinligi bo'yicha termik qarshilikni bir tekis taqsimlanishi laminar oqimda turbulent oqimga nisbatan ancha yaxshi. Demak, ushbu holda gazning katta qatlamini qo'zg'atish zarur. Tajribalar shuni ko'rsatadiki, bunday holatda hosil bo'lgan laminar uyurmaviy soha kam issiqlik o'tkazuvchanligi bilan xarakterlidir. Bunda gidravlik qarshilik ham birdaniga ortadi. Nisbatan kichik bo'rtiqlar uchun gaz oqimida g'adir-budirlikni ta'siri natijasida Re_{kr} qiymat Re soning kichik qiymatlari tomonga o'tadi. Ushbu masala Kox va Nunnerning ishlarida to'liq keltirilgan. Ushbu ishlarning natijasiga asosan $Re_{kr} = 2900 m^2$, bu yerda $m = (d/D)^2$. Gaz oqimida kichik g'adir-budirliklar uchun g'adir-budirlikli quvurlarda issiqlik almashinuv jadalligi silliq quvurda issiqlik almashinuv jadalligiga yaqin bo'ladi (yoki kam bo'ladi).

Katta g'adirliklar (diafragma) uchun boshqa holat kuzatiladi. Katta balandlikli ($k/R = 0,7 \dots 0,8$) diafragmalar o'rnatilgan quvurda V.K. Migay tomonidan tajriba tadqiqotlari o'tkazilgan. Ushbu tajribaning natijalari yirik masshtabli laminar uyurmalarini issiqlik almashinuviga ta'sirini baholash imkoniyatini beradi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, ushbu holatda ($Re = 500$) issiqlik almashinuv jadalligi silliq quvurnikiga qaraganda bir necha marta kichik va amalda diafragmalar joylashgan masofaga bog'liq emas. Diafragmadan keyin sust sirkulyatsiyali turib qolish mavjud bo'lib, undagi termik qarshilik molekulyar issiqlik o'tkazuvchanlikdan aniqlanadi.

Shunday qilib, ko'rib chiqilgan geometriyali diafragmalar tizimi issiqlik almashinuvini jadallashishiga emas, balki uni pasayishiga xizmat qiladi. Ushbu holat uchun tajriba natijalari quyidagi tenglama ko'rinishida umumlashtirilgan:

$$Nu = 0,0015Re^{0,5} \quad (4.36)$$

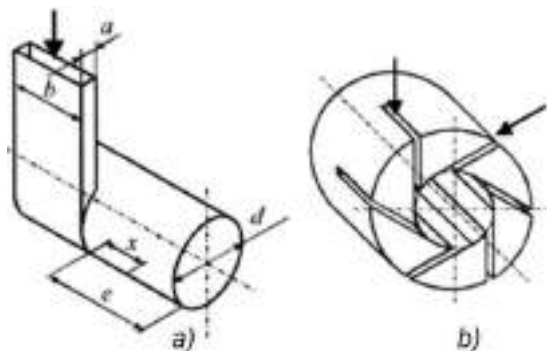
§4.3. Issiqlik tashuvchini quvurga tangensial uzatish.

Suyuqlikni quvurga tangensial uzatish, bir yoki bir nechta teshiklar orqali amalga oshiriladi. Ushbu teshiklarning ko'ndalang kesimi dumaloq yoki to'g'ri burchakli bo'lishi mumkin, bunda quvurga uzatilayotgan suyuqlik quvurning ko'ndalang kesimi va uzunligi bo'yicha turlicha tarqalishi mumkin. Odatda ushbu usul yordamida oqimni uyurma harakatga keltirish quvurning boshida amalga oshiriladi, natijada tangensial kanallar orqali suyuqlikning to'liq yoki bir qismi uzatiladi [48].

Tangensial girdoblantirgich-eng sodda va ko'p tarqalgan moslama hisoblanadi (4.10, a-rasm). Tangensial girdoblantirgichda uzatuvchi kanallarning shakli to'g'ri burchakli, dumaloq yoki ovalsimon bo'lishi mumkin. Uzatuvchi kanallarning soni bittadan to'rttagacha o'zgaradi va ularni soni yanada ortganda girdoblantirgichdan keyingi tezlikning azimutal notenglik darajasi kamayadi. Uzatuvchi kanalning kengligi b va balandligi a , kichik quvurning diametri d va uzunligi l tangensial girdoblantirgichning asosiy geometrik parametrlari hisoblanadi [91].

Quvurning kirish qismida o'rnatilgan tangensial girdoblantirgichli quvurda issiqlik berish koeffitsiyenti A. Abkaryan, A. Nau va R. Westlar tomonidan to'liq tadqiqot qilingan. Reynoldsning kichik sonlari uchun ($Re_d \approx 10^4$) tajriba natijalari quyidagi tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$Nu_d/Nu_\infty = (1 + F)^{1,75} \quad (4.35)$$



4.10-rasm. Girdoblantirgichning turlari:

a) tangensial girdoblantirgich; b) tangensial-yoriqli girdoblantirgich.

(4.35) tenglama quvur uzunligi $l/d = 18$ bo'lganda olingan. $Re_d = 2 \div 5 \cdot 10^5$ sohada va $F < 2,4$ bo'lganda, $l/d=25,0$ uzunlikdagi quvur uchun tajriba natijalari quyidagi tenglama yordamida umumlashtiriladi:

$$Nu_d/Nu_\infty = (1 + F)^{1,7} \quad (4.36)$$

Issiqlik tashuvchi bitta teshik orqali tangensial uzatiladigan uzun quvurda ($l/d = 39$) havoni sovitishda issiqlik berish kirish qismining turli konstruktiv parametrlarida tadqiqot qilingan [92]. Tajribalar $Re = 3 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$ va $\bar{F}_{kir} = 0,5 \div 1$ bo'lganda o'tkazilgan, tajriba natijalarining ko'rsatishicha $\bar{F}_{kir}$ ni kamayishi bilan issiqlik almashinish jadalligi ortadi.

$\bar{F}_{kir} = 0,5$ bo'lgan tangensial girdoblantirgich yordamida $Re = 3 \cdot 10^3 \div 10^4$ oraliqda olingan eng natijalarni quyidagi o'xshashlik tenglamasi yordamida xarakterlash mumkin:

$$Nu = 0,417 Re^{0,57} \quad (4.37)$$

Girdoblantirgichdagi gidravlik yo'qotilishlar turli sabablarga ko'ra yuzaga keladi. Ulardan asosiylari: kirishdagi yo'qotilishlar, tezliklar profilini qayta qurilishiga yo'qotilishlar, ishqalanishga, ko'ndalang kesimni keskin kengayishiga yo'qotilishlar va hokazo. Turli girdoblantirgichlarda bosim yo'qotilishi uchun tajribaviy bog'liqliklar [93, 94] tadqiqot ishlarida keltirilgan.

Tangensial-yoriqli girdoblantirgich-ichi bo'sh silindrdan iborat bo'lib, uning yon yuzida yoriqlar hosil qilingan (4.10, b-rasm). Girdoblantirgichning buralish darajasini o'zgartirish pazlar sonini va og'ish burchagini o'zgartirish bilan amalga oshiriladi.

Tangensial-yoriqli girdoblantirgich yordamida uyurmaviy harakat hosil qilinganda, quvur yuzasidan havo oqimiga mahalliy issiqlik berish E. Volchkov va V. Terexovlar tomonidan o'rganilgan. Oqimni girdoblantirgichdan chiqishida buralish burchagi 74° ga yetgan. Olingan tajriba natijalari quyidagi tenglama bilan umumlashtirilgan:

$$Nu = 0,0288 Re^{0,8} Pr^{0,4} (1 + tg^2 \varphi^*)^{0,4} \quad (4.38)$$

bu yerda: φ^* -kanal yuzasi yaqinida oqimni buralish burchagining dastlabki qiymati.

E. Volchkov va S. Spotar qisman buralish hosil qilinadigan quvurda mahalliy issiqlik berishni tadqiqot qilishgan. Havo oqimida tajriba natijalari quyidagi tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,113 Re_x Pr_x^{0,4} \bar{x}^{-0,56} (1 + tg^2 \varphi^*)^{0,4} \quad (4.39)$$

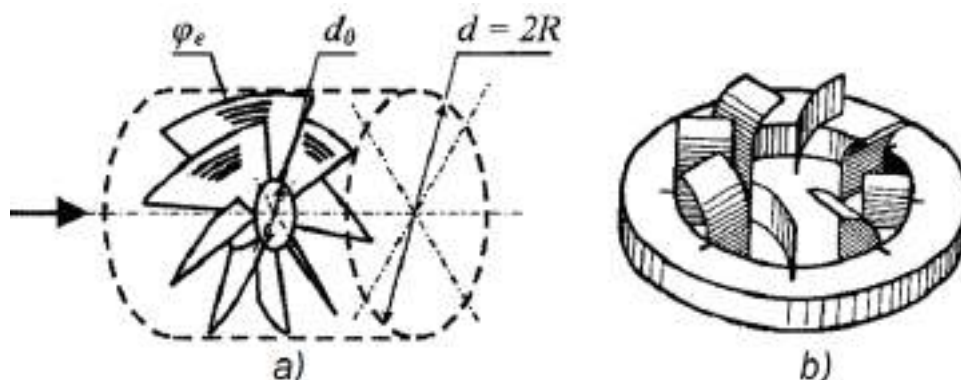
(4.39) tenglama $\bar{x} = 20 \dots 100$ sohada o'rinli.

$Re = 2 \cdot 10^4 \div 8 \cdot 10^4$ sonining katta qiymatlarida ikkita simmetrik joylashgan kanal orqali havo tangensial uzatiluvchi quvurda issiqlik berish R.Z. Alimov tomonidan tadqiqot qilingan [95]. Havo $\bar{l}_{kir} = 13,3$ bo'lgan yoriq orqali uzatiladi, $\bar{F}_{kir}$ qiymat esa 0,765 ga tenglashadi. Ushbu sharoitda issiqlik berish jadalligi quyidagi mezonli tenglama bilan ifodalanadi:

$$Nu = 0,044 Re^{0,86} \quad (4.40)$$

Bunday girdoblantirgichlarning kamchiligi hosil qilingan buralishlarning jadalligi quvur uzunligi bo'yicha kamayadi, shuning uchun uzun quvurlarda oqimni uyurmaviy harakatga keltirishda ularni ko'p marta takrorlash zarur.

Kurakchali girdoblantirgichlar- kanalning radiusi bo'ylab joylashtirilgan kurakchali o'qiy yo'naltiruvchi moslama hisoblanadi (4.11-rasm) Kurakchalar tashqi halqaga va d_0 diametrli markaziy jismga mahkamlanadi hamda kanal o'qiga nisbatan belgilangan burchak ostida joylashtiriladi. Kurakchali girdoblantirgichning kurakchasi yassi yoki egri chiziqli bo'lishi mumkin.



4.11-rasm. Kurakchali girdoblantirgichlar:

a) aksial-kurakchali girdoblantirgich; b) profillangan kurakchali girdoblantirgich.

A. Sudarev, V. Antonovsk va L. Kuznetsovlar havo kurakchasining buralish burchagi o'zgarmas ($n = 0$) bo'lgan aksial-kurakchali girdoblantirgich yordamida uyurmaviy harakatga keltiriladigan $l/d = 100$ uzunlikdagi quvurda mahalliy issiqlik almashinuvini tadqiqot qilishgan. Kurakchaning buralish burchagi 50 dan 78° gacha o'zgaradi, markaziy jismning o'lchamsiz diametri 0,65...0,83 ni tashkil etadi. Reynolds sonining o'zgarish sohasi 10^5 dan 10^7 gacha bo'lganda tajriba natijalari quyidagi tenglama yordamida umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,026K(1 + tg\varphi)^{0,77}Re^{0,8}exp(0,42\bar{d}_0^3) \quad (4.41)$$

bu yerda: $K = (w_m/\bar{w}_x)^{0,8}$ -maksimal o'qiy tezlikni quvur uzunligi bo'yicha o'zgarishini aniqlovchi parametr.

$tg\varphi = tg\varphi_l(R/r)^n$ darajali qonuniyat bo'yicha loyihalangan aksial-kurakchali girdoblantirich yordamida havo uyurmaviy harakatga keltiriladigan $l/d = 150$ uzunlikdagi quvurda lokal issiqlik almashinuvi A. Xalatov va V. Letyaginlar tomonidan to'liq tadqiqot qilingan. Burchak 15° dan 60° gacha, daraja ko'rsatkichlari -1 dan $+3$ gacha ($\bar{r}_0 = 0,47$) o'zgarganda quyidagi tenglama olingan:

$$Nu_x = 0,0306Re_x^{0,8}Pr^{0,4}\varepsilon_\varphi\varepsilon \quad (4.42)$$

bu yerda ε_φ -oqimni uyurmаланish omili, $\varepsilon_\varphi = 1 + 0,49(F - 0,19)^{0,61}$.

V. Shukin va A. Kovalnogov [96] suvning oqimida oqim qisman uyurmаланuvchi quvurda mahalliy issiqlik berishni tadqiqot qilishgan. $Re = 1 \div 9 \cdot 10^4$ ($l/d = 60$) oraliqda tajriba natijalari quyidagicha umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,024Re^{0,8}Pr^{0,4} \left(\frac{Pr_s}{Pr_d} \right)^{0,25} \varepsilon \cdot \varepsilon_x \quad (4.43)$$

$\varphi = 75^\circ$ va $n = 0$ bo'lganda kurakchali girdoblantirgichli quvurlarda issiqlik berishni tadqiqot natijalari $K = f(Re)$ grafiklar shaklida keltirilgan [48]. $n = 0$, $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ va $Re = 10^4 \div 9 \cdot 10^4$ bo'lganda uzun quvurlar ($l/d = 60$) uchun issiqlik berishning tadqiqot natijalari quyidagi mezonli tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_s}{Pr_d} \right)^{0,25} (1 + 0,147\bar{\varphi}^{0,82}) \quad (4.44)$$

Tashqi diametrda oqimning buralishi $\varphi = 45^\circ$ va $n = -1; 0; 3$ ga teng bo'lganda, Reynoldsning xuddi shu sohasida uzun quvurlarda issiqlik berishning tadqiqot natijalari quyidagi mezonli tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,0286Re^{0,8}Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_s}{Pr_d} \right)^{0,25} (1 + 0,044n) \quad (4.45)$$

Kurakchali girdoblantirgichli quvurlarda issiqlik berish bo'yicha tajriba ma'lumotlarini umumlashtirish natijalari $K_\varphi = f(Re)$ va $K_n = f(Re)$ grafiklar shaklida keltirilgan [48]. (4.44) va (4.45) formulalarda tajriba nuqtalarini bog'liqliklardan eng ko'p og'ishi 6% dan oshmaydi.

$n = 0, \varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ va $Re = 10^4 \div 9 \cdot 10^4$ bo'lganda uzun quvurlar ($l/d = 60$) uchun qarshilik ko'effitsiyentining tadqiqot natijalari quyidagi mezonli tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} (1 - 0,13\bar{\varphi}^{0,65}) Re^{0,02\bar{\varphi}} \quad (4.46)$$

$\varphi = 45^\circ$ bo'lganda:

$$\xi = \frac{0,2265}{Re^{0,19}} (1 - 0,02n) Re^{0,01n} \quad (4.47)$$

Kurakchali girdoblantirgichli quvurlarda gidravlik qarshilik bo'yicha tajriba ma'lumotlarini umumlashtirish natijalari $\xi/\varepsilon_n = f(Re)$ va $\xi/\varepsilon_\varphi = f(Re)$ grafiklar shaklida keltirilgan [48]. (4.46) va (4.47) formulalarda tajriba nuqtalarini bog'liqliklardan eng ko'p og'ishi 8% dan oshmaydi.

