


UO‘K: 621.513:620.9

 10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.36

PORSHENLI KOMPRESSORLAR UCHUN KO‘P BOSQICHLI SO‘RILUVCHI HAVONI SOVITISH TIZIMINI ISHLAB CHIQUISH VA UNING ENERGIYA SAMARADORLIGIGA TA‘SIRINI TADQIQ ETISH



Yuldashev Elmurod Umaraliyevich

Dotsent v.b., Olmaliq davlat texnika instituti, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: yuldashevelmurodumaraliyevich@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-7740-4177
Science ID: FTV-0825-0021



Jo‘rayev Shaxzod Numon o‘g‘li

Katta o‘qituvchi, Olmaliq davlat texnika instituti, Olmaliq,
O‘zbekiston
E-mail: shahzodjorayev699@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-8232-4292
Science ID: MQD-0326-0022

Annotatsiya. Porshenli kompressorlarning energiya samaradorligi ko‘p jihatdan kompressorga so‘riluvchi havoning boshlang‘ich termodinamik holatiga, ayniqsa uning haroratiga bog‘liq. So‘riluvchi havoning yuqori harorati gaz zichligining kamayishiga olib keladi, bu esa siqish jarayonida bajariladigan ish miqdorining ortishiga va natijada elektr energiyasi sarfining ko‘payishiga sabab bo‘ladi. Ushbu tadqiqotning maqsadi porshenli kompressorlar uchun ko‘p bosqichli so‘riluvchi havoni sovitish tizimini ishlab chiqish hamda uning termodinamik va aerodinamik ko‘rsatkichlarga ta‘sirini hisoblash suyuqliklar usuli asosida baholashdan iborat. Taklif etilgan texnik yechimda so‘riluvchi havo kompressorga kirishdan oldin ketma ket joylashgan ko‘p bosqichli quvurli issiqlik almashtirgichlar orqali sovitiladi. Tadqiqot SolidWorks Flow Simulation dasturi yordamida amalga oshirildi va harorat hamda bosim maydonlari modellashtirildi. Modellashtirish natijalari so‘riluvchi havoning harorati 40°C dan 7–8°C gacha kamayishini ko‘rsatdi. Bu esa havoning zichligini oshirish, siqish uchun zarur ish miqdorini kamaytirish va kompressorning energiya samaradorligini oshirish imkonini beradi. Shu bilan birga, qurilmadagi bosim yo‘qotish qiymati 14–26 Pa oralig‘ida bo‘lib, bu gidravlik qarshiliklarning minimal darajada ekanligini ko‘rsatadi. Olingan natijalar taklif etilgan ko‘p bosqichli sovitish tizimi kompressorning hajmiy unumdorligini oshirish, elektr energiyasi sarfini kamaytirish va umumiy energiya samaradorligini yaxshilashga xizmat qilishini tasdiqlaydi. Taklif etilgan texnik yechim sanoat porshenli kompressorlarida energiya tejamkor texnologiya sifatida qo‘llanishi mumkin.

Kalit so‘zlar: Porshenli kompressor, so‘riluvchi havo, ko‘p bosqichli sovitish, issiqlik almashtirgich, suyuqliklar dinamikasini modellashtirish, energiya samaradorligi, hajmiy unumdorlik, bosim yo‘qotish.

РАЗРАБОТКА МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВСАСЫВАЕМОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Юлдашев Элмурод Умаралиевич

И.о. доцента, Алмалыкский государственный технический
институт, Алмалык, Узбекистан

Джурраев Шахзод Нумон угли

Старший преподаватель, Алмалыкский государственный
технический институт, Алмалык, Узбекистан

Аннотация. Энергетическая эффективность поршневых компрессоров во многом зависит от начального термодинамического состояния воздуха, поступающего в компрессор, в частности от его температуры. Повышенная температура всасываемого воздуха приводит к уменьшению плотности газа, что вызывает увеличение работы, выполняемой в процессе сжатия, и, как следствие, рост потребления электрической энергии. Целью данного исследования является разработка многоступенчатой системы охлаждения всасываемого воздуха для поршневых компрессоров, а также оценка её влияния на термодинамические и аэродинамические характеристики на основе расчетов методами вычислительной гидродинамики. В предлагаемом техническом решении всасываемый воздух перед поступлением в компрессор охлаждается посредством последовательно расположенных многоступенчатых трубчатых теплообменников. Исследование выполнено с использованием программного комплекса SolidWorks Flow Simulation, в котором были смоделированы поля температуры и давления. Результаты моделирования показали, что температура всасываемого воздуха снижается с 40°C до 7–8°C. Это способствует увеличению плотности воздуха, снижению работы, необходимой для процесса сжатия, и повышению энергетической эффективности компрессора. При этом величина потерь давления в устройстве составляет 14–26 Па, что свидетельствует о минимальном уровне гидравлического сопротивления. Полученные результаты подтверждают, что предложенная многоступенчатая система охлаждения способствует повышению объемной производительности компрессора, снижению потребления электрической энергии и улучшению общей энергетической эффективности. Предложенное техническое решение может быть использовано в промышленных поршневых компрессорах в качестве энергоэффективной технологии.

Ключевые слова: Поршневой компрессор, всасываемый воздух, многоступенчатое охлаждение, теплообменник, моделирование гидродинамики жидкости, энергетическая эффективность, объемная производительность, потери давления.

DEVELOPMENT OF A MULTISTAGE SUCTION AIR COOLING SYSTEM FOR RECIPROCATING COMPRESSORS AND INVESTIGATION OF ITS IMPACT ON ENERGY EFFICIENCY

Yuldashev Elmurod Umaraliyevich

Acting Associate Professor, Almalyk State Technical Institute,
Almalyk, Uzbekistan

Jurayev Shakhzod Numon ugli

Senior Lecturer, Almalyk State Technical Institute, Almalyk,
Uzbekistan

Abstract. The energy efficiency of reciprocating compressors largely depends on the initial thermodynamic state of the air entering the compressor, particularly its temperature. A high temperature of the suction air leads to a decrease in gas density, which increases the work required during the compression process and consequently results in higher electrical energy consumption. The aim of this study is to develop a multi-stage suction air cooling system for reciprocating compressors and to evaluate its effect on thermodynamic and aerodynamic characteristics using computational fluid dynamics methods. In the proposed technical solution, the suction air is cooled before entering the compressor through a series of sequentially arranged multi-stage tubular heat exchangers. The research was carried out using SolidWorks Flow Simulation software, where temperature and pressure fields were modeled. The simulation results showed that the temperature of the suction air decreases from 40 °C to 7–8 °C. This increases air density, reduces the work required for compression, and improves the energy efficiency of the compressor. At the same time, the pressure loss in the device ranges between 14–26 Pa, which indicates minimal hydraulic resistance. The obtained results confirm that the proposed multi-stage cooling system increases the volumetric efficiency of the compressor, reduces electrical energy consumption, and improves overall energy efficiency. The proposed technical solution can be applied in

industrial reciprocating compressors as an energy-efficient technology.

Keywords: *Reciprocating compressor, suction air, multi-stage cooling, heat exchanger, computational fluid dynamics, energy efficiency, volumetric efficiency, pressure loss.*

Kirish. Porshenli kompressorlar konchilik, metallurgiya, kimyo va energetika sanoatlarida siqilgan havoni ishlab chiqarish uchun keng qo'llaniladigan asosiy texnologik uskunalardan biri hisoblanadi. Ushbu qurilmalarning ishlashi katta miqdorda elektr energiyasi sarfi bilan bog'liq bo'lib, ularning energiya samaradorligini oshirish sanoat korxonalarida energiya tejankor texnologiyalarni joriy etishning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Kompressorlarning energiya samaradorligiga ta'sir qiluvchi asosiy omillardan biri kompressorga so'riluvchi havoning boshlang'ich haroratidir.

Termodinamik qonunlarga muvofiq, gazning zichligi uning haroratiga teskari proportsionaldir. So'riluvchi havoning harorati ortishi gaz zichligining kamayishiga olib keladi, bu esa kompressor silindriga kiruvchi havo massasining kamayishiga sabab bo'ladi. Natijada kompressor tomonidan bajariladigan siqish ishi ortadi va elektr energiyasi sarfi ko'payadi. Aksincha so'riluvchi havoning haroratini kamaytirish gaz zichligining ortishiga, kompressorning hajmiy unumdorligining oshishiga va siqish uchun zarur energiya sarfining kamayishiga olib keladi.

Shu sababli kompressorga kiruvchi havoning haroratini kamaytirish kompressorlarning energiya samaradorligini oshirishning samarali usullaridan biri hisoblanadi. Ayniqsa, ko'p bosqichli sovitish tizimlaridan foydalanish orqali issiqlik almashinuvi jarayonining samaradorligini oshirish va havoning haroratini bosqichma bosqich kamaytirish mumkin.

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi porshenli kompressorlar uchun ko'p bosqichli so'riluvchi havoni sovitish tizimini ishlab chiqish, uning ishlash prinsipini tahlil qilish va Suyuqliklar dinamikasi modellashtirish asosida termodinamik hamda aerodinamik ko'rsatkichlarini baholashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Sanoat korxonalarida siqilgan havo tizimlari umumiy elektr energiyasi iste'molining 10–20% gacha qismini tashkil etadi va ularning energiya samaradorligini oshirish muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega [1]. Kompressorlarning energiya samaradorligiga ta'sir

qiluvchi asosiy omillardan biri so'riluvchi havoning termodinamik holati hisoblanadi. Gazning boshlang'ich harorati ortishi siqish jarayonida bajariladigan ish miqdorining ortishiga olib keladi va energiya sarfini oshiradi [2].

Gaz siqish jarayonining termodinamik tahlili shuni ko'rsatadiki, siqish uchun zarur ish gazning boshlang'ich haroratiga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq bo'lib, haroratning kamayishi siqish ishining kamayishiga olib keladi [3]. Porshenli kompressorlarning ishlash samaradorligini oshirishda issiqlik almashinuvi jarayonlarini optimallashtirish muhim ahamiyatga ega ekanligi ko'rsatib berilgan [4].

Issiqlik almashtirgichlardan foydalanish gaz haroratini kamaytirish va energiya samaradorligini oshirishning samarali usullaridan biri hisoblanadi. Issiqlik almashinuvi jarayonlarini optimallashtirish orqali issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish va energiya tejash mumkin [5,6].

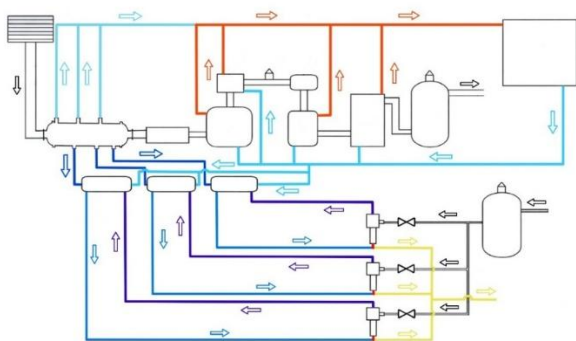
So'nggi yillarda issiqlik va oqim jarayonlarini tahlil qilish uchun suyuqliklar dinamikasi model-lashtirish usullari keng qo'llanilmoqda. Suyuqliklar dinamikasi usullari yordamida issiqlik almashinuvi jarayonlarini, harorat va bosim taqsimotini yuqori aniqlik bilan aniqlash mumkin [7,8].

Issiqlik almashtirgichlarning samaradorligi issiqlik uzatish koeffitsiyenti, oqim tezligi va harorat gradientiga bog'liq bo'lib, ushbu parametrlarni optimallashtirish orqali issiqlik almashinuvi samaradorligini oshirish mumkin [9,10].

Mavjud ilmiy tadqiqotlar asosan siqish jarayonidan keyingi sovitish tizimlariga qaratilgan bo'lib, kompressorga kiruvchi havoni ko'p bosqichli sovitish orqali energiya samaradorligini oshirish masalasi yetarli darajada o'rganilmagan. Shu sababli, kompressorga kiruvchi havoni ko'p bosqichli sovitish tizimini ishlab chiqish va uning samaradorligini suyuqliklar dinamikasi model-lashtirish asosida baholash muhim ilmiy ahamiyatga ega.

Natijalar. Porshenli kompressorga kiruvchi havoning haroratini kamaytirish va siqish jarayonining energiya samaradorligini oshirish maqsadida ko'p bosqichli so'riluvchi havoni

sovitish qurilmasi ishlab chiqildi. Taklif etilgan sovitish tizimining umumiy texnologik sxemasi 1-rasmda keltirilgan. Ushbu tizimda atmosfera havosi kompressorga kirishdan oldin ketma-ket joylashgan issiqlik almashinuvi qurilmalari orqali o'tkaziladi. Sovitish jarayonida havo sovituvchi qurilma bilan issiqlik almashinuvi natijasida o'z haroratini bosqichma-bosqich kamaytiradi. Sovituvchi muhit yopiq kontur bo'ylab harakatlanadi va issiqlik almashinuvi jarayonining uzluksiz amalga oshishini ta'minlaydi. Natijada kompressorga kiruvchi havoning harorati pasayadi, bu esa gaz zichligining ortishiga va siqish uchun zarur ish miqdorining kamayishiga olib keladi.



1-rasm. Ko'p bosqichli so'riluvchi havoni sovitish tizimining umumiy texnologik sxemasi.

Sovitish qurilmasining geometrik modeli va issiqlik almashinuvi elementlarining fazoviy joylashuvi SolidWorks dasturida uch o'lchamli muhitda ishlab chiqildi. Modelda kirish va chiqish kollektorlar, issiqlik almashinuvi quvurlari va oqim kanallari aniq ko'rsatildi. Ushbu konstruktiv yechim havo oqimining issiqlik almashinuvi yuzasi bilan maksimal aloqasini ta'minlash va issiqlik uzatish samaradorligini oshirishga imkon beradi.

Issiqlik almashinuvi va oqim jarayonlarini tahlil qilish uchun hisoblash suyuqliklar dinamikasi usuli qo'llanildi. Modellashtirish SolidWorks Flow Simulation dasturiy muhitida amalga oshirildi. Suyuqliklar dinamikasi modeli qurilma ichidagi harorat va bosim taqsimotini aniqlash imkonini beradi. Sovitish qurilmasining uch o'lchamli suyuqliklar dinamikasi modeli va hisoblash sohasining umumiy ko'rinishi 2-rasmda keltirilgan.

Modellashtirish jarayonida ishchi muhit sifatida atmosfera havosi qabul qilindi va uning

fizik xossalari ideal gaz tenglamasi asosida aniqlangan:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (1)$$

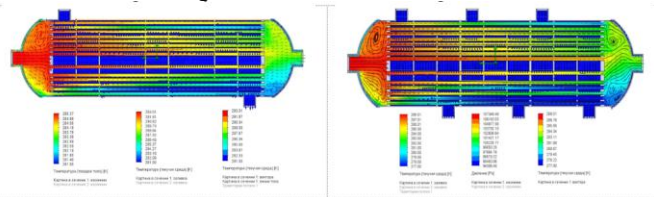
bu yerda:

ρ - gaz zichligi (kg/m³);

P - bosim (Pa);

R - gaz doimiysi (287 J/(kg·K));

T - mutlaq harorat (K).



2-rasm. Ko'p bosqichli sovitish qurilmasining suyuqliklar dinamikasi modeli va hisoblash sohasi (SolidWorks Flow Simulation).

Gazni siqish uchun zarur ish miqdori quyidagi tenglama bilan aniqlanadi:

$$L = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2)$$

bu yerda:

L - siqish ishi (J/kg);

T_1 - boshlang'ich harorat (K);

P_1 - boshlang'ich va yakuniy bosim (Pa);

k - adiabata ko'rsatkichi.

Hisoblash jarayonida quyidagi chegara shartlari qabul qilindi:

1-jadval

Hisoblash jarayonida qabul qilingan chegara shartlari

1	Kirish harorati	10–40 °C
2	Atmosfera bosimi	101325 Pa
3	Sovituvchi muhit harorati	1 °C, 4 °C va 8 °C
4	Sovituvchi muhit tezligi	0.6 m/s
5	Oqim holati	turbulent

Modellashtirish natijalarining miqdoriy qiymatlari va hisoblash parametrlari 2-jadvalda keltirilgan.

Suyuqliklar dinamikasi modellashtirish yordamida qurilma ichidagi harorat maydoni, bosim taqsimoti va oqim xarakteristikalari aniqlandi. Olingan natijalar asosida sovitish tizimining termodinamik va aerodinamik samaradorligi baholandi.

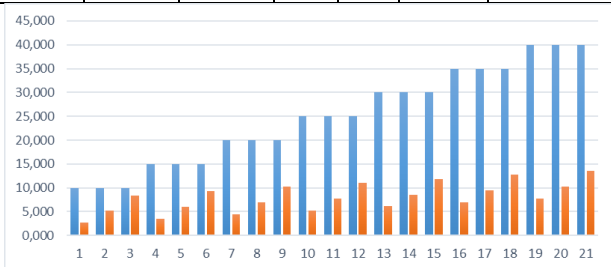
Natijalar va muhokama. Ko'p bosqichli so'riluvchi havoni sovitish qurilmasining samaradorligini baholash maqsadida hisoblash suyuqliklar dinamikasi modellashtirish amalga

oshirildi. Modellastirish natijasida sovitish qurilmasiga kiruvchi va undan chiquvchi havoning harorat qiymatlari hamda tizimdagi bosim o'zgarishlari aniqlandi. Hisoblash natijalari 3-rasm da keltirilgan.

2-jadval

Modellastirish natijalarining miqdoriy ko'rsatkichlari va hisoblash parametrlari

$t_{s,h}, ^\circ\text{C}$	$t_{s,h}, \text{K}$	$t_{s,h}, ^\circ\text{C}$	$t_{s,sv}, ^\circ\text{C}$	$v_{s,sv}, \text{m/s}$	P_{atm}	P_2
10,000	275,750	2,750	1	0.6	101325	101311,18
10,000	278,224	5,224	4	0.6	101325	101311,3
10,000	281,427	8,427	8	0.6	101325	101311,4321
15,000	276,530	3,530	1	0.6	101325	101309,080
15,000	279,020	6,020	4	0.6	101325	101309,200
15,000	282,340	9,340	8	0.6	101325	101309,332
20,000	277,380	4,380	1	0.6	101325	101306,980
20,000	279,870	6,870	4	0.6	101325	101307,100
20,000	283,190	10,190	8	0.6	101325	101307,232
25,000	278,23	5,230	1	0.6	101325	101304,880
25,000	280,72	7,720	4	0.6	101325	101305,000
25,000	284,04	11,040	8	0.6	101325	101305,132
30,000	279,08	6,080	1	0.6	101325	101302,780
30,000	281,57	8,570	4	0.6	101325	101302,900
30,000	284,89	11,890	8	0.6	101325	101303,032
35,000	279,93	6,930	1	0.6	101325	101300,680
35,000	282,42	9,420	4	0.6	101325	101300,800
35,000	285,74	12,740	8	0.6	101325	101300,932
40,000	280,78	7,780	1	0.6	101325	101298,580
40,000	283,27	10,270	4	0.6	101325	101298,700
40,000	286,59	13,590	8	0.6	101325	101298,832



3-rasm. Ko'p bosqichli sovitish qurilmasining sovitish natijalari.

Olingan natijalar sovitish qurilmasi orqali o'tayotgan havoning harorati sezilarli darajada kamayishini ko'rsatdi. Xususan, sovitish qurilmasiga kiruvchi havoning boshlang'ich harorati 40°C bo'lgan holatda chiqish harorati 7–8°C gacha pasayishi aniqlandi. Haroratning bunday darajada kamayishi sovitish tizimida issiqlik almashinuvi jarayoni samarali amalga oshayotganligini ko'rsatadi. Havoning harorati pasayishi uning zichligining ortishiga olib keladi, bu esa kompressor silindriga kiruvchi havo massasining oshishiga sabab bo'ladi.

Muhokama. Havoning zichligining ortishi kompressorning hajmiy unumdorligini oshirishga

ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Natijada kompressor bir xil ish sharoitida ko'proq miqdorda havoni siqish imkoniyatiga ega bo'ladi. Bu esa kompressorning umumiy ish samaradorligini oshiradi va energiya resurslaridan samarali foydalanishni ta'minlaydi.

Sovitish qurilmasining aerodinamik xususiyatlarini baholash natijalari tizimdagi bosim yo'qotish qiymati 14–26 Pa oralig'ida ekanligini ko'rsatdi. Ushbu qiymat juda kichik bo'lib, sovitish qurilmasining havo oqimiga qarshiligi minimal ekanligini tasdiqlaydi. Bu esa sovitish qurilmasining kompressor ish rejimiga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatmasligini va tizimning barqaror ishlashini ta'minlashini ko'rsatadi.

Olingan natijalar ko'p bosqichli sovitish qurilmasi havoning haroratini samarali kamaytirish imkonini berishini ko'rsatdi. Havoning haroratini kamaytirish siqish jarayonining energiya samaradorligini oshiradi, chunki past haroratli havo siqish jarayonida kamroq energiya talab qiladi. Bu esa kompressorning elektr energiyasi sarfini kamaytirish imkonini beradi.

O'tkazilgan suyuqliklar dinamikasi model-lashtirish natijalari taklif etilgan ko'p bosqichli sovitish tizimi porshenli kompressorlarning energiya samaradorligini oshirishda samarali texnik yechim ekanligini tasdiqlaydi. Tizimning past bosim yo'qotish qiymatiga ega bo'lishi uning aerodinamik jihatdan samarali ishlashini ko'rsatadi va sanoat sharoitida qo'llash uchun maqbulligini tasdiqlaydi.

Xulosa. Tadqiqotda porshenli kompressorlarga kiruvchi havoning termodinamik parametrlarini yaxshilash va siqish jarayonining energiya samaradorligini oshirish maqsadida ko'p bosqichli so'riluvchi havoni sovitish tizimi ishlab chiqildi va hisoblash suyuqliklar dinamikasi usuli asosida kompleks tahlil qilindi. Taklif etilgan texnik yechim kompressorga kiruvchi havoning haroratini kompressor so'rish liniyasida bosqichma-bosqich kamaytirish prinsipiga asoslangan bo'lib, issiqlik almashinuvi jarayonini samarali tashkil etishga imkon beradi.

Suyuqliklar dinamikasi model-lashtirish natijalari ishlab chiqilgan sovitish tizimi yuqori issiqlik almashinuvi samaradorligiga ega ekanligini ko'rsatdi. Xususan, sovitish qurilmasiga kiruvchi havoning harorati 40°C bo'lgan holatda chiqish harorati 7–8°C gacha kamayishi aniqlandi.

Haroratning 32°C ga kamayishi gaz zichligining ortishiga va kompressor silindriga kiruvchi havo massasining oshishiga olib keladi. Bu esa kompressorning hajmiy unumdorligini oshirishga va siqish uchun zarur ish miqdorini kamaytirishga xizmat qiladi.

Aerodinamik tahlil natijalari sovitish qurilmasidagi bosim yo'qotish qiymati 14–26 Pa oralig'ida ekanligini ko'rsatdi. Ushbu qiymat juda kichik bo'lib, qurilmaning aerodinamik qarshiligi minimal darajada ekanligini va kompressor ish rejimiga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatmasligini tasdiqlaydi. Bu esa ishlab chiqilgan sovitish tizimi yuqori issiqlik samaradorligi bilan bir qatorda yaxshi aerodinamik xususiyatlarga ham ega ekanligini ko'rsatadi.

Termodinamik tahlil shuni ko'rsatdiki, so'riluvchi havoning haroratini kamaytirish siqish jarayonida bajariladigan ish miqdorining kamayishiga olib keladi. Bu esa kompressor elektr dvigatelining yuklanishini kamaytiradi va elektr energiyasi sarfini pasaytiradi. Natijada kom-

pressorning umumiy energiya samaradorligi oshadi va energiya tejamkorlik ta'minlanadi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi porshenli kompressorlarda so'riluvchi havoni ko'p bosqichli issiqlik almashinuvi asosida sovitish tizimini ishlab chiqish va uning termodinamik hamda aerodinamik samaradorligini suyuqliklar dinamikasi model-lashtirish asosida kompleks baholashdan iborat. Olingan natijalar taklif etilgan sovitish tizimi kompressorlarning energiya samaradorligini oshirishning samarali usullaridan biri ekanligini ko'rsatdi.

Taklif etilgan texnik yechim sanoat porshenli kompressorlarida qo'llanishi mumkin bo'lib, energiya sarfini kamaytirish, kompressorning ish samaradorligini oshirish va energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etishda muhim amaliy ahamiyatga ega. Kelgusidagi tadqiqotlarda ishlab chiqilgan tizimning eksperimental sinovlarini o'tkazish va uning sanoat sharoitidagi samaradorligini baholash maqsadga muvofiq hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Saidur, R. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial compressed air systems. *Energy*, 35(12), 5171–5179. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.023>
- [2] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Hoboken: Wiley.
- [4] Bloch, H. P., & Hoefner, J. J. (1996). *Reciprocating compressors: Operation and maintenance*. Houston: Gulf Publishing Company.
- [5] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. New York: Wiley.
- [6] Saidur, R., Hasanuzzaman, M., & Mujtaba, I. M. (2012). Review on heat transfer enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5649–5659. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.031>
- [7] ANSYS Inc. (2020). *ANSYS Fluent theory guide*. Canonsburg.
- [8] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. London: Pearson Education.
- [9] Kakaç, S., & Liu, H. (2002). *Heat exchangers: Selection, rating, and thermal design*. Boca Raton: CRC Press.
- [10] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Wiley.
- [11] Dilshoda, K., & Elmurod, Y. (2024). Mathematical modelling of deposit formation processes on heat-exchange surfaces of piston compressor air coolers. *Universum: технические науки*, 8(2), 43–46.