



Havoli sovutish apparatlarida konstruktiv va ish rejimi parametrlarining energiya samaradorligiga ta'siri

Nasillo N. Sadullayev^{1,a}, Firdavs F. Muzaffarov¹, Firdavs F. Murtazoyev^{1,b}

^{1a} DSc, prof., Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; info@bstu.uz <https://orcid.org/0000-0002-4112-7177>

¹ PhD, dots., Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0006-1830-5023>

^{1,b} Doktorant, Buxoro davlat texnika universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0001-6229-6754>

Dolzarbli: Havoli sovutish apparatlarining energetik samaradorligi issiqlik almashinish yuzasining konstruktiv xususiyatlari, quvurlarning joylashuvi, qovurg'alanish darajasi, havo oqimining tashkil etilishi hamda ventilyator elektr yuritmasining ish rejimiga bevosita bog'liq. Ushbu omillarning oqilona tanlanmasligi issiqlik uzatish intensivligining pasayishi, aerodinamik qarshilikning ortishi va elektr energiyasi sarfining ko'payishiga olib keladi.

Maqsad: Havoli sovutish apparatlarining asosiy konstruktiv va ekspluatatsion parametrlarini tizimli tahlil qilish hamda ularning issiqlik almashinish jarayoni va energiya iste'moliga ta'sirini baholashdan iborat.

Usullari: Tadqiqotda issiqlik almashgich quvurlarining joylashuvi, qovurg'alanish usullari, ichki oqimni jadallashtiruvchi elementlar, ventilyator yuritmasining reduktorli, tasmali va bevosita ulanish sxemalari hamda aylanish tezligini boshqarish usullari qiyosiy tahlil qilingan.

Natijalar: Tahlil natijasida issiqlik almashinish yuzasini kengaytirish va oqim turbulentligini kuchaytirish issiqlik uzatishni jadallashirishi, biroq gidravlik va aerodinamik qarshilikning ortishini ham keltirib chiqarishi aniqlandi. Ventilyator aylanish tezligini rostdash, elektr yuritmani optimal ulash va parraklarning o'rnatilish burchagini boshqarish energiya sarfini kamaytirish hamda sovutish jarayonining barqarorligini ta'minlashning asosiy yo'nalishlari sifatida belgilandi. Havoli sovutish apparatlarida yuqori samaradorlikka erishish uchun issiqlik almashgich va ventilyator tizimlarini o'zaro bog'liq holda optimallashtirish zarurligi asoslandi.

Kalit so'zlar: havoli sovutish apparati, issiqlik almashgich, qovurg'ali quvur, issiqlik uzatish, ventilyator, elektr yuritma, energiya samaradorligi.

Влияние конструктивных и режимных параметров на энергетическую эффективность аппаратов воздушного охлаждения

Насилло Н. Садуллаев^{1,a}, Фирдавс Ф. Музаффаров¹, Фирдавс Ф. Муртазоев^{1,b}

For citation: Sadullayev N.N., Muzaffarov F.F., Murtazoyev F.F. Effect of structural and operating parameters on the energy efficiency of air-cooled heat exchangers. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 45-55.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23464497>

Received: 23.03.2026

Revised: 15.04.2026

Accepted: 26.05.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Nasillo N. Sadullayev, Firdavs F. Muzaffarov, Firdavs F. Murtazoyev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

^{1a} DSc, проф., Бухарский государственный технический университет, Бухара, 200117, Узбекистан; info@bstu.uz <https://orcid.org/0000-0002-4112-7177>

¹ PhD, доц., Бухарский государственный технический университет, Бухара, 200117, Узбекистан; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0006-1830-5023>

^{1,b} Докторант, Бухарский государственный технический университет, Бухара, 200117, Узбекистан; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0001-6229-6754>

Актуальность: Энергетическая эффективность аппаратов воздушного охлаждения непосредственно зависит от конструктивных особенностей поверхности теплообмена, расположения труб, степени оребрения, организации воздушного потока, а также режима работы электропривода вентилятора. Нерациональный выбор указанных факторов приводит к снижению интенсивности теплопередачи, увеличению аэродинамического сопротивления и росту потребления электрической энергии.

Цель: Системный анализ основных конструктивных и эксплуатационных параметров аппаратов воздушного охлаждения, а также оценка их влияния на процесс теплообмена и энергопотребление.

Методы: В исследовании проведён сравнительный анализ расположения труб теплообменника, способов оребрения, элементов интенсификации внутреннего потока, редукторной, ременной и непосредственной схем соединения привода вентилятора, а также методов регулирования частоты его вращения.

Результаты: В результате анализа установлено, что увеличение поверхности теплообмена и усиление турбулентности потока интенсифицируют теплопередачу, однако одновременно приводят к увеличению гидравлического и аэродинамического сопротивления. Регулирование частоты вращения вентилятора, оптимальное соединение электропривода и управление углом установки лопастей определены как основные направления снижения энергопотребления и обеспечения устойчивости процесса охлаждения. Обоснована необходимость взаимосвязанной оптимизации систем теплообменника и вентилятора для достижения высокой эффективности аппаратов воздушного охлаждения.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, теплообменник, оребрённая труба, теплопередача, вентилятор, электропривод, энергетическая эффективность.



Effect of structural and operating parameters on the energy efficiency of air-cooled heat exchangers

Nasillo N. Sadullayev^{1,a)}, Firdavs F. Muzaffarov¹, Firdavs F. Murtazoyev^{1,b)}

^{1a)} DSc, prof., Bukhara State Technical University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; info@bstu.uz <https://orcid.org/0000-0002-4112-7177>

¹ PhD, assoc. prof., Bukhara State Technical University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0006-1830-5023>

^{1,b)} Doctoral student, Bukhara State Technical University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; info@bstu.uz <https://orcid.org/0009-0001-6229-6754>

Relevance: The energy efficiency of air-cooled heat exchangers directly depends on the structural characteristics of the heat-transfer surface, tube arrangement, degree of finning, organization of the air flow, and the operating mode of the fan electric drive. An irrational selection of these factors leads to a decrease in heat-transfer intensity, an increase in aerodynamic resistance, and higher electrical energy consumption.

Aim: To carry out a systematic analysis of the main structural and operating parameters of air-cooled heat exchangers and to evaluate their influence on the heat-transfer process and energy consumption.

Methods: The study presents a comparative analysis of heat-exchanger tube arrangements, finning methods, elements used to intensify the internal flow, geared, belt-driven, and direct-drive fan configurations, as well as methods for controlling rotational speed.

Results: The analysis showed that increasing the heat-transfer surface area and intensifying flow turbulence enhance heat transfer; however, they also result in higher hydraulic and aerodynamic resistance. Regulation of fan rotational speed, optimal configuration of the electric drive, and control of the blade setting angle were identified as the main approaches to reducing energy consumption and ensuring stable cooling operation. The necessity of integrated optimization of the heat exchanger and fan systems in order to achieve high efficiency in air-cooled heat exchangers was substantiated.