Olingan natijalarning tahlili shuni ko'rsatadiki, girdoblantirgichning α ko'effitsiyenti bir xil va $n > 0$ bo'lganda gidravlik qarshilik $n = 0$ ga nisbatan kichik bo'ladi. Shuningdek $Re = idem$ bo'lganda $\varphi = 75^\circ, n = 0$ va $\varphi = 45^\circ, n = 3$ parametrlarga ega bo'lgan girdoblantirgichli uzun quvurlarda issiqlik almashinuv jadalligi deyarli bir xil bo'ladi. $Re = 10^4 \div 9 \cdot 10^4$ bo'lganda gidravlik qarshilik ko'effitsiyenti birinchi quvurda ikkinchi quvurga nisbatan katta bo'ladi, masalan $l/d = 60$ bo'lganda 2,5-5% gacha, $l/d = 50$ bo'lganda 8-12% gacha, $l/d = 30$ bo'lganda 10-15% gacha va hokazo.

Kurakchali girdoblantirgichning kamchiligi kanallarning chekli soni va oqimning qovushqoq xususiyatlaridan kelib chiqqan holda, chiqish joyidagi azimut tezligining bir xil emasligidir. Shuning uchun, kurakchalarning buralish burchagi faqat kurakchalar tekisliklarining o'zaro "bir-biriga yopishishi" mavjud bo'lganda muhimdir.

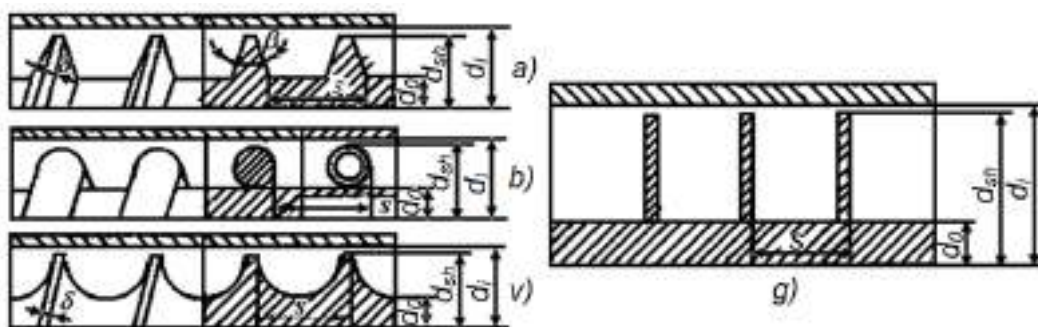
§4.4. Shnekli oqim buragichlar yordamida issiqlik almashinuvini jadallashtirish.

Issiqlik almashinuvini jadallashtirishni texnologik jihatdan sodda bo'lgan shnekli oqim buragichlar yordamida amalga oshirish mumkin (4.12-rasm). Shnekli oqim buragichlar deformatsiyalangan lentalarni sterjen-o'zakka payvandlash yoki mexanik ishlov berish yordamida tayyorlanadi. Vintsimon o'rnatmalarni tayyorlash uchun zarur bo'lgan lentalar silliq (odatda rangli) metaldan tayyorlanadi.



4.11-rasm. Shnekli oqim buragichlar.

Shneklar bir yoki ko'p yo'lli bo'lishi mumkin. Shnekli oqim buragichlarning konstruktiv sxemalari 4.12-rasmda keltirilgan.



4.12-rasm. Shnekli oqim buragichlarning konstruktiv sxemalari:

a-trapetsiyasimon ariqchali shnek; b-sim yoki quvurni o'rash orqali tayyorlangan shnek; v-yarim dumaloq ariqchali shnek; g-to'g'ri burchakli ariqchali shnek.

Mongkuta (Tailand) qirollik texnologiya instituti quyosh havo qizdirgichlari uchun ichki issiqlik almashinuvi jadallashgan quvurlardan foydalanishni taklif etgan, bunda sim spiralsimon o'ralgan sterjen quvurlarning ichiga uzluksiz yoki uzlukli ravishda o'rnatiladi (4.13-rasm). Bundan tashqari, sim o'ralgan sterjenni markaz bo'yicha o'rnatish shnekli oqim buragichlar hosil bo'lishini ta'minlaydi.



4.13-rasm. Brown Fintube (AQSH) kompaniyasining IAQLari uchun taklif etgan shnekli oqim buragichlari.

A. Xalatov va Y. Osipenko chiqish burchagi 82° bo'lgan uch pog'onali oqim buragich yordamida havo oqimini $l/d = 15$ quvurda burama

harakatga keltirishda mahalliy issiqlik almashinuvini tadqiqot qilishgan. Vtulka diametri $\bar{d}_0 = 0,5$ ga teng. $Re = 1 \dots 6 \cdot 10^4$ sohada tajriba natijalari quyidagi tenglama bilan umumlashtiriladi:

$$Nu = 0,63\Phi_0^{0,58}[1 + 0,58\exp(-0,084\bar{x})]Re^{0,5} \quad (4.48)$$

E. Nerjnyy va A. Sudarev ikki va to'rt yo'lli oqim buragichlar yordamida havo oqimini uzunligi $l/d = 180$ bo'lgan quvurda burama harakatga keltirishda mahalliy issiqlik almashinuvini tadqiqot qilishgan. Ular $Re = 8 \cdot 10^4 \dots 10^7$ sohada quyidagi tenglamani olishgan:

$$Nu = 0,0306Re^{0,8}(1 + tg^2\varphi_0)^m \quad (4.49)$$

bu yerda $m = 0,8\exp(-0,027\bar{x})$.

V. Reznikov uzunligi $l/d = 40$ bo'lgan quvurda o'nta oqim buragichni o'rnatib o'rtacha issiqlik almashinuvini tadqiqot qilgan. $Re = 3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$ sohada tajriba natijalari quyidagi tenglama bilan umumlashtirilgan:

$$Nu = 0,021Re^{0,9} \quad (4.50)$$

Shnekli oqim buragich yordamida oqimni mahalliy burama harakatga keltirishda quvurlarda issiqlik berish, oqim buragichlarning konstruksiyalari va geometrik xarakteristikalar [48] keltirilgan bo'lib, tadqiqot ishlari $Re = 10^3 \dots 6 \cdot 10^4$ sohada gradiyentlar usulida olib borilgan [96, 97]. $\varphi = 75^\circ$ va $d'/d = 1$ bo'lganda shnekli oqim buragichli quvurda Re sonining issiqlik berishga ta'siri $Nu = f(Re)$ grafik shaklida keltirilgan.

$\varphi = 45 \dots 75^\circ$ va $d'/d = 1$ bo'lgan shnekli oqim buragichlar yordamida uzun quvurlarda ($l/d = 60$) oqimni burama harakatga keltirishda issiqlik berishning tadqiqot natijalari $Re = 10^4 \dots 6 \cdot 10^4$ soha uchun quyidagi mezonli tenglama orqali ifodalanadi:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}(1 + 0,092\bar{\varphi}^{1,73}) \quad (4.51)$$

bu yerda $\bar{\varphi} = \varphi/15$.

$Re = 10^4 \dots 6 \cdot 10^4$ sohada, $\varphi = 45^\circ$ va $d'/d = 1 \dots 0,5$ bo'lganda shnekli oqim buragich uchun quyidagicha:

$$Nu = 0,0328Re^{0,8}Pr^{0,43}\left(\frac{Pr_s}{Pr_d}\right)^{0,25}\left[1 + 0,0355\left(\frac{d'}{d}\right)^{-3,15}\right] \quad (4.52)$$

Tajriba nuqtalarini (4.51) va (4.52) formulalarga mos keluvchi bog'liqlikdan og'ishi 8% dan oshmaydi.

