

**COMPUTER SCIENCE
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ**

ӘОЖ 51-76: 004.9
ҒТАХР 28.23.24

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2026-23-1-10-21>

¹*Махамбетов Қ.И.,

докторант, ORCID ID: 0009-0000-6047-8629,

*e-mail: 1998kaldybek@gmail.com

¹Бельгибаев Б.А.,

доцент, ORCID ID: 0000-0002-6857-3775,

e-mail: bbelgybaev@list.ru

²Куницина Н.,

профессор, ORCID ID: 0000-0002-0980-0958,

e-mail: Nadezda.Kunicina@rtu.lv

¹Амирханова Г.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-3933-5476,

e-mail: gulshat.aa@gmail.com

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Riga Technical University, Рига қ., Латвия

**ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕРДІ ҚҰРУ МАҚСАТЫНДА
ТАМАҚ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ
ПРОЦЕСТЕРДІ БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУ**

Аңдатпа

Бұл мақалада пісіру камерасындағы (электрлік пеш-шкаф) термодинамикалық процестерді бақылау және цифрлық модельдеуге негізделген тамақ өнеркәсібі үшін цифрлық егіздерді құру тәсілі талқыланады. Тәжірибе нысаны ретінде нан өнімдерін термиялық өңдеуге арналған кәсіби электр пеш-шкаф ASTAR пайдаланылды. Мониторинг жүйесі ретінде температуралық өрістерді бақылау үшін VICTOR 304F инфрақызыл пирометрі, UNI-T UTi120S тепловизоры және MGrpof пеш кабинасының ішіне енгізілген аналогтық термометрі пайдаланылды, бұл жұмыс камерасының ішіндегі сенімді температура деректерін алуға мүмкіндік берді. Аталған құрылғылар негізінде өнім дайын болғанға дейінгі уақыт аралығында периодты түрде температуралық деректерді жинақтап отырдық. Жиналған деректер негізінде температуралық өрістер картасы құрылды. MATLAB PDE Toolbox жүйесінде 2D өлшемде жүзеге асырылған және Дирихле мен Нейман шарттарын ескере отырып құрылған жылу берудің математикалық моделі мен тәжірибе нәтижелері салыстыру арқылы тексерілді. Алынған нәтижелер пісіру камерасындағы температура градиенттері мен жылу ағындарын дәл модельдеуге ғана емес, сонымен қатар нақты уақыт режимінде жүйенің әрекетін болжауға қабілетті цифрлық егізді құрудың негізін салуға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл тамақ өнер-

кәсібінде энергия тиімділігін арттыру, сапаны бақылауды автоматтандыру және технологиялық режимдерді оңтайландыру үшін қолданылуы мүмкін. Бұл зерттеу жұмыстары цифрлық егіз құру барысында термодинамикалық процесстерді моделдеу және жобалау кезінде пайда болатын мәселелерді шешуге өз үлесін қосады.

Тірек сөздер: цифрлық егіздер, жылу беру, MATLAB PDE Toolbox, FEM, жылу теңдеуі, шекаралық шарттар, цифрлық модельдеу, температуралық өрісті талдау.

Кіріспе

Цифрлық технологиялар мен өндірістік автоматтандырудың заманауи дамуы технологиялық үдерістерді басқару мен оңтайландыру барысында жаңа тәсілдер мен әдістерді қолдануды талап етеді. Осындай озық тұжырымдамалардың бірі, Industry 4.0 концепциясының негізі болған цифрлық егіздерді (Digital Twins) құру болады. Digital Twins – нақты физикалық нысандардың виртуалды көшірмелері. Олар математикалық модельдер мен мониторинг деректері негізінде жүйелердің нақты уақыттағы күйін, мінез-құлқын және болашақтағы эволюциясын, өзгерісін бейнелеуге, болып жатқан процесстерге анализ жасау арқылы болашақтағы болатын процесстерді болжауға қабілетті [1]. Тамақ өнеркәсібінде, әсіресе жылу процесстері, термодинамикалық өзгерістер шешуші рөл атқаратын жағдайларда, цифрлық егіздерді енгізу температураны дәл реттеуге, энергия тиімділігін арттыруға және өнім сапасын бақылауды автоматтандыру үшін жаңа мүмкіндіктер ашады [2]. Аталған тәсілдің өзектілігі нан пісіру өндірісі сегментінде ерекше байқалады, мұнда температура мен жылу алмасу өнімнің соңғы қасиеттеріне – кеуектілік, ылғалдылық, қабықша түзілуі, дәміне – тікелей әсер етеді. Нан пісіруге арналған жабдықтар кең таралғанына қарамастан, пештердің ішіндегі жылу процесстерін ғылыми негізделген мониторинг және модельдеу [3], әсіресе оларды цифрлық егіздерге бейімдеу тұрғысынан, әлі де жеткіліксіз зерттелген мәселелер қатарында.

Тамақ өнеркәсібіндегі термодинамикалық процесстерді талдау және оңтайландырудың заманауи әдістері есептеу құралдары мен сандық модельдеу жүйелеріне көбірек сүйенеді. MATLAB ортасы және оның құрамындағы PDE Toolbox модулі жылу беру мәселелерін және көп компонентті физикалық процесстерді шешуге кең мүмкіндіктер ұсынады. Das S. [4] атап өткендей, MATLAB жүйесінде ақырғы элементтерді талдауды пайдалану жоғары есептеу дәлдігін және модель параметрлерін конфигурациялаудағы икемділікті қамтамасыз етеді, бұл әдісті әсіресе инженерлік және зерттеу қолданбалары үшін тиімді етеді. Chalilov H.M. пен Muhtorov S. [5] PDE Toolbox-ты пайдалану физикалық сипаттамалардың сенімді қайталануын қамтамасыз ете отырып, әртүрлі шекаралық жағдайлары бар жүйелерде жылу алмасудың компьютерлік модельдерін құруға мүмкіндік беретінін атап көрсетеді. Сонымен қатар, Attaway D.C. [6] MATLAB-тың тек бағдарламалау құралы емес, сонымен қатар инженерлік қолданбалардағы физикалық процесстерді жан-жақты талдау құралы ретіндегі маңыздылығын атап өтеді.

Соңғы жылдары азық-түлік өнімдерін өңдеу процесстеріне Internet of Things (IoT) технологиялары мен цифрлық мониторинг жүйелерін біріктіруге ерекше көңіл бөлінуде. Mishra N. және т.б. [7] өндіріс сапасы мен энергия тиімділігін арттыру үшін сандық шешімдердің әлеуетін көрсете отырып, кептіру процесстерін бақылау және басқару үшін IoT көмегімен интеллектуалды жүйені әзірледі. Мұндай тәсілдер цифрлық егіздерді – процесс параметрлерін автономды түрде талдауға және оңтайландыруға қабілетті нақты технологиялық жүйелердің виртуалды көшірмелерін енгізу үшін негіз болады.

Цифрлық егіздер тұжырымдамасы тамақ өнеркәсібінде де белсенді дамып келеді. Kannarinn M. және т.б. [8] физикалық үлгіге негізделген цифрлық егіздер редуцирленетін модель әдістерін пайдалана отырып, өндірістік циклды бұзбай, термиялық өңдеу процесстерін тиімді модельдеуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Krupitzer C. және т.б. [9] деректерді талдау мен тағамдық инженерия әдістерін біріктіретін цифрлық егіздің жүйелі үлгісін ұсынды, ал Purlis E. [10] тұрақты және интеллектуалды өндіріс үшін олардың маңыздылығын атап

өтіