

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/GMYR4462>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGZB9542>**Ж. Е. Байжұма¹, Н. Б. Қаласов², *Г. О. Ильясова³**^{1,2,3}Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3692-2245>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6205-4959>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3709-5544>*e-mail: ilyasova_gulzhan@mail.ru

ҚАЛДЫҚ ЖЫЛУДЫ ТИІМДІ ПАЙДАЛАНУ ҮШІН ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШТЫ CFD АРҚЫЛЫ ТАЛДАУ

Бұл зерттеу қалдық жылууды тиімді пайдалану «Құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғыштың жылу гидравликалық өнімділігін зерттейді, ол тура және қарсы ағын конфигурацияларын салыстырмалы талдауға назар аударады. Зерттеудің негізгі бағыты тура және қарсы ағыс конфигурациясын талдау болып табылады. Рейнольдс саны (Re) 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта негізгі параметрлерді, соның ішінде Колберн факторы (j) және үйкеліс факторы (f) мәндерін қарастырды. Қарсы ағын конфигурациясы тура ағынға қарағанда жоғары мәндерге ие болды, (j) мәндері 0.04-тен 0.02-ге дейін өзгеріп, қысым жоғалтулары азайды (f) 0.01-ден 0.006-ға дейін, ал тура ағын жоғары (j) мәндерін (0.05-тен 0.03-ке дейін) көрсетті, бірақ (f) өсті (0.015-тен 0.007-ге дейін). BSL $k-\omega$ турбуленттілік моделі ($Re = 4000$)-де SST $k-\omega$ -мен салыстырғанда ең тиімді болып танылды, CFD нәтижелері (j) үшін 8–25 %, (f) үшін 0–20 % ауытқу көрсетті. Зерттеу қарсы ағынды конструкцияның артықшылықтарын айқындап, гидравликалық диаметр мен ағын жылдамдығы сияқты параметрлерді оңтайландыру қажеттігін атап өтеді, сондай-ақ күрделі геометрияларды зерттеуді ұсынады. Бұл нәтижелер тұрақты жылу энергиясын қайта пайдалану технологияларын дамытуға сенімді негіз бола алады.

Кілтті сөздер: жылу алмастырғыш, қалдық жылу, энергия тиімділігі, Колберн факторы, үйкеліс факторы, CFD.

Кіріспе

Энергетикалық жүйелердің тұрақты дамуына, энергия тиімділігін арттыруға және парникті газдардың шығуын азайтуға бағытталған жаһандық талаптар ықшам және жоғары өнімді жылу алмастырғыштарды жобалауға арналған зерттеулерді жандандыруда [1]. Қазіргі заманғы энергетикалық жүйелерде, көлік саласында, салқындату жүйелерінде және жаңартылатын энергия көздерінде шектеулі кеңістікте жоғары жылу беру тиімділігіне қол жеткізу қажеттілігі барған сайын өзекті бола түсуде. Бұл әсіресе қатты оксидті отын элементтері (SOFC) [2], микрогаз турбиналары (MGT), ішкі жану қозғалтқыштарына арналған салқындату жүйелері, HVAC&R жүйелері [3], аэроғарыштық және болашақ энергетикалық жүйелер үшін өте маңызды. Мұндай құрылғыларда жиі кездесетін негізгі мәселе – қысым жоғалтуды азайта отырып, жылуалмасу тиімділігін арттыру [4]. Осыған байланысты, ықшам әрі жоғары өнімді жылуалмастырғыштарды әзірлеу қазіргі энергетика ғылымындағы өзекті және өмірлік маңызды бағыттардың біріне айналды. Энергия тиімділігін арттыру және қалдық жылуды пайдалану үшін жоғары температуралы жылуды қалпына келтіретін алмастырғыштар кеңінен қолданылады. Бұл жылу алмастырғыштар әдетте ықшам құрылымдармен ерекшеленеді және жылуды жұмыс сұйықтығына тиімді беру үшін арнайы геометриялық конфигурациялармен жабдықталған. Қазіргі уақытта қарапайым қанаттар [5], түйреуіштер [6], офсеттік жолақты қанаттар [7], гофрленген қанаттар [8], перфорацияланған және толқынды қанаттар сияқты әртүрлі қанатты құрылымдар кеңінен зерттелуде. Осы құрылымдардың жылу беру тиімділігін арттыру мақсатында көптеген эксперименттік және есептеу (CFD) зерттеулері жүргізілді.

Осы зерттеулердің логикалық жалғасы ретінде геометриялық инновациялар, атап айтқанда спиральды және қос спиральды қанатты жылу алмастырғыштар (DSFHE) айтарлықтай қызығушылық тудырды. Мұндай құрылымдар ағынның турбуленттілігін күшейтіп, жылуалмасу бетінің ауданын ұлғайту арқылы жылу беру тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Junjie L. және Yun M. K. және әріптестері [9;10] кеңістігі шектеулі қолданбаларда дәстүрлі спиральды қанаттармен салыстырғанда ыдыс тәрізді құрылымдардың жоғары тиімділігін дәлелдеді бұл j -факторы мен жылу ағынының тығыздығының жақсаруымен расталды және ребристі құбырлармен жабдықталған жылу алмастырғыштардағы (FTHE) ауа жағынан жылу берілуіне және үйкеліс әсерінен болатын қысым шығындарына әсер ететін негізгі параметрлерге жан-жақты талдау жасалып, j және f коэффициенттерінің эксперименттік және сандық корреляциялары салыстырылып, ең тиімді параметрлер анықталды. Сонымен қатар, Punnoose A. және оның әріптестері [11] спиральды

қанатты түтіктер санының артуы Нуссельт санын және салқындату қабілетін жоғарылататынын, бірақ сонымен қатар қысым жоғалтуын да арттыратынын атап өтті. Осы себепті геометриялық параметрлерді оңтайландыру қажеттілігі туындайды. Бұл мәселені шешу үшін қазіргі уақытта компьютерлік модельдеу әдістері мен жасанды нейрондық желілер (ANN) кеңінен қолданылуда.