Keywords: air-cooled heat exchanger, heat exchanger, finned tube, heat transfer, fan, electric drive, energy efficiency.

1. Kirish (Introduction)

Neft-gaz, kimyo va energetika korxonalaridagi ko'plab texnologik jarayonlarda mahsulot yoki issiqlik tashuvchi muhit haroratini belgilangan qiymatgacha pasaytirish talab etiladi. Mazkur qurilmalarda issiqlik sovutilayotgan texnologik oqimdan quvur devori va uning tashqi yuzasidagi qovurg'alar orqali atmosfera havosiga uzatiladi, havo harakati esa, asosan, ventilyator yordamida majburiy tarzda tashkil etiladi. Havoli sovutish apparatining energetik ko'rsatkichlari alohida bir element bilan emas, balki bir-biri bilan bog'langan bir necha konstruktiv va rejim parametrlarining yig'ma ta'siri bilan belgilanadi. Issiqlik almashgich seksiyalarida quvurlar soni va ularning joylashish tartibi o'zgarganda havo oqimining aerodinamik qarshiligi va issiqlik berish sharoiti ham o'zgaradi. Quvur qatorlari ortishi ayrim sharoitlarda issiqlik berish koeffitsiyentining pasayishi va gidravlik qarshilikning ortishiga olib kelishi sababli yuqori quvvatli ventilyatorlardan foydalanish zarurati yuzaga keladi. Issiqlik almashinishni jadallashtirishning asosiy konstruktiv usullaridan biri quvurlarning tashqi yuzasini qovurg'alash hisoblanadi. Qovurg'alar issiqlik uzatish yuzasini kengaytiradi va, ayniqsa, issiqlik berish koeffitsiyenti nisbatan kichik bo'lgan havo tomonida issiqlik almashinish jarayonini yaxshilash imkonini beradi. Shu bilan birga, qovurg'aning shakli, balandligi, qadami, tayyorlanish texnologiyasi va quvur bilan birikish sifati apparatning issiqlik-texnik hamda ekspluatatsion ko'rsatkichlariga ta'sir qiladi. Maqolada payvandlangan, pazga o'rnatilgan, L-shaklli va mexanik usulda hosil qilingan qovurg'ali quvurlar konstruksiyalari ko'rib chiqilgan.

2. Metodlar va materiallar (Methods and materials)

Havoli sovutish apparat(HSA)larining hozirgi kunda 10000 dan ortiq turi mavjud bo'lib, konstruktiv tuzilish hamda ishlash prinsipiga ko'ra farqlandi.

1-rasmdan ma'lumki HSA lari asosan: konstruktiv tayanch, elektr motor, ventilyator, diffuzor, kollektor, issiqlik almashgich (qator trubalar va ularga yopishgan alyuminiy qanotlar) lardan tuzilgan. Ushbu elementlarning ish rejimlarini o'zgartirish, shuningdek konstruktiv holatini takomillashtirish, hamda avtomatik boshqarish orqali energiya samaradorlikka erishiladi.

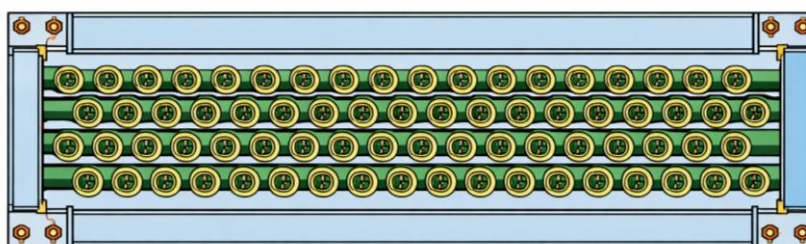
HSAda tayanch metall konstruksiya HSAning asosiy o'rnatiladigan elementlarini birlashtirib beruvchi qismi hisoblanib, tarkibiga ko'ndalang va bo'ylama balkalar kiradi. Konstruksiya tayanch poydevorlarga o'rnatiladi va barcha qism bir biriga anker boltlar yordamida mustahkam qotiriladi. Ushbu konstruksiya shunday o'rnatilishi lozimki, havo harorati va namlik o'zgaruvchan xususiyati tufayli ventilyator havo sarfini keng diapazonda rostlash imkoniga ega bo'lishi lozim.



1-rasm. Havoli sovutish apparatining asosiy elementlari.

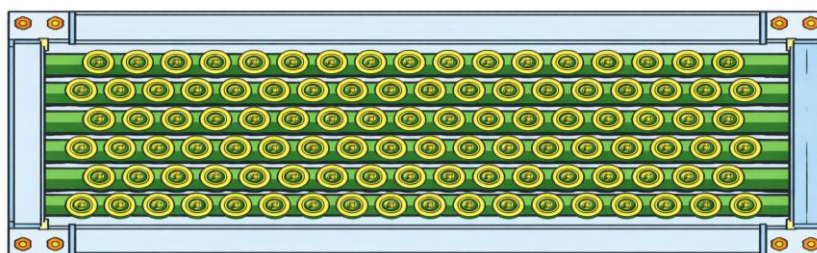
Fig.1. Main elements of an air-cooled heat exchanger.

Havoli sovutish apparatining asosiy elementi issiqlik almashgich trubalari hisoblanadi. Issiqlik almashinish to'rt, olti yoki sakkiz qatorli qovurg'alangan truba qatorlardan iborat bo'lib, quvurlar odatda teng tomonli uchburchak uchlari bo'ylab shaxmat tartibida joylashtiriladi.



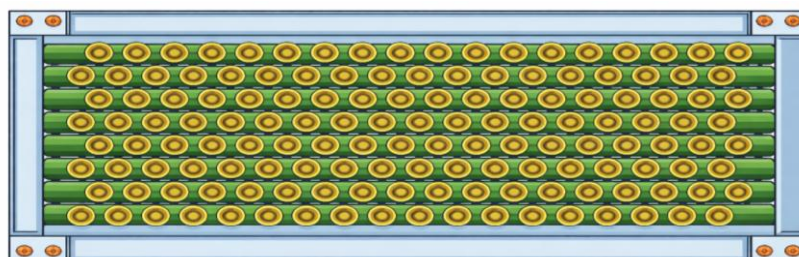
2-rasm. Seksiyada to'rt qatorli quvurlar joylashuvi.

Fig.2. Arrangement of tubes in a four-row section.



3-rasm. Seksiyada olti qatorli quvurlar joylashuvi.

Fig.3. Arrangement of tubes in a six-row section.



4-rasm. Seksiyada 8 qatorli quvurlar joylashuvi.

Fig.4. Arrangement of tubes in an eight-row section.

2÷4- rasmlarda issiqlik almashinish seksiyasida shaxmat usulida joylashtirilgan quvurlarning qatorlar soniga ko'ra joylashuvi tasvirlangan. Bunda issiqlik almashinish quvurlari soni oshgani sayin bir xil o'lchamli seksiyada quvurning ichki diametri kichrayishiga olib keladi. Agar quvur qatorlari bir qatorda joylashtirilsa, HSA samarasiz ishlaydi. Havo oqimi tez, issiqlik almashinuvi esa sekin amalga oshadi. Issiqlik almashgich trubalari ma'lum holatda ushlab turilishi uchun ramalarga biriktiriladi. Ramalarga biriktirilgan truba qatorlariga old va orqa tomondan qopqoqlar bilan biriktiriladi. HSAda sovutilishi kerak bo'lgan gaz kiruvchi quvur nozuldan kollektorga o'tadi. Kollektordan gaz bir xil bosimda quvurlarga uzatiladi, bunda quvurlar oxirlari ochiq bo'lib, gaz orqa tomon qopqoqqa uriladi va ostki trubalarga yo'naltiriladi. Sovutilgan gaz kollektorga o'tib, bosimi oshgach, nozuldan chiqarib



yuboriladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, quvurlar qatorlari sonining ortishi issiqlik berish koeffitsiyentining pasayishiga olib keladi va bir vaqtning o'zida seksiya ichidagi gidravlik qarshilikni oshiradi, natijada yuqori quvvatli ventilyatorlardan foydalanish zarurati tug'iladi. Shu sababli amaliy konstruksiyalarda quvurlar qatorlari soni odatda to'rt, olti yoki sakkiz qator bilan chegaralanadi. Quvurlarni o'rnatishda ularning quvur panjarasi yuzasida maksimal zichlikda joylashuvi va issiqlik almashinish kesimi bo'yicha bir maromda taqsimlanishi ta'minlanadi. Quvur seksiyalarining taxminiy massasi:

1-jadval. Quvurlarning bosimga ko'ra va quvur uzunligiga ko'ra massasi.

Table 1. Mass of tubes depending on pressure and tube length.

Quvur material turi	P (MPa)	Quvur uzunligi 4 m			Quvur uzunligi 8 m		
		Issiqlik almashgich seksiyasidagi quvur qatorlar soni (ta)					
		4	6	8	4	6	8
B1	0,6	1500	2130	2750	2640	3770	4880
	1	1540	2200	2880	2680	3840	4980
	1,6	1610	2300	3060	2760	3940	5160
	2,5	1680	2460	3230	2830	4090	5330
	4	1840	2600	3500	2990	4250	5600
	6,4	1950	2730	3730	3100	4480	5830
B2	0,6	1460	2050	2700	2610	3700	4800
	1	1480	2110	2750	2630	3750	4850
	1,6	1540	2220	2770	2690	3860	4870
	2,5	1610	2320	3090	2760	3960	5200
	4	1740	2520	3310	2890	4170	5410
	6.4	1850	2580	3470	3000	4230	5570

1-jadvalda keltirilgan quvur materialiga ko'ra massasining ifodasi toifalarga ajratilib foydalaniladi. API 661 standartiga muvofiq, havoli sovutish apparatlarida qo'llaniladigan quvurlar B1 va B2 klasslarga ajratiladi. B1 klass quvurlar yuqori sifat va kengaytirilgan sinov talablariga ega bo'lib, yuqori bosimli va xavfli texnologik muhitlar uchun mo'ljallangan. B2 klass quvurlar esa soddaroq nazorat darajasiga ega bo'lib, ekspluatatsiya sharoiti yengil bo'lgan tizimlarda qo'llaniladi [1]. Shuningdek issiqlik almashinish apparatlarini loyihalashda issiqlik uzatish intensivligi va bosim yo'qotishlaridan tashqari vibratsiya omili ham alohida ahamiyatga ega. Suyuqlik oqimi harakati va havoning tezlik bosimi ta'sirida quvurlar o'ziga xos tabiiy tebranish chastotalarida tebranadi. Tebranishlar turli darajadagi avariya holatlarini keltirib chiqarmasligi uchun elektr yuritma HSAning ostki qism ramasiga ventilyator va undan yuqoridagi elementlar ustki ramaga mahkamlanadi. HSAning elektr yuritma yoki ventilyator qismida vibratsiya xavf tug'diradigan chegaraga yetganda qurilma faoliyatini cheklash uchun qo'chimcha o'chirgich o'rnatilishi mumkin. Mavjud issiqlik almashgichlarda tashqi sirtlarning shakli aylana bo'lib, issiqlikni uzatishda samarali bo'lishi va uyurmaviy havo oqimini hosil qilish maqsadida uning tashqi yuzasini aylanadan kattaroq va issiqlik almashinish intensivligini oshirish imkonini beruvchi shaklli quvurlardan foydalanishni taqazo etadi.

Truba qovurg'alari truba tashqi sirtida joylashgan bo'lib, bunda ikki uch va undan ortiq trubalar uchun yaxlit qovurg'a ko'rinishida ham qo'llaniladi [2]. Gazni sovutishda gaz o'tuvchi qovurg'alarni o'tkazish, qurilmani samarador ishlashini va tashqi issiqlik almashinish yuzasini 25-30 barobargacha oshirish imkoniyatini beradi. Qovurg'alangan umumiy quvur yuzasini, silliq quvur tashqi yuzasiga nisbati qovurg'alangan koeffitsiyenti (φ) bilan ifodalaniladi. Bunda $\varphi = 1$ bo'lsa, silliq quvur, Agar $\varphi > 1$ bo'lsa qovurg'alangan quvur ma'nosini anglatadi.

$$\varphi = \frac{S_{qy}}{S_{tq}} \quad (1)$$

1- formulada S_{qy} - qovurg'ali quvurning to'liq yuzasi (m^2), S_{tq} - qovurg'asiz holdagi quvurning to'liq yuzasi (m^2) va ushbu formula $S_{tq} = L\pi d_t$ orqali topiladi. Bunda L quvur uzunligi (m), d_t quvur markazidan tashqi devorigacha bo'lgan masofani bildiradi.

Shuningdek tashqi yuzani ortish koeffitsiyenti degan skalyar kattalik mavjud bo'lib, u ψ bilan belgilanadi. Bunda qovurg'alangan quvur tashqi yuzasini quvur ichki yuzasiga nisbati orqali aniqlaniladi.

$$\psi = \frac{S_{qy}}{S_{iq}} \quad (2)$$

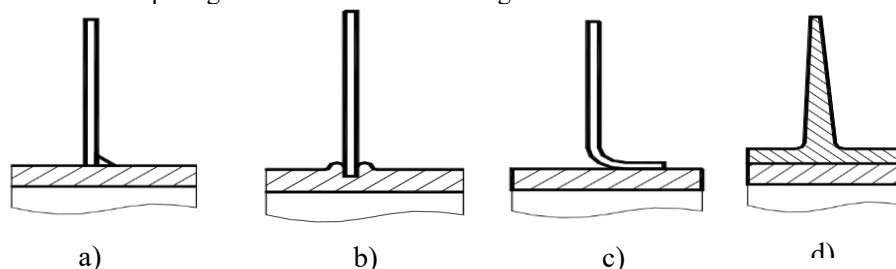
2- formulada S_{qy} - qovurg'ali quvurning to'liq yuzasi (m^2), S_{iq} - qovurg'asiz holdagi quvurning to'liq yuzasi (m^2) va ushbu formula $S_{iq} = L\pi d_i$ orqali topiladi. Bunda L quvur uzunligi (m), d_i quvur markazidan ichki devorigacha bo'lgan masofani anglatadi.