Makrouyurmali laminar oqimida shnekli oqim buragichlar yordamida hosil qilingan kanallardagi gidravlik qarshilik [98] da keltirilgan bo'lib, tadqiqot jarayonida qadaming qiymati bo'yicha farq qiluvchi 12 ta qirgilgan va o'ralgan shneklardan foydalanilgan. Shneklarning geometrik

xarakteristiklari jadval shaklida keltirilgan [98]. Qirqilgan shneklar qalinligi 0,5 mm bo'lgan to'g'ri burchakli qovurg'adan iborat bo'lib, o'ralgan shneklarda qovurg'a rolini diametri 2,9 mm bo'lgan sim bajaradi. Barcha shneklar bir yo'lli bo'lib, oqimning buralish burchagi va kanal ko'ndalang kesimining radial o'lchami 1 dan 17 gacha o'zgaradi, egri chiziqli kanallarning nisbiy uzunligi $l/d_e = 73 \dots 509$. Tajribalar suvning oqimida $Re = 2 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^4$ sohada o'tkazilgan va ishqalanish qarshiligi ko'effitsiyentining o'rtacha qiymati aniqlangan.

Kanalda o'rnatilgan 12 ta shnekli oqim buragichlar yordamida olingan tajriba natijalari umumlashtirilib quyidagi tenglama olingan:

$$\xi = c Re^{-0,42} \left(\frac{d_e}{D} \right)^{0,65} \psi^{0,3} \quad (4.53)$$

Bu yerda qirqilgan shneklar uchun $c = 5,55$, o'ramli uchun $c = 4,90$.

Tadqiqot natijalari $\xi = f(Re)$ grafik shaklida keltirilgan. Tajriba nuqtalarini umumlashtiruvchi bog'liqliklardan eng ko'p og'ishi 10% dan oshmaydi.

Shnekli qoim buragichlar yordamida oqimni burama harakatga keltirishda quvurlarda gidravlik qarshilik tadqiqoti [96, 97] ishlarda ham to'liq keltirilgan. Sinovdan o'tkazilgan oqim buragichlarning buralish burchagi $\varphi = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Diametrlarning nisbati $d'/d = 1; 0,75; 0,5$. Shnekli oqim buragichlar o'rnatilgan quvurning gidravlik qarshiligini tadqiqoti $Re = 6 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^4$ oraliqda o'tkazilgan. $d'/d = 1$ bo'lganda shnekli oqim buragich o'rnatilgan uzun quvurda gidravlik qarshilikni aniqlash uchun quyidagicha mezonli tenglama taklif etilgan:

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25-0,03\bar{\varphi}}} (1 + 4,7 \cdot 10^{-6} \bar{\varphi}^{8,4}) \quad (4.54)$$

bu yerda $\bar{\varphi} = \varphi/15$.

$\varphi = 45^\circ$ va d'/d nisbat turlicha bo'lganda uzun quvurlar uchun:

$$\xi = \frac{0,3320}{Re^{0,19}} \left[0,24 + 0,76 \left(\frac{d'}{d} \right)^{-3,76} \right] \quad (4.55)$$

Tadqiqot natijalari $\xi = f(Re)$ grafik shaklida keltirilgan. Tajriba nuqtalarini (4.54) va (4.55) bog'liqliklardan eng ko'p og'ishi 6% dan oshmaydi.

Shnekli oqim buragichlarning kamchiligi shundaki, zamonaviy IAQsini tayyorlash uchun ko'p miqdordagi listli material sarflanadi. Masalan, diametri $d=30 \times 2$ mm bo'lgan quvurlar uchun metal sarfi va IAQsining massasi taxminan 15% ga ortadi. Shuningdek shnekli oqim buragichlar

qo'llanilganda issiqlik berish koeffitsiyenti $30 \div 40\%$ ga ortganda gidravlik qarshilik koeffitsiyenti $1,5 \div 2,5$ marta ortadi. Bundan tashqari, Re sonini ortishi bilan shnekli oqim buragichlarning samaradorligi kamayadi. Shnekli oqim buragichlarni ifloslangan oqimlarda qo'llash qo'shimcha qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi.

§4.5.