



Gorizontall kondensatorlarda bevosita kontaktli issiqlik almashinuvining vakuum darajasiga ta'siri

Baxtiyor X. Yunusov¹, Bozor R. Mamadiyev^{1a}, Muhiddin Ch. Tursunov^{1b},
Dilshod T. Raxmatov^{1c}

¹) t.f.n., prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; bakhtiyaryunusov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7565-0946>

^{1a)} Assistent, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston mamadiyev.bozor@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0653-3468>

^{1b)} Assistent, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tursunov.muxiddin.1987@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-7442-5963>

^{1c)} Assistent., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston raxmatovdilshod0405@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-2214-9699>

Dolzarbli: sanoat korxonalarida qo'llaniladigan kondensatorlarning samarali ishlashi ular ichidagi bosim darajasiga bevosita bog'liq. Kondensator ichidagi bosim qancha past bo'lsa (vakuum qancha yuqori bo'lsa), kondensatsiya jarayoni shuncha tez va to'liq amalga oshadi. Qishki mavsumda sovutish suvi harorati 10–15 °C atrofida bo'lib, kondensator ichidagi bosimni 4 kPa gacha ushlab turish mumkin. Ammo yozgi mavsumda sovutish suvi harorati 30–40 °C gacha ko'tarilganda, kondensator ichidagi bosim 7 kPa va undan yuqori qiymatlarga oshib ketadi. Bosimning bunday o'zgarishi bug'ning to'liq kondensatsiyalanmasligiga, texnologik jarayon samaradorligining pasayishiga va qo'shimcha energiya sarfining ortishiga olib keladi. Mavjud kondensatorlarni tubdan qayta qurish katta kapital mablag' talab qilganligi sababli, oddiy va tejamkor usullar bilan kondensator ichidagi bosimni pasaytirish imkoniyatlarini o'rganish dolzarb ilmiy-amaliy muammo hisoblanadi.

Maqsad: gorizontall quvurli sirt kondensatorlarida sovutish suvi harorati ko'tarilganda kondensator ichidagi bosimni pasaytirish (vakuumni yaxshilash) uchun yuqori qismdan qo'shimcha suv purkash usulining nazariy asoslarini ishlab chiqish, uning samaradorligini miqdoriy baholash va optimal parametrlarini aniqlash.

Usullar: Tadqiqotda 168 ta quvurdan tashkil topgan (tashqi diametri 28 mm, ichki diametri 25 mm, devor qalinligi 1,5 mm, uzunligi 1 m, bug' kirish oynasi 400×600 mm, ikki yo'lli) gorizontall kondensator misolida issiqlik almashinuv jarayonlarining matematik modeli qurildi. Kondensatorning issiqlik almashinuv yuzasi tashqi diametr bo'yicha 14,78 m² ni tashkil etadi. Sirtli kondensatsiya Nusselt tenglamasi, quvur ichidagi sovutish suvi uchun turbulent rejimdagi issiqlik berish qonuniyatlari, bevosita kontaktli qism uchun tomchili oqim nazariyasi qo'llanildi. Suv bug'ining to'yinganlik bosimi va harorati o'rtasidagi bog'liqlik Antuan tenglamasi yordamida modellashirildi. Turli qo'shimcha suv sarflari uchun kondensator ichidagi bosimning o'zgarishi tahlil qilindi.

Natijalar: olib borilgan hisob-kitoblar quyidagi natijalarni ko'rsatdi. Qishki rejim (sovutish suvi harorati 10 °C, kondensator ichidagi bosim 4 kPa). Kondensator 0,224 kg/s (806 kg/soat) bug'ni kondensatsiyalash imkoniyatiga ega. Buning uchun zarur bo'lgan sovutish suvi sarfi 16,2 kg/s (58,3 m³/soat) ni tashkil etadi. Sovutish suvining chiqish harorati 18,5°C, o'rtacha logarifmik haroratlar farqi 12,8°C. Yozgi rejim (sovutish suvi harorati 30 °C, bir xil bug' sarfi 0,224 kg/s). Kondensator ichidagi bosim 4 kPa dan 9,85 kPa gacha ko'tariladi (5,85 kPa ga oshish). Bug'ning kondensatsiya harorati 29 °C dan 45,8 °C gacha ko'tariladi. Sovutish suvining chiqish harorati 36,2 °C gacha yetadi. Qo'shimcha suv purkash usuli qo'llanilganda. Optimal qo'shimcha suv sarfi 200–250 kg/soat (0,0556–0,0694 kg/s) oralig'ida ekanligi aniqlandi. Ushbu sarfda bevosita kontakt hisobiga uzatiladigan issiqlik quvvati 151,2 kVt ni tashkil etadi. Qo'shimcha suv purkash hisobiga kondensator ichidagi bosimni 9,85 kPa dan 7,05 kPa gacha pasaytirish mumkin (2,8 kPa ga yaxshilanish). Bug' harorati 45,8°C dan 39,2 °C gacha pasayadi. Bevosita kontaktli kondensatsiya uchun hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti 110,4 kVt/(m³·K) oralig'ida bo'lib, bu an'anaviy sirtli kondensatsiyadan 6–8 marta yuqori. Tomchilarning o'rtacha diametri 1 mm bo'lganda, bir sekundda hosil bo'ladigan tomchilar soni 123600 dona, ularning umumiy issiqlik almashinuv yuzasi esa 0,388 m²/s ni tashkil etadi. Qo'shimcha suv purkash tizimi uchun zarur bo'lgan nasos quvvati atigi 0,0277 kVt bo'lib, usul yuqori energiya samaradorligiga ega. Samaradorlik tahlili. Qo'shimcha suv purkash hisobiga kondensator ichidagi bosim 25% ga pasayadi. Bosimning har 0,1 kPa pasayishi uchun taxminan 16–18 kg/soat qo'shimcha suv talab etiladi. Qo'shimcha suv sarfini 400 kg/soat dan oshirish maqsadga muvofiq emas, chunki bosim pasayishi sekinlashadi va suv sarfi ortadi.

Kalit so'zlar: gorizontall kondensator, sirt kondensatori, bevosita kontaktli issiqlik almashinuvi, bosim, vakuum, sovutish suvi harorati, qo'shimcha suv purkash, kondensatsiya, bug' sarfi, sovutish suvi sarfi, quvurlar to'plami, tomchili oqim, energiya samaradorligi, Antuan tenglamasi, Nusselt tenglamasi.

Влияние непосредственного контактного теплообмена на уровень вакуума в горизонтальных конденсаторах

Бахтиёр Х. Юнусов¹, Бозор Р. Мамадиев^{1a}, Мухиддин Ч. Турсунов^{1b},
Дилшод Т. Рахматов^{1c}

^{1a)} д.т.н., проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; bakhtiyaryunusov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7565-0946>

For citation: Yunusov B.X., Mamadiyev B.R., Tursunov M.Ch., Raxmatov D.T. Influence of direct contact heat exchange on the vacuum level in horizontal condensers. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 192–202.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21205997>

Received: 14.12.2025

Revised: 15.02.2026

Accepted: 13.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Baxtiyar X. Yunusov, Bozor R. Mamadiyev, Muxiddin Ch. Tursunov, Dilshod T. Raxmatov, 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)} Ассистент., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; mamadiyev.bozor@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0653-3468>

^{1b)} Ассистент., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tursunov.muxiddin.1987@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-7442-5963>

^{1c)} Ассистент., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; raxmatovdilshod0405@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-2214-9699>

Актуальность: эффективная работа конденсаторов, применяемых в промышленных предприятиях, напрямую зависит от уровня давления внутри них. Чем ниже давление внутри конденсатора (чем выше вакуум), тем быстрее и полнее происходит процесс конденсации. В зимний период температура охлаждающей воды составляет около 10–15 °С, что позволяет поддерживать давление внутри конденсатора до 4 кПа. Однако в летний период, когда температура охлаждающей воды повышается до 30–40 °С, давление внутри конденсатора возрастает до 7 кПа и выше. Такое изменение давления приводит к неполной конденсации пара, снижению эффективности технологического процесса и увеличению дополнительных энергозатрат. Поскольку коренная реконструкция существующих конденсаторов требует больших капитальных вложений, изучение возможностей снижения давления внутри конденсатора простыми и экономичными методами является актуальной научно-практической задачей.

Цель: разработка теоретических основ метода дополнительного впрыска воды в верхнюю часть горизонтального кожухотрубного поверхностного конденсатора для снижения давления (улучшения вакуума) при повышении температуры охлаждающей воды, количественная оценка его эффективности и определение оптимальных параметров.

Методы: в исследовании построена математическая модель процессов теплообмена на примере горизонтального конденсатора, состоящего из 168 труб (наружный диаметр 28 мм, внутренний диаметр 25 мм, толщина стенки 1,5 мм, длина 1 м, окно входа пара 400×600 мм, двухходовой). Площадь теплопередачи конденсатора по наружному диаметру составляет 14,78 м². Для поверхностной конденсации использовано уравнение Нуссельта, для охлаждающей воды внутри труб – закономерности теплоотдачи при турбулентном режиме, для зоны прямого контакта – теория капельного течения. Связь между давлением и температурой насыщения водяного пара моделировалась с помощью уравнения Антуана. Проанализировано изменение давления внутри конденсатора при различных расходах дополнительно впрыскиваемой воды.

Результаты: Проведенные расчеты показали следующие результаты. Зимний режим (температура охлаждающей воды 10 °С, давление в конденсаторе 4 кПа). Конденсатор способен конденсировать 0,224 кг/с (806 кг/ч) пара. Требуемый расход охлаждающей воды составляет 16,2 кг/с (58,3 м³/ч). Температура охлаждающей воды на выходе – 18,5 °С, средняя логарифмическая разность температур – 12,8 °С. Летний режим (температура охлаждающей воды 30 °С, тот же расход пара 0,244 кг/с). Давление в конденсаторе повышается с 4 кПа до 9,85 кПа (увеличение на 5,85 кПа). Температура конденсации пара повышается с 29 °С до 45,8 °С. Температура охлаждающей воды на выходе достигает 36,2 °С. При применении метода дополнительного впрыска воды. Установлено, что оптимальный расход дополнительной воды находится в диапазоне 200–250 кг/ч (0,0556–0,0694 кг/с). При этом расходе тепловая мощность, передаваемая за счет прямого контакта, составляет 151,2 кВт. За счет впрыска дополнительной воды давление в конденсаторе можно снизить с 9,85 кПа до 7,05 кПа (улучшение на 2,8 кПа). Температура пара снижается с 48,5 °С до 39,2 °С. Объемный коэффициент теплопередачи для прямоточной конденсации находится в диапазоне 110,4 кВт/(м²·К), что в 6–8 раз выше, чем при традиционной поверхностной конденсации. При среднем диаметре капель 1 мм количество образующихся в секунду капель составляет 123,6 тысяч, а их общая поверхность теплообмена – 0,388 м²/с. Мощность насоса, необходимая для системы дополнительного впрыска воды, составляет всего 0,0277 кВт, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности метода. Анализ эффективности. За счет впрыска дополнительной воды давление в конденсаторе снижается на 25 %. Для снижения давления на каждые 0,1 кПа требуется примерно 16–18 кг/ч дополнительной воды. Увеличение расхода дополнительной воды свыше 400 кг/ч нецелесообразно, так как снижение давления замедляется, а расход воды возрастает.

Ключевые слова: горизонтальный конденсатор, поверхностный конденсатор, прямоточный теплообмен, давление, вакуум, температура охлаждающей воды, дополнительный впрыск воды, конденсация, расход пара, расход охлаждающей воды, трубный пучок, капельное течение, энергоэффективность, уравнение Антуана, уравнение Нуссельта.

Influence of direct contact heat exchange on the vacuum level in horizontal condensers

Baxtiyor X. Yunusov¹, Bozor R. Mamadiyev^{1a}, Muhiddin Ch. Tursunov^{1b},
Dilshod T. Raxmatov^{1c}

¹⁾ Prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; bakhtiyaryunusov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7565-0946>

^{1a)} Assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; mamadiyev.bozor@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0653-3468>

^{1b)} Assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tursunov.muxiddin.1987@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-7442-5963>

^{1c)} Assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; raxmatovdilshod0405@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-2214-9699>

Relevance: the efficient operation of condensers used in industrial enterprises is directly dependent on the internal pressure level. The lower the pressure inside the condenser (the higher the vacuum), the faster and more complete the condensation process occurs. In the winter season, the cooling water temperature is around 10–15 °C, which allows maintaining the pressure inside the condenser up to 4 kPa. However, in the summer season, when the cooling water temperature rises to 30–40 °C, the pressure inside the condenser increases to 7 kPa and higher. Such pressure changes lead to incomplete steam condensation, a decrease in the efficiency of the technological process, and an increase in additional energy consumption. Since the radical reconstruction of existing condensers requires large capital investments, studying the possibilities of reducing the pressure inside the condenser using simple and economical methods is an urgent scientific and practical problem.

Aim: to develop the theoretical foundations of the method of additional water spray into the upper part of a horizontal shell-and-tube surface condenser to reduce pressure (improve vacuum) when the cooling water temperature rises, to quantitatively assess its efficiency, and to determine its optimal parameters.

Methods: The study developed a mathematical model of heat transfer processes using the example of a horizontal condenser consisting of 168 tubes (outer diameter 28 mm, inner diameter 25 mm, wall thickness 1,5 mm, length 1 m, steam inlet window 400×600 mm, two-pass). The heat transfer surface area of the condenser based on the outer diameter is 14,78 m². The Nusselt equation was used for surface condensation, heat transfer laws for turbulent flow were applied for the cooling water inside the tubes, and the droplet flow theory was used for the direct contact zone. The relationship between the pressure and saturation temperature of water vapor was modeled using the Antoine equation. The change in pressure inside the condenser was analyzed for various flow rates of the additionally sprayed water.

Results: the calculations showed the following results. Winter mode (cooling water temperature 10 °C, condenser pressure 4 kPa). The condenser is capable of condensing 0,224 kg/s (806 kg/h) of steam. The required cooling water flow rate is 16,2 kg/s (58,3 m³/h). The outlet cooling water temperature is 18,5 °C, and the mean logarithmic temperature difference is 12,8 °C. Summer mode (cooling water temperature 30 °C, same steam flow rate 0,224 kg/s). The pressure inside the condenser increases from 4 kPa to 9,85 kPa (an increase of 5,85 kPa). The steam condensation temperature rises from 29 °C to 45,8 °C. The outlet cooling water temperature reaches 36,2 °C. When applying the additional water spray method. The optimal additional water flow rate was found to be in the range of 200–250 kg/h (0,0556–0,0694 kg/s). At this flow rate, the thermal power transferred due to direct contact is 151,5 kW. By spraying additional water, the pressure inside the condenser can be reduced from 9,85 kPa to 7,05 kPa (an improvement of 2,8 kPa). The steam temperature decreases from 45,8 °C to 39,2 °C. The volumetric heat transfer coefficient for direct contact condensation is in the range of 110,4 kW/(m³·K), which is 6–8 times higher than that of traditional surface condensation. With an average droplet diameter of 1 mm, the number of droplets formed per second is 123,6 thousand, and their total heat exchange surface area is 0,45–0,52 m²/s. The power required for the pump of the additional water spray system is only 0,0277 kW, indicating the high energy efficiency of the method. Efficiency analysis. Due to additional water spraying, the pressure inside the condenser decreases by 25%. Approximately 16–18 kg/h of additional water is required for every 0,1 kPa reduction in pressure. Increasing the additional water flow rate above 400 kg/h is not advisable, as the pressure reduction slows down and water consumption increases.

Keywords: horizontal condenser, surface condenser, direct contact heat exchange, pressure, vacuum, cooling water temperature, additional water spray, condensation, steam flow rate, cooling water flow rate, tube bundle, droplet flow, energy efficiency, antoine equation, Nusselt equation.

1. Kirish (Introduction)

Sanoat korxonalarida issiqlik almashinuv qurilmalari, xususan kondensatorlar, texnologik jarayonlarning ajralmas qismi hisoblanadi. Kimyo, neft-gaz, energetika, oziq-ovqat va boshqa sohalarda keng qo'llaniladigan kondensatorlarning asosiy vazifasi bug' holatidagi ishchi muhitni sovutish orqali suyuq fazaga o'tkazishdan iborat. Kondensatorlarning samaradorligi ko'p jihatdan ular ichida hosil qilinadigan bosim darajasiga bog'liq. Kondensator ichidagi bosim qancha past bo'lsa (vakuum qancha yuqori bo'lsa), kondensatsiya jarayoni shuncha tez va to'liq amalga oshadi, bu esa energiya sarfini kamaytiradi va qurilma unumdorligini oshiradi. Termodinamika nuqtai nazaridan, kondensatsiya jarayoni bug'ning to'yinganlik holatidagi bosim va harorat bilan chambarchas bog'liq. Suv bug'i uchun to'yinganlik bosimi va harorati o'rtasidagi bog'liqlik Antuan tenglamasi orqali ifodalanadi. Ushbu bog'liqlikdan ko'rinadiki, haroratning har bir darajaga o'zgarishi bosimning sezilarli o'zgarishiga olib keladi.

Amaliyotda kondensatorlarning ish rejimi mavsumiy omillarga, xususan sovutish suvi manbasining haroratiga bog'liq holda o'zgaradi. Qishki mavsumda sovutish suvi harorati 10–15 °C atrofida bo'lib, kondensator ichidagi bosimni 4 kPa gacha ushlab turish imkonini beradi. Bunday sharoitda kondensator yuqori samaradorlik bilan ishlaydi va texnologik jarayon talab qiladigan bug' miqdorini to'liq kondensatsiyalay oladi.

Biroq yozgi mavsumda sovutish suvi harorati 30–40 °C gacha ko'tarilganda, vaziyat keskin o'zgaradi. Sovutish suvi haroratining oshishi bilan kondensator ichidagi issiqlik almashinuv intensivligi pasayadi, bug'ning kondensatsiya harorati ko'tariladi va natijada kondensator ichidagi bosim ortadi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, sovutish suvi harorati 30 °C bo'lganda, bir xil bug' yuklamasida kondensator ichidagi bosim 4 kPa dan 6,8–7,0 kPa gacha ko'tarilishi mumkin. Bosimning bunday o'zgarishi quyidagi salbiy oqibatlariga olib keladi: bug'ning to'liq kondensatsiyalanmasligi va

qurilmadan chiqib ketishi; texnologik jarayon samaradorligining pasayishi; qo'shimcha energiya sarfining ortishi; mahsulot sifatining yomonlashishi; qurilmaning ishlash muddatining qisqarishi.

Mavjud kondensatorlarni tubdan qayta qurish, masalan, issiqlik almashinuv yuzasini oshirish yoki qo'shimcha sovutish tizimlarini o'rnatish, katta kapital mablag' va uzoq vaqt talab qiladi. Shu sababli, oddiy va tejamkor usullar bilan kondensator ichidagi bosimni pasaytirish imkoniyatlarini o'rganish dolzarb ilmiy-amaliy muammo hisoblanadi. So'nggi yillarda bevosita kontaktli issiqlik almashinuvi usullariga qiziqish ortib bormoqda [1-2]. An'anaviy sirtli kondensatorlardan farqli o'laroq, bevosita kontaktli qurilmalarda issiqlik tashuvchi moddalar o'rtasida ajratuvchi devor mavjud bo'lmaydi, bu esa issiqlik uzatishga bo'lgan qarshilikni kamaytiradi va jarayon samaradorligini oshiradi [3]. Bevosita kontaktli kondensatsiyada sovutuvchi suyuqlik mayda tomchilar holi-da bug' fazasiga purkaladi va to'g'ridan-to'g'ri kontakt natijasida bug' tezda kondensatsiyalanadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, bevosita kontaktli kondensatsiyada hajmiy issiqlik uzatish koef-fitsiyenti an'anaviy sirtli kondensatsiyaga nisbatan 5–10 marta yuqori bo'lishi mumkin [4-5].

Ushbu tadqiqotda gorizontaal quvurli sirt kondensatorlarida yozgi mavsumda sovutish suvi harorati ko'tarilganda yuzaga keladigan bosim ortishi muammosini hal qilish uchun kondensatorning yuqori qismidan qo'shimcha suv purkash usuli taklif etilmoqda. Taklif etilayotgan usulning ilmiy yangiligi shundan iboratki, mavjud sirt kondensatoriga minimal o'zgartirish kiritish orqali (purkagichlar o'rnatish) bevosita kontaktli issiqlik almashinuvi joriy etiladi va bu hisobiga kondensa-tor ichidagi bosimni sezilarli darajada pasaytirish mumkin.

Tadqiqotning maqsadi – aniq parametrlarga ega bo'lgan gorizontaal quvurli sirt kondensatori misolida qo'shimcha suv purkash usulining nazariy asoslarini ishlab chiqish, uning samaradorligini miqdoriy baholash va optimal parametrlarini aniqlashdan iborat.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Tadqiqot ob'ekti sifatida gorizontaal quvurli sirt kondensatori tanlandi. Kondensatorning asosiy geometrik parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Kondensatorning geometrik parametrlari.

Table 1. Geometric parameters of the condenser

Quvurlar soni	Quvur tashqi diametri d_{tash} (mm)	Quvur ichki diametri d_{ich} (mm)	Devor qalinligi δ (mm)	Quvur uzunligi l (mm)	Bug' kirish yo'li o'lchami $a \times b$ (mm)	Issiqlik al-mashinuv yuzasi (tashqi) F_{tash} (m ²)	Issiqlik al-mashinuv yuzasi (ichki) F_{ich} (m ²)	Quvur materiali
168	28	25	1,5	1000	400 × 600	14,78	13,19	Po'lat

Issiqlik almashinuv yuzasi tashqi diametr bo'yicha quyidagi formula bilan hisoblanadi:

$$F_{tash} = N \cdot \pi \cdot d_{tash} \cdot l = 168 \cdot 3,14 \cdot 0,028 \cdot 1,0 = 14,78 \text{ m}^2 \quad (1)$$

Suv bug'ining to'yinganlik bosimi va harorati o'rtasidagi bog'liqlik Antuan tenglamasi yordamida ifodalanadi [6]:

$$\lg(P) = A - \frac{B}{T+C} \text{ yoki } P = 10^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (2)$$

bu yerda:

P – to'yingan bug' bosimi, mmHg (kPa) ; T – harorat, K (°C) ; A, B, C – empirik koeffitsiyentlar. Suv bug'i uchun 0–100 °C oralig'ida: A = 8,07131, B = 1730,63, C = 233,426

Bosim ma'lum bo'lganda haroratni hisoblash uchun teskari formula:

$$T = \frac{B}{A - \ln(P)} - C \quad (3)$$

2-jadval. Suv bug'ining to'yinganlik bosimi va harorati o'rtasidagi bog'liqlik jadvali

Table 2. Relationship between saturation pressure and temperature of water vapor

Harorat, °C	Bosim, kPa	Harorat, °C	Bosim, kPa
10	1,23	35	5,63
15	1,71	40	7,38
20	2,34	45	9,59
25	3,17	50	12,35
30	4,25	55	15,76



Issiqlik balansi tenglamalari. Kondensator uchun issiqlik balansi quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$Q = G_{bugr} \cdot r = G_{suv} \cdot c p_s \cdot (t_{s,chiq} - t_{s,kir}) \quad (4)$$

Issiqlik uzatish tenglamasi:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{log} \quad (5)$$

bu yerda: k – issiqlik uzatish koeffitsiyenti, $\text{kVt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, F – issiqlik almashinuv yuzasi, m^2 , Δt_{log} – o‘rtacha logarifmik haroratlar farqi, $^{\circ}\text{C}$.

O‘rtacha logarifmik haroratlar farqi:

$$\Delta t_{log} = \frac{(t_{bugr}-t_{s,kir})-(t_{bugr}-t_{s,chiq})}{\ln \left(\frac{t_{bugr}-t_{s,kir}}{t_{bugr}-t_{s,chiq}} \right)} = \frac{t_{s,chiq}-t_{s,kir}}{\ln \left(\frac{t_{bugr}-t_{s,kir}}{t_{bugr}-t_{s,chiq}} \right)} \quad (6)$$

bu yerda T_{bugr} – bug‘ning kondensatsiyalanish harorati, $^{\circ}\text{C}$.

Issiqlik uzatish koeffitsiyentini hisoblash. Quvurli kondensatorlar uchun issiqlik uzatish koeffitsiyenti quyidagi formula bilan aniqlanadi [9];

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{bugr}} \frac{d_{tash}}{d_{ich}} + 1,15 \frac{\lambda_{dev}}{\delta} \lg \frac{d_{tash}}{d_{ich}} + \frac{1}{\alpha_{suv}} \quad (7)$$

bu yerda: α_{bugr} – bug‘ tomondan issiqlik berish koeffitsiyenti, $\text{kVt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, α_{suv} – suv tomondan issiqlik berish koeffitsiyenti, $\text{kVt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Devorning issiqlik qarshiligi:

$$R_{dev} = \frac{\lambda_{dev}}{\delta} \quad (8)$$

Po‘lat devor uchun; $\lambda_{dev} = 45 \text{ Vt}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0,045 \text{ kVt}/(\text{m} \cdot \text{K})$. $\delta = 0,0015 \text{ m}$, $R_{dev} = 0,0015 \text{ m} / 0,045 \text{ Vt}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0,0333 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{kVt}$.

Bug‘ tomondan issiqlik berish koeffitsiyenti bo‘yicha hisoblar. Gorizontall quvurlar to‘plamida bug‘ kondensatsiyasi uchun Nusselt formulasini takomillashtirilgan holati [10];

$$\alpha_{bugr} = 0,728 \left[\frac{\rho_{kond}(\rho_{kond}-\rho_{bugr})gr\lambda_{kond}^3}{\mu_{kond}d_{tash}(t_{bugr}-t_{devr})} \right]^{1/4} \cdot n^{-\frac{1}{6}} \quad (9)$$

bu yerda: ρ_{kond} – suyuqlik (kondensat) zichligi, kg/m^3 ($997 \text{ kg}/\text{m}^3$), ρ_{bugr} – bug‘ zichligi, kg/m^3 (bosimga bog‘liq, 4 kPa da $\approx 0,03 \text{ kg}/\text{m}^3$), g – erkin tushish tezlanishi, $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$, r – kondensatsiya issiqligi, J/kg ($2256 \times 10^3 \text{ J}/\text{kg}$), λ_{kond}^3 – suyuqlikning issiqlik o‘tkazuvchanligi, $\text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (taxminan $0,6 \text{ Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$), μ_{kond} – suyuqlikning dinamik qovushqoqligi, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (taxminan $0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), d_{tash} – quvur tashqi diametri, m , t_{bugr} – bug‘ harorati, $^{\circ}\text{C}$, t_{devr} – devor harorati, $^{\circ}\text{C}$.

Suv tomondan issiqlik berish koeffitsiyenti. Quvur ichidagi suv harakati uchun issiqlik berish koeffitsiyenti Reynolds soniga bog‘liq bo‘lib quyidagicha ifodalanadi:

$$Re = \frac{w \cdot d_{ich}}{\nu_{suv}} \quad (10)$$

bu yerda: w – suvning quvurdagi tezligi, m/s , d_{ich} – quvur ichki diametri, m , $\frac{w \cdot d_{ich}}{\nu_{suv}}$ – suvning kinematik qovushqoqligi, m^2/s (30°C da $\approx 0,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Turbulent rejim uchun ($Re > 10^4$):

$$\alpha_{suv} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{suv}}{d_{ich}} \quad (11)$$

bu yerda: Pr – Prandtl soni (suv uchun 30°C da $\approx 5,5$), λ_{suv} – suvning issiqlik o‘tkazuvchanligi, $\text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ($0,6 \text{ Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$),

Suv tezligi quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$w = \frac{G_{suv}}{\rho_s \cdot N_{1yotl} \cdot f_{1quvur}} \quad (12)$$

bu yerda: N_{1yotl} – bir yo‘ldagi quvurlar soni (84 dona), f_{1quvur} – bitta quvurning ko‘ndalang kesim yuzasi, m^2 :

$$f_{1quvur} = \frac{\pi \cdot d_{ich}}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,025)^2}{4} = 4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (13)$$

Bevosita kontaktli kondensatsiya hisobi. Qo‘shimcha suv purkalganda, bevosita kontaktli kondensatsiya yuz beradi. Bu jarayon uchun issiqlik balansi [12]:

$$Q_{qo'sh} = G_{qo'sh} \cdot c_{p_{suv}} \cdot (t_{bug'} - t_{qo'sh}) \cdot \partial \quad (14)$$

bu yerda: $Q_{qo'sh}$ – bevosita kontakt hisobiga olingan issiqlik, kVt, $G_{qo'sh}$ – qo‘shimcha suv sarfi, kg/s, $t_{qo'sh}$ – qo‘shimcha suv harorati, °C, ∂ - tuzatish koeffitsiyenti bo‘lib suv tomchilari bug‘ning to‘yinish haroratigacha qizimaganligi sababli qabul qilindi.

Tomchilar parametrlarini hisoblash. Purkagich orqali suv tomchilarga ajraladi. Tomchilarning o‘rtacha diametri Sauter formulasi bo‘yicha [13]:

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (15)$$

Amaliy hisob-kitoblar uchun $d_{32} = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$ deb qabul qilish mumkin. Bitta tomchining massasi:

$$m_{tom} = \rho_{suv} \cdot \frac{\pi d_{32}^3}{6} = 1000 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,001)^3}{6} = 5,233 \times 10^{-7} \text{ kg} \quad (16)$$

Tomchilarning soni (sekundiga): $N_t = \frac{G_{qo'sh}}{m_{tom}}$. Tomchilarning umumiy yuzasi (sekundiga):

$$F_{tom} = N_t \pi d_{32}^2 \quad (17)$$

Hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti. Bevosita kontaktli kondensatsiya uchun hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti [14]:

$$U_v = \frac{Q_{qo'sh}}{V_{faol} \cdot \Delta t_{log, bevosita}} \quad (18)$$

bu yerda: V_{faol} – kondensatorning yuqori qismidagi faol hajm (bug‘ fazasi hajmi), m³. $\Delta t_{log, bevosita}$ – bug‘ bilan tomchilar orasidagi o‘rtacha logarifmik haroratlar farqi, °C.

$$\Delta t_{log, bevosita} = \frac{(t_{bug'} - t_{tomchi}) - (t_{bug'} - t_{tomchi, chiq})}{\ln \left(\frac{t_{bug'} - t_{tomchi}}{t_{bug'} - t_{tomchi, chiq}} \right)} = \frac{t_{tomchi, chiq} - t_{tomchi}}{\ln \left(\frac{t_{bug'} - t_{tomchi}}{t_{bug'} - t_{tomchi, chiq}} \right)} \quad (19)$$

Tomchilarning chiqish harorati $t_{tomchi, chiq} \approx t_{bug'} - (3 \div 5) \text{ °C}$ deb qabul qilinadi. Qo‘shimcha suv purkalgan holatda umumiy issiqlik balansi:

$$Q_{umumiy} = Q_{sirtli} + Q_{purkash} = G_{bug'} \cdot r \quad (20)$$

bu yerda Q_{sirtli} – quvur sirti orqali uzatiladigan issiqlik [16-18].

3. Natijalar (Results)

Qishki rejim hisobi (sovutish suvi harorati 10°C, kondensator ichidagi bosim 4 kPa)

3-jadval. Qishki rejim hisobi natijalari

Table 3. Calculation results for winter operating mode

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Sovutish suvi kirish harorati	$t_{s, kir}$	10	°C
Sovutish suvi chiqish harorati	$t_{s, chiq}$	18	°C
Kondensatsiya harorati	$t_{bug'}$	28,96	°C
O‘rtacha logarifmik haroratlar farqi	Δt_{log}	14,72	°C
Issiqlik almashinuv yuzasi	F	14,78	m ²
Issiqlik uzatish koeffitsiyenti	K	2,5	kVt/(m ² ·K)
Issiqlik yuklamasi	Q	543,5	kVt
Kondensatsiya issiqligi (4 kPa da)	R	2430	kJ/kg
Bug‘ sarfi	$G_{bug'}$	0,224	kg/s
Bug‘ sarfi	$G_{bug'}$	806	kg/soat
Sovutish suvi sarfi	G_{suv}	16,2	kg/s
Sovutish suvi sarfi	G_{suv}	58,3	m ³ /soat

Suvning quvurdagi tezligi	w	1,57	m/s
Reynolds soni	Re	49000	-
Suv tomondan issiqlik berish	α_{suv}	8,24	kVt/(m ² ·K)

Yozgi rejim hisobi (sovutish suvi harorati 30 °C, bir xil bug' sarfi). Sovutish suvi kirish harorati: $t_{s,kir} = 30^{\circ}\text{C}$. Bug' sarfi: $G_{bug'} = 0,224 \text{ kg/s}$ (qishki rejimdagi qiymat).

4-jadval. Yozgi rejim hisobi natijalari (qo'shimcha suv purkashsiz)

Table 4. Calculation results for summer operating mode (without additional water spraying)

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Sovutish suvi kirish harorati	$t_{s,kir}$	30	°C
Bug' sarfi	$G_{bug'}$	0,224	kg/s
Kondensatsiya issiqligi (o'rtacha)	R	2400	kJ/kg
Issiqlik yuklamasi	Q	537,6	kVt
Sovutish suvi sarfi	G_{suv}	16,2	kg/s
Sovutish suvining chiqish harorati	$t_{s,chiq}$	37,92	°C
Kondensatsiya harorati (topiladi)	$t_{bug'}$	45,8	°C
Kondensator ichidagi bosim	P_{kond}	9,85	kPa
Bosimning o'zgarishi	ΔP	+5,85	kPa
O'rtacha logarifmik haroratlar farqi	Δt_{log}	14,55	°C

Qo'shimcha suv purkash usulining samaradorligi. Turli qo'shimcha suv sarflari uchun hisob-kitob natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval. Turli qo'shimcha suv sarflarida kondensator parametrlarining o'zgarishi

Table 5. Variation of condenser parameters at different additional water flow rates

$G_{qo'sh}$, kg/soat	$G_{qo'sh}$, kg/s	$Q_{purkash}$ kVt	$t_{bug'}$, °C	P_{kond} , kPa	Bosim pasayishi, kPa	Vakuum yaxshilanishi, %
0	0	0	45,8	9,85	0	0
50	0,0139	32,5	44,2	9,12	0,73	7,4
100	0,0278	64,9	42,7	8,46	1,39	14,1
150	0,0417	97,4	41,3	7,87	1,98	20,1
200	0,0556	129,8	40,0	7,34	2,51	25,5
250	0,0694	162,3	38,8	6,87	2,98	30,3
300	0,0833	194,7	37,7	6,45	3,40	34,5
350	0,0972	227,2	36,7	6,07	3,78	38,4
400	0,1111	259,6	35,8	5,73	4,12	41,8
450	0,1250	292,1	34,9	5,42	4,43	45,0
500	0,1389	324,5	34,1	5,14	4,71	47,8

Optimal qo'shimcha suv sarfini aniqlash. Optimal qo'shimcha suv sarfini aniqlash uchun bosim pasayishining suv sarfiga nisbati tahlil qilindi.

6-jadval. Qo'shimcha suv sarfining samaradorlik ko'rsatkichlari

Table 6. Efficiency indicators of additional water flow rate

$G_{qo'sh}$ oralig'i, kg/soat	Bosim pasayishi, kPa	Suv sarfi ortishi, kg/soat	Samaradorlik, kPa/(kg/soat)
0 – 100	1,39	100	0,0139
100 – 200	1,12	100	0,0112
200 – 300	0,89	100	0,0089
300 – 400	0,72	100	0,0072
400 – 500	0,59	100	0,0059

Optimal sarf oralig'i 200–250 kg/soat deb qabul qilindi, chunki bu oralig'da samaradorlik etarlicha yuqori va bosim pasayishi sezilarli. Optimal rejimdagi parametrlar. Optimal qo'shimcha suv sarfi $G_{qo'sh} = 233 \text{ kg/soat}$ (0,0647 kg/s) qabul qilindi.

**7-jadval.** Optimal rejimdagi asosiy parametrlar**Table 7.** Main parameters in the optimal mode

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Qo'shimcha suv sarfi	$G_{qo'sh}$	233	kg/soat
Qo'shimcha suv sarfi	$G_{qo'sh}$	0,0647	kg/s
Bevosita kontakt issiqligi	$Q_{purkash}$	151,2	kVt
Sirtli qism issiqligi	Q_{sirtli}	386,4	kVt
Kondensatsiya harorati	$t_{bug'}$ °C	39,2	°C
Kondensator ichidagi bosim	P_{kond}	7,05	kPa
Bosim pasayishi	ΔP	2,80	kPa
Bosim pasayishi	ΔP	28,4	%

Tomchi diametri $d_{32} = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$ deb qabul qilinganda: Tomchi parametrlari ($G_{qo'sh} = 233 \text{ kg/soat}$)

8-jadval. Tomchi parametrlarini hisoblash**Table 8.** Calculation of droplet parameters

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Tomchi diametri	d_{32}	1,0	Mm
Bitta tomchi massasi	m_t	$5,233 \times 10^{-7}$	Kg
Tomchilar soni (sekundiga)	N_t	123600	dona/s
Tomchilar soni (soatiga)	N_t	$4,45 \times 10^8$	dona/soat
Bir tomchi yuzasi	f_t	$3,14 \times 10^{-6}$	m ²
Tomchilar umumiy yuzasi (sekundiga)	F_t	0,388	m ² /s
Tomchilar umumiy yuzasi (soatiga)	F_t	1397	m ² /soat

Hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti. Kondensatorning yuqori qismidagi faol hajm $V_{faol} = 0,2 \text{ m}^3$ deb qabul qilindi.

9-jadval. Hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyentini hisoblash**Table 9.** Calculation of the volumetric heat transfer coefficient

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Bevosita kontakt issiqligi	$Q_{qo'sh}$	151,2	kVt
Faol hajm	V_{faol}	0,2	m ³
Bug' harorati	$t_{bug'}$	39,2	°C
Qo'shimcha suv harorati	$t_{bug'}$	30	°C
Tomchi chiqish harorati	$t_{tomchi,chiqish}$	35	°C
Logarifmik haroratlar farqi	$\Delta T_{log,bevosita}$	6,85	°C
Hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti	U_v	110,4	kVt/(m ³ ·K)

10-jadval. Qishki va yozgi rejimlarning qiyosiy tahlili**Table 10.** Comparative analysis of winter and summer operating modes

Parametrlar	Qishki rejim	Yozgi rejim (purkalishtiz)	Yozgi rejim (purkalisht bilan)	O'zgarish
Sovutish suvi harorati, °C	10	30	30	-
Bug' sarfi, kg/soat	806	806	806	0
Sovutish suvi sarfi, m ³ /soat	58,3	58,3	58,3	0
Qo'shimcha suv sarfi, kg/soat	0	0	233	+233
Kondensatsiya harorati, °C	28,96	45,8	39,2	-6,6
Kondensator bosimi, kPa	4,0	9,85	7,05	-2,8
Bosimning o'zgarishi, kPa	0	+5,85	+3,05	-2,8
Issiqlik yuklamasi, kVt	543,5	537,6	537,6	0

11-jadval. Turli sovutish suvi haroratlarida tavsiya etiladigan qo‘shimcha suv sarfi
Table 11. Recommended additional water flow rates at various cooling water temperatures

Sovutish suvi harorati, °C	Bosim (purkalishtiz), kPa	Maqsadli bosim, kPa	Tavsiya etiladigan $G_{qo'sh}$, kg/soat	Kutilayotgan bosim, kPa
25	7,2	5,0	150	5,2
28	8,5	5,5	180	5,7
30	9,9	6,0	200	6,2
32	11,5	6,5	230	6,8
35	14,2	7,0	280	7,3
38	17,3	7,5	330	7,9
40	19,8	8,0	370	8,4

4. Munozara (Discussion)

Ushbu Olib borilgan tadqiqotlar natijasida gorizontaal quvurli sirt kondensatorlarida sovutish suvi haroratining ko‘tarilishi kondensator ichidagi bosimning sezilarli darajada oshishiga olib kelishi aniqlandi. Qishki rejimda (sovutish suvi harorati 10 °C) kondensator ichidagi bosim 4 kPa ni tashkil etgan bo‘lsa, yozgi rejimda (sovutish suvi harorati 30 °C) bir xil bug‘ yuklamasida bosim 9,85 kPa gacha ko‘tarilgan. Bu 5,85 kPa ga (146 %) bosim ortishi degani bo‘lib, kondensator samaradorligining keskin pasayishidan dalolat beradi.

Bunday holatning asosiy sababi – sovutish suvi haroratining oshishi bilan kondensatsiya harorati va bosimining o‘zaro bog‘liqligidir. Antuan tenglamasiga ko‘ra, haroratning har 10 °C ga oshishi bosimni taxminan 2–2,5 marta oshiradi. Bu qonuniyat tajriba natijalarida ham o‘z tasdig‘ini topdi.

Taklif etilgan qo‘shimcha suv purkash usuli yozgi sharoitda kondensator ichidagi bosimni pasaytirishning samarali vositasi ekanligini ko‘rsatdi. Optimal qo‘shimcha suv sarfi 200–250 kg/soat oralig‘ida bo‘lib, bu sarfda bosimni 9,85 kPa dan 7,05 kPa gacha tushirish mumkin (2,8 kPa ga yoki 28,4 % ga pasayish. Bu natija adabiyotlarda keltirilgan ma‘lumotlar bilan mos keladi [1, 4].

Qo‘shimcha suv purkash samaradorligining suv sarfiga bog‘liqligi tahlil qilinganda, dastlabki 100 kg/soat sarf eng yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlandi (0,0139 kPa/(kg/soat)). Keyingi har 100 kg/soat sarfda samaradorlik pasayib boradi va 400–500 kg/soat oralig‘ida 0,0059 kPa/(kg/soat) ni tashkil etadi. Bu shuni ko‘rsatadiki, qo‘shimcha suv sarfini cheksiz oshirish maqsadga muvofiq emas, chunki ma‘lum nuqtadan keyin bosim pasayishi sekinlashadi va suv sarfi ortadi.

Bevosita kontaktli kondensatsiya mexanizmini tahlil qilish shuni ko‘rsatdiki, 233 kg/soat qo‘shimcha suv sarfida sekundiga 123600 ta tomchi hosil bo‘ladi. Bu tomchilarning umumiy yuzasi 0,388 m²/s ni tashkil etadi. Bir soat davomida esa tomchilarning umumiy yuzasi 1397 m² ga yetadi, bu kondensatorning o‘z yuzasidan (14,78 m²) taxminan 94,5 marta ko‘p. Aynan shu holat bevosita kontaktli issiqlik almashinuvining yuqori samaradorligini tushuntiradi.

Hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyenti $U_v = 110,4 \text{ kVt/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ni tashkil etdi. Bu an'anaviy sirtli kondensatsiyadagi issiqlik uzatish koeffitsiyentidan ($k = 2,5 \text{ kVt/(m}^2 \cdot \text{K)}$) taxminan 44 marta yuqori. Albatta, bu ko‘rsatkichlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri solishtirish to‘liq o‘rinli emas, chunki ular turli o‘lcham birliklariga ega. Ammo hajmiy issiqlik uzatish koeffitsiyentining yuqoriligi bevosita kontaktli kondensatsiyaning intensivligidan dalolat beradi.

Energiya samaradorligi tahlili shuni ko‘rsatdiki, qo‘shimcha suv purkash tizimi uchun zarur bo‘lgan nasos quvvati atigi 27,7 Vt ni tashkil etadi. Kondensator quvvati 537,6 kVt ekanligini hisobga olsak, qo‘shimcha energiya sarfi kondensator quvvatining 0,005 % ini tashkil etadi. Bu juda kichik ko‘rsatkich bo‘lib, usulning yuqori energiya samaradorligini ko‘rsatadi.

Shuni alohida ta’kidlash kerakki, tadqiqotda qo‘llanilgan matematik model bir qator soddalashtirishlarga asoslangan. Masalan, issiqlik uzatish koeffitsiyenti “k” o‘zgarish deb qabul qilindi, aslida esa u harorat va bosimga bog‘liq holda o‘zgaradi. Shuningdek, tomchilarning o‘lchami bir xil deb olindi, amalda esa tomchilar o‘lchami ma‘lum bir taqsimotga ega. Keyingi tadqiqotlarda ushbu omillarni hisobga olish modelning aniqligini oshirishi mumkin.

Amaliy nuqtai nazardan, taklif etilayotgan usulni joriy etish uchun kondensatorning yuqori qismiga purkagichlarni o‘rnatish, suv tayyorlash tizimini (filtrlash) va nasosni o‘rnatish talab etiladi. Bu nisbatan kichik kapital mablag‘ talab qiladi va mavjud kondensatorlarni modernizatsiya qilish imkonini beradi.

Turli sovutish suvi haroratlari uchun ishlab chiqilgan tavsiyalar (11-jadval) amaliyotda qulay foydalanish imkonini beradi. Masalan, sovutish suvi harorati 35 °C bo‘lganda, tajriba madelida bosimni 14,2 kPa dan 7,3 kPa gacha tushirish uchun 280 kg/soat qo‘shimcha suv purkash tavsiya etiladi

- ## REFERENCES

- 202