5-rasm. Qovurg'ali quvurning umumiy ko'rinishi.

Fig. 5. General view of a finned tube.

Truba atrofini qovurg'alash turli usullarda amalga oshiriladi:



6-rasm. a) Yassi qovurg'alarni quvurga payvandlash va kavsharlash (paykalash); b) qovurg'alar pazlarga o'rnatilgan; c) L-shaklli qovurg'a; d) siqib chiqarilgan yoki nakatlash yo'li bilan hosil qilingan qovurg'a.

Fig. 6. Tube finning methods: a) flat fins welded or brazed to the tube; b) fins embedded in grooves; c) L-shaped fin; d) extruded or rolled fin.

6-rasmda ko'rsatilgan tartibda gaz o'tuvchi quvurlarni qovurg'alantirish mumkin. Bunda a-shakldagi ko'rinishda spiralsimon shaklda payvandlash yoki kavsharlash mumkin. Bunda b-rasmda ajratilgan oraliq masofa, pazlar orasida preslash yo'li bilan qovurg'alantirish, c-shakldagi kabi L ko'rinishdagi qovurg'alarni payvandlash, d-shakldagi kabi quvurni preslash orqali quvur devoridan qovurg'a hosil qilish orqali qovurg'alanish amalga oshiriladi. Biroq ko'rsatilgan barcha hollarda ham korroziya hodisasi sabab qovurg'aning quvur sirtiga birikish sifati yomonlashadi, ayniqsa quvur va qovurg'a turli materiallardan tayyorlanishi korroziya hodisasini tezlashtiradi. Shuningdek ushbu turdagi qovurg'alarni o'rnatish yuqori mehnat talab etadi.

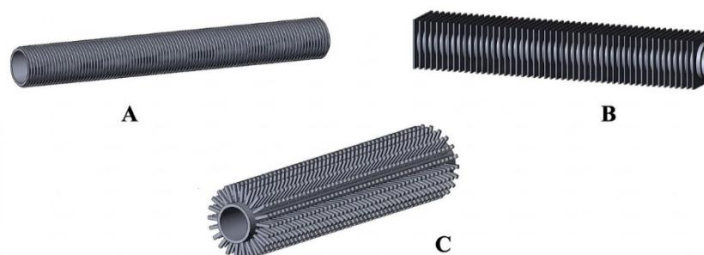
Amaliyotda eng maqbul yechim sifatida mexanik ishlov yordamida yaxlit qalin devorli quvurdan tayyorlanadigan qovurg'ali quvurlar qo'llanadi. Shuningdek bunday quvurlar odatda alyuminiy yoki alyuminiy qotishmalaridan ishlab chiqariladi. Qovurg'alarni hosil qilishda quvur shakl beruvchi disk-lar tizimi orasidan uzluksiz o'tkaziladi va yuzada kesish orqali qovurg'ali quvur shakllantiriladi. Ko'ndalang-vintli nakatlash texnologiyasi yuqori unumdorlikni ta'minlaydi, hamda ishlab chiqarish jarayonini mexanizatsiya va avtomatlashtirishga moslashtirishni osonlashtiradi [3]. Boshqa usullar esa ishlab chiqarish hajmiga nisbatan kichik ulushga ega bo'lib, ko'pincha 10–15% dan oshmaydi. Issiqlik tashuvchi muhitning kimyoviy va issiqlik-texnik xususiyatlari, shuningdek ishlash sharoitlari inobatga olgan holda qovurg'ali quvur tarkibiga mos materialdan tayyorlangan qo'shimcha ichki quvur joylashtirilishi mumkin. Bunda ichki quvur qovurg'ali tashqi qism bilan bo'shliqsiz, zich ulanadigan qilib o'rnatiladi va issiqlik uzatish jarayonida ishonchli bog'lanishni ta'minlanadi. Ushbu konstruksiya natijasida quvur ikki xil metall yoki materialdan tashkil topgan bimetall element sifatida qaraladi.

Qovurg'ali quvurlarning turiga qarab ruxsat etiladigan maksimal ish harorati chegaralari mavjud bo'lib, ish harorati belgilangan me'yordan yuqoriga ko'tarilsa, quvur bilan qovurg'a orasidagi ulanishning barqarorligi pasayadi. Shu sababli havo sovitish apparatlarida bunday quvurlarni qo'llash ekspluatatsiya harorati bo'yicha ma'lum diapazon bilan cheklanadi. Shuningdek qovurg'alanish koeffitsiyentiga yoki qovurg'a balandligiga ham chegara mavjud bo'lib, katta qiymatga erishgan qovurg'alanish koeffitsiyenti issiqlik almashinish samaradorligiga ta'sir etmasligi lozim.

2-jadval. Qovurg'alanish ko'effitsiyenti qiymatiga ta'sir etuvchi parametrlar.**Table 2.** Parameters affecting the value of the finning coefficient.

Parametrlar	Qovurg'alanish ko'effitsiyenti		
	$\varphi = 9$	$\varphi = 14$	$\varphi = 20$
Qovurg'a asosidagi quvur diametri d_t (mm)	28	28	27
Asosiy quvur diametri (bimetall quvurlar uchun), d_t (mm)	25	25	25
Bimetall quvurning ichki diametri, d_i (mm)	21	21	21
Qovurg'alar qadami u (mm)	3,5	3	2,5
1 m quvurga to'g'ri keladigan qovurg'alar soni	286±5	333±5	400±5
Qovurg'alar balandligi h (mm)	10,5	14	15
Qovurg'aning yuqori qismidagi (uchi) qalinligi δ_1 , mm	0,6	0,6	0,6
Qovurg'aning asosidagi qalinligi, δ_2 (mm)	1,1	1,1	1,1
Qovurg'alar diametri D_r	49	56	57
Bir metr quvur uchun issiqlik almashinish yuzasi (m^2)			
Qovurg'ali sirt yuzasi S_{qy}	0,792	1,284	1,69
Qovurgasiz quvur sirtining yuzasi S_{ty}	0,088	0,088	0,085

2-jadvalda Qovurg'alanish ko'effitsiyentiga ta'sir qiluvchi parametrlar keltirilgan bo'lib, bitta parametrlar o'zgarishi tashqi yuzaning o'zgarishiga sabab bo'ladi. Shuningdek energiya samaradorligi ya'ni elektr energiya iste'moli miqdori oshishi yoki kamayishi mumkin. Yuzaning ortish ko'effitsiyenti $\varphi = 9$ ($\psi=12$), $\varphi = 14$ ($\psi=19,6$), $\varphi = 20$ ($\psi=25,6$). Bunda qovurg'alanish ko'effitsiyenti ham, yuzaning ortish ko'effitsiyenti ham bir xil ma'noda foydalaniladi. Ya'ni quvurga qanot o'rnatilgandan so'ng yuzani necha barobarga oshganini ifodalovchi kattalik hisoblanadi. Quvur yuzasini oshirish maqsadida quvur yuzalari turli shakldagi qanot quvurg'alari bilan qoplanadi (7-rasm).

**7-rasm.** Doiraviy past qanotchali (A), to'rtburchak qanotchali (B) va tishli qanotchali (C) quvurlarning geometriyasi.**Fig. 7.** Geometry of tubes with circular low fins (A), rectangular fins (B) and serrated fins (C).

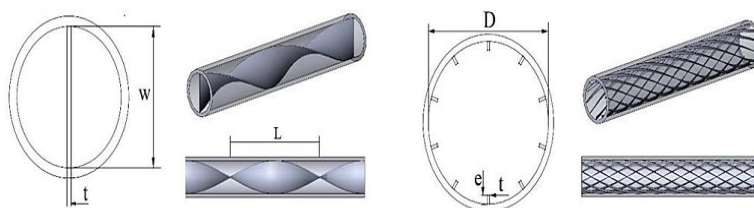
Silliqlik quvurlarda issiqlik almashinuvi faqat quvurning tashqi yuzasi orqali amalga oshadi. Qanotchalar qo'shilishi bilan effektiv yuza 5-10 barobargacha ortadi. Bu, ayniqsa, gaz (havo) va suyuqlik o'rtasidagi issiqlik almashinuvida juda muhim, chunki havoning issiqlik berish xususiyati past.

David Artemyev va Andrew Zaitsev tomonidan olib borilgan tadqiqot ishida 7-rasmdagi (A) doiraviy past qanotchali quvur tasvirlangan. Ularning samaradorligi silliqlik quvurga nisbatan yuqori, lekin intensivligi nisbatan past.

B – rasmdagi to'rtburchak qanotchali konstruksiya keltirilgan, bu konstruksiyadagi qanotchaning chekka qismlarida issiqlik samaradorligi pasayadi.

C – rasmda tishli qanotchali konstruksiyaning samaradorligi yuqoridagi konstruksiyaga nisbatan yuqori bo'lib, doiraviy qanotchaga nisbatan 15-20% gacha samarali [4].

Ushbu tadqiqot ishida samaradorlik ko'rsatkichlarini yanada yaxshilash maqsadida quvurning ichki qismiga yo'naltiruvchi lenta o'rnatilgan (8-rasm). Quvur ichidan oqib o'tayotgan suyuqlik yoki gazni uyurmali (turbulent) harakatga keltiradi. Suyuqlik to'g'ri chiziqli emas, balki aylanma harakat qila boshlaydi.

**8-rasm.** Quvur ichidagi issiqlik almashinuvini kuchaytirishning ikkita passiv usuli.**Fig. 8.** Two passive methods of heat-transfer enhancement inside the tube.

Bunda: w- Lentaning kengligi (odatda trubaning ichki diametriga teng), t-lentaning qalinligi, l-burilish qadami-bu masofa qanchalik kichik bo'lsa, uyurma shunchalik kuchli bo'ladi.

HSAdagi qovurg'ali quvurga issiqlik almashinish jarayonini tezlashtirish uchun xizmat qiluvchi va majburiy havo oqimini hosil qilib yo'naltirib beruvchi qism bu ventilyator hisoblanadi. Ventilyator elektr motor yordamida harakatga keltiriladi va bunda issiqlik almashinishning samarasi elektr energiya sarfi va issiqlik almashinishning intensivligi bilan baholanadi. HSAni energiya iste'molida energiya sarfini rostlash energiya va xomashyo tejallishi, xizmat muddatining uzayishi, ekologiyaga ta'sirni kamayishi va HSAning ishonchligini oshirish, shuningdek texnologik jarayonni samarali ishlashiga sabab bo'ladi. Rostlash tizimi ventilyatorning ish rejimini o'zgarishidan qat'iy nazar, texnologik talablarni bajarishi lozim. Havo sarfini bir necha usullarda rostlash mumkin.

- Issiqlik almashinish seksiyalariga uzatiluvchi havoning sarfini o'zgartirish orqali;
- Qishki davrda HSAda kiruvchi havo qizdirish orqali;
- Yozgi davrda kiruvchi havoni va issiqlik almashgich qismini namlantirish orqali;
- Texnologik oqimning bir qismini baypas liniyalari orqali rostlovchi klapanlar yordamida o'tkazish orqali;

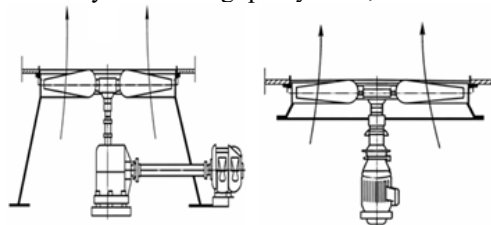
HSAning eksplutatsiya xarajatlaridagi eng muhimlaridan biri ventilyatorni harakatlantiruvchi elektr motor tomonidan iste'mol qilinadigan elektr energiya hisoblanadi. Kiruvchi havo oqimini nominal rostlanganda elektr motor iste'mol qiladigan energiyani 60% gacha tejash mumkin. HSAda havo sarfini o'zgartirishda elektr motorda energiya sarfini kamaytirishning bir necha usullari mavjud bo'lib;

- Ikki tezlikli motordan foydalanish orqali;
- Elektr motor tezlikni chastota o'zgartkich yordamida boshqarish orqali;

Bunda ikki tezlikda ishlovchi motor mavsum va tashqi muhit haroratiga ko'ra ventilyatorni past tezlikda va to'la quvvatda yuqori tezlikda harakatlantiradi. Shuningdek qishda tashqi havo harorati past bo'lgan paytda o'shirib qo'yiladi. Bunda tashqi muhit havosining o'zi haroratni tushirib beradi va bunday holat erkin konveksiya deb ataladi.