Акула құрылымына ұқсас биомиметикалық қанаттар да жылу алмасуды арттыруда кеңінен қолданылады. Бұл құрылымдар екіншілік ағындарды тудыру және турбуленттілікті күшейту арқылы жылу беру тиімділігін жақсартады. Jin Y., Zijin Zh. және әріптестері [12] биондық қанаттардың геометриясын оңтайландыру үшін жасанды нейрондық желілерді (ANN) және NSGA-II алгоритмін қолданып, Колберн факторы (j) мен үйкеліс факторы (f) көрсеткіштерін жақсартуға қол жеткізген. Бұл табиғи формаларды есептеу әдістерімен үйлестірудің тиімділігін көрсетеді және қиғаш эллипстік қос тесікті (DPIE) турбулизаторлар Нуссельт санын едәуір арттыра отырып, үйкеліс факторының тек шамалы өсуіне себеп болады, нәтижесінде жылуалмасудың максималды тиімділігі қамтамасыз етілген. Мұндай пассивті әдістер қос құбырлы жылуалмастырғыштар үшін тиімді әрі үнемді шешімдер болып табылады.

Октаэдрлік немесе үштік периодты минималды беттік (TPMS) торлы жақтау материалдары (LFM) сияқты жетілдірілген материалдық шешімдер механикалық беріктігін сақтай отырып, жылу беруді жақсартады. TPMS негізіндегі жылу алмастырғыш конструкциялары жылу кедергісін төмендететінін және тиімділікті арттыратынын көрсетті, дегенмен олар қысымның жоғалуын арттырады, бұл одан әрі оңтайландыруды қажет етеді [13; 14; 15].

Алайда, күрделі геометриялар мен турбулентті ағындарды дәстүрлі эмпирикалық тәуелділіктер негізінде модельдеу шектеулі қолдану аясынан тыс қиындықтар тудырады. Сондықтан ANSYS Fluent және CFX сияқты есептеуіш гидрогаздинамика (CFD) құралдары ағын құрылымдары мен жылуалмасу процестерін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. CFD қазіргі таңда қанаттардың бұрышын, арақашықтығын және орналасу ретін бағалауда маңызды құралға айналды. Алайда, CFD модельдеудің есептеу шығындары өте жоғары болғандықтан, барлық ықтимал конструкциялық нұсқаларды толықтай зерттеу іс жүзінде тиімсіз. Осы мәселені шешу мақсатында, соңғы уақытта CFD нәтижелерімен үйлестірілген мәліметтерге негізделген жуықтаушы модельдер - мысалы, жасанды нейрондық желілер (ANN) мен генетикалық алгоритмдер (GA) кеңінен қолданылуда. Мысалы, Naresh K. және әріптестері CFD деректеріне негізделген ANN көмегімен j және f факторларын дәл болжай алды. Сондай-ақ ANN және NSGA-II алгоритмін қолданып биондық қанаттардың құрылымын оңтайландырып, қысым жоғалтуларын шектеу арқылы жылуалмасуды жақсартуға сонымен қатар

модельдерді жобалау параметрлерінің кең ауқымында жылдам әрі нақты болжаулар жасауға мүмкіндік береді.

Long Zh. және әріптестері [16] қатты оксидті отын элементтеріне (SOFC) арналған пластиналы жылуалмастырғыштардың геометриясын CFD негізінде оңтайландырып, Колберн факторының (j) 31.87 %-ға өсуіне, j/f қатынасының 20.75 %-ға жақсаруына және қысым жоғалтудың 58 %-ға төмендеуіне қол жеткізді. Бұл нәтижелер CFD-ге негізделген параметрлік оңтайландырудың тиімділігін нақты көрсетеді. Соңғы зерттеулер жылуалмастырғыштардың өнімділігін арттыру үшін беткі жабындарды, перфорацияланған қанаттарды және жетілдірілген модельдеу әдістерін қолдануға баса назар аударады. Мысалы, Han Ch. және әріптестері [17] қанатты-түтіккі жылуалмастырғыштарға бірқабатты көміртекті нанотүтікшелер (SWCNT) жабындысын қолданып, Колберн факторының 10.5 %-ға артуына және үйкеліс коэффициентінің 9.1 %-ға төмендеуіне қол жеткізді. Бұл әдіс HVAC жүйелері мен энергия үнемдеуге бағытталған технологиялар үшін перспективалы шешім бола алады. Сондай-ақ Gursheer A. және әріптестері [18] перфорацияланған толқынды қанаттарды CFD арқылы зерттеп, j -фактордың 19–35 % және f -фактордың 21–33 % аралығында өсуін байқады. Бұл жақсартулар ағын турбуленттілігінің күшеюі мен шекаралық қабаттың бұзылуымен байланысты.

Бұл зерттеулер жиынтығы ықшам, қысым жоғалтулары төмен және жоғары тиімділікті жылуалмастырғыштарды жасау мақсатында CFD, мәліметтерге негізделген жуықтаушы модельдер, сондай-ақ нанокұрылымдар мен 3D-басып шығарылған торлы құрылымдар сияқты инновациялық материалдар мен геометриялардың маңызды рөлін айқын көрсетеді. Бұл зерттеу бағыттары болашақта тұрақты және тиімді жылуалмасу жүйелерін дамытуға берік ғылыми-технологиялық негіз қалайды.

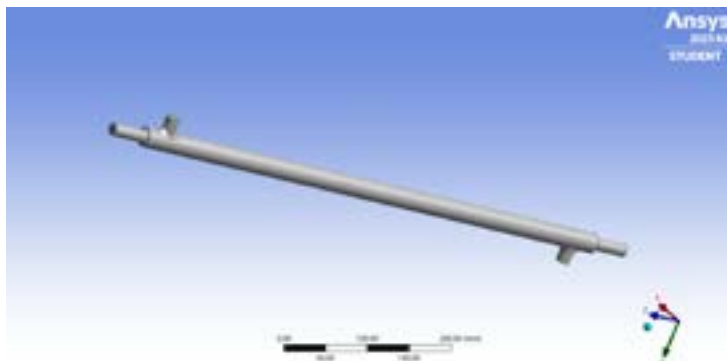
Қорытындылай келе, мақалада жылу алмастырғыштардың жұмысын жақсарту үшін сұйықтықтың есептеу динамикасын (CFD), жасанды нейрондық желілерді (ANN), генетикалық алгоритмдерді (GA) және биоинспирацияланған фин құрылымдарын қолдануға баса назар аударылады. Бұл құралдар күрделі геометриялар мен жұмыс жағдайлары бойынша жылу және гидравликалық сипаттамаларды дәл болжауға мүмкіндік береді. Мақаланың келесі бөлімдерінде CFD қосымшалары, валидация әдістері, торлы тәуелсіздікті зерттеу, болашақ бағыттар және тиімді жылу алмастырғыштарды жасаудағы кемшіліктер қарастырылады.

