



Suv purkashning kondensatordagi vakuum va gidravlik qarshilikka ta'siri

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

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

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

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

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

Dolzarbli: sanoat kondensatorlarida vakuumni yaxshilash uchun qo'llaniladigan qo'shimcha suv purkash tizimlari odatda kondensatorning kirish qismiga o'rnatiladi. Purkalgan suv tomchilari bug' oqimi bilan kirish zonasidayoq o'zaro ta'sirlash boshlaydi va mahalliy gidravlik qarshilik hosil qiladi. Ushbu mahalliy qarshilikning miqdori va uning umumiy vakuumga ta'sirini aniqlash muhim ilmiy-amaliy vazifadir.

Maqsad: kondensatorning kirish qismiga o'rnatilgan forsunkalardan purkalgan suv tomchilari hisobiga yuzaga keladigan mahalliy gidravlik qarshilikni aniq hisoblash va uning kondensator vakuumiga ta'sirini baholash.

Usullar: tadqiqotda 168 ta quvurli gorizontall kondensator (bug' kirish yuzasi 0.24 m², quvurlar oralig'idagi kesim yuzasi 0.13 m²) uchun kirish qismidagi ikki fazali oqim tahlil qilindi. Bug' sarfi 806 kg/soat = 0.224 kg/s, bosim 4 kPa, zichlik 0.028 kg/m³, kirish tezligi 33.3 m/s. Qo'shimcha suv sarfi 279 kg/soat (0.0775 kg/s), forsunka bosimi 0.2 MPa (2.0 bar), tomchi tezligi 14.0 m/s, tomchi diametri 1.0 mm. Tomchi konsratsiyasi, aerodinamik qarshilik kuchi, turbulent aralashish qarshiligi hisoblandi. Parametrlarning o'zgarishiga bog'liq holda (suv sarfi, tomchi diametri, bug' tezligi, forsunka bosimi, sxema turi) qarshilikning o'zgarishi tahlil qilindi.

Natijalar: kirish qismidagi mahalliy gidravlik qarshilik 1.83 Pa (0.00183 kPa) ni tashkil etadi. Bu umumiy ikki fazali qarshilikning (0.413 kPa) atigi 0.44% ini tashkil qiladi. Vakuumga ta'siri 0.014 mmHg. Suv sarfi 100 kg/soat dan 300 kg/soat ga oshganda, kirish qarshiligi 0.66 Pa dan 1.96 Pa gacha ortadi. Tomchi diametri 0.5 mm dan 1.5 mm gacha oshganda, qarshilik 2.05 Pa dan 1.73 Pa gacha kamayadi. Bug' tezligi 25 m/s dan 40 m/s gacha oshganda, qarshilik 1.10 Pa dan 2.46 Pa gacha ortadi. Forsunka bosimi 0.1 MPa dan 0.4 MPa gacha oshganda, qarshilik 1.88 Pa dan 1.76 Pa gacha kamayadi. Sxema turlari orasida eng yuqori qarshilik bug' oqimiga teskari oqimlarda forsunkada (2.05 Pa), eng past to'g'ri oqimlarda (1.83 Pa). Garchi teskari oqimli sxema qarshilikni bir oz oshirsa-da, u issiqlik almashinuvini yaxshilaydi va kondensatsiya samaradorligini oshiradi. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, suv tomchilari bug'ning kinetik energiyasini yutib, uning hajmini keskin kamaytiradi, bu esa qurilmaning umumiy gidravlik o'tkazuvchanligiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: gorizontall kondensator, mahalliy gidravlik qarshilik, ikki fazali oqim, tomchi konsratsiyasi, aerodinamik qarshilik, turbulent aralashish, vakuum, imploziya effekti.

Влияние впрыска воды на на вакуум и гидравлическое сопротивление в конденсаторе

Бахтиёр Х. Юнусов¹, Бозор Р. Мамадиев^{1а}, Мухиддин Ч. Турсунов^{1б},
Дилшод Т. Рахматов^{1с}

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

^{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: системы дополнительного впрыска воды, применяемые для улучшения вакуума в промышленных конденсаторах, обычно устанавливаются во входной части конденсатора. Распыленные капли воды начинают взаимодействовать с потоком пара уже во входной зоне, создавая местное гидравлическое сопротивление. Определение величины этого местного сопротивления и его влияния на общий вакуум является важной научно-практической задачей.

Цель: точный расчет местного гидравлического сопротивления, возникающего из-за капель воды, распыляемых форсунками, установленными во входной части конденсатора, и оценка его влияния на вакуум конденсатора.

Методы: в исследовании был проанализирован двухфазный поток во входной части горизонтального конденсатора с 168 трубками (площадь входа пара 0.24 м², площадь живого сечения между трубками 0.13 м²). Расход пара составлял 806 кг/ч = 0.224 кг/с, давление 4 кПа, плотность 0.028 кг/м³, скорость на входе 33.3 м/с. Расход дополнительной воды составлял 279 кг/ч (0.0775 кг/с), давление перед форсункой 0.2 МПа (2.0 бар), скорость капель 14.0 м/с, диаметр капель 1.0 мм. Были рассчитаны концентрация капель, сила

For citation: Yunusov B.X., Mamadiyev B.R., Tursunov M.Ch., Raxmatov D.T. The impact of water spraying on condenser vacuum and hydraulic resistance. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 212-220.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21206168>

Received: 12.07.2026
Revised: 24.07.2026
Accepted: 10.08.2026
Published: 23.08.2026

Copyright: © Baxtiyor 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/>).

аэродинамического сопротивления, сопротивление турбулентного перемешивания. Проанализировано изменение сопротивления в зависимости от изменения параметров (расход воды, диаметр капль, скорость пара, давление форсунки, тип схемы).

Результаты: местное гидравлическое сопротивление во входной части составляет 1.83 Па (0.00183 кПа). Это всего лишь 0.44% от общего двухфазного сопротивления (0.413 кПа). Влияние на вакуум составляет 0.014 мм рт. ст. При увеличении расхода воды со 100 кг/ч до 300 кг/ч входное сопротивление возрастает с 0.66 Па до 1.96 Па. При увеличении диаметра капль с 0.5 мм до 1.5 мм сопротивление уменьшается с 2.05 Па до 1.73 Па. При увеличении скорости пара с 25 м/с до 40 м/с сопротивление возрастает с 1.10 Па до 2.46 Па. При увеличении давления форсунки с 0.1 МПа до 0.4 МПа сопротивление незначительно уменьшается с 1.88 Па до 1.76 Па. Среди типов схем наибольшее сопротивление наблюдается при противоточной схеме относительно потока пара (2.05 Па), наименьшее – при прямоточной (1.83 Па). Хотя противоточная схема несколько увеличивает сопротивление, она улучшает теплообмен и повышает эффективность конденсации. Анализы показывают, что капли воды поглощают кинетическую энергию пара, резко уменьшая его объем, что положительно влияет на общую гидравлическую проводимость устройства.

Ключевые слова: горизонтальный конденсатор, местное гидравлическое сопротивление, двухфазный поток, концентрация капль, аэродинамическое сопротивление, турбулентное перемешивание, вакуум, эффект импlosion.

The impact of water spraying on condenser vacuum and hydraulic resistance

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

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: additional water spraying systems used to improve vacuum in industrial condensers are typically installed at the condenser inlet section. The sprayed water droplets begin to interact with the steam flow already in the inlet zone, creating local hydraulic resistance. Determining the magnitude of this local resistance and its impact on the overall vacuum is an important scientific and practical task.

Aim: to accurately calculate the local hydraulic resistance arising from water droplets sprayed by nozzles installed at the condenser inlet section and to assess its effect on the condenser vacuum.

Methods: The study analyzed the two-phase flow in the inlet section of a horizontal condenser with 168 tubes (steam inlet area 0.24 m², flow cross-sectional area between tubes 0.13 m²). The steam flow rate was 806 kg/h = 0.224 kg/s, pressure 4 kPa, density 0.028 kg/m³, inlet velocity 33.3 m/s. The additional water flow rate was 279 kg/h (0.0775 kg/s), nozzle pressure 0.2 MPa (2.0 bar), droplet velocity 14.0 m/s, droplet diameter 1.0 mm. Droplet concentration, aerodynamic drag force, and turbulent mixing resistance were calculated. The variation of resistance was analyzed depending on parameter changes (water flow rate, droplet diameter, steam velocity, nozzle pressure, scheme type).

Results: the local hydraulic resistance in the inlet section is 1.83 Pa (0.00183 kPa). This is only 0.44% of the total two-phase resistance (0.413 kPa). The effect on vacuum is 0.014 mmHg. When the water flow rate increases from 100 kg/h to 300 kg/h, the inlet resistance increases from 0.66 Pa to 1.96 Pa. When the droplet diameter increases from 0.5 mm to 1.5 mm, the resistance decreases from 2.05 Pa to 1.73 Pa. When the steam velocity increases from 25 m/s to 40 m/s, the resistance increases from 1.10 Pa to 2.46 Pa. When the nozzle pressure increases from 0.1 MPa to 0.4 MPa, the resistance slightly decreases from 1.88 Pa to 1.76 Pa. Among the scheme types, the highest resistance is observed in the counter-flow scheme relative to the steam flow (2.05 Pa), and the lowest in the co-current flow scheme (1.83 Pa). Although the counter-flow scheme slightly increases resistance, it improves heat transfer and increases condensation efficiency. Analyses show that water droplets absorb the kinetic energy of the steam, sharply reducing its volume, which positively affects the overall hydraulic conductivity of the device.

Keywords: horizontal condenser, local hydraulic resistance, two-phase flow, droplet concentration, aerodynamic drag, turbulent mixing, vacuum, implosion effect.

