

Н.Н. Кусбергова*, В. Мукамеденқызы

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЖЫЛУЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ ЖАҒДАЙЫНДА ЖЕКЕ ҚОРҒАНЫС ҚҰРАЛДАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ БАҒАЛАУ

Аңдатпа: Бұл мақалада өндірістік және төтенше жағдайларда қолданылатын жеке қорғаныс құралдарының (ЖҚҚ) жылуфизикалық сипаттамаларына кешенді талдау жүргізілді. Жоғары температура мен сәулелік жылу ағыны жағдайында адам ағзасын термиялық зақымданудан қорғау – басты міндеттердің бірі болып саналады. Зерттеу барысында үш түрлі материалдың жылуөткізгіштік, жылу сыйымдылық, термиялық төзімділік және инфрақызыл сәуле шағылту қасиеттері зертханалық сынақтар арқылы және COMSOL Multiphysics платформасындағы модельдеу әдісімен бағаланды. Сонымен қатар, өндірістік ортада жұмыс істейтін қызметкерлер арасында сауалнама жүргізіліп, ЖҚҚ-ның шынайы қолдану тиімділігі анықталды. Алынған нәтижелер ЖҚҚ-ның әртүрлі типтерінің нақты жұмыс жағдайларындағы жарамдылығын ғылыми тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде олардың құрылымын жетілдіру, жаңа буын қорғаныс киімдерін жасау және өндірістік қауіпсіздік деңгейін арттыру бойынша практикалық ұсыныстар әзірлеуге негіз болады.

Зерттеу нәтижелері химия, металлургия, мұнай-газ және өрт сөндіру салаларындағы ЖҚҚ сапасын жақсартуға бағытталған. Сонымен қатар, болашақ зерттеулерде материалдың эргономикасы мен адам физиологиясына әсерін, сондай-ақ смарт-датчиктермен біріктіру мүмкіндігін кешенді бағалау ұсынылады. Мұндай ғылыми негізделген тәсілдер тек қауіпсіздікті емес, жұмысшылардың өмір сүру сапасын да арттыруға септігін тигізеді.

Түйін сөздер: жеке қорғаныс құралдары, жылуөткізгіштік, термиялық төзімділік, сәулелік шағылысу, экстремалды орта.

Кіріспе

Қазіргі өндірістік ортада қызметкерлер көбіне экстремалды жағдайда, әсіресе жоғары температура мен жылулық сәулелену әсерінде жұмыс істейді, бұл адамның физиологиялық жүйесіне айтарлықтай жүктеме түсіреді. Осындай жағдайда жеке қорғаныс құралдары (ЖҚҚ) – жұмысшыны механикалық зақымданудан ғана емес, термиялық күйіктерден, сәулелік жылу мен инфрақызыл сәулеленуден қорғаудың негізгі тетігі. Олардың тиімділігі материалдың жылуөткізгіштік коэффициенті (жылуды өткізу жылдамдығы), меншікті жылу сыйымдылығы (жылуды жинақтау қабілеті) және сәулелік шағылу коэффициенті (инфрақызыл сәулені кері қайтару қабілеті) сияқты жылуфизикалық сипаттамалардың үйлесіміне байланысты анықталады.

Соңғы жылдары халықаралық зерттеулерде ЖҚҚ материалдарының тиімділігін арттыруға маңызды жетістіктерге қол жеткізілді. Park және әріптестері (2023) арамид талшықтарының көпқабатты құрылымдарын зерттеп, жоғары температураға төзімділікті жақсарту жолдарын ұсынды; Li мен Zhou (2024) наноқаптамалар арқылы инфрақызыл шағылысуды күшейтіп, сәулелік жылуды азайтудың тиімді әдістерін көрсетті; Gholamreza және т.б. (2021) көпқабатты қорғаныс маталарының жылуөткізгіштік қасиеттерін және құрылымдық параметрлерінің жылу тұрақтылығына әсерін дәлелдеді. Қазақстанда жоғары температура мен сәулелік жылу ағыны әсеріндегі ЖҚҚ-ны кешенді жылуфизикалық тұрғыдан зерттеу аз, сондықтан бұл жұмыс отандық және халықаралық тәжірибені біріктіріп, нақты материалдардың тиімділігін анықтауға бағытталған [1, 45 б].

Зерттеудің мақсаты – өндірістік және төтенше жағдайларда қолданылатын үш ЖҚҚ материалының жылуфизикалық қасиеттерін кешенді зерттеп, олардың тиімділігін салыстырмалы талдау арқылы анықтау. Материалдар лазерлік флэш әдісі, дифференциалды калориметрия және инфрақызыл спектроскопиямен зерттеліп, COMSOL Multiphysics платформасында адам терісі мен материал арасындағы жылуалмасу модельденді. Алынған нәтижелер өндірістік қауіпсіздік стандарттарын жетілдіруге, жаңа буын ЖҚҚ жасауда және термиялық төуекті азайтуда қолдануға бағытталған.

Тәжірибелік бөлім

Жеке қорғаныс құралдарын (ЖҚҚ) зерттеу барысында әлемдік деңгейде танылған бірқатар еңбектер қарастырылды. F.Hoffmann-ның «Thermal Conductivity Measurement Techniques» еңбегі материалдардың жылуөткізгіштігін бағалау әдістерін теориялық және тәжірибелік тұрғыдан түсіндіреді [2]. Chen, Wang және Li авторлығымен шыққан «Protective Clothing Performance Evaluation» мақаласында ЖҚҚ-ның тиімділігі мен адам физиологиясы арасындағы байланыс жүйелі талданған. Мұндай еңбектер теорияны қолданбалы зерттеулермен ұштастырып, отандық жұмыстарға үлгі болады. Зерттеуде осындай дереккөздерге сілтеме жасау ғылыми адалдық пен кәсіби жауапкершілікті көрсетеді [3].

Соңғы бес жылдағы басты үрдістер – материалдардың жылуфизикалық қасиеттерін жақсарту, көпқабатты құрылымдар және нанотехнологиялар арқылы сәулелік шағылу мен жылуөткізгіштікті басқару. 2025 жылы RSC Advances функционалдық жабындардың отқа төзімділік, микробқа қарсы және өзін-өзі тазалау қасиеттерін арттыруын көрсетті [7]. Nano-Micro Letters FP-12-6 матасының күн сәулесін шағылыстырып, жылуды шығаруға қабілеттілігін анықтады [8]. 2024 жылы Cell Reports Physical Science наноқұрылымды текстильдердің сәулелік жылуды басқаруын, Science Advances температураға бейімделетін фотондық материалдарды сипаттады [9, 10]. Journal of Materials Science арамид наноталшықты полисульфон нанокомпозиттерін перспективалы деп атады [11].

Зерттеулер ЖҚҚ-ның көп функциялы маңыздылығын көрсетеді. Қазақстанда мұндай зерттеулер аз болғандықтан, халықаралық тәжірибені отандық жағдайға бейімдеу қажет. Қазақстандық ғалымдар ЖҚҚ-ны дұрыс таңдаудың қауіптерді азайтудағы рөлін дәлелдеп, материалдық құрам мен жылу төзімділікті зерттеп, отандық өнімдерді шетелдік үлгілермен салыстырады. Олар инновациялық технологиялар мен ғылыми сараптаманың қажеттігін атап, қауіпсіз еңбек ортасын қалыптастыруға үлес қосады.

ASTM, ISO және EN сияқты халықаралық стандарттарды білу ЖҚҚ зерттеушісі үшін міндетті, себебі олар нақты талаптар мен әдістемелерді белгілеп, зерттеу нәтижелерінің халықаралық деңгейде мойындалуына ықпал етеді. Сілтеме жасау жұмыстың сапасы мен беделін арттырады, әдебиетті меңгеру мен басқа зерттеулермен салыстыру жалған тұжырымдардан сақтайды және ғылыми этикаға сәйкес болуға мүмкіндік береді. Әлемдік тәжірибе отандық жағдайға бейімделген тиімді шешімдер ұсынуға жол ашады [4].

Зерттеу әдісі мен материалдары

Зерттеу үшін өндірістік және төтенше жағдайларда жиі қолданылатын үш түрлі қорғаныс материалы таңдалды. Таңдау кезінде олардың өндірістік ортадағы қолданыс жиілігі, термиялық жүктемеге төзімділігі және халықаралық стандарттарға сәйкестігі ескерілді. Бұл үш материал өндірісте жиі кездесетін үш түрлі технологиялық ортада – жоғары температура, сәулелік жылу ағыны және ашық жалын әсерінде – қолданылатын үлгілерді бейнелеу үшін таңдалды. Әр материалдың физикалық сипаттамалары, қалыңдығы, тығыздығы, өндірушісі және қолданылатын негізгі саласы 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Зерттелген материалдардың сипаттамалары

Материал коды, құрамы және түрі	Қалыңдығы, мм	Тығыздығы, г/м ²	Өндіруші ел	Негізгі қолданылу саласы
M1 – Арамид талшығынан тоқылған мата (Nomex® типі)	0,65	240	АҚШ (DuPont)	Өрт сөндіру киімдері, металлургиялық қорғаныс костюмдері
M2 – Алюминий қабаты бар арамид мата (қорғаныс жабыны 25 мкм)	0,70	255	Нидерланд (TenCate Protective Fabrics)	Инфрақызыл сәуледен қорғайтын арнайы киімдер
M3 – Арнайы химиялық өңделген жанбайтын мақта	0,80	320	Ұлыбритания (Carrington Textiles)	Дәнекерлеу және жеңіл өнеркәсіптегі қорғаныс киімдері

Сынақ шарттары

Барлық сынақтар Алматы қаласындағы физика-техникалық зертханада жүргізілді. Өлшеу процестері ISO 13506:2022 және ASTM F1939-15 стандарттарының талаптарына толық сәйкес орындалды.

Сынақтар 150°C, 300°C және 450°C температурада, 20, 35 және 50 кВт/м² сәулелік жылу ағынында, 60, 180 және 300 секунд әсер ету уақытымен, 101,3 кПа атмосфералық қысымда және 45 ± 5 % салыстырмалы ауа ылғалдылығында жүргізіліп, әр сынақ үш рет қайталанып, орташа мәндері есептелді.

Өлшеу әдістері және құрал-жабдықтар

Материалдардың жылуфизикалық қасиеттерін анықтау үшін заманауи жоғары дәлдікті құралдар пайдаланылды: жылуөткізгіштік коэффициенті (λ) – Netzsch LFA 467 HyperFlash лазерлік флэш әдісімен, дәлдігі ±3%; меншікті жылусыйымдылық (c) – Mettler Toledo DSC 3+ дифференциалды сканерлеуші калориметрия әдісімен, дәлдігі ±2 %; сәулелік шағылу коэффициенті – Bruker Vertex 70 FTIR спектрометрі арқылы, толқын ұзындығы 0,7-25 мкм диапазонында, дәлдігі ±1%; термиялық төзімділік уақыты – Carbolite Gero жоғары температуралы пешінде, дәлдігі ±1°C.

COMSOL Multiphysics модельдеу әдістемесі

Жылуөткізгіштік процестерін сандық модельдеу үшін COMSOL Multiphysics 6.1 бағдарламасының Heat Transfer in Solids модулі пайдаланылды. Бұл әдістеме күрделі физикалық және инженерлік процестердің жұмыс заңдылықтарын талдауға, түрлі жағдайларда жүйенің мінез-құлқын болжауға және тәжірибе жүргізуге кететін уақыт пен шығынды азайта отырып, зерттелетін нысанның виртуалды моделін құруға мүмкіндік береді.

Модельдеу 2D transient heat conduction түрінде, қалыңдығы 0,65-0,80 мм пластина (төменгі беті адамның терісімен жанасатын аймақ) геометриясында, өлшемі 1 мм үшбұрышты торда, 0,1 секундтық уақыт қадамымен және 300 секунд жалпы уақыт аралығында, конвергенция критерийі 10^{-6} , бастапқы температурасы 25 °C, сәулелік жылу ағыны 20, 35 және 50 кВт/м² сценарийлерінде, жоғарғы беті сәулелік және конвективтік жылу ағынының қосындысы (Heat Flux Boundary Condition), төменгі беті адамның терісіне тең тұрақты температура ($T_{\text{skin}} = 37$ °C) болып, материалдық қасиеттері (λ , c және ρ) зертханалық өлшеулерден алынған мәндермен беріліп орындалды.

Модель нәтижелері мен тәжірибелік деректер арасындағы салыстыру ±5 % шегінде сәйкестік көрсетті.

Жылуфизикалық өлшеу нәтижелері (2 кесте)

Кесте 2 – Материалдардың жылуфизикалық параметрлері (орташа мән ± стандартты қате)

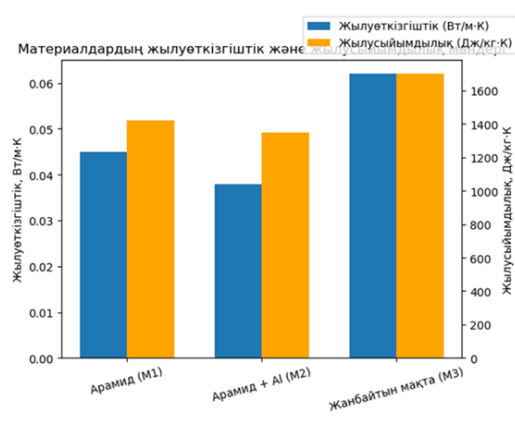
Материал	λ , Вт/(м·K)	c , Дж/(кг·K)	Сәулелік шағылу, %	Термиялық төзімділік уақыты (450 °C, с)
M1 – Арамид	0,045 ± 0,002	1420 ± 25	18 ± 1	270 ± 5
M2 – Арамид + Al	0,038 ± 0,002	1350 ± 20	82 ± 2	240 ± 4
M3 – Жанбайтын мақта	0,062 ± 0,003	1700 ± 30	12 ± 1	180 ± 5

Статистикалық өңдеу

Барлық деректер Microsoft Excel және OriginPro 2023 бағдарламаларында талданып, нәтижелер орташа мән ± стандартты қате түрінде беріліп, 95 % сенімділік интервалдары есептелді, материалдар арасындағы айырмашылық бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) арқылы, ал сауалнама нәтижелері мен термиялық төзімділік уақытының байланысы Пирсон корреляция коэффициентімен ($r = 0,78$; $p < 0,05$) бағаланды.