Материалдар мен әдістері

Сандық модельдеу

Бұл зерттеу ANSYS Fluent (CFD) бағдарламалық құралын пайдаланып қос құбырлы жылу алмастырғышты сандық талдауға бағытталған. Жылу

алмастырғыш екі концентрлі құбырдан тұрады, онда ішкі құбыр ыстық сұйықтық ағынын, ал ішкі және сыртқы құбырлар арасындағы сақиналы кеңістік суық сұйықтық ағынын өткізеді. Жылу беру тиімділігіне және қысымның төмендеуіне әсерін бағалау үшін ағынның екі конфигурациясы зерттелді: тура ағын және қарсы ағын. Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың моделі және параметрлері 1-суретте және 1-кестеде көрсетілген.



1-сурет – құбыр ішіндегі құбыр жылуалмастырғыш геометриясы

1-кесте – Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың геометриялық параметрлері

Параметрлері	Белгіленуі	Мағынасы
Сыртқы құбыр диаметрі	d_2	24 мм
Ішкі құбыр диаметрі	d_1	12 мм
Сыртқы құбыр ұзындығы	L_2	350 мм
Ішкі құбыр ұзындығы	L_1	400 мм
Құбыр саны	n	1 дана

Шекаралық шарт

Шекаралық шарттарды дәл анықтау сандық модельдеудің дәлдігіне айтарлықтай әсер етеді. Осы 2-кестеде және зерттеуде құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғышқа келесі шекаралық шарттар қолданылды (тура және қарсы ағынның конфигурациясы үшін): ыстық судың кірісі мен суық судың кірісі массалық ағынның кірісі ретінде анықталды, ал ыстық судың шығысы және суық судың шығысы қысым шығысы ретінде орнатылды.

2-кесте – Ыстық және суық сұйықтықтар үшін жылу беру және үйкеліс коэффициенттері тура және қарсы ағындарында

Рейнольдс саны (Re)	тура ыстық ағыс j	тура ыстық ағыс f	қарсы ыстық ағыс j	қарсы ыстық ағыс f	тура ыстық ағыс Nu	қарсы ыстық ағыс Nu
1000	0.05	0.015	0.04	0.01	44.0	35.2
2000	0.045	0.013	0.035	0.009	79.2	61.6
3000	0.04	0.011	0.03	0.008	105.6	79.2
4000	0.035	0.009	0.025	0.007	123.2	88.0
5000	0.03	0.007	0.02	0.006	132.0	88.0

Рейнольдс саны (Re)	тура суық ағыс j	тура суық ағыс f	қарсы суық ағыс j	қарсы суық ағыс f	қарсы суық ағыс Nu	тура суық ағыс Nu
1000	0.045	0.012	0.035	0.008	63.3	81.5
2000	0.042	0.011	0.032	0.007	115.9	152.2
3000	0.038	0.010	0.028	0.006	150.8	205.0
4000	0.033	0.008	0.022	0.005	159.3	239.0
5000	0.025	0.006	0.015	0.004	135.2	226.5

Қатты дене материалы ретінде алюминий қолданылған. 2-суретте модельдің алдыңғы және бүйір жақтарындағы тор құрылымының орналасуы көрсетілген. Жұмыс ортасы ретінде су қарастырылған. Қатты денелер аймағында бейқұрылымды тор қолданылса, сұйық орта аймағының негізгі бөлігінде құрылымды тор жүйесі пайдаланылған.



2-сурет – Құбыр ішіндегі құбыр жылу алмастырғыштың торлы құрылымы

Тордың тәуелсіздігін тексеру

Тордың өлшемі кішірейген сайын сандық модельдеу нәтижелерінің дәлдігін жақсартады. Дегенмен, жоғары дәлдікке қол жеткізу айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді. Тор элементтерінің саны белгілі бір шекті деңгейге жеткенде, олардың санын одан әрі көбейту нәтижелерге айтарлықтай қатты әсер етпейді. Сондықтан тордың оңтайлы өлшемін таңдау арқылы дәлдікті жоғалтпай есептеу уақытын қысқартуға және тиімді нәтижелер алуға болады.

3-кесте – Тордың тәуелсіздігін тексеру.

Тор саны (миллион)	j (Колберн факторы)	f (Фаннинг үйкеліс факторы)
1.9	0.00568	0.02920
2.3	0.00574	0.02885
3.2	0.00576	0.02860
5.0	0.00577	0.02865

3-кестеде келтірілген мәліметтерге сәйкес, тордың жалпы саны 1,9 миллионды құраған кезде Колберн коэффициентіндегі қайталану қателігі шамамен 2,6 % құрайды, бұл торлар саны 3,2 миллионға дейін өскен сайын 0,3 %- ға дейін төмендейді. Үйкеліс коэффициентінің (f) өзгеруі минималды болып қалады, барлық тексерілген тор тығыздықтарында 1,7 %-дан аспады. Есептеу дәлдігі мен ресурстық тиімділікті ескере отырып, соңғы сандық модельдеу үшін 3.2 миллион элементтен тұратын тор конфигурациясы таңдалды.

Айта кету керек, тор элементтерінің жалпы саны құрылымдық және геометриялық айырмашылықтарға байланысты әртүрлі модельдер арасында аздап өзгеруі мүмкін. Сонымен қатар, тордың сапасы CFD нәтижелерінің дәлдігін анықтауда шешуші рөл атқарады. Қабырға аймағына жақын орналасқан тордың ажыратымдылығының негізгі көрсеткіштерінің бірі-қабырғаның өлшемсіз қашықтығы, Y^+ , бұл тордың шекаралық қабатты шешу қабілетін көрсетеді.