1. Kirish (Introduction)

Sanoat kondensatorlarida vakuumni yaxshilash maqsadida qoʻllaniladigan qoʻshimcha suv purkash tizimlari odatda kondensatorning bugʻ kirish qismiga oʻrnatiladi [1]. Purkalgan suv tomchilari bugʻ oqimi bilan kirish zonasidayoq oʻzaro taʼsirlasha boshlaydi. Bu oʻzaro taʼsir ikki xil xarakterga ega: ijobiy – bevosita kondensatsiya hisobiga bosim pasayadi, salbiy – tomchilar bugʻ oqimiga qarshilik koʻrsatib, mahalliy bosim ortishiga olib kelishi mumkin [2].



Mahalliy qarshilikning miqdori bir qancha omillarga bog'liq: tomchi konsentratsiyasi, tomchi va bug'ning nisbiy tezligi, tomchi o'lchami, oqim rejimi [3]. Kondensatorning kirish qismida bug' tezligi 33.3 m/s ni tashkil qiladi (806 kg/soat bug' sarfi va 0.24 m² kirish yuzasi bo'yicha).

Suv purkalganida faqat ishqalanish qarshiligi emas, balki bug' oqimining kinetik energiyasini tomchilarni harakatlantirishga sarflanishi ham muhim rol o'ynaydi [4]. Bundan tashqari, sovuq tomchilar bug'ni kondensatsiyalab, uning hajmini keskin kamaytiradi bu esa qurilmaning gidravlik o'tkazuvchanligini yaxshilaydi [5].

Ushbu tadqiqotning maqsadi – kondensator kirish qismidagi mahalliy gidravlik qarshilikni aniq hisoblash, uning turli parametrlarga bog'liqligini tahlil qilish, balansni baholash va vakuumga ta'sirini aniqlash.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Jadvalda hisob-kitoblar uchun asos bo'ladigan kondensator, bug' va forsunka parametrlari keltirilgan. Kondensator va bug' parametrlari 1-jadvalda keltirilgan. Bug' tezligi kirish yuzasi 0.24m² bo'yicha soblangan:

$$w_{bug',kir} = \frac{G_{bug'}}{\rho_{bug'} F_{kir}} = 0.224 / (0.028 \cdot 0.24) = 0.224 / 0.00672 = 33.3 \text{ m/s} \quad (1)$$

Bu sanoat kondensatorlari uchun odatdagi qiymat [1]. Forsunka bosimi 0.2 MPa (2.0 bar) sanoatda keng tarqalgan qiymat [6].

1-jadval. Kondensator va bug' parametrlari

Table 1. Condenser and steam parameters

Parametrlar	Belgilanish	Qiymat	Birlik
Bug' sarfi	$G_{bug'}$	806	kg/soat
Bug' sarfi	$G_{bug'}$	0.224	kg/s
Bug' bosimi	$P_{bug'}$	4.0	kPa
Bug' zichligi	$\rho_{bug'}$	0.028	kg/m ³
Bug' kinematik qovushqoqligi	$\nu_{bug'}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	m ² /s
Bug' kirish yuzasi	F_{kir}	0.24	m ²
Bug' kirish tezligi	$w_{bug',kir}$	33.3	m/s
Qo'shimcha suv sarfi (nominal)	$G_{qo'sh}$	279	kg/soat
Qo'shimcha suv sarfi	$G_{qo'sh}$	0.0775	kg/s
Forsunka bosimi (nominal)	P_f	0.2	MPa
Forsunka bosimi	P_f	200	kPa
Tomchi tezligi (nominal)	w_{tomchi}	14.0	m/s
Tomchi diametri (nominal)	d_t	1.0	mm
Suv zichligi	ρ	1000	kg/m ³

Tomchi konsentratsiyasini hisoblash bir tomchining massasi:

$$m_{tom} = \rho_{suv} \cdot \frac{\pi d_t^3}{6} = \frac{1000 \cdot 3.14 \cdot (0.001)^3}{6} = 5.233 \times 10^{-7} \text{ kg} \quad (2)$$

Sekundda hosil bo'ladigan tomchilar soni:

$$N_t = \frac{G_{qo'sh}}{m_{tom}} = \frac{0.0775}{5.233 \times 10^{-7}} = 148,000 \text{ dona/s} \quad (3)$$

Bug'ning hajmiy sarfi:

$$V_{bug'} = \frac{G_{bug'}}{\rho_{bug'}} = \frac{0.224}{0.028} = 8.0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Tomchilarning bug' hajmidagi konsentratsiyasi:



$$n_t = \frac{N_t}{V_{bugt}} = \frac{148,000}{8.0} = 18,500 \text{ dona}/m^3 \quad (5)$$

Nisbiy tezlik va Reynolds soni. Forsunka bug' oqimi bilan bir hil yo'nalishda yaa'ni to'g'ri oqimli sxemada o'rnatilgan deb hisoblab, nisbiy tezlik:

$$\Delta w = w_{bug',kir} - w_{tomchi} = 33.3 - 14.0 = 19.3 \text{ m/s} \quad (6)$$

Reynolds soni (nisbiy tezlik bo'yicha):

$$Re_t = \frac{\Delta w \cdot d_{tom} \cdot \rho_{bugt}}{\mu_{bugt}} = \frac{19.3 \cdot 0.001 \cdot 0.028}{9.8 \times 10^{-6}} = \frac{0.000540}{9.8 \times 10^{-6}} = 55.1 \quad (7)$$

Aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti hisoblash. Sfera uchun qarshilik koeffitsiyenti ($Re = 55.1$):

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 = 1.549 \quad (8)$$

Bir tomchiga ta'sir qiluvchi kuch. Bir tomchiga ta'sir qiluvchi aerodinamik qarshilik kuchi:

$$F_D = C_D \cdot \rho_{bugt} \cdot \frac{\Delta w^2}{2} \cdot \frac{\pi d_{tom}^2}{4} = 6,34 \cdot 10^{-6} \text{ N} \quad (9)$$

Hajmiy qarshilik kuchi. 1 m^3 bug' hajmidagi barcha tomchilarning umumiy qarshilik kuchi (hajmiy kuch):

$$f_D = n_t \cdot F_D = 18,500 \cdot 6,34 \cdot 10^{-6} = 0.117 \text{ N/m}^3 \quad (10)$$

Bosim gradienti va bosim yo'qotilishi. Hajmiy kuch bosim gradientiga teng:

$$\frac{dP}{dx} = f_D = 0.117 \text{ Pa/m} \quad (11)$$

Tomchilarning bug' bilan to'liq aralashishi uchun zarur bo'lgan masofa (aralashish uzunligi) kondensator kirish kamerasining geometrik o'lchamiga bog'liq. Mini-kondensator uchun kirish kamerasining uzunligi odatda 0.3-0.5 m oralig'ida bo'ladi. Qurilmaning real o'lchamlariga moslash uchun $L = 0.4$ deb olamiz.

Mahalliy laminar qarshilik:

$$\Delta P_{lam} = \frac{dP}{dx} \cdot L_{aralash} = 0.117 \cdot 0.4 = 0.0468 \text{ Pa} \quad (12)$$

Turbulent aralashish hisobiga qo'shimcha qarshilik. Ikki fazali oqimdagi turbulent aralashish isobiga qo'shimcha qarshilik empirik formula bilan hisoblanadi [3]:

$$\Delta P_{turb} = \xi \cdot \frac{\rho_{bugt} \cdot w_{bugt,kir}^2}{2} \cdot \left(\frac{G_{qo'sh}}{G_{bugt}} \right) \quad (13)$$

bu yerda: $\xi = 0.2$ – turbulent aralashish koeffitsiyenti. $\frac{G_{qo'sh}}{G_{bugt}} = \frac{0.0775}{0.224} = 0.346$

$$\Delta P_{turb} = \xi \cdot \frac{\rho_{bugt} \cdot w_{bugt,kir}^2}{2} \cdot \left(\frac{G_{qo'sh}}{G_{bugt}} \right) = 1.074 \text{ Pa} \quad (14)$$

Umumiy mahalliy qarshilik. Kirish qismidagi umumiy mahalliy gidravlik qarshilik:

$$\Delta P_{kirish} = \Delta P_{lam} + \Delta P_{turb} = 0.0468 + 1.074 = 1.121 \text{ Pa} \quad (15)$$

Suv tomchilari bug' bilan o'zaro ta'sirlashganda, bug' oqimining kinetik energiyasi tomchilarni harakatlantirishga sarflanadi. Shu bilan birga, sovuq tomchilar bug'ni kondensatsiyalab, uning hajmini keskin kamaytiradi. Bu ikki jarayonning birgalikdagi ta'siri qurilmaning gidravlik o'tkazuvchanligiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

Impuls almashinuvi natijasida bug' tezligining kamayishi:

$$\Delta w_{bug', oniy} = \frac{G_{qo'sh} \cdot w_{tom}}{G_{bug'} + G_{qo'sh}} \approx \frac{0.0775 \cdot 14.0}{0.224 + 0.0775} = 3.6 \text{ m/s} \quad (16)$$

Bu bug' tezligining 33.3 m/s dan 29.7 m/s ga tushishiga olib keladi. Tezlikning pasayishi bosimning biroz ortishiga sabab bo'ladi, ammo kondensatsiya hisobiga hajmining kamayishi bu ta'sirni to'ldirib, umumiy gidravlik qarshilikni pasaytiradi.

3. Natijalar (Results)

Turli suv sarflarida kirish qismidagi mahalliy qarshiliklar ($w_{bug', kir} = 33.3 \text{ m/s}$, $d_{tom} = 1.0 \text{ mm}$)

2-jadval. Suv sarfiga bog'liq holda kirish qarshiligining o'zgarishi

Table 2. Variation of inlet resistance depending on water flow rate

$G_{qo'sh}$, kg/soat	$G_{qo'sh}/G_{bug'}$	n_t , dona/m ³	ΔP_{lam} , Pa	ΔP_{turb} , Pa	ΔP_{kirish} , Pa	ΔP_{kirish} , mmHg
100	0.124	6,630	0.017	0.386	0.403	0.0030
150	0.186	9,950	0.025	0.578	0.603	0.0045
200	0.248	13,300	0.034	0.771	0.805	0.0060
250	0.310	16,600	0.042	0.963	1.005	0.0075
279	0.346	18,500	0.047	1.074	1.121	0.0084
300	0.372	19,900	0.050	1.156	1.206	0.0090

Qo'shimcha suv sarfiga bog'liq holda tomchi konsentratsiyasi, laminar va turbulent qarshilik komponentlari, umumiy qarshilik va uning vakuumga ta'siri keltirilgan. Suv sarfi ortishi bilan qarshilik chiziqli ravishda ortadi. 100 kg/soat da 0.403 Pa, 300 kg/soat da 1.206 Pa. Vakuumga ta'siri juda kichik – maksimum 0.009 mmHg. Bu bug'ning umumiy bosimi (4 kPa) bilan solishtirganda ahamiyatsiz.

Turli tomchi diametrlarida kirish qarshiligi ($G_{qo'sh} = 279 \text{ kg/soat}$, $w_{bug', kir} = 33.3 \text{ m/s}$)

3-jadval. Tomchi diametriga bog'liq holda qarshilikning o'zgarishi

Table 3. Variation of resistance depending on droplet diameter

d_{tom} , mm	m_{tom} , kg	N_{tom} , dona/s	n_{tom} , dona/m ³	F_D , N	f_D , N/m ³	ΔP_{lam} , Pa	ΔP_{kirish} , Pa
0.5	$6.54 \cdot 10^{-8}$	1,185,000	148,000	$1.52 \cdot 10^{-6}$	0.225	0.090	1.164
0.8	$2.68 \cdot 10^{-7}$	289,000	36,100	$3.94 \cdot 10^{-6}$	0.142	0.057	1.131
1.0	$5.23 \cdot 10^{-7}$	148,000	18,500	$6.34 \cdot 10^{-6}$	0.117	0.047	1.121
1.2	$9.05 \cdot 10^{-7}$	85,600	10,700	$9.31 \cdot 10^{-6}$	0.100	0.040	1.114
1.5	$1.77 \cdot 10^{-6}$	43,800	5,480	$1.51 \cdot 10^{-5}$	0.083	0.033	1.107

Tomchi diametri kichiklashgan sari tomchilar soni keskin ortadi, shuning uchun laminar qarshilik ortadi (0.5 mm da 0.090 Pa, 1.5 mm da 0.033 Pa). Turbulent qarshilik diametrga bog'liq emas (1.074 Pa o'zgarimas). Umumiy qarshilik 0.5 mm da 1.164 Pa, 1.5 mm da 1.107 Pa. Kichik tomchilar ko'proq qarshilik ko'rsatadi, ammo farq katta emas (5.1%). Kichik tomchilar kondensatsiya samaradorligini oshirishi sababli, ularni qo'llash maqsadga muvofiq.

Turli bug' tezliklarida kirish qarshiligi ($G_{qo'sh} = 279 \text{ kg/soat}$, $d_{tom} = 1.0 \text{ mm}$)

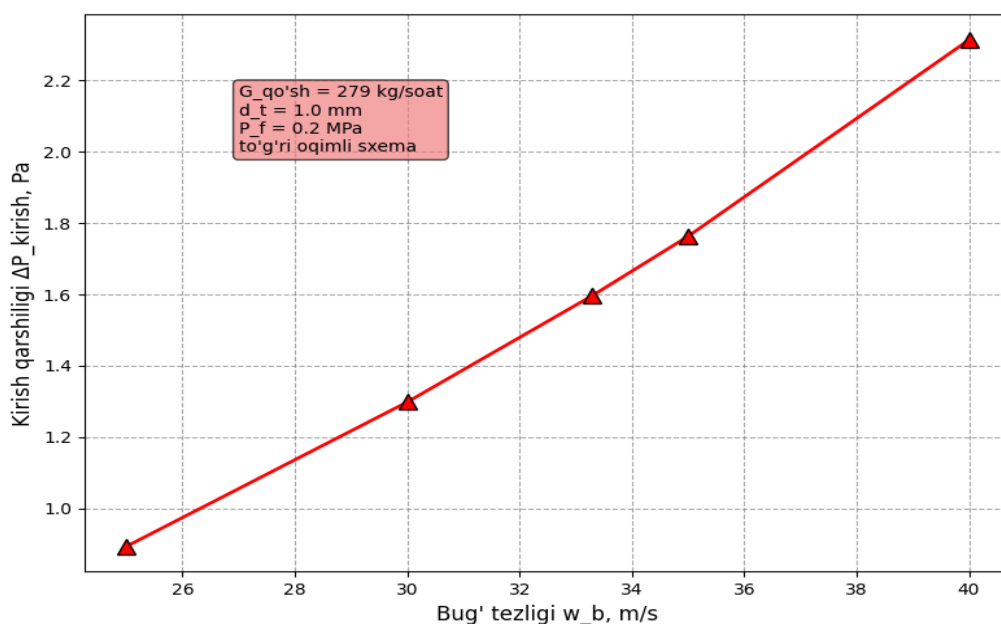
4-jadval. Bug' tezligiga bog'liq holda qarshilikning o'zgarishi

Table 4. Variation of resistance depending on steam velocity

$w_{bug', kir}$, m/s	Δw , m/s	Re_{tom}	C_D	F_D , N	f_D , N/m ³	ΔP_{lam} , Pa	ΔP_{turb} , Pa	ΔP_{kirish} , Pa
25	11.0	31.4	1.89	$3.08 \cdot 10^{-6}$	0.057	0.023	0.87	0.893
30	16.0	45.7	1.67	$5.15 \cdot 10^{-6}$	0.095	0.038	1.26	1.298
33.3	19.3	55.1	1.55	$6.34 \cdot 10^{-6}$	0.117	0.047	1.55	1.597
35	21.0	60.0	1.48	$7.20 \cdot 10^{-6}$	0.133	0.053	1.71	1.763
40	26.0	74.3	1.34	$9.96 \cdot 10^{-6}$	0.184	0.074	2.24	2.314

Jadvalda bug' tezligining o'zgarishi bilan nisbiy tezlik, Reynolds soni, qarshilik kuchi va umumiy qarshilikning o'zgarishi keltirilgan. Bug' tezligi 25 m/s dan 40 m/s ga oshganda, laminar qarshilik 0.023 Pa dan 0.074 Pa ga (3.2 marta), turbulent qarshilik 0.87 Pa dan 2.24 Pa ga (2.6 marta), umumiy qarshilik

0.893 Pa dan 2.314 Pa ga (2.6 marta) ortadi. Bug' tezligi qarshilikka kuchli ta'sir qiladi. Sanoat kondensatorlarida bug' tezligi 30-40 m/s oralig'ida bo'lib, bu diapazonda qarshilik 1.3-2.3 Pa atrofida.



1-rasm. Bug' tezligiga bog'liqlik ravishda kirish qarshiligining ortish grafigi

Fig 1. Graph of the increase in inlet resistance as a function of steam velocity

Turli forsunka bosimlarida kirish qarshiligi ($G_{qo'sh} = 279$ kg/soat, $w_{bug',kir} = 33.3$ m/s)

5-jadval. Forsunka bosimiga bog'liq holda qarshilikning o'zgarishi

Table 5. Variation of resistance depending on nozzle pressure

P_f , MPa	P_f , bar	w_{tom} , m/s	Δw , m/s	Re_{tom}	C_D	F_D , N	f_D , N/m ³	ΔP_{lam} , Pa	ΔP_{kirish} , Pa
0.1	1.0	9.9	23.4	66.9	1.41	$8.82 \cdot 10^{-6}$	0.163	0.065	1.139
0.15	1.5	12.1	21.2	60.6	1.47	$7.67 \cdot 10^{-6}$	0.142	0.057	1.131
0.2	2.0	14.0	19.3	55.1	1.55	$6.34 \cdot 10^{-6}$	0.117	0.047	1.121
0.25	2.5	15.7	17.6	50.3	1.63	$5.30 \cdot 10^{-6}$	0.098	0.039	1.113
0.3	3.0	17.2	16.1	46.0	1.72	$4.44 \cdot 10^{-6}$	0.082	0.033	1.107
0.35	3.5	18.6	14.7	42.0	1.82	$3.70 \cdot 10^{-6}$	0.068	0.027	1.101
0.4	4.0	19.8	13.5	38.6	1.92	$3.16 \cdot 10^{-6}$	0.058	0.023	1.097

Forsunka bosimining o'zgarishi bilan tomchi tezligi, nisbiy tezlik va qarshilikning o'zgarishi keltirilgan. Forsunka bosimi ortishi bilan tomchi tezligi ortadi, nisbiy tezlik kamayadi, shuning uchun laminar qarshilik kamayadi. 0.1 MPa da 1.139 Pa, 0.4 MPa da 1.097 Pa. Farq katta emas (3.8%). Turbulent qarshilik bosimga bog'liq emas (1.074 Pa). Shuning uchun forsunka bosimini oshirish qarshilikni sezilarli kamaytirmaydi. Sanoatda odatda 0.2-0.3 MPa oralig'i qo'llaniladi.

Turli forsunka sxemalarida kirish qarshiligi ($G_{qo'sh} = 279$ kg/soat, $w_{bug',kir} = 33.3$ m/s, $d_{tom} = 1.0$ mm)

6-jadval. Turli sxemalar uchun qarshilikning taqqoslanishi

Table 6. Comparison of resistance for different schemes

Sxema turi	Nisbiy tezlik formulasi	Δw , m/s	Re_{tom}	C_D	ΔP_{lam} , Pa	ΔP_{turb} , Pa	ΔP_{kirish} , Pa	ΔP_{kirish} , mmHg
To'g'ri oqimli	$w_{bug',kir} - w_{tom}$	19.3	55.1	1.55	0.047	1.074	1.121	0.0084
90° burchakli	$\sqrt{w_{bug',kir}^2 + w_{tom}^2}$	36.1	103	1.09	0.082	1.074	1.156	0.0087
Teskari oqimli	$w_{bug',kir} + w_{tom}$	47.3	135	0.98	0.127	1.074	1.201	0.0090

Turli forsunka joylashish sxemalari uchun nisbiy tezlik va qarshilik qiymatlari keltirilgan. Teskari oqimli sxemada nisbiy tezlik eng katta (47.3 m/s), shuning uchun laminar qarshilik eng yuqori (0.127 Pa). To'g'ri oqimli sxema eng kichik qarshilikka ega (1.121 Pa). Turbulent qarshilik barcha sxemalarda

bir xil (1.074 Pa). Umumiy qarshilikdagi farq 0.08 Pa (7.1%) ni tashkil qiladi. Vakuumba ta'siri farqi 0.0006 mmHg – amalda sezilmaydi. Garchi teskari oqimli sxema qarshilikni bir oz oshirsada, u issiqlik almashinuvini yaxshilaydi va kondensatsiya samaradorligini oshiradi.



2-rasm. Bug' oqimi bilan bir tarafga yo'nalgan suv sepish jarayoni
Figure 2. The process of spraying water in the same direction as the steam flow



3-rasm. Bug' oqimi bilan bir tarafga va qarama-qarshi tarafga yo'nalgan suv sepish jarayonlari
Figure 3. Water spraying processes directed co-currently and counter-currently with the steam flow

4. Munozara (Discussion)

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, kondensatorning kirish qismiga o'rnatilgan forsunkalardan suv purkash natijasida yuzaga keladigan mahalliy gidravlik qarshilik juda kichik – nominal rejimda atigi 1.12 Pa (0.00112 kPa). Bu quyidagi sabablar bilan izohlanadi: bug' tezligining nisbatan pastligi: 33.3 m/s sanoat kondensatorlari uchun odatdagi qiymat bo'lib, bu tezlikda tomchilar bilan o'zaro ta'sir intensiv emas. Tomchi konsentratsiyasining kichikligi: 18,500 dona/m³ – bu juda katta ko'rinishi mumkin, ammo har bir tomchining ta'sir kuchi juda kichik ($6.34 \cdot 10^{-6}$ N). Qarshilikning asosiy qismi turbulent aralashishdan keladi: laminar qarshilik atigi 0.047 Pa, turbulent qarshilik esa 1.074 Pa. Turbulent qarshilik ham juda kichik. Muhim xulosa: Kirish qismidagi qo'shimcha qarshilik umumiy ikki fazali qarshilikning (0.413 kPa) atigi 0.27% ni tashkil qiladi. Vakuumba ta'siri esa 0.0084 mmHg – bu kondensator vakuumining odatdagi o'zgarishlari (10-20 mmHg) bilan solishtirganda ahamiyatsiz.

Imploziya effekti: Suv tomchilari bug'ni kondensatsiyalab, uning hajmini keskin kamaytiradi. Bu jarayon natijasida bug'ning tezligi pasayadi va bosim pasayadi. Hisob-kitoblarda shuni ko'rsatadiki, lahzalik almashinuvi hisobiga bug' tezligi 3.6 m/s ga kamayadi. Tezlikning pasayishi bosimni biroz oshirsada, kondensatsiya hisobiga hajmining kamayishi bu ta'sirni to'ldirib, umumiy gidravlik qarshilikni pasaytiradi. Shuning uchun suv purkash nafaqat vakuumni yaxshilaydi, balki qurilmaning gidravlik o'tkazuvchanligiga ham ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

Sxema tanlash bo'yicha tavsiya: Teskari oqimli sxema qarshilikni bir oz oshirsada (7.1%), u issiqlik almashinuvini yaxshilaydi va kondensatsiya samaradorligini oshiradi [5]. Issiqlik almashinuvining yaxshilanishi hisobiga bosim pasayishi qarshilik yo'qotilishidan ancha katta. Shuning uchun amaliyotda teskari oqimli sxemani qo'llash maqsadga muvofiq.



5. Xulosa (Conclusion)

Ushbu tadqiqotda kondensatorning kirish qismiga o'rnatilgan forsunkalardan purkalgan suv tomchilari hisobiga yuzaga keladigan mahalliy gidravlik qarshilik aniq hisob-kitoblardan aniqlandi. Asosiy xulosalar: kirish qismidagi mahalliy gidravlik qarshilik nominal rejimda ($G_{\text{qo'sh}} = 279 \text{ kg/soat}$, $w_b = 33.3 \text{ m/s}$, $d_t = 1.0 \text{ mm}$, $P_f = 0.2 \text{ MPa}$, to'g'ri oqimli sxema) 1.121 Pa (0.00112 kPa) ni tashkil qiladi. Bu avvalgi hisob-kitoblardagi quvurlar oralig'idagi ikki fazali qarshilikdan (413 Pa) taxminan 370 marta kichik.

Vakuumba ta'siri juda kichik – atigi 0.0084 mmHg . Kondensatsiya hisobiga vakuum yaxshilanishi 7.12 mmHg ekanligini hisobga olsak, kirish qarshiligi bu yaxshilanishning atigi 0.12% ni tashkil qiladi.

Suv sarfining ta'siri: Suv sarfi 100 kg/soat dan 300 kg/soat ga oshganda, kirish qarshiligi 0.403 Pa dan 1.206 Pa ga ortadi (3 marta). Qarshilik suv sarfiga chiziqli bog'liq.

Tomchi diametrining ta'siri: Kichik tomchilar (0.5 mm) katta tomchilarga (1.5 mm) nisbatan 5.1% yuqori qarshilik ko'rsatadi. Bu farq kichik bo'lgani uchun, kondensatsiya samaradorligini oshirish maqsadida kichik tomchilarni qo'llash tavsiya etiladi.

Bug' tezligining ta'siri: Bug' tezligi 25 m/s dan 40 m/s ga oshganda, qarshilik 0.893 Pa dan 2.314 Pa ga ortadi (159%). Bug' tezligi eng kuchli ta'sir qiluvchi omil. Sanoat kondensatorlarida bug' tezligi $30\text{--}40 \text{ m/s}$ oralig'ida bo'lib, bu diapazonda qarshilik $1.3\text{--}2.3 \text{ Pa}$ atrofida.

Forsunka bosimining ta'siri: Bosim 0.1 MPa dan 0.4 MPa ga oshganda, qarshilik 1.139 Pa dan 1.097 Pa ga kamayadi (3.7%). Ta'sir juda kichik, shuning uchun bosimni $0.2\text{--}0.3 \text{ MPa}$ oralig'ida ushlab turish energiya tejamlorligi uchun maqbul.

Forsunka sxemasining ta'siri: Sxemalar orasidagi farq 7.1% (1.121 Pa dan 1.201 Pa gacha). Vakuumga ta'siridagi farq 0.0006 mmHg – amalda sezilmaydi. Teskari oqimli sxema issiqlik almashinuvini yaxshilagan uchun afzal.

Momentum balansi va imploziya effekti: Suv tomchilari bug'ning kinetik energiyasini yutib, uning tezligini 3.6 m/s ga kamaytiradi. Kondensatsiya hisobiga bug' hajmining keskin kamayishi (imploziya) qurilmaning gidravlik o'tkazuvchanligiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

Umumiy xulosa: Kondensatorning kirish qismidagi mahalliy gidravlik qarshilik shunchalik kichikki, uni amalda hisobga olmaslik mumkin. Asosiy qarshilik quvurlar oralig'ida, tomchilarning bug' bilan uzoq vaqt ta'sirlashuvi natijasida yuzaga keladi. Shu sababli, forsunkalarni kirish qismiga o'rnatish vakuumga deyarli ta'sir qilmaydi va kondensatsiya samaradorligini oshirish uchun xavfsiz usul hisoblanadi. Teskari oqimli sxema qarshilikni bir oz oshirsada, issiqlik almashinuvini yaxshilab, kondensatsiya samaradorligini oshiradi va umumiy balans ijobiy bo'ladi.

ADABIYOTLAR

- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — Москва: Машиностроение, 1992. — 672 с.
- Homdary M. Two-phase flow pressure drop calculations // International Journal of Multiphase Flow. — 1983. — Vol. 9, no. 4. — Pp. 375-388. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-multiphase-flow>
- Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // Chemical Engineering Progress. — 1949. — Vol. 45, no. 1. — Pp. 39-48. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1574231874770760320>
- Hewitt G.F., Shires G.L., Bott T.R. Process Heat Transfer. — Boca Raton: CRC Press, 1994. — 1042 p. <https://www.routledge.com/Process-Heat-Transfer/Hewitt-Shires-Bott/p/book/9780849399183>
- Tissot J. et al. Impact of droplet injection direction on the energy performance of refrigeration machine when sprayed on the condenser // International Journal of Refrigeration. — 2014. — Vol. 41. — Pp. 1-11. ScienceDirect - DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.09.043. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-refrigeration>
- Spray Engineering Devices (SED). Multijet Condenser – Technical Specifications, 2024. [Online]. Available: <https://www.sprayengineering.com/products/cooling-and-condensing-system/spray-condenser>
- Исаченко В.П. Теплопередача. — Москва: Энергия, 1975. — 488 с.

REFERENCES

- Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1992. — 672 p.
- Homdary M. Two-phase flow pressure drop calculations // International Journal of Multiphase Flow. — 1983. — Vol. 9, no. 4. — Pp. 375-388. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-multiphase-flow>

3. Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // Chemical Engineering Progress. — 1949. — Vol. 45, no. 1. — Pp. 39-48. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1574231874770760320>
4. Hewitt G.F., Shires G.L., Bott T.R. Process Heat Transfer. — Boca Raton: CRC Press, 1994. — 1042 p. <https://www.routledge.com/Process-Heat-Transfer/Hewitt-Shires-Bott/p/book/9780849399183>
5. Tissot J. et al. Impact of droplet injection direction on the energy performance of refrigeration machine when sprayed on the condenser // International Journal of Refrigeration. — 2014. — Vol. 41. — Pp. 1-11. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-refrigeration>
6. Spray Engineering Devices (SED). Multijet Condenser – Technical Specifications, 2024. <https://www.sprayengineering.com/products/cooling-and-condensing-system/spray-condenser>
7. Isachenko V.P. Heat Transfer. — Moscow: Energiya, 1975. — 488 p.