Tadqiqotchi Robert Giammarutiga ko'ra ventilyatorlar aksariyat hollarda issiqlik almashgichning ustida yoki ostida joylashadi [5]. Agar HSA ustida ventilyator joylashsa havoni so'rib yuqoriga chiqarish orqali issiqlik almashinadi va bunda diffuzor issiqlik almashgichning ustida ventilyatorning ostki qismida joylashadi. Bir holatda elektr motor ostki qismida reduktor orqali ventilyatorga bog'langan holda joylashadi. Keyingi holatda elektr motor issiqlik almashgich yuqorisida diffuzor ichiga ventilyator bilan tasmali uzatma yordamida bog'langan holda joylashtiriladi. Bevosita bog'lanishda HSAning eng yuqori qismida ventilyator ustiga joylashtirish orqali ham issiqlik almashinish hosil qilinadi. Bunday issiqlik almashinishdan kichik bosim va haroratlarda foydalaniladi. Ventilyator havoni so'rish davomida issiqlik almashgichdan chiqayotgan yuqori harorat ta'siri tufayli samaradorlik pasayishiga olib kelib, issiqlik almashinish sekinlashuviga sabab bo'ladi. Bunda ventilyator elektr motorga reduktor yordamida bog'langan bo'lsa, podshipniklarning ishdan chiqishiga, tasmali uzatma yordamida bog'langanda tasmalarning deformatsiyaga uchrashiga, bevosita ustki qismida joylashganda motor qizish natijasida motorning ishonchligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shuningdek HSAda elektr motorni yuqori qismga joylashtirish eksplutatsiya (texnik xizmat ko'rsatish) jarayonlarining murakkablashuviga va texnik xizmat ko'rsatish vaqtining cho'zilishiga olib keladi. Konstruktiv tomondan qaralganda HSA yuqori qismida ventilyator va elektr motor joylashuvi tayanchlarning mustahkamligini oshirish, zilzila bardoshligini ta'minlashni taqazo qiladi va bu esa HSAning tan narxining oshishiga sabab bo'ladi.

Ikkinchi holatda ventilyatorlar HSAning ostki qismida joylashtiriladi va bunda havoni yo'naltiruvchi diffuzor ventilyator va issiqlik almashgich orasida joylashadi. Ventilyatorni harakatga keltiruvchi elektr motor ventilyatorga reduktor orqali ulanishi mumkin. Bunda kichik quvvatli yuqori tezlikli motor reduktor yordamida aylanish tezligi pasaytirilib, momenti oshiriladi.

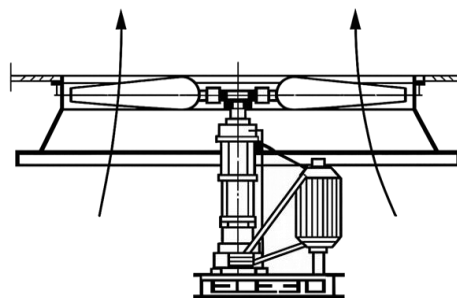


9-rasm. Ventilyator va elektr motorni reduktor yordamida bog'langan ko'rinishi, a) reduktor perpendikulyar val orqali bog'lanishi, b) reduktor parallel val orqali bog'lanishi.

Fig. 9. Fan and electric motor connected through a gearbox: a) gearbox with a perpendicular shaft; b) gearbox with a parallel shaft.

9-rasmda ko'rsatilgan ulanish orqali elektr motor ishonchligi oshadi, biroq podshipniklardagi

ishqalanish tufayli elektr motorda energiya iste'moli oshadi va qurilma samaradorligi pasayadi.



10-rasm. Ventilyator va elektr motorni tasmali uzatma yordamida bog'langan ko'rinishi.

Fig. 10. Fan and electric motor connected through a belt drive.

Robert Mukherjee va boshqalar tomonidan o'tkazilgan tadqiqot ishida 10-rasmda keltirilgan konstruktsiya taklif etilgan, bunda ventilyator va elektr motorni tasmali uzatma yordamida bog'langan bo'lib, tasmali uzatma orqali tezlikni boshqarish havoli sovutish apparatlarida energiya tejamkorligini ta'minlash nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega. Ventilyator aylanish tezligining kamaytirilishi elektr energiyasi iste'molining pasayishiga, shuningdek aerodinamik shovqin va tebranish darajasining kamayishiga olib kelishi uning afzalligi hisoblanadi. Bu esa apparatning ekspluatatsion barqarorligini va uning xizmat muddatini oshiradi. Bundan tashqari, tasmali uzatma elastik element sifatida mexanik yuklamalarni qisman yutish xususiyatiga ega bo'lib, elektr dvigatel va ventilyator qismlarining mexanik shikastlanish ehtimolini kamaytiradi. Biroq ventilyator tezligini keng diapozonda rostdlashda shkiqlardan foydalanish, energetik nuqtai nazardan samarasiz hisoblanadi. Shu sababli ventilyator aylanish chastotasining havoli sovutish apparati samaradorligiga ta'sirini baholashda J. A. Mo'minov tomonidan o'tkazilgan eksperimental tadqiqot natijalari alohida ahamiyatga ega. Muallif ventilyator aylanish chastotasini 1500–3800 ayl/min oralig'ida o'zgartirib, ushbu parametrlarning sovutish jarayoniga ta'sirini tajriba asosida baholagan [6].

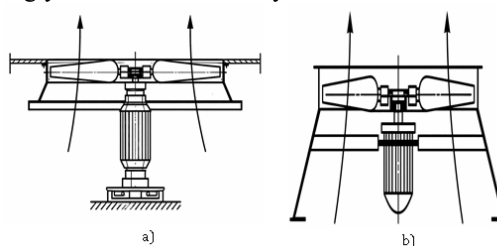
3-jadval. HSA ventilyatorining aylanish chastotasini o'zgartirishning haroratga ta'siri.

Table 3. Effect of changing the fan rotational speed of the air cooler on the temperature difference.

№	Haroratlar farqi ΔT , °C		
	n=1500 ayl/min	n=2500 ayl/min	n=3800 ayl/min
1 tajriba	41	48	53
2 tajriba	42	49	50
3 tajriba	41	51	53
O'rtacha	41	49	52

Mo'minov tomonidan olingan natijalar ventilyator aylanish chastotasi bilan sovutish samaradorligi o'rtasidagi bog'lanish chiziqli emasligini ko'rsatadi. Aylanish chastotasi 1500 ayl/min dan 2500 ayl/min gacha oshirilganda o'rtacha haroratlar farqi 41 °C dan 49 °C gacha, ya'ni 19,5 % ga ortgan. Chastotaning 2500 ayl/min dan 3800 ayl/min gacha keyingi oshirilishi esa haroratlar farqini 49 °C dan 52 °C gacha, ya'ni atigi 6,1 % ga oshirgan. Bu holat ventilyator aylanish tezligini oshirish orqali olinadigan qo'shimcha issiqlik-texnik samaraning yuqori chastotalarda kamayib borishini ko'rsatadi. Shu sababli ventilyator tezligini maksimal qiymatga yetkazish o'rniga, sovutish samaradorligi va elektr energiyasi sarfi o'rtasidagi maqbul nisbatni aniqlash energetik jihatdan asosliroq yondashuv hisoblanadi [6].

HSAlarining ventilyator qismiga elektr motorni bevosita ulab ishlatish orqali ular orasidagi ishqalanish, qizish kabi energiya isroflari kuzatilmaydi.



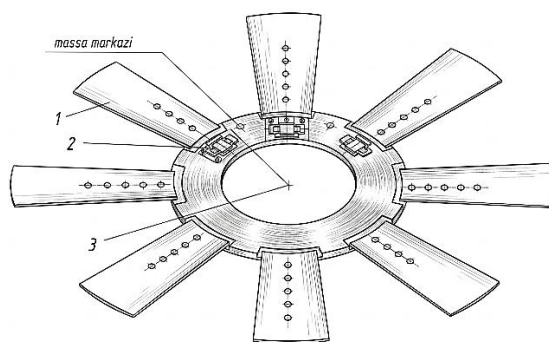
11-rasm. Ventilyator va elektr motorning bevosita bog'langan ko'rinishi: a) motori beton tayanchga o'rnatilgan HSA; b) motori metall konstruksiyaga o'rnatilgan HSA.

Fig. 11. Direct connection of the fan and electric motor: a) motor mounted on a concrete support; b) motor mounted on a steel structure.

11-rasmda ventilyatorning elektr dvigatel bilan bevosita bog'lanishida parrak dvigatel valiga to'g'ridan-to'g'ri biriktiriladi va bunday biriktirishda mexanik uzatma elementlaridan tasma, shkiv yoki reduktorlardan foydalanilmaydi. Bunday konstruktiv bog'liqlik aylanish energiyasining elektr dvigateldan ventilyatorga minimal mexanik yo'qotishlar bilan uzatilishini ta'minlab, tizimning umumiy samaradorligini oshiradi. Bevosita bog'langan yuritmalar, odatda, aylanish chastotasi oldindan belgilangan yoki chastota o'zgartirgich yordamida rostlanadigan elektr dvigatellar bilan jihozlanadi.

Chastota o'zgartirgichlardan foydalanish ventilyator aylanish tezligini silliq hamda yuqori aniqlikda rostlash imkonini beradi. API 661 standart talablari asosida amalga oshirilgan tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, ventilyator va elektr dvigatelning bevosita bog'langan yuritmasi konstruktiv soddaligi tufayli yuqori ekspluatatsion ishonchlilik va kam xizmat ko'rsatish xarajatlari bilan tavsiflanadi, biroq aylanish tezligini moslashuvchan boshqarish imkoniyatlari cheklangan bo'ladi. Tasmali uzatma asosidagi yuritmalar esa ventilyator aylanish chastotasini rostlash va energiya samaradorligini oshirish nuqtai nazaridan ustunlikka ega bo'lib, ularning barqaror ishlashi muntazam texnik xizmat ko'rsatishni talab etadi. Reduktorli yuritmalar yuqori aylantiruvchi moment va katta quvvat talab etiladigan ish sharoitlarida samarali yechim bo'lsada, ularning konstruktiv murakkabligi hamda ekspluatatsiya va ta'mirlash xarajatlarining nisbatan yuqoriligi bilan ajralib turadi.

Ventilyator orqali hosil qilinadigan havo oqimi issiqlik almashinish yuzalaridan o'tib, sovutilayotgan muhitdan issiqlikni olib chiqishni ta'minlaydi. Shu sababli ventilyatorning konstruktiv tuzilishi va aerodinamik xususiyatlari apparatning umumiy samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi [7].



12-rasm. HSA ventilyatorining ko'rinishi: 1 – lopast; 2 – stupitsa; 3 – ventilyator markazi.

Fig. 12. Air-cooler fan: 1 – blade; 2 – hub; 3 – fan centre.

12-rasmda ventilyator parragi tasvirlangan bo'lib, u bir nechta asosiy elementlardan tashkil topgan. Bu elementlarga parraklar (lopastlar), parraklarni stupitsaga biriktiruvchi buriluvchi o'qlar, parraklar o'rnatiladigan markaziy stupitsa hamda ventilyatorning massa markazi kiradi. Parraklar aerodinamik shaklga ega bo'lib, aylanish jarayonida havoni o'ziga tortadi va unga kinetik energiya beradi. Ushbu energiya oqim tezligining oshishiga hamda issiqlik almashinish jarayonining jadallashishiga olib keladi. Parraklarning stupitsaga buriluvchi o'qlar orqali mahkamlanishi ularning o'rnatilish burchagini o'zgartirish imkonini beradi. Bu esa ventilyatorning unumdorligini va hosil qilinadigan bosimini turli ish rejimlariga moslash imkonini beradi. Parrak burchagining o'zgarishi havo sarfi, elektr energiyasi iste'moli va aerodinamik ko'rsatkichlariga ta'sir ko'rsatadi. Shu bois turli konstruktiv yechimlar HSA ventilyatorlarida keng qo'llaniladi. Markaziy stupitsa parraklarni bir butun mexanik tizimga birlashtirib, aylanish momentini elektr yuritmadan parraklarga uzatadi. Stupitsaning mustahkamligi va geometrik aniqligi ventilyatorning ishonchli va uzoq muddatli ishlashini ta'minlaydi. Ventilyatorning massa markazi esa aylanish o'qi bilan mos tushishi zarur bo'lib, bu muvozanatlash talablaridan kelib chiqadi. Massa markazining noto'g'ri joylashuvi tebranishlarning kuchayishiga, podshipniklarning tez eskirishiga va ekspluatatsion ishonchlilikning pasayishiga olib keladi. V. B. Kuntyshev va A. B. Sukhotskii [8] tomonidan olib borilgan tadqiqotda havoli sovutish apparati aksial ventilyatori parraklarining o'rnatilish burchagi uning energetik va issiqlik-texnik ko'rsatkichlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Mualliflar parraklarning o'rnatilish burchagini ish sharoitiga mos ravishda tanlash ventilyator quvvati va apparatning issiqlik yuklamasi o'rtasidagi maqbul nisbatni ta'minlashini ko'rsatganlar. Shu sababli ventilyator parraklari burchagini boshqarish havoli sovutish apparatlarining energiya samaradorligini oshirishning muhim vositalaridan biri hisoblanadi [8].

3. Natija va muhokamalar (Results and discussion)

Qiyosiy tahlil havoli sovutish apparatining energiya samaradorligi konstruktiv va ish rejimi parametrlarining o'zaro bog'liqligiga asoslanishini ko'rsatdi. Qovurg'alar qadami 3,5 mm dan 2,5 mm gacha kamaytirilganda 1 m quvurdagi qovurg'alar soni 286 ± 5 tadan 400 ± 5 tagacha, qovurg'ali sirt

yuzasi esa 0,792 m² dan 1,69 m² gacha, ya'ni qariyb 2,1 baravar ortadi. Biroq sirt yuzasining ortishi havo oqimiga qarshilikni ham oshirishi mumkin, shu sababli qovurg'alanish darajasini faqat maksimal yuza bo'yicha tanlash maqsadga muvofiq emas.

Qovurg'a geometriyasi ham issiqlik almashinuviga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Tahlil qilingan manbada tishli qanotchali quvurlar doiraviy qanotchali quvurlarga nisbatan 15–20 % gacha yuqori samaradorlik ko'rsatishi qayd etilgan. Demak, issiqlik almashinishni jadallashtirishda qovurg'a shakli va qadami aerodinamik qarshilik bilan birgalikda baholanishi kerak.

Ventilyator aylanish chastotasining ta'siri J. A. Mo'minovning eksperimental natijalari asosida baholandi. Aylanish chastotasi 1500 ayl/min bo'lganda o'rtacha haroratlar farqi 41 °C, 2500 ayl/min da 49 °C, 3800 ayl/min da esa 52 °C ni tashkil etgan. 1500 dan 2500 ayl/min gacha oshirishda natija 19,5 %, 2500 dan 3800 ayl/min gacha oshirishda esa atigi 6,1 % yaxshilangan. Bu yuqori aylanish chastotalarida qo'shimcha sovutish samarasining kamayib borishini ko'rsatadi.

Shunday qilib, energiya samaradorligini oshirish uchun maksimal qovurg'alanish yoki maksimal ventilyator tezligini tanlash emas, balki issiqlik uzatish samarasi, aerodinamik qarshilik va elektr energiyasi sarfi o'rtasidagi maqbul nisbatni ta'minlash zarur. Ventilyator tezligini chastota o'zgartirgich bilan boshqarish va parrak burchagini rostlash havo sarfini ish sharoitiga moslashtirish imkonini beradi; manbada avtomatik parrak boshqaruvi chiqish haroratini ± 1 °C chegarada rostlash imkonini berishi qayd etilgan.

4. Xulosa (Conclusion)

Havoli sovutish apparatining samarali ishlashi faqat issiqlik almashgich yuzasini kengaytirish yoki ventilyator quvvatini oshirish bilan belgilanmaydi. Qurilmaning energetik ko'rsatkichlari quvur geometrik parametrlari, qovurg'alanish darajasi, oqimning gidrodinamik holati, ventilyatorning aerodinamik tavsiflari va elektr yuritmaning boshqaruv usuli o'rtasidagi muvofiqlikka bog'liq. Quvur qatorlari sonini haddan tashqari ko'paytirish seksiyaning aerodinamik qarshiligini oshirib, ventilyatorga tushadigan yuklamani kuchaytirishi mumkin. Shu sababli issiqlik almashinish yuzasining kattalashishi doimo umumiy energetik samaradorlikning ortishini anglatmaydi. Qovurg'ali quvurlar issiqlik berish yuzasini sezilarli kengaytiradi, biroq ularning geometrik o'lchamlari va joylashish qadami havo oqimiga qarshilik bilan birgalikda tanlanishi zarur. Quvur ichiga burama lenta yoki mikroqovurg'ali yuzalarni joriy etish oqimni jadallashtirib, issiqlik uzatish intensivligini oshirish imkonini beradi. Bunday konstruksiyalarda esa olinadigan issiqlik samarasi qo'shimcha bosim yo'qotilishi bilan solishtirilishi lozim. Demak, optimal yechim maksimal issiqlik uzatish emas, balki issiqlik samarasi va energiya sarfi o'rtasidagi maqbul nisbat asosida tanlanishi kerak. Ventilyator yuritmasi bo'yicha tahlil bevosita ulanish mexanik yo'qotishlarni kamaytirishini, tasmali tizim aylanish tezligini moslashtirish imkonini berishini, reduktorli yuritma esa katta moment talab etiladigan rejimlarda maqsadga muvofiqligini ko'rsatadi. Ushbu variantlardan birini tanlashda faqat boshlang'ich konstruksiya emas, balki xizmat ko'rsatish xarajatlari, ishonchlilik va boshqaruv diapazoni ham hisobga olinishi lozim.

Ventilyator aylanish tezligini chastota o'zgartirgich yordamida rostlash va parraklarning o'rnatilish burchagini ish sharoitiga mos ravishda o'zgartirish havoning zarur sarfini ortiqcha elektr energiyasi iste'molisiz ta'minlash imkonini beradi. Avtomatik parrak boshqaruvi havo oqimini uzluksiz tartibga solish va mahsulot chiqish haroratini belgilangan chegarada ushlab turishga xizmat qiladi.

Umuman, havoli sovutish apparatlarining energiya samaradorligini oshirishda issiqlik almashgich va ventilyator-elektr yuritma tizimini alohida emas, yagona issiqlik-aerodinamik-elektromexanik tizim sifatida optimallashtirish eng maqsadga muvofiq yondashuv hisoblanadi.

ADABIYOTLAR

1. API Standard 661. Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries — Air-Cooled Heat Exchangers. — 7th ed. — Washington, DC: American Petroleum Institute, 2013. — Reaffirmed June 2018.
2. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 2 / пер. с англ.; под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 352 с.
3. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / под ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бесонного. — СПб.: Недра, 1996. — 510 с.
4. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2021. — Vol. 866. — Art. 012020. — DOI: 10.1088/1755-1315/866/1/012020.
5. Performance Improvement of Air-Cooled Heat Exchangers [Электронный ресурс] // Chart Industries. — URL: <https://files.chartindustries.com/hudson/Performance-Improvement-Air-Cooled-Heat-Exchangers.pdf> (дата обращения: ..2026).



6. Муминов Ж. А. Влияние изменения частоты вращения вентилятора на эффективность охлаждения // *Universum: технические науки*. — 2023. — № 6-1 (111). — С. 29–32.
7. Бараненко А. В., Бухарин Н. Н. Холодильные машины / под ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 1997.
8. Kunttysh V. B., Sukhotskii A. B. Effect of blade pitch in an axial fan on the energy characteristics of an air cooler // *Chemical and Petroleum Engineering*. — 2010. — Vol. 46, No. 3–4. — P. 125–129. — DOI: 10.1007/s10556-010-9304-y.

REFERENCES

1. API Standard 661. Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries — Air-Cooled Heat Exchangers. 7th ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2013. Reaffirmed June 2018.
2. Handbook of Heat Exchangers: in 2 vols. Vol. 2 / translated from English; ed. by O. G. Martynenko et al. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 352 p.
3. Fundamentals of Calculation and Design of Air-Cooled Heat Exchangers / ed. by V. B. Kunttysh, A. N. Besonny. St. Petersburg: Nedra, 1996. 510 p.
4. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 866, 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/866/1/012020.
5. Performance Improvement of Air-Cooled Heat Exchangers [Electronic resource]. Chart Industries. Available at: <https://files.chartindustries.com/hudson/Performance-Improvement-Air-Cooled-Heat-Exchangers.pdf> (accessed: ..2026).
6. Muminov Zh. A. Influence of fan rotation frequency variation on cooling efficiency. *Universum: Technical Sciences*, 2023, no. 6-1 (111), pp. 29–32.
7. Baranenko A. V., Bukharin N. N. Refrigeration Machines / ed. by L. S. Timofeevsky. St. Petersburg: Politekhnik, 1997.
8. Kunttysh V. B., Sukhotskii A. B. Effect of blade pitch in an axial fan on the energy characteristics of an air cooler. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2010, vol. 46, no. 3–4, pp. 125–129. DOI: 10.1007/s10556-010-9304-y.