Сұйықтық пен қатты зат арасындағы конвективті жылу алмасудың көп бөлігі жылу шекаралық қабатында жүретіндіктен, дәл нәтиже алу үшін сәйкес Y^+ диапазоны қажет. Осы зерттеуде қарастырылған параллель және қарсы ағынды конфигурациялар үшін Рейнольдс саны 2116-дан 5547-ге дейін ауытқиды, бұл сұйықтықтың түріне және ағынның бағытына байланысты ламинарлы және өтпелі ағын режимдерін қамтиды.

Барлық тор конфигурациялары үшін жылу тасымалдағыш беттерінде байқалған Y^+ мәндері 0,2-ден 0,9-ға дейінгі диапазонда болды, бұл қабырғаға жақын жылу әсерлерін шешу үшін қолайлы. Бұл мәндер шекаралық қабаттың

жеткілікті түрде шешілгенін және таңдалған тор жылу беру мен қысымның төмендеуі үшін сенімді және дәл болжамдарды қамтамасыз ететінін растайды.

Турбуленттілік моделін тексеру

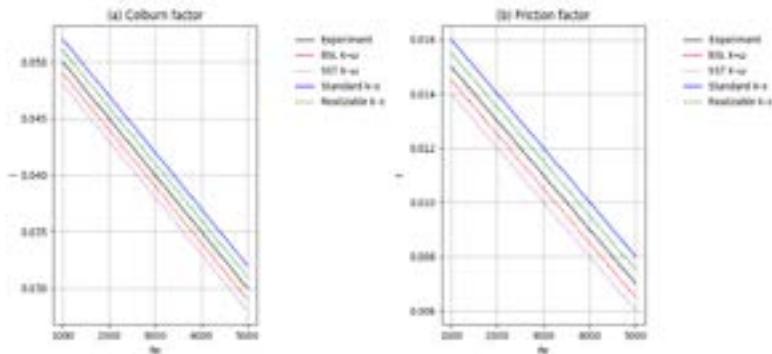
Турбуленттілік моделін дұрыс таңдау шағын жылуалмастырғыштардағы ағыс пен жылуалмасу процестерін талдауда сандық модельдеу нәтижелерінің дәлдігіне айтарлықтай әсер етеді. Өртүрлі турбуленттілік модельдері жылдамдық таралуы, температуралық градиенттер және қысым жоғалтулар бойынша әртүрлі болжамдар бере алады. Сондықтан толық масштабтағы модельдеуді бастамас бұрын таңдалған модельдерге валидация жүргізу қажет.

Осы зерттеу аясында, тура және қарсы ағын конфигурацияларындағы жылу және ағыс сипаттамаларын модельдеу үшін бірнеше кеңінен қолданылатын турбуленттілік модельдері қарастырылады. Қарастырылған модельдер қатарына стандартты $k-\epsilon$, realizable $k-\epsilon$, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдері кіреді.

Олардың дәлдігін бағалау үшін модельдеу әр модель үшін бірдей шекаралық және жұмыс жағдайында жүргізілді, Ал Колберн коэффициенті (j) мен үйкеліс коэффициенті (f) бойынша нәтижелер 3-суретте салыстырылды. Салыстыру тек сандық сәйкестік пен модельдердің шоғырлану сипатына негізделді.

Салыстыруда, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдері неғұрлым тұрақты және дәлірек көрсеткіш ауытқулары қолайлы шектерде қалды. Екінші жағынан $k-\epsilon$ және $k-\epsilon$ модельдері дәлірек емес нәтижелер көрсетті.

Барлық сыналған модельдердің ішінде BSL $k-\omega$ моделі есептеу тұрақтылығы мен физикалық дәлдік арасындағы ең жақсы жалпы тепе-теңдікті көрсетті. Сондықтан ол осы жұмыста кейінгі модельдеу үшін қолайлы турбуленттік модель ретінде таңдалды. Қорытындылардың дұрыстығын қамтамасыз ету үшін Рейнольдс саны 4000 болатын SST $k-\omega$ моделін қолдана отырып, қосымша тексеру жүргізілді. Нәтижелер шамалы ғана ауытқуларды көрсетті және BSL $k-\omega$ үлгісімен алынған нәтижелердің сенімділігін растады.



3-сурет – Турбуленттілік моделін тексеру.

Деректерді саралау

Жылу алмастырғыштың ағын жоғалтуы мен жылу беру сипаттамалары әдетте Колбурн факторы j және Фаннинг үйкеліс факторы f көмегімен сипатталады және өлшенеді, ол теңдеулер (1) және (2)-де көрсетілген.

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \quad (1)$$

Мұнда Nu , Re және Pr тиісінше Нуссельт саны, Рейнгольдс саны және Прандтль санын білдіреді, олардың есептеу формулалары тиісінше теңдеу (4), теңдеу (5) және теңдеу (6)-да берілген.

$$f = \frac{D_h \Delta P}{2L\rho v^2} \quad (2)$$

Мұнда ΔP кіріс пен шығыс арасындағы қысым айырмашылығын, D_h гидравликалық диаметрді білдіреді, оның есептеу формуласы теңдеу (3)-те берілген; L спиральді түтікшелер жиынтығының жалпы ұзындығын, ρ орташа ағын жылдамдығын көрсетеді.

$$D_h = 4 \frac{A_c}{A} L \quad (3)$$

Мұнда A жалпы жылу беру ауданын, A_c ең кіші кесінді ауданын білдіреді.

$$Nu = \frac{h_f D_h}{\lambda} \quad (4)$$

Мұнда h_f жалпы жылу беру коэффициентін, ал λ сұйықтың жылу өткізгіштігін білдіреді.

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5)$$

Мұнда ρ сұйықтың тығыздығын, ал μ динамикалық тұтқырлығын білдіреді.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (6)$$

Мұнда C_p сұйықтың ерекше жылу сыйымдылығын білдіреді.

$$h_f = \frac{Q}{\Delta T_m A} \quad (7)$$

Мұнда Q жалпы берілетін жылу мөлшерін, ΔT_m логарифмдік орташа температура айырмашылығын білдіреді, ол теңдеу (8)-де берілген.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{w1} - T_{f1}) - (T_{w2} - T_{f2})}{\ln((T_{w1} - T_{f1}) - \ln T_{w2} - T_{f2})} \quad (8)$$

Жалпы тиімділік факторы JF келесі түрде берілген

$$JF = \frac{J}{f^{1/3}} \quad (9)$$

Нәтижелер және талқылау

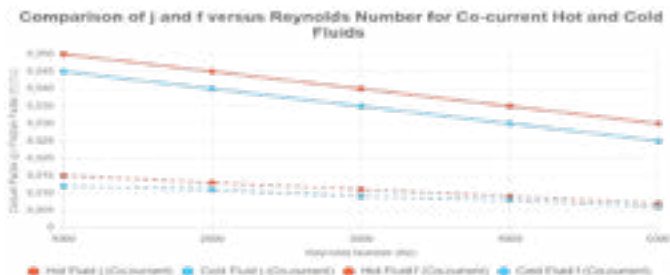
Бұл бөлім «кұбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғышты зерттеуге арналған, онда ыстық және суық су тура және қарсы ағын режимдерінде қозғалады. Негізгі мақсат – жылу беру тиімділігін және ағын динамикасының сипаттамаларын бағалау арқылы қалдық жылу ресурстарын пайдалануды оңтайландыру болып табылады. Негізгі модель геометриялық параметрлері оңтайландырылған конфигурация болып табылады. Эксперименттік және есептеуіш сұйық динамикасы (CFD) деректері жылу алмасу процестерінің тиімділігін салыстыру үшін қолданылады.

Тура және қарсы ағын режимдерінде жылу беру мен қысым жоғалтуын салыстыру

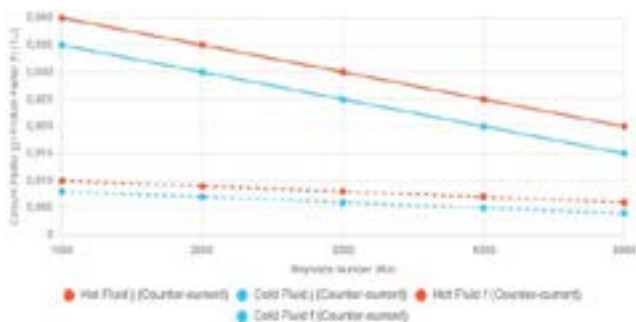
Бұл бөлімше «құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғышта ыстық және суық суды пайдалана отырып, тура және қарсы ағын конфигурациялары үшін Рейнольдс саны (Re) диапазоны 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта жылу беру тиімділігін көрсететін Колберн коэффициенті (j) мен қысым жоғалтуын көрсететін үйкеліс коэффициенті (f) салыстырмалы талдауын ұсынады. Эксперименттік деректер сызықтармен (толық немесе үзік) көрсетілсе, есептеуіш сұйық динамикасы (CFD) деректері нүктелермен бейнеленеді, бұл деректер жиынтықтары арасындағы айқын ажыратымдылықты қамтамасыз етеді.

3-суретте тура ағын конфигурациясы үшін ыстық суға арналған j мәні $Re=1000$ -де 0.05-тен $Re=5000$ -де 0.03-ке дейін төмендейді (толық қызыл сызық), ал f факторының мәні 0.015-тен 0.007-ге дейін кемиді (үзік қызыл сызық). Сол конфигурацияда суық су үшін j факторының 0.045-тен 0.025-ке дейін азаяды (толық көк сызық), ал f факторының 0.012-ден 0.006-ға дейін төмендейді (үзік көк сызық). Қарсы ағын конфигурациясында ыстық суға арналған j мәні $Re=1000$ -де 0.04-тен $Re=5000$ -де 0.02-ге дейін төмендейді (толық сары сызық), ал f факторының мәні 0.01-ден 0.006-ға дейін азаяды (үзік сары сызық). Қарсы ағын суық су үшін j факторының мәні 0.035-тен 0.015-ке дейін төмендейді (толық көгілдір сызық), ал f факторы 0.008-ден 0.004-ке дейін кемиді (үзік көгілдір сызық).

j және f факторларының мәндері екі конфигурацияда да ыстық суға қарағанда суық су үшін тұрақты түрде төмен, бұл әбден мүмкін, себебі сұйықтың тұтқырлығы мен жылу өткізгіштігі сияқты қасиеттеріндегі айырмашылықтарға байланысты. Тура ағын конфигурациясы төмен Re мәндерінде жылу беру тиімділігін арттырады, бірақ жоғары қысым жоғалтуларына әкеледі, бұл f фактор мәндерін жоғарылатады. Осыдан кері, қарсы ағын конфигурациясы жылу беру профилін біркелкі сақтайды және жоғары Re мәндерінде қысым жоғалтуын азайтады, бұл оны жылу алмастырғыштарды жобалауда тиімді қалдық жылу пайдалану үшін қолайлы етеді. Бұл нәтижелер ағын конфигурациясын таңдаудың жылу алмастырғыштардың қалдық жылу қайта өңдеу қолданбаларына арналған өнімділігін оңтайландырудағы маңыздылығын баса көрсетеді.

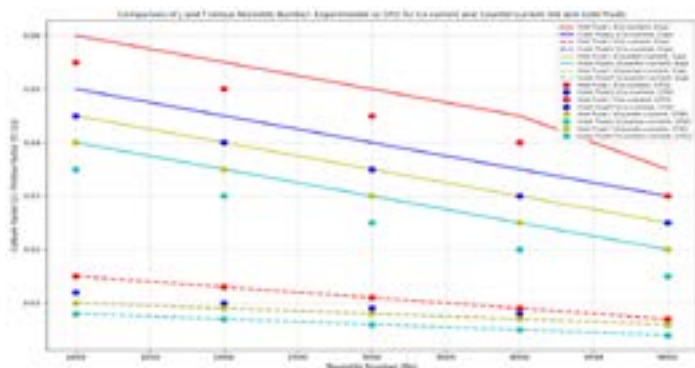


4-сурет – Тура ағын конфигурациясы (ыстық және суық су) үшін j және f факторларын салыстырылуы



5-сурет – Қарсы ағын конфигурациясы (ыстық және суық су) үшін j және f факторларын салыстырылуы

Бұл графикте Рейнольдс саны (Re) диапазоны 1000-ден 5000-ге дейінгі аралықта қарсы ағын конфигурациясында ыстық және суық су үшін жылу беру тиімділігін көрсететін Колбурн коэффициенті (j) мен қысым жоғалтуын көрсететін үйкеліс коэффициенті (f)-тің тәуелділігін ұсынады. Ыстық су үшін j мәндері $Re=1000$ -де 0.04-тен басталып, $Re=5000$ -де 0.02-ге дейін төмендейді (толық қызыл сызықпен көрсетілген), ал f мәндері 0.01-ден 0.006-ға дейін азаяды (үзік қызыл сызықпен көрсетілген). Суық су үшін j мәндері $Re=1000$, 0.035-тен басталып, $Re=5000$, 0.015-ке дейін төмендейді (толық көк сызықпен көрсетілген), ал f мәндері 0.008-ден 0.004-ке дейін кемиді (үзік көк сызықпен көрсетілген). j және f мәндері суық суда ыстық суға қарағанда аздап төмен, бұл сұйықтың қасиеттеріндегі айырмашылықтарға (мысалы, тұтқырлық) байланысты болуы мүмкін. Қарсы ағын конфигурациясы орташа жылу беру деңгейін сақтайды және қысым жоғалтуын азайтады, бұл жылу алмастырғыштардың тиімділігін арттыру үшін маңызды.



6-сурет – j және f факторларының Рейнольдс санына қатысты салыстырылу

j және f факторларының Рейнольдс санына қатысты салыстырылуы: тура және қарсы ағын ыстық және суық сұйықтар үшін эксперименттік пен CFD деректері

Қарсы ағын конфигурациясы

5-суретте қарсы ағын конфигурациясына назар аударады. Ыстық су үшін j мәні $Re=1000$, 0.04 -тен $Re=5000$, 0.02 -ге дейін төмендейді (толық қызыл сызық), ал f мәні 0.01 -ден 0.006 -ға дейін азаяды (үзік қызыл сызық). Суық су үшін j факторының мәні 0.035 -тен 0.015 -ке дейін төмендейді (толық көк сызық), ал f мәні 0.008 -ден 0.004 -ке дейін кемиді (үзік көк сызық). j және f факторларының мәндері суық суда ыстық суға қарағанда аздап төмен, бұл сұйықтың қасиеттеріндегі айырмашылықтарға (мысалы, тұтқырлық) байланысты болуы мүмкін. Қарсы ағын конфигурациясы орташа жылу беру деңгейін сақтайды және қысым жоғалтуын азайтады, бұл жылу алмастырғыштардың қалдық жылу пайдалану тиімділігін арттыруда маңызды.

Тәжірибелік және CFD салыстыру

6-суретте тәжірибелік және CFD нәтижелерін қолдана отырып, қосалқы және қарсы ағыс конфигурациялары үшін Колберн коэффициенті (j) мен үйкеліс коэффициенті (f) салыстырылады. Тәжірибелік мәліметтер әр түрлі түстермен және сызықтармен ұсынылған (мысалы, қатты қызыл сызық) j үшін ыстық сұйықтық бірлескен ағынында, үзік-үзік көк сызық f факторының мәні үшін суық сұйықтық бірлескен ағынында), ал CFD деректері сәйкес түсті нүктелермен көрсетілген (мысалы, қызыл нүктелер j факторы үшін ыстық сұйықтық бірлескен ағынында). 6-суретті талдай отырып, эксперименттік және CFD деректері арасындағы айырмашылықтар байқалады. j факторының коэффициенті эксперименттік мәндерді, CFD нүктелерінен жоғары көрсетеді.

Мысалы, $Re=1000$ кезіндегі бірлескен ағынындағы ыстық сұйықтық үшін тәжірибелік $j \approx 0.06$ ал, CFD $j \approx 0.055$. Айырмашылық Re жоғарылаған сайын аздап артады (мысалы $Re=5000$, $j \approx 0.035$ кезінде), дегенмен тенденция тұрақты түрде төмендейді. f коэффициенті тәжірибелік және CFD деректерін өте жақын, кейде бірдей етіп көрсетеді. Мысалы, $Re=1000$ кезіндегі бірлескен ағынындағы ыстық сұйықтық үшін екеуі де $f \approx 0.015$, ал $Re=5000$ кезінде екеуі де 0.007 құрайды. Бұл минималды айырмашылық мәндердің төмен диапазонына ($0.01-0.015$) және үйкеліс есептеулерінің дәлдігіне байланысты болуы мүмкін. Тәжірибелік және CFD деректерінің арасындағы айырмашылық j факторы үшін $8-25\%$ және f факторы үшін $0-20\%$ аралығында болады. Ең үлкен қателік (25%) $Re=5000$ кезінде қарсы ағынындағы суық сұйықтықтың j үшін байқалады, ал ең төменгі қателік (0%) көптеген жағдайларда f факторы үшін орын алады.

j және f мәндері тұтқырлық және жылу өткізгіштік сияқты сұйықтық қасиеттерінің айырмашылығына байланысты екі конфигурациядағы ыстық сумен салыстырғанда суық су үшін тұрақты түрде төмен. Бірлескен конфигурациясы жылу берудің тиімділігін төменгі Re мәндерінде жоғарылатады, бірақ қысымның жоғарылауымен байланысты, бұл ағынның жоғары жылдамдығында қалдық жылуды қалпына келтіруге жарамдылығын шектейді. Керісінше, қарсы ағынның конфигурациясы біркелкі жылу беру профилін қамтамасыз етеді және қысымның жоғалуын азайтады, әсіресе жоғары Re мәндерінде, бұл жылу алмастырғышты оңтайландыру үшін тиімдірек етеді қалдықтарды жылуды тиімді пайдалану. Бұл нәтижелер қалдық жылуды қалпына келтіру қолданбалары үшін жылу алмастырғыштарды жобалаудағы ағын конфигурациясын таңдаудың маңызды рөлін көрсетеді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл ғылыми мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің 2025–2027 жылдарға арналған ғылыми және ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыру аясындағы AP26100165 «Бірегей жылулық қорғанысы бар шұғыл континенталды аймақтарға арналған жел турбинасын жобалау және жасау» жобасын іске асыру барысында жазылды.

