

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/SSGE6270>***Д. Т. Мұзапаров¹, О. М. Талипов²**^{1,2}Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0733-2343>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>*e-mail: mdt07@bk.ru

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БЕТТЕРДЕ ҚАЙНАҒАН КЕЗДЕ ЖЫЛУ АЛМАСУДЫ КҮШЕЙТУДІҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ

Модификацияланған құрылымы және берілген ылғалдылығы бар жылу алмасу беттерінде қайнаған кезде жылу алмасуды пассивті интенсификациялаудың заманауи әдістеріне шолу берілген. Энергетика, микроэлектроника және аэроғарыш салаларының қазіргі даму тенденциялары жылу өндірудің үздіксіз өсуімен сипатталады, бұл жылу тиелген жабдықтар үшін жоғары тиімді салқындату жүйелерін құруды талап етеді. Қолданыстағы салқындату жүйелерінің ішінде салқындатқыштың қайнауына негізделген жүйелер ең кең таралған болып қала береді, бірақ жоғары тығыздықтағы жылу ағындарын бұру үшін жылу беру коэффициентін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) едәуір арттыруға мүмкіндік беретін шешімдер қажет. Ең перспективалы-жылу алмасу беттерінің беткі қасиеттері мен морфологиясының өзгеруіне негізделген пассивті интенсификация тәсілдері. Мақалада осы саладағы ең жаңа жетістіктер, соның ішінде беттердің лазерлік, химиялық және физикалық модификациясы, сондай-ақ әртүрлі ылғалдылық үлгілерін жасау (гидрофильді-гидрофобты құрылымдар) жүйеленген. Соңғы жылдардағы басылымдарды талдау негізінде магнетронды бүрку, электрохимиялық анодты ою, нанокұрылым мен текстураның әртүрлі әдістері сияқты функционалды жабындарды қолдану технологиялары қарастырылды. Ылғалдылықтың (гидрофильділік және гидрофобтылық) бу көпіршіктерінің нуклеация процесіне, қайнау режимдерінің динамикасына түбегейлі әсеріне ерекше назар аударылды. ЖБК, КЖА бойынша өңдеудің әртүрлі әдістерінің тиімділігі және ұзақ пайдалану режимінде термиялық деградацияға

төзімділігі талқыланды. Синергетикалық әсерді көрсететін микроарналық құрылымдармен және наноқабаттармен беттік модификацияны біріктіретін біріктірілген гибриді тәсілдер бөлек қарастырылады. Қорытындылай келе, одан әрі зерттеу бағыттары тұжырымдалды, олардың арасында күрделі гибриді құрылымдардың КЖА есептеу үшін болжамды модельдер әзірлеу, экстремалды жылу жағдайында функционалды жабындардың ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен механикалық беріктігін арттыру, сондай-ақ қарастырылған технологияларды масштабтау және нақты өнеркәсіптік жылу техникасына енгізу мәселелері бар.

Кілтті сөздер: қайнау, жылу беру коэффициенті, критикалық жылу ағыны, беттік модификация, сулану, наноқұрылымдар, микроарналар, бифильді беттер.

Кіріспе

Соңғы жылдары технологияның дамуымен жабдықтың өнімділігі едәуір өсті, бұл осы қондырғылар жұмыс істейтін жұмыс температурасының өсуіне әкелді. Бұл сын-қатерлер терморегуляцияға байланысты мәселелерді шешу үшін, атап айтқанда, оның сенімді және үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуге бағытталған құрылғыларды салқындату үшін әлемдік ғылыми қоғамдастық тарапынан назар аударады. Бұл мәселені шешудің ең қол жетімді нұсқасы – жылу өткізгіштігі жоғары материалдарды пайдалану. Алайда, бұл әдіс тек материалдармен шектеледі. Бұл мәселені шешудің ең қарапайым әдістерінің бірі-жылу алмасу аймағын ұлғайту. Жылуды бөлудің балама әдісі қайнау процестері болуы мүмкін.

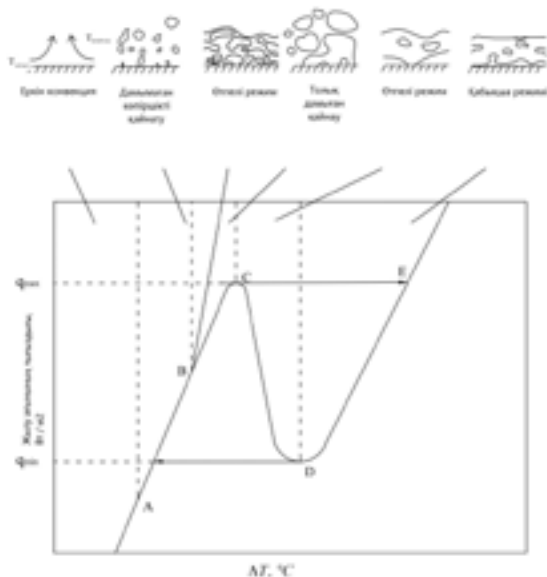
Бүгінгі таңда қайнау кезінде пайда болатын жылу беру процесі қатты дененің бетінен көп мөлшерде жылуды кетірудің ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Қайнау процестері кейде 1000 Вт/см^2 дейін жететін жоғары тығыздықтағы жылу ағындарын бөлуді қажет ететін бірқатар инженерлік және өндірістік салаларда қолданылады. Мысалы: ядролық реакторларда қайнату оларды салқындату үшін қолданылады; микроэлектроникада қайнау электронды аппаратураның элементтерін салқындату үшін қолданылады, мұнда су компоненттерге еніп, жылуды сіңіреді және қайнай бастайды, ол компоненттердің бетінен жылуды алып тастайтын буға айналады, бұл электронды құрылғылардың салқындауына және қауіпсіз температура шегінде жұмыс істеуіне мүмкіндік береді; тоңазытқыш қондырғыларында қайнау процесі тоңазытқыш машиналарында жұмыс істейтін буландырғыштарда қолданылады; химия өнеркәсібінде қайнау қоспаны ерітіндіден бөліп алу үшін, сондай-ақ химиялық реакциялар жүргізу және химиялық өнімдердің кең спектрін өндіру үшін қажет заттарды газ тәрізді күйге келтіру үшін

қолданылады; ғарыштық технологияларда қайнау авиациялық және зымырандық-ғарыштық техникада қозғалтқыш жүйесінің өзін де, ұшатын қондырғылардың жеке тораптары мен конструкцияларын да салқындату үшін қолданылады аппараттар. Сондықтан қайнау процесі энергетика, микроэлектроника, тоңазытқыш техникасы, атом және химия өнеркәсібі, ғарыш технологияларында кеңінен қолданылатын жылу алмасудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Дәстүрлі тегіс қыздыру беттерінің жылу беру коэффициентін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыру мүмкіндігі шектеулі. Басқаша айтқанда, жылу алмасудың тиімділігі табиғи конвекция кезінде жылу берудің төмен коэффициентімен, сондай-ақ жылу алмасу дағдарысының басталуымен шектеледі, бұл беттің қызып кетуіне, содан кейін оның бұзылуына әкеледі, бұл бүкіл жылу алмасу жүйесінің сенімділігіне әсер етеді. Сондықтан жылу тасымалдағыштардың қайнауын қарқындату жылу беру коэффициенттерін (ЖБК) және критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыруға, жылу алмасу дағдарысын жоғары температура аймағына ауыстыруға бағытталған негізгі міндет болып табылады, бұл болашақта жылу алмасу жүйелерінің пайдалану сипаттамаларын кеңейтуге, олардың өнімділігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қатты бет қабырғасынан сұйықтыққа жылу беру режимдері 1-суретте көрсетілген. Бұл суретте бет пен сұйықтық арасындағы жылу берудің ең тиімді аймағы белсенді көпіршікті қайнау аймағы болып табылады, онда бу көпіршіктерінің пайда болуы, олардың өсуі және қыздыру бетінде бөлінуі пайда болады, бұл кейіннен беттің салқындауына әкеледі. Көпіршікті қайнау аймағынан тыс, критикалық жылу ағыны (КЖА) жылу беру коэффициентінің төмендеуіне айтарлықтай әсер етеді, бұл беткі температураның күрт өсуіне әкеледі. Қайнау пленканың қайнау фазасына өткеннен кейін жылу беру тиімділігі айтарлықтай төмендейді, бұл жабдықтың зақымдану қаупін тудырады. Сондықтан, ондаған жылдар бойы жүргізілген ғылыми зерттеулерден кейін ғалымдар әлі де қайнату тиімділігін арттырудың тиімді әдістерін іздеуде, бұл пленка қайнатуға көшуді мүмкіндігінше кешіктіруге үміттенеді [1].



1-сурет – Қайнау кысығы

Осылайша, көпіршікті қайнатудың пайда болу құбылысы және критикалық жылу ағыны (КЖА) жылу мен экономикалық тиімділікке, сондай-ақ тұтастай алғанда жылу алмасу жүйесінің қауіпсіздігіне айтарлықтай әсер ететін қайнау кезіндегі жылу алмасу процесінде шешуші болып табылады. Бүгінгі таңда осы сипаттамаларды жақсарту бойынша бірқатар эксперименттер мен зерттеулер жүргізілді. Соңғы онжылдықтарда қыздыру бетінде өлшемдері жүздеген нанометрден бірнеше микрометрге дейінгі микро және нанокұрылымдарды құру арқылы көпіршікті қайнау мен критикалық жылу ағынын (КЖА) жақсартуға ықпал ететін модификацияланған беттерді өндіру технологияларының қарқынды өсуі байқалды.

Сондықтан қайнаудың қарқындылығы жылу беру коэффициенттерін арттыруға (ЖБК), жылу алмасу дағдарысын жоғары температура мен жылу ағындары аймағына ауыстыруға және көпіршікті қайнатуды тұрақтандыруға бағытталған.

Жылу беру процесін қарқындатудың перспективалық бағыттарының бірі-беттердің құрылымын, гидрофильділігін және микрогеометриясын басқаруға мүмкіндік беретін жылу алмасу беттерін өзгерту. Қайнау

процестерін қарқындрату өнеркәсіптік процестердің энергия тиімділігін арттыру контекстінде маңызды міндет болып табылады.

Қайнау процестерін күшейтудің әртүрлі әдістері бар:

- механикалық бетті өңдеу технологиясы (кесу, жылтырату, тегістеу, соғу, штамптау, престоу, илемдеу, фрезерлеу);
- лазерлік бетті өңдеу технологиясы;
- бетке жабын жағу техникасы (арнайы материалдардың біртекті немесе гетерогенді жабыны);
- химиялық процестер (тотығу, химиялық ойып өңдеу);
- микро және нано электромеханикалық жүйелердің технологиясы (фотолитография техникасы, реактивті ионды ойып өңдеу және микро және нано беттерді жасау үшін терең реактивті ионды ойып өңдеу);
- жылу өткізгіштігін арттыру үшін салқындатқышқа нанобөлшектерді енгізе отырып, нано сұйықтықтарды қолдану техникасы.

Бүгінгі күні кесу, илемдеу және фрезерлеу сияқты механикалық (контактілі) өңдеу әдістерімен жасалған жылу алмасу беттерінің құрылымының қайнау қарқындылығына әсері егжей-тегжейлі зерттелген. Механикалық өңдеу әдістерімен текстураны өзгерту арқылы қайнаууды интенсивтендірудің бұл тәсілінің негізгі идеясы белгілі бір рельефті қалыптастыру арқылы жылу беру бетінің ауданын ұлғайту болып табылады. Механикалық әдістермен текстураны қалыптастыру арқылы қайнаууды күшейту бойынша зерттеулердің қолда бар деректеріне сәйкес, ең жоғары әсерлердің бірі деформациялық кесу өңдеу әдісін қолдану арқылы алынды [2]. Осы әдіс аясында металл беттерде биіктігі 340–570 мкм және 120–180 мкм кадаммен үш өлшемді микро қабырғалар жасалды. Мұндай құрылым жылу беру коэффициентін (ЖБК) 4-6 есе, ал критикалық жылу ағынын (КЖА) шамамен алты есе арттыруға мүмкіндік берді [2]. Қайнау кезінде жылу алмасу қарқындылығын арттыру үшін беттерді өңдеудің механикалық әдістеріне өте егжей-тегжейлі және заманауи шолу Володин О.А. [3].

Жылу алмасу беттерін контактсіз өңдеу бойынша қолда бар зерттеу нәтижелері жер бетіне жақын қабаттың өзгерген қасиеттері қайнау параметрлеріне қалай әсер ететінін сенімді болжау үшін әлі жеткіліксіз. Байланыссыз әдістердің ішінде металдарды лазерлік өңдеу ең перспективалы болып саналады [4]. Лазерлік сәулеленудің әсері жаңа қосылыстар түзу үшін беттің элементтік құрамын ғана емес, сонымен қатар нано түзу арқылы оның құрылымын, содан кейін агрегация мен микроэлементтерді өзгертуге мүмкіндік береді. Құрамы мен құрылымының елеулі модификациясы қажетті жер бетіне жақын қасиеттерді мақсатты түрде орнатуға және сол арқылы жылу тасымалдағыштардың қайнау процестерін қоса алғанда, технологиялық беттердегі физика-химиялық процестерді басқаруға мүмкіндік береді.

Нано, пико және фемтосекундтық ұзындықтағы сәулеленуді өңдеу әртүрлі нәтижелерге әкелетінін ескеру маңызды. Пико және фемтосекундтық әсер ету кезінде, өте жоғары қуатқа байланысты, термиялық әсер ету аймағы сәулелік дақпен шектеледі, яғни лазерлік дақ аймағынан тыс, наносекундтық өңдеуден айырмашылығы, беткі қабаттың айқын модификациясы болмайды. Наносекундтық әсер ету кезінде элементтік құрам мен текстураның өзгеруі айтарлықтай үлкен аймақтарды қамтиды. Дегенмен, барлық көрсетілген режимдер (нано, пико және фемтосекунд) металдардың беткі қабатының қасиеттерін түбегейлі өзгертуге мүмкіндік береді.

[5; 6] жұмыстарына сәйкес, мыс, болат және алюминийден жасалған жылу алмасу беттерінің лазерлік модификациясы дистилденген су немесе FC-72 (құрамында фтор бар салқындатқыш сұйықтық) сияқты салқындатқыштар қайнаған кезде критикалық жылу ағынының (КЖА) және жылу беру коэффициентінің (ЖБК) жоғарылауына әкеледі. Алайда, [7] атап өткендей, лазермен текстураланған беттер жылу алмасу параметрлерін жақсартады (нуклеация орталықтарының санының өсуі және жылу беру коэффициентінің жоғарылауы арқылы (ЖБК)), ойып өңдеу әдісімен алынған кавернасы бар беттер одан да жоғары көрсеткіштерді көрсетеді. Сонымен қатар, [8] микрокуаттары жоқ салыстырмалы түрде таяз микротекстуралы беттер тегіс (жылтыратылған) беттермен салыстырылатын қайнау сипаттамаларын көрсететіні анықталды.

Жылу алмасу беттерін өңдеудің жанасу және жанаспайтын әдістерінен басқа, беткі қабаттың қасиеттерін айтарлықтай өзгерту, демек, әр түрлі жабындарды қолдануға негізделген тәсіл қайнау кезінде жылу беруді басқаруға мүмкіндік береді. Шартты түрде жабындарды қалыптастыру әдістерін екі топқа бөлуге болады: физикалық (магнетронды бүрку, центрифугалау, бүрку) және химиялық (газ фазалы химиялық тұндыру, электрохимиялық ойып өңдеу). Жабындар материалда да, құрылымда да әр түрлі болуы мүмкін: оксид қабатын қалыптастырудан [9] нанотүтікшелер, нано талшықтар [10] немесе металл бөлшектерін жағуға дейін [11]. Жабындарды жағудың физикалық және химиялық әдістері жылу алмасу беттерінің беткі қабатының қасиеттері мен сипаттамаларын айтарлықтай өзгертуге мүмкіндік береді, бұл жылу беру коэффициентін (ЖБК), критикалық жылу ағынын (КЖА) арттыру және бу түзу орталықтарының санын көбейту арқылы қайнаудың қарқындылығына әкеледі. Алайда, мұндай жабындардың беріктігі және оларды практикалық қолдану үшін масштабтау мәселелері ашық болып қалады және жан-жақты, кең ауқымды зерттеулерді қажет етеді. Жабындарды қалыптастырудың ең перспективалы әдістерінің бірі жоғары энергиялы плазмалық бүрку [12] екенін атап өткен жөн. Бұл әдіс үлгінің бетінде берік, жоғары адгезиялы және біркелкі жабын алуға мүмкіндік

береді. Плазмодинамикалық синтез процесінде 1 км/с астам жылдамдықпен импульстік эрозиялық плазманың жоғары жылдамдықты әсер ету шарттары іске асырылады. Мұндай әсер жабын материалының ол қолданылатын негізге гидродинамикалық араласуын тудырады. Осының арқасында жабын жылу алмасу беттерін өңдеудің байланыссыз әдістері үшін қол жетімді емес адгезияны едәуір арттырады. Мыс бетіне алюминий жабынын плазмалық бүрку арқылы жағу жылу беру коэффициентін (ЖБК) 68 %-ға арттырып, критикалық жылу ағынын (КЖА) жылтыратылған мыспен салыстырғанда 2,39 есе арттыратыны белгілі [12].

Жоғарыда аталған барлық нұсқалардың ішінде беттің модификациясы химиялық және механикалық тұрақтылықты жеңудегі салыстырмалы түрде аз қиындықтардың арқасында айтарлықтай назар аударды.

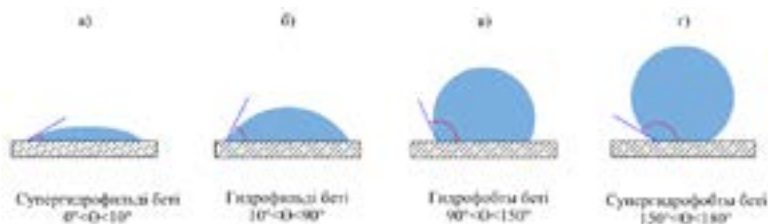
Жылу алмасу бетінің геометриясынан басқа, қайнау процесін күшейтуде қатты дененің сулануы да маңызды рөл атқарады. Беттің сулануы тамшының қандай күйде екенін анықтайды (Вензель немесе Касси-Бакстер күйі, 2-сурет) және оның ішіндегі бу көпіршігінің пайда болуы мен өсуіне, сондай-ақ тамшы көлеміндегі конвективті ағындардың сипатына әсер етеді. Сондықтан сұйықтықтың бір тамшысының қыздырылған бетімен өзара әрекеттесуін зерттеу жылу алмасу жүйелеріндегі жылу беру механизмдері мен сипаттамаларын түсінудің кілті болып табылады. Қыздырылған бетке тиетін бір тамшының мінез-құлқын талдау жылу массасының негізгі заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Алайда, тіпті бір тамшының қайнауы да көптеген факторларға әсер ететін күрделі процесс: сұйықтықтың өзі, қоршаған орта жағдайлары, бетінің температурасы және оның ерекшеліктері. Сондықтан көптеген ғылыми зерттеулерде ылғалдылық қыздырылған беттерде қайнаған кезде жылу алмасу нәтижелеріне әсер ететін негізгі факторлардың бірі ретінде қарастырылады [13].



2-сурет – Вензель мен Касси-Бакстердің жағдайы

Супергидрофобты және супергидрофильді беттер жылу беруді күшейту үшін заманауи технологияларда кеңінен қолданылады (3-сурет). Беттің кедір-бұдырлығы мен сулануы қайнау процесінің екі негізгі параметріне әсер етеді: жылу беру коэффициенті (ЖБК) және критикалық жылу ағыны (КЖА). Жылу

ағыны критикалық мәннен асып кетсе, Сұйықтық пен бет арасындағы бу қабатының пайда болуына байланысты беткі температура күрт көтеріледі, бұл жабдықтың апаттық режимін тудыруы мүмкін. Критикалық жылу ағынының (КЖА) жоғарылауы қайнау процестерінде жоғары температураға қауіпсіз жетуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, тамшы ішіндегі конвективті ағындардың табиғаты гидрофильді және гидрофобты беттерде айтарлықтай ерекшеленетіні белгілі.



3-сурет – супергидрофильді (а), гидрофильді (б), гидрофобты (в) және супергидрофобты (г) беттеріндегі сулану контакт бұрышы

Беттік модификация-тамшылатып және жұқа қабықшалы қайнату кезінде жылу беруді жақсартудың ең көп таралған әдістерінің бірі. Беткі құрылымның өзгеруі және оның сулануы жылу берудің қарқындылығына, сондай-ақ көпіршікті қайнатудың пайда болуына, қалыптасуына, өсуіне, бөлінуіне және бу көпіршіктерінің кейіннен бірігуіне айтарлықтай әсер етеді. Ылғалдылық, өз кезегінде, бетінің кедір-бұдырлығымен және химиялық құрамымен анықталады. Қыздырылған беттердің гидрофильді және гидрофобты қасиеттері салқындатқыштың қайнау сипаттамаларына әр түрлі әсер етеді.

Гидрофобты беттерде көпіршікті қайнату процесі ертерек басталады, өйткені мұнда нуклеация орталықтарының саны көп. Нәтижесінде, төмен жылу ағындарында гидрофобты беттерде жылу беру коэффициенті (ЖБК) гидрофильді беттерге қарағанда жоғары. Алайда, жылу ағынының өсуімен бу көпіршіктерінің мөлшері мен саны артады, бұл бу пленкасының пайда болуына және жылу беру коэффициентінің төмендеуіне әкеледі (ЖБК). Сондықтан, гидрофильді беттерде қайнаудың кейінірек басталуына қарамастан, жоғары жылу ағындарында олар жақсы ылғалданудың арқасында тиімді жылу беруді қамтамасыз етеді. Тиісінше, гидрофильді беттерге арналған критикалық жылу ағыны (КЖА) жоғары.

Осылайша, гидрофобты беттер кіші жылу ағындарында, ал гидрофильді беттер үлкен жылу ағындарында қолайлы.

Сондай-ақ, жылу беру коэффициентінің (ЖБК) және критикалық жылу ағынының (КЖА) өсуіне учаскелерді әртүрлі ылғалдылықпен біріктіретін бифильді беттер арқылы қол жеткізуге болады, бұл сұйық фазаның жанасу аймағының азаюымен нуклеация орталықтарының жоғары тығыздығын қамтамасыз етеді [14]. Мұндай беттер жоғары тиімділікті көрсетті. Гидрофильді және гидрофобты аймақтардың тіркесімі тамшының булану процесін өзгертеді. Атап айтқанда, бифильді құрылымдар гидрофобты учаскелерде ерте көпіршікті қайнатуды бастауға мүмкіндік береді, сонымен бірге гидрофильді жерлерде Жоғары критикалық жылу ағынын (КЖА) қамтамасыз етеді, бұл оларды қайнау кезінде жылу беруді жақсарту үшін әсіресе перспективалы етеді [15].

Бифильді жылу өткізгіш беттер әртүрлі әдістермен жасалды, соның ішінде гидрофильді бетте литография арқылы гидрофобты аймақтарды қалыптастыру [16], содан кейін гидрофобты агентті бүрку арқылы маскировка [17], сондай-ақ булану-кристалдану әдісі [18].

Соңғы жылдары лазерлік материалдарды өңдеу технологиялары салыстырмалы түрде төмен қаржылық шығындардың, іске асырудың қарапайымдылығының, жоғары өнімділіктің және беттің функционалдық қасиеттерін мақсатты түрде өзгерту мүмкіндігінің арқасында көбірек назар аударуда. Сонымен қатар, лазерлік өңдеу бифильді құрылымдарды жасауға мүмкіндік береді. Жұмыста [15] алюминий нитридінде бифильді беттерді алу үшін гидрофильді және супергидрофобты аймақтарды құрайтын лазерлік өңдеу мен силанизацияның комбинациясы қолданылды. [15] Лаплас қысымының айырмашылығы көпіршіктердің супергидрофобты аймаққа қарай жылжуына әкелетіні анықталды.

Зерттеуде [19] лазерлік абляцияны және одан кейінгі силанизацияны қолдана отырып, кремний субстратында бифильді беттер пайда болды. 16,4 Вт/см² жылу ағынында ұсақ бу көпіршіктері тек супергидрофильді аймақта пайда болатындығы көрсетілген. Сондай-ақ, супергидрофобты аймақтың температурасы супергидрофильді аймақтың температурасынан 25 °C жоғары, ал кіші жылу ағындарында 90 °C жоғары екендігі анықталды.

2 мм қадамы бар 2×2 мм шаршы өрнектер түріндегі бифильді құрылымдар мыс түтікте химиялық Тұндыру және пикосекундтық лазер арқылы жасалған [14]. Мұндай беттің жылу беру коэффициенті (ЖБК) жылтыратылған мыспен салыстырғанда 1,16 есе өсті, бірақ жоғары жылу ағындары бар супергидрофобты аймақтар үшін коэффициенттің 0,83-ке дейін төмендеуі байқалды, бұл ылғалдылыққа байланысты көпіршік динамикасындағы айырмашылықтарға байланысты [14].

Супергидрофилді алюминий беттері химиялық тұндыру мен наносекундтық лазерлік Текстураның қосындысы арқылы алынды [20].

Оңтайлы жылу алмасу тиімділігі (КЖА және ЖБК өсуі) гидрофобты нүктелік учаскелер арасындағы қашықтық көпіршіктің бөліну диаметріне сәйкес келген кезде қол жеткізіледі [20].

Жұмыста [8] тот баспайтын болат фольгаға ПДМС-кремний диоксиді (полидиметилсилоксан) гидрофобты жабыны жағылды, ал супергидрофильді аймақтарды қалыптастыру үшін жергілікті лазерлік термиялық өңдеу қолданылды. Алынған бифильді бет көпіршікті қайнауың басталу температурасын және жылтыратылған, гидрофобты және гидрофильді беттермен салыстырғанда жоғары жылу беру коэффициентін (ЖБК) қамтамасыз етті [8].

Біз 2025 жылдың қыркүйегінде Томск ғылыми-зерттеу политехникалық университетінің базасында Турбомаркер түріндегі лазермен өңделген алюминий қорытпасынан жасалған дайындалған үлгілерге бірнеше эксперименттер жүргіздік (Ресей Федерациясы шығарған). Беттер екі-алты сағат бойы өңделді, супергидрофильді ұшы бар қырлы беттер алынды. Лазермен өңдеуден бұрын қалыңдығы 3 мм пластиналар алмаз пастасымен айналдырына дейін жылтыратылды, ұштары будың пайда болуының қажетті орталықтарын болдырмау үшін біркелкі исклучстікті болдырмау үшін металл файлмен өңделді. Содан кейін, лазерлік қондырғыда үлгінің температурасын бекіту үшін термопара үшін үш таяз тесік бұрғыланды. Әрі қарай, текстура қолданылды, үлгі экспериментті таза ұстау үшін ультрадыбыстық ваннадағы ықтимал ластаушы заттардың қалдықтарынан тазартылды. Төменгі және бүйір бөліктері көпіршікті нуклеация орталықтарын болдырмау үшін ыстыққа төзімді тығыздағышпен жабылған, өйткені зерттеуге тек текстуралы бет қатысады. Үлгілердің бірі 4-суретте көрсетілген.



4-сурет – Эксперимент үшін дайындалған үлгі

Эксперимент кезінде реостаттағы ток күші мен кернеу мөлшерін реттеу арқылы сынақ үлгісінде жылу жүктемесі біртіндеп өсті. Тәжірибе 100 градус Цельсий температурасында қайнаған, деаэrlenген суда жүргізілді. Контейнердегі судың температурасы екі электр қайнатқышымен қамтамасыз етілді.

Нәтижелер және талқылау

Қайнау процесіне бағытталған көптеген зерттеулерге қарамастан, бұл құбылыстың бірыңғай қабылданған теориясы әлі жоқ. Бұл әртүрлі кеңістіктік масштабта қайнатуға әсер ететін көптеген факторларға байланысты. Олардың ішінде оның кедір-бұдырлығы мен сулануымен анықталатын бетінің күйі шешуші рөл атқарады.

Лазерлік модификацияға негізделген металды өңдеудің байланыссыз әдістері кедір-бұдыр деңгейінде де, оның геометриялық конфигурациясында да текстураның кең ауқымы бар бетті қалыптастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, лазерлік өңдеу ылғалдылықты супергидрофильділіктен супергидрофобтылыққа дейінгі төтенше жағдайларға дейін басқаруға мүмкіндік береді. Осы себепті жылу алмасу беттерінің лазерлік модификациясы қайнау процестерін күшейтудің перспективалы құралы болып табылады.

Жоғары энергиялы плазмалық бүрку сонымен қатар қайнаған кезде жылу алмасуды жақсартудың перспективалы және әлі зерттелмеген әдістерін білдіреді, бұл оны әрі қарай зерттеу үшін маңызды бағытқа айналдырады.

Қазіргі уақытта Томск политехникалық университетінде жүргізілген эксперимент нәтижелерін өңдеу жүргізілуде. Көпіршіктердің пішіндері, мөлшері мен саны, олардың пайда болу жиілігі және бетінен бөлінуі зерттеледі. Жылу жүктемесінің жылу беру коэффициентіне (ЖБК) және критикалық жылу ағынына (КЖА) тәуелділігі мен әсері құрылады.

Қорытынды

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, беттік модификация қайнауы күшейтудің ең тиімді әдісі болып табылады. Сонымен, беттік модификация (физикалық және химиялық) қайнау тиімділігін едәуір арттырады, ал микро және нанокұрылымнан сулануды басқаруға дейінгі әдістердің үйлесімі энергияның орташа шығындарымен ЖБК мен КЖА-ның айтарлықтай өсуіне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Бифильді беттер жылу алмастырғыш материалдардың жаңа буыны болып табылады, өйткені бұл беттер ылғалдануды басқарудың арқасында ЖБК мен КЖА-ны бір уақытта арттыруды қамтамасыз етеді.

Наноқабаттары бар микроарналық құрылымдар микроэлектроника мен энергетикалық қондырғылардың болашақ термиялық басқару жүйелерінің ең перспективалы бағыты мен негізін құрайды.

Негізгі қиындықтар – бұл жабынның деградациясы, әмбебап КЖА модельдерінің болмауы және технологияны масштабтаудың күрделілігі. Сондықтан болашақ зерттеулер көп деңгейлі беттерді біріктіруге және болжамды модельдерді құруға бағытталуы керек.

REFERENCES

1 Mori, S., Utaka, Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling : A review, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 108. – 2017. – P. 2534–2557.

2 Popov, I. A., Shchelchkov, A. V., Gortyshov, Y. F., Zubkov, N. N. Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces, // *High Temp.* – 55 – 2017 – P. 524–534.

3 Volodin, O. A., Pecherkin, N. I., Pavlenko, A. N. Heat Transfer Enhancement at Boiling and Evaporation of Liquids on Modified Surfaces – A Review, *High Temp.* – 59 – 2021 – P. 405–432.

4 Emelyanenko, K. A., Emelyanenko, A. M., Boinovich, L. B. Laser Obtained Superhydrophobic State for Stainless Steel Corrosion Protection, a Review, *Coatings.* – 2023. – Vol. 13. – P. 194. 13.

5 Liu, B., Liu, J., Zhang, Y., Wei, J., Wang, W. Experimental and theoretical study of pool boiling heat transfer and its CHF mechanism on femtosecond laser processed surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 132. – 2019 – P. 259–270.

6 Može, M., Zupančič, M., Hočevar, M., Golobič, I., Gregorčič, P. Surface chemistry and morphology transition induced by critical heat flux incipience on laser-textured copper surfaces, *Appl. Surf. Sci.* 490. – 2019. –P. 220–230.

7 Sitar, A., Može, M., Crivellari, M., Schille, J., Golobič, I. Nucleate pool boiling heat transfer on etched and laser structured silicon surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. – P. 147.

8 Zupančič, M., Može, M., Gregorčič, P., Sitar, A., Golobič, I. Evaluation of enhanced nucleate boiling performance through wall-temperature distributions on PDMS-silica coated and non-coated laser textured stainless steel surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 111 – 2017 – P. 419–428.

9 Kim, N., Son, H. H., Kim, S. J. Oxidation effect on pool boiling critical heat flux enhancement of Cr-coated surface for accident-tolerant fuel cladding application, *Int. J. Heat Mass Transf.* – 144. – 2019 P. 118–655.

10 Sahu, R. P., Sinha-Ray, S., Sinha-Ray, S., Yarin, A. L. Pool boiling on nano-textured surfaces comprised of electrically-assisted supersonically solution-blown, copper-plated nanofibers: Experiments and theory, *Int. J. Heat Mass Transf.* 87. – 2015 – P. 521–535.

11 **Dewangan, A.K., Kumar, A., Kumar, R.** Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of R-134a and R-410a on a Porous Surface, *Heat Transf. Eng.* 40 – 2019. – P. 1249–1258.

12 **Ranjan, A., Priy, A., Ahmad, I., Pathak, M., Khan, M. K., Keshri, A. K.** Heat Transfer Characteristics of Pool Boiling with Scalable Plasma-Sprayed Aluminum Coatings, *Langmuir*. – 39. – 2023 – P. 6337–6354.

13 **Tetreault-Friend, M., Azizian, R., Bucci, M., Mckrell, T., Buongiorno, J., Rubner, M., Cohen, R.** Critical heat flux maxima resulting from the controlled morphology of nanoporous hydrophilic surface layers, *Appl. Phys. Lett.* – 108 2016 – P. 9–21.

14 **Cheng, H. C., Jiang, Z. X., Chang, T. L., Chen, P. H.** Effects of difference in wettability level of biphilic patterns on copper tubes in pool boiling heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021. – Vol. 120. – № July – 2020. – P. 110–241.

15 **Xia, Y., Gao, X., Li, R.** Influence of Surface Wettability on Bubble Formation and Motion, *Langmuir*, – 2021. – Vol. 37. – № 49. – P. 14483–14490.

16 **Mandsberg, N. K., Hansen, O., Taboryski, R.** Generation of micro-droplet arrays by dip-coating of biphilic surfaces; The dependence of entrained droplet volume on withdrawal velocity, *Scientific Reports*, – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 1–9.

17 **Pontes, P., Cautela, R., Teodori, E., Moita, A.S., Moreira, A. L.N.** Experimental description of bubble dynamics and heat transfer processes occurring on the pool boiling of water on biphilic surfaces, *Applied Thermal Engineering*, – 2020. – Vol. 178. – P. 115507.

18 **Han, T., Choi, Y., Kwon, J. T., Kim, M. H., Jo, H. J.** Evaporation-crystallization method to promote coalescence-induced jumping on superhydrophobic surfaces, *Langmuir*. – 2020. – Vol. 36. – № 33. – P. 9843–9848.

19 **Xia, Y., Gao, X., Li, R.** Surface effects on Sub-cooled pool boiling for smooth and laser-ablated silicon surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 194. – P. 123113.

20 **Može, M., Zupančič, M., Golobič, I.** Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. – Vol. 161.

03.12.25 ж. баспаға түсті.

04.12.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Д. Т. Музапаров¹, О. М. Талипов²

^{1,2}Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 03.12.25.

Поступило с исправлениями 04.12.25.

Принято в печать 05.12.25.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Представлен обзор современных методов пассивной интенсификации теплообмена при кипении на поверхностях теплообмена с модифицированной текстурой и заданной смачиваемостью. Современные тенденции развития энергетики, микроэлектроники и аэрокосмической отрасли характеризуются непрерывным ростом тепловыделения, что требует создания высокоэффективных систем охлаждения для теплонагруженного оборудования. Среди существующих систем охлаждения, системы, основанные на кипении теплоносителя, остаются наиболее распространенными, однако для отвода тепловых потоков высокой плотности необходимы решения, позволяющие значительно увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и критический тепловой поток (КТП). Наиболее перспективными являются пассивные подходы интенсификации, базирующиеся на изменении приповерхностных свойств и морфологии поверхностей теплообмена. В статье систематизированы новейшие достижения в данной области, включая лазерную, химическую и физическую модификацию поверхностей, а также создание паттернов различной смачиваемости (гидрофильно-гидрофобные структуры). На основе анализа публикаций последних лет рассмотрены технологии нанесения функциональных покрытий, такие как магнетронное напыление, электрохимическое анодное травление, а также различные методы наноструктурирования и текстурирования. Особое внимание уделено фундаментальному влиянию смачиваемости (гидрофильности и гидрофобности) на процессы нуклеации паровых пузырей, динамику режимов кипения. Проведено обсуждение эффективности различных методов обработки по КТО, КТП и устойчивости к термической деградации в длительном режиме эксплуатации. Отдельно рассмотрены комбинированные гибридные подходы, объединяющие модификацию поверхности с микроканальными структурами и нанопокрывтиями,

демонстрирующие синергетический эффект. В заключение сформулированы направления для дальнейших исследований, среди которых – разработка прогностических моделей для расчета КТП сложных гибридных структур, повышение долговременной стабильности и механической прочности функциональных покрытий в экстремальных тепловых условиях, а также вопросы масштабирования и внедрения рассмотренных технологий в реальную промышленную теплотехнику.

Ключевые слова: кипение, коэффициент теплоотдачи, критический тепловой поток, модификация поверхности, смачиваемость, наноструктуры, микроканалы, бифильные поверхности.

*D. T. Muzaparov¹, O. M. Talipov²

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 03.12.25.

Received in revised form 04.12.25.

Accepted for publication 05.12.25.

MODERN METHODS FOR INTENSIFYING HEAT TRANSFER DURING BOILING ON MODIFIED SURFACES

An overview of modern methods of passive intensification of heat transfer during boiling on heat transfer surfaces with modified texture and specified wettability is presented. Current trends in the development of energy, microelectronics, and the aerospace industry are characterized by continuous growth in heat generation, which requires the creation of highly efficient cooling systems for heat-loaded equipment. Among existing cooling systems, those based on heat transfer fluid boiling remain the most common, but solutions that significantly increase the heat transfer coefficient (HTC) and critical heat flux (CHF) are needed to dissipate high-density heat fluxes. The most promising are passive intensification approaches based on changing the surface properties and morphology of heat exchange surfaces. The article systematizes the latest achievements in this field, including laser, chemical, and physical modification of surfaces, as well as the creation of patterns with different wettability (hydrophilic-hydrophobic structures). Based on an analysis of recent publications, technologies for applying functional coatings, such as magnetron sputtering, electrochemical anodic etching, and various methods of nanostructuring and texturing, are considered. Particular attention is paid to the fundamental influence

of wettability (hydrophilicity and hydrophobicity) on the processes of vapor bubble nucleation and boiling dynamics. The effectiveness of various treatment methods was discussed in terms of HTC, CHF and resistance to thermal degradation during long-term operation. Combined hybrid approaches that combine surface modification with microchannel structures and nanocoatings, demonstrating a synergistic effect, were considered separately. In conclusion, directions for further research are formulated, including the development of predictive models for calculating the CHF of complex hybrid structures, improving the long-term stability and mechanical strength of functional coatings in extreme thermal conditions, as well as issues of scaling and implementation of the considered technologies in real industrial heat engineering.

Keywords: boiling, heat transfer coefficient, critical heat flux, surface modification, wettability, nanostructures, microchannels, biphilic surfaces.

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