Зертханалық сынақтар нәтижесінде алынған жылуөткізгіштік (λ), меншікті жылусыйымдылық (c), сәулелік шағылу коэффициенті және термиялық төзімділік уақыты мәндері 2-кестеде көрсетілді. Деректер үш қайталау нәтижесінде алынған орташа мәндер және стандартты қателікпен берілді.

Талдау нәтижесінде арамид матасының жылуөткізгіштік коэффициенті ең төмен – 0,045 Вт/(м·K), бұл оның жылуды баяу өткізу қабілетінің жоғары екенін көрсетеді. Алюминий жабыны бар арамид сәулелік шағылу көрсеткіші бойынша (82%) басым болғанымен, қалыңдығының аздығынан ішкі қабаты жылдам қызады. Ал жанбайтын мақта меншікті жылусыйымдылығының (1700 Дж/(кг·K)) жоғары болуына қарамастан, жылуөткізгіштігінің салыстырмалы түрде үлкен мәні оның жоғары температураға ұзақ төтеп беруін шектейді. 1 – суретте материалдардың жылуөткізгіштік және жылусыйымдылық мәндерін салыстыру диаграммасы бейнеленген.

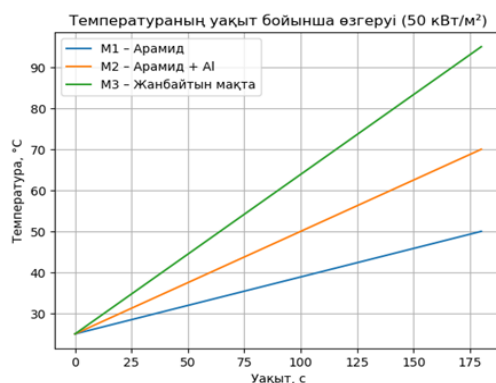


Сурет 1 – Материалдардың жылуөткізгіштік және жылуусыйымдылық мәндерін салыстыру диаграммасы

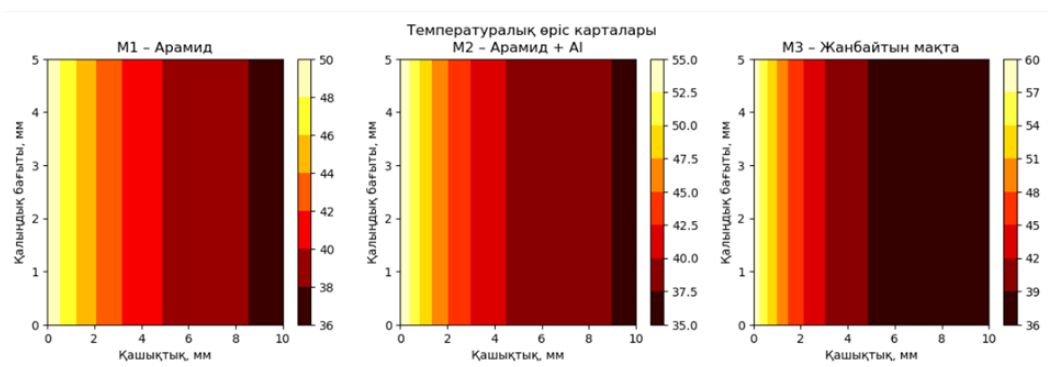
COMSOL Multiphysics модельдеу нәтижелері

Модельдеу кезінде үш түрлі материал үшін 20, 35 және 50 кВт/м² сәулелік жылу ағыны жағдайында ішкі қабаттың температурасының уақыт бойынша өзгерісі есептелді.

Негізгі нәтижелер бойынша, 50 кВт/м² сәулелік жылу ағыны жағдайында M1 (арамид) материалының ішкі температурасы 180 секундта 50°C-қа жетті, M2 (арамид + алюминий жабыны) – 120 секундта 55°C-қа, ал M3 (жанбайтын мақта) – 90 секундта 60 °C-қа жетті. Бұл көрсеткіштер материалдың жылуөткізгіштік қасиеттерінің ғана емес, құрылымдық ерекшеліктерінің де маңызды екенін дәлелдейді (Сурет 2, 3).



Сурет 2 – COMSOL моделінде температураның уақыт бойынша өзгерісін көрсететін график



Сурет 3 – 50 кВт/м² жылу ағынында температуралық өріс картасы (әр материал үшін жеке)

Сауалнама нәтижелері мен физикалық деректердің байланысы

Бұл зерттеуде сандық (quantitative) зерттеу әдісі қолданылды. Негізгі дерек жинау құралы ретінде онлайн сауалнама пайдаланылды. Сауалнама Google Forms платформасында дайындалып, өндірістік ортада жұмыс істейтін қызметкерлер арасында таратылды. Бұл әдіс респонденттердің пікірін жүйелі түрде жинап, талдауға және ЖҚҚ-ның шынайы тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді.

Сауалнама құрылымы

Сауалнама 15 сұрақтан тұрып, келесі мазмұндық блоктарды қамтыды: жалпы мәліметтер (жасы, еңбек өтілі, мамандық саласы); ЖҚҚ қолдану тәжірибесі (қолдану жиілігі, жағдайы, сенімділігі); ЖҚҚ тиімділігі туралы пікірлер (жылу сақтауы, ыңғайлылығы, қауіпсіздік деңгейі); сондай-ақ қиындықтар мен ұсыныстар (жабық сұрақтар арқылы).

Барлық сұрақтар жабық түрге негізделді, яғни респондент тек ұсынылған жауап нұсқаларын таңдады. Бұл нәтижелерді сандық талдауға мүмкіндік берді.

Респонденттер құрамы

Сауалнамаға барлығы 52 респондент қатысты. Олардың кәсіби салалары төмендегідей бөлінді (3 – кесте).

Кесте 3 – Кәсіби салалар бойынша қатысушылардың саны

Сала атауы	Қатысушылар саны
Өрт сөндіру қызметі	17
Металлургия	14
Мұнай және газ саласы	12
Химия өндірісі	9

Респонденттердің еңбек өтілі 1 жылдан 20 жылға дейінгі аралықта болды. Бұл мәліметтер зерттеу нәтижелерін түрлі тәжірибе деңгейі тұрғысынан салыстыруға мүмкіндік берді.

Деректерді өңдеу тәсілі: Жиналған мәліметтер Microsoft Excel бағдарламасына экспортталып, пайыздық үлесте, жиілікпен және диаграммалар арқылы өңделді. Әр жауап көрсеткіші жүйелі кестелерге енгізіліп, негізгі тенденциялар мен ортақ пікірлер анықталды [5].

Деректерді визуализациялау

Сауалнама нәтижелерін тереңірек талдау мақсатында мен Python бағдарламалау тілінде арнайы код жазып, алынған мәліметтерді визуализациялау жүргізілді. Бұл үшін matplotlib және pandas кітапханалары қолданылды. Әсіресе, жеке қорғаныс құралдарының (ЖҚҚ) тиімділігіне қатысты бірнеше критерийді (мысалы: жылуөткізгіштікке қанағаттану, ыңғайлылық, қорғаныс деңгейі, жұмысқа әсері және т.б.) бір уақытта салыстыруға мүмкіндік беретін радиалды диаграмма (radar chart) таңдалды.

Radar chart (4 – сурет) – бірнеше параметрді бір уақытта көрсетуге мүмкіндік беретін график, ол респонденттердің бағалауындағы негізгі трендтер мен айырмашылықтарды айқындап, ЖҚҚ-ның күшті және әлсіз жақтарын анықтады. Excel деректерінен әр критерийдің орташа мәндері есептеліп, осы негізде радиалды диаграмма салынды, нәтижелері келесі бөлімдегі талдаумен үйлестірілді.



Сурет 4 – «Radar Chat» ЖҚҚ тиімділігі бойынша радиалды талдау

Сауалнама арқылы алынған деректер зерттеу мақсатына сай ЖҚҚ-ның нақты қолдану тиімділігін бағалауға, олардың жылуфизикалық қасиеттерін пайдаланушылар тәжірибесімен байланыстыруға негіз болды. Бұл әдіс алынған эксперименттік нәтижелерге қосымша ретінде нақты әрі объективті ақпарат ұсынды [6].

Жалпы талқылау

Алынған нәтижелер арамид матасының экстремалды температура жағдайында ең тиімді қорғаныс деңгейін қамтамасыз ететінін дәлелдейді. Бұл материалдың төмен жылуөткізгіштік коэффициенті мен жоғары термиялық төзімділігі оның артықшылығын қамтамасыз етеді. Алюминий жабыны бар арамид сәулелік жылу әсерінен жақсы қорғаса да, ұзақ мерзімді экспозицияда ішкі қызудың алдын алу үшін қосымша оқшаулау қабаты қажет. Жанбайтын мақта экологиялық тұрғыдан тиімді, бірақ жылу оқшаулау қабілеті төмен болғандықтан оны тек орташа температура жағдайында қолдану орынды. Бұл деректер ЖҚҚ конструкцияларын жобалау кезінде материалдардың жылуфизикалық параметрлерін кешенді түрде ескерудің маңыздылығын айқындайды.

Болашақ зерттеулерге ұсыныс:

Жеке қорғаныс құралдарын (ЖҚҚ) бағалау кезінде тек жылуфизикалық қасиеттермен шектелмей, қатар эргономика мен адам ағзасының физиологиясына әсерін де кешенді қарастыру қажет. Болашақ зерттеулерде ұзақ уақыт бойы ЖҚҚ пайдалану кезінде жүрек соғысы, терлеу, қозғалыс еркіндігі және жайлылық параметрлерін өлшеу ұсынылады, бұл тиімді әрі қауіпсіз қорғаныс құралдарын жасауды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, пайдаланушылардың психологиялық жай-күйін ескере отырып, смарт-технологиялар – температура, ылғалдылық және зиянды газдарды бақылау сенсорлары бар киімдерді енгізу маңызды. Бұдан басқа, отандық материалдардың сапасы мен экологиялық қауіпсіздігін шетелдік аналогтармен салыстырып, бәсекеге қабілетті шешімдер ұсыну болашақ зерттеулердің өзекті бағыты болып табылады, бұл ЖҚҚ сапасын арттырып, өндірістік қауіпсіздікті және отандық өнімдердің нарықтағы орнын нығайтады.

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысы өндірістік ортада қолданылатын жеке қорғаныс құралдарының (ЖҚҚ) жылуфизикалық қасиеттерін кешенді талдауға арналды. Жоғары температура мен сәулелік жылу жағдайларында қызметкерлердің қауіпсіздігі қорғаныс құралдарының тиімділігімен қатар, оларды ғылыми негізделген стандарттарға сәйкес таңдаумен анықталатыны көрсетілді.

Зерттеу әдістері ретінде сауалнама жүргізу және жылуөткізгіштік пен сәулелік шағылысу параметрлерін модельдеу қолданылды. Нәтижелер бойынша арамид негізіндегі киімнің жылу өткізгіштігі төмен болып, тиімді қорғаныс беретіні анықталды. Алюминий жабыны бар арамид сәулелік жылуды тиімді шағылыстырғанымен, ішкі қабат қызуы жоғарылады. Жанбайтын мақта экологиялық тұрғыдан тиімді болғанымен, жоғары температура жағдайында қолдану мүмкіндігі шектеулі екені дәлелденді. Сауалнама нәтижелері мамандардың материалдардың қорғаныс деңгейін жоғары бағалайтынын, алайда ұзақ уақыт қолдану кезінде қолайлылықтың шектеулі болатынын көрсетті.

Зерттеу нәтижелері ЖҚҚ-ны жобалау және бағалау барысында жылуфизикалық қасиеттермен қатар эргономикалық көрсеткіштерді ескеру қажеттігін айқындады.

Әдебиеттер тізімі

1. Hoffmann F. Thermal Conductivity Measurement Techniques / F. Hoffmann // Springer. – 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40652-5>
2. Chen L. Protective Clothing Performance Evaluation / L. Chen, X. Wang, Z. Li // Journal of Safety Science. – 2020. – Т. 130. – P. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104888>.
3. ASTM International. ASTM F1939-15: Radiant Heat Resistance of Clothing. – 2015. – <https://www.astm.org/f1939-15.html>.
4. Multilayer Protective Fabrics Thermal Behavior / M. Gholamreza et al // Fibers and Polymers. – 2021. – Т. 22, № 4. – P. 888-897. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0021-7>.
5. ISO. ISO 13506: Protective Clothing against Heat and Flame – Thermal Manikin Test Method. – 2022. <https://www.iso.org/standard/79962.html>.
6. Қабдол А.М. Жоғары температура жағдайында жұмыс істейтін арнайы киімдердің материалдарын термографиялық бағалау / А.М. Қабдол, Т.Т. Байменов // Қазақстан Инженерлік Журналы. – 2022. – № 2(58). – Б. 27-34. <https://kzengineering.kz/2022/02/16/jqq-thermal-paper>.
7. Functional coatings for textiles: advancements in flame resistance, antimicrobial defense, and self-cleaning performance / J. Ghosh et al // Published by the Royal Society of Chemistry. – 2025. – № 15. – P. 10984–11022. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ra/d5ra01429h>.

8. Selective Emission Fabric for Indoor and Outdoor Passive Radiative Cooling in Personal Thermal Management / Haijiao Yu et al // Nano-Micro Lett. – 2025. – № 17. – P. 192. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-025-01713-4>.
9. Nanotechnology-empowered radiative cooling and warming textiles / K.M. Faridul Hasan et al // Cell Reports Physical. – 2024. – Science 5. – P. 102108. <https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/fulltext/S2666-3864%2824%2900386-2>.
10. Temperature-adaptive dual-modal photonic textiles for thermal management / Kaixuan Zhu et al // Science Advances. – 2024. – Vol. 10, Issue 41. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adr2062>.
11. High-performance transparent polysulfone nanocomposites enhanced with masterbatch-based aramid nanofibers for improved toughness and flame retardancy / Seul-A Park et al // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2025. – № 307, Vol. 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42114-025-01392-0>

References

1. Hoffmann F. Thermal Conductivity Measurement Techniques / F. Hoffmann // Springer. – 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40652-5>. (In English).
2. Chen L. Protective Clothing Performance Evaluation / L. Chen, X. Wang, Z. Li // Journal of Safety Science. – 2020. – T. 130. – R. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104888>. (In English).
3. ASTM International. ASTM F1939-15: Radiant Heat Resistance of Clothing. – 2015. – <https://www.astm.org/f1939-15.html>. (In English).
4. Multilayer Protective Fabrics Thermal Behavior / M. Gholamreza et al // Fibers and Polymers. – 2021. – T. 22, № 4. – R. 888-897. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0021-7>. (In English).
5. ISO. ISO 13506: Protective Clothing against Heat and Flame – Thermal Manikin Test Method. – 2022. <https://www.iso.org/standard/79962.html>. (In English).
6. Қабдол А.М. Жоғары температура жағдайында зһымс истеitin арнайы киімдердің материалдарын термографиялық бағалау / А.М. Қабдол, Т.Т. Байменов // Қазақстан Инженерлік Журналы. – 2022. – № 2(58). – Б. 27-34. <https://kzengineering.kz/2022/02/16/jqq-thermal-paper>. (In Kazakh).
7. Functional coatings for textiles: advancements in flame resistance, antimicrobial defense, and self-cleaning performance / J. Ghosh et al // Published by the Royal Society of Chemistry. – 2025. – № 15. – R. 10984-11022. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ra/d5ra01429h>. (In English).
8. Selective Emission Fabric for Indoor and Outdoor Passive Radiative Cooling in Personal Thermal Management / Haijiao Yu et al // Nano-Micro Lett. – 2025. – № 17. – R. 192. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-025-01713-4>. (In English).
9. Nanotechnology-empowered radiative cooling and warming textiles / K.M. Faridul Hasan et al // Cell Reports Physical. – 2024. – Science 5. – R. 102108. <https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/fulltext/S2666-3864%2824%2900386-2>. (In English).
10. Temperature-adaptive dual-modal photonic textiles for thermal management / Kaixuan Zhu et al // Science Advances. – 2024. – Vol. 10, Issue 41. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adr2062>. (In English).
11. High-performance transparent polysulfone nanocomposites enhanced with masterbatch-based aramid nanofibers for improved toughness and flame retardancy / Seul-A Park et al // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2025. – № 307, Vol. 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42114-025-01392-0>. (In English).

N.N. Kusbergenova*, V. Mukamedenkyzy

¹Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue, 71
*e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru

THERMOPHYSICAL ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT IN CONDITIONS OF HIGH TEMPERATURE AND THERMAL RADIATION

This article provides a comprehensive analysis of the thermophysical properties of personal protective equipment (PPE) used in industrial and emergency environments. Protecting the human body from thermal damage under high temperatures and radiant heat is one of the key objectives addressed. The study

evaluates three types of materials in terms of thermal conductivity, heat capacity, thermal resistance, and infrared reflectivity using both laboratory tests and numerical simulations in COMSOL Multiphysics. Additionally, a survey was conducted among workers operating in hazardous environments to assess the real-world effectiveness of PPE. The data collected enabled a scientifically grounded evaluation of the suitability of PPE materials for specific working conditions. The results serve as a basis for improving PPE design, developing next-generation protective clothing, and enhancing industrial safety standards.

This research is relevant to sectors such as chemical production, metallurgy, oil and gas, and firefighting. Future research should include a comprehensive assessment of ergonomic features, physiological impacts on users, and the integration potential of smart sensors. Such scientifically informed approaches will not only improve workplace safety but also contribute to the overall quality of life and health protection of workers facing thermal risks.

Key words: *personal protective equipment, thermal conductivity, thermal resistance, radiant reflection, extreme environment.*

Н.Н. Кусбергенова*, В. Мукамеденқызы*

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, проспект аль-Фараби, 71
*e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье представлен комплексный анализ теплофизических свойств средств индивидуальной защиты (СИЗ), используемых в производственной и чрезвычайной среде. Одной из основных задач является защита человеческого организма от термического повреждения при воздействии высоких температур и теплового излучения. В исследовании оценивались теплопроводность, теплоёмкость, термостойкость и способность отражать инфракрасное излучение для трёх типов материалов на основе лабораторных испытаний и численного моделирования в COMSOL Multiphysics. Также был проведён опрос среди работников, занятых в опасных условиях, с целью изучения реальной эффективности СИЗ. Полученные данные позволяют научно обоснованно оценить пригодность защитных материалов к конкретным условиям эксплуатации. Результаты исследования могут быть использованы для усовершенствования конструкции СИЗ, разработки новых поколений защитной одежды и повышения уровня производственной безопасности.

Проведённый анализ актуален для отраслей, связанных с химическим производством, металлургией, нефтегазовой сферой и пожарной безопасностью. В дальнейших исследованиях рекомендуется комплексно оценить эргономические свойства СИЗ, их влияние на физиологическое состояние человека, а также возможности интеграции смарт-датчиков. Подобные подходы не только повысят безопасность труда, но и улучшат общее качество жизни работников, подвергающихся тепловым рискам на производстве.

Ключевые слова: *средства индивидуальной защиты, теплопроводность, термическая устойчивость, лучистое отражение, экстремальная среда.*

Авторлар туралы мәліметтер

Наргиз Нұрланқызы Кусбергенова – Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасының магистранты; e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru.

Венера Мукамеденқызы – доцент, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: mukameden@inbox.ru.

Сведения об авторах

Наргиз Нұрланқызы Кусбергенова* – магистрант кафедры теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет; e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru.

Венера Мукамеденқызы – доцент, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: mukameden@inbox.ru.

Information about the authors

Nargiz Nurlankyzy Kusbergenova* – Master's student of the department of Thermophysics and Technical Physics, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology; e-mail: nargiz.kusbergenova@mail.ru.

Venera Mukamedenkyzy – associate professor, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Department of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: mukameden@inbox.ru.

Редакцияға енуі 11.07.2025

Өңдеуден кейін түсуі 11.08.2025

Жариялауға қабылданды 20.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-57](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-57)



IRSTI: 44.31.35

L.G. Sulyubayeva¹, A. Maulet^{2,3}, B.A. Alibekova^{1*}, A.E. Alibekov¹

¹Research Center Surface Engineering and Tribology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk 070002, Kazakhstan

²PlasmaScience LLP,

Ust-Kamenogorsk 070018, Kazakhstan

³Research School of Physical and Chemical Sciences,
071412, Kazakhstan, Semey, Shakarim University,

*e-mail: balymalibekova304@gmail.com

STUDY OF THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MECHANICAL-TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS AFTER PLASMA ELECTROLYTIC CARBURIZING

Abstract: The paper presents a study of the influence of plasma electrolytic carburizing (PEC) regimes on the structural, phase, microhardness, and tribological characteristics of structural steels. Plasma electrolytic carburizing was carried out in an aqueous solution containing 10% soda ash (Na_2CO_3) and 20% urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), at a temperature of about 950°C and a voltage of 300V. Two cooling regimes were implemented after PEC for steel 20: natural cooling in the electrolyte and active nozzle cooling with electrolyte supply to the treatment zone, and for 30CrMnSiA steel only natural cooling in the electrolyte. The morphology of the structure and phase composition were studied using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy, and optical microscopy. The results showed that the microstructure of steels after PEC morphologically has a zonal structure with a main martensitic phase with Fe_3C and Fe_7C_3 carbide inclusions. The microhardness profile was determined from the cross-section of the modified layer using a FISCHERSCOPE HM2000 device. Tribological tests were performed using the ball on disc method on a TRB³ machine under dry friction conditions at a normal load of 10 N and a sliding speed of 0.05 m/s. It was found that active cooling promotes the formation of a harder martensitic structure with maximum microhardness values of up to 430 HV for steel 20 and up to 720 HV for 30CrMnSiA steel, while their initial microhardness values were 170 HV and ~250 HV, respectively. It was also found that the coefficient of friction for these steels decreases by an average of 25–30% compared to the initial samples. The results confirm the effectiveness of PEC in forming hardened layers with increased microhardness and improved tribological parameters and demonstrate the potential of the method for use in the production of parts operating under high mechanical and frictional loads.

Key words: plasma electrolytic carburizing, chemical-thermal treatment, X-ray structural analysis, zonal structure, structural steel, carbides, microhardness, friction coefficient.

Introduction

In the context of modern technological developments and increasing demands on the operational characteristics of machines and mechanisms, particular attention is paid to improving the properties of parts made from structural steels [1-2]. This is especially relevant for carbon and low-carbon steels, which are widely used in mechanical engineering due to their good mechanical properties, machinability, and availability. However, in their initial state, such steels do not always have sufficient hardness and wear resistance, which limits their service life when operating under conditions of intense friction and loads. Along with well-known technologies, one of the promising