Қорытынды

Бұл зерттеуде қалдық жылуды тиімді пайдалану мақсатында тура және қарсы ағын конфигурацияларын жан-жақты салыстыра отырып, «құбыр ішіндегі құбыр» жылу алмастырғыштағы жылу алмасу және ағын динамикасын оңтайландырудың жаңа тәсілі ұсынылып, оның тиімділігі негізделді. Алынған нәтижелер бұл конструкцияның жылуды қалпына келтіру жүйелерінде қолдануға жарамды және тиімді бола алатынын көрсетті.

Жоғары тиімділік: қарсы ток конфигурациясы жоғары жылу-гидравликалық өнімділікті көрсетті, Колберн коэффициентінің (j) мәндері 0,04-тен 0,02-ге дейін және бірлескен ток қондырғысымен салыстырғанда біркелкі жылу беру профилі (j) 0,05-тен 0,03-ке дейін. Рейнольдс саны 1000 болғанда, қарсы ағыны теңдестірілген тиімділікке қол жеткізді, ал тура ағыны қысымның жоғары шығынын көрсетті үйкеліс коэффициенті (f) 0,015-тен 0,007-ге дейін, бұл қарсы ағыс конструкциясының артықшылығын көрсетеді.

Геометриялық аспектілер: зерттеу көрсеткендей, ағынның жылдамдығы (мысалы, $v_{hot}=0,051 \times 10^{-3}$ м/сек $v_{cold}=0,053 \times 10^{-3}$ м/сек) және түтік геометриясы жылу беру тиімділігіне әсер етеді. Есептелген жылу беру қуаты ($Q_{hot}=236,34$ Вт, $Q_{cold}=256,87$ Вт) және температура градиенті ($\Delta t=16,62^\circ\text{C}$) энергияны қалпына келтірудің айтарлықтай әлеуетін көрсетеді, дегенмен гидравликалық диаметрді одан әрі оңтайландыру ұсынылады.

Турбуленттілік моделін таңдау: турбуленттілік модельдерін, оның ішінде стандартты $k-\epsilon$, іске асырылатын $k-\epsilon$, BSL $k-\omega$ және SST $k-\omega$ модельдерін бағалау, BSL $k-\omega$ моделін есептеу тұрақтылығы мен физикалық дәлдіктің тепе-теңдігін қамтамасыз ететін ең тиімді деп анықтады. $Re=4000$ кезінде SST $k-\omega$ -ге қарсы валидация оның болашақ модельдеуге жарамдылығын нығайта отырып, минималды ауытқуларды растады.

CFD валидациясы: тәжірибелік және CFD нәтижелері арасындағы сәйкессіздіктер (j факторы үшін 8–25 %, f факторы үшін 0–20 %) болашақ модельдеу жұмыстарында дәлдікті қамтамасыз ете отырып, тордың ажыратымдылығы мен сұйықтықтың қасиеттері туралы тексерілген деректерді нақтылау қажеттілігін көрсетеді.

Оңтайландыру мәселелері: Қарсы ағынды конфигурация жалпы тиімділік бойынша жоғары нәтиже көрсеткенімен, j факторының салыстырмалы түрде төмен мәндері геометриялық параметрлер немесе ағынның біркелкілігіне байланысты мүмкін болатын шектеулерді білдіреді. Бұл жағдай жылу алмастырғыштың құрылымдық параметрлерін оңтайландыру үшін қосымша зерттеулер жүргізуді қажет етеді.

REFERENCES

1 Junjie, L., Uglanov, D.A., Naresh, K., Shimanov, A., Bowen, Z., Shimanova, A. B. Numerical study on a new spiral fin heat Exchanger's thermal-hydraulic performance. – // Case Studies in Thermal Engineering. – 61/ – 2024 – 104895. – P – 2.

2 Naresh, K., Uglanov, D. A., Blagin, E. V., Gorshkalev, A. A.,

Roman, A. P., Junjie, L., Unified ANN model for heat transfer factor (j) and friction factor (f) prediction in offset strip and wavy fin PFHEs. // Case Studies in Thermal Engineering. – 53. – 2024. – 103845. – P–2–4.

3 Diani, A., Mancin, S., Zilio, C., Rossetto, L. Experimental and numerical analyses of different extended surfaces. – // International Journal of Thermal Sciences. – 67. – 2013. – 120e134. P–4–6.

4 Diani, A., Mancin, S., Zilio, C., Rossetto, L. An assessment on air forced convection on extended surfaces: experimental results and numerical modeling // [International Journal of Thermal Sciences](#) **V. 67**, May 2013.–P – 122–124.

5 Wei, L., Xialing, W. Heat transfer and pressure drop correlations for compact heat exchangers with multi-region louver fins. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 53 (2010) 2955–2962.–P–4.

6 Xiangyang, Z., Zhaogang, Q. A comprehensive review of offset strip fin and its applications // Applied Thermal Engineering 139 (2018) 61–75.–P–62–63.

7 Shaeri, M. R., Yaghoubi, M., Jafarpur, K. Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks. // Applied Energy 86 (2009) 2019–2029.–P–2021–2022.

8 Wang, Ch., Fu, W.L., Chang, C.T. Heat transfer and friction characteristics of typical wavy fin-and-tube heat exchangers, – New York. – // Experimental Thermal and Fluid Science 1997; 14:174–186 – P–175–176.

9 Junjie, L., Uglanov, D. A., Naresh, K., Guanghua, Zh., Jinglun, F., Shimanov, A. A., Gaev E. S. Enhanced compactness and thermal performance of a novel double spiral finned heat exchanger: A CFD and ANN approach, // Applied Thermal Engineering 275 (2025) 126910 – P–12–15.

10 Yun, M. K., Joo, Y. S., Sangho, S., Chan, H. S., Morteza, K. A., Yongchan, K., Yong, T. K. A critical review on Colburn j-factor and f-factor and energy performance analysis for finned tube heat exchangers, // Energy 287 (2024) 129609.–P–57–61.

11 Punnoose, A., Shawkat Mostafa, M. E. Thermal and hydraulic characteristics of multiple row spiral finned tube heat exchangers. – // International Journal of Refrigeration. – 130 (2021) 56–66.–P–61–65.

12 Jin, Y., Zijin, Zh., Jussi, S., Jin, W., Lidija, C., Zheng, D. Structure optimization of intercooler bionic fins based on artificial neural network and genetic algorithms, // Energy – 307 (2024) 132615.–P–2–10.

13 Shiming, G., Mo H., Junjie, Y., Qu, Sh., Junhao, D., Xu, S. Numerical and experimental investigations of a twisted copper heat exchanger with triply periodic minimal surfaces, // International Communications in Heat and Mass Transfer 165 (2025) 109099.–P–9–14.

14 Jeon, S., Kim, S., Nili-Ahmadabadi, M., Man, Y., H., Yong, G. P. Parametric study on the performance of heat exchangers with octahedral-type

lattice frame materials // International Journal of Heat and Mass Transfer 236 (2025) 126332.–P–6–13.

15 **Montazerifar, F., Amidpour, M., Abedi, Z.** Numerical investigation of turbulent nanofluid flow behavior in a multi-stream plate-fin heat exchanger with a novel design of fractal fins // Engineering Journal (2023) 72. – 431–449.–P–13–17.

16 **Long, Zh., Ji, Y., Yan, D., Lichao, J., Han, X., Kaiming, W., Jiajun, Y., Li, J.** Performance analysis and optimized design of an offset strip fin heat exchanger for kW-class SOFC systems. // International Journal of Hydrogen Energy 99 (2025) 123–136.–P–125–132.

17 **Han, Ch., Lee, S., Lee, D., Lee, M., Kim, J., Kim, Y.** Heat transfer characteristics of fin-tube heat exchangers coated with single-walled carbon nanotubes under various coating concentrations, // International Communications in Heat and Mass Transfer 153 (2024) 107349.–P–6–11.

18 **Gursher, A., Ranganayakulu, Ch.** Establishment of Colburn «j» factor and Fanning friction factor «f» correlations for a compact heat exchanger having perforated wavy fins using Computational Fluid Dynamics, // International Journal of Heat and Fluid Flow 108 (2024) 109484

08.07.25 ж. баспаға түсті.

22.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Ж. Е. Байжұма¹, Н. Қ. Қаласов², *Г. О. Ильясова³*

^{1,2,3}Қазақский Национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 08.07.25.

Поступило с исправлениями 22.07.25.

Принято в печать 05.12.25.

АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕННИКА С ПОМОЩЬЮ CFD ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛА

Данное исследование посвящено изучению теплогидравлических характеристик теплообменника типа «труба в трубе», предназначенного для эффективного использования остаточного тепла, с акцентом на сравнительный анализ конфигураций с прямоточным и противоточным течением. Основное внимание уделено анализу конфигураций прямого и противоточного потока. В диапазоне чисел Рейнольдса (Re) от 1000 до 5000 были рассмотрены

ключевые параметры, включая значения факторов Колберна (j) и трения (f). Противоточная конфигурация показала более высокие значения (j) в диапазоне от 0.04 до 0.02 при снижении потерь давления (f) от 0.01 до 0.006, в то время как прямоточная конфигурация продемонстрировала более высокие значения (j) от 0.05 до 0.03, но с увеличением (f) от 0.015 до 0.007. Модель турбулентности BSL $k-\omega$ при $Re = 4000$ оказалась наиболее эффективной по сравнению с SST $k-\omega$. Результаты CFD показали отклонения для (j) в диапазоне 8–25 % и для (f) в диапазоне 0–20 %. Исследование выявило преимущества противоточной конструкции, подчеркнув необходимость оптимизации таких параметров, как гидравлический диаметр и скорость потока, а также предложило дальнейшее изучение сложных геометрий. Эти результаты могут служить надежной основой для развития технологий повторного использования тепловой энергии в целях устойчивого развития.

Ключевые слова: теплообменник, остаточное тепло, энергоэффективность, фактор Колберна, фактор трения, CFD.

Zh. Y. Baizhuma¹, N. B. Kalassov², *G. O. Ilyassova³

^{1,2,3}Al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 08.07.25.

Received in revised form 22.07.25.

Accepted for publication 05.12.25.

ANALYSIS OF A HEAT EXCHANGER USING CFD FOR EFFICIENT USE OF RESIDUAL HEAT

This study investigates the thermohydraulic performance of a «tube-in-tube» heat exchanger designed for efficient residual heat recovery, focusing on a comparative analysis of parallel-flow and counter-flow configurations. The primary emphasis is on analyzing the characteristics of parallel and counter-flow configurations. Within the Reynolds number (Re) range of 1000 to 5000, key parameters, including the Colburn factor (j) and friction factor (f), were examined. The counter-flow configuration exhibited higher (j) values ranging from 0.04 to 0.02 with reduced pressure losses (f) from 0.01 to 0.006, while the parallel-flow configuration showed higher (j) values from 0.05 to 0.03 but with increased (f) from 0.015 to 0.007. The BSL $k-\omega$ turbulence model at $Re = 4000$ proved to be the most effective compared

to the SST $k-\omega$ model. CFD results indicated deviations of 8–25 % for (j) and 0–20 % for (f). The study highlights the advantages of the counter-flow design, emphasizing the need for optimization of parameters such as hydraulic diameter and flow velocity, and suggests further investigation of complex geometries. These findings provide a robust foundation for advancing sustainable thermal energy recovery technologies.

Keywords: heat exchanger; residual heat, energy efficiency, Kolbern factor; friction factor; CFD.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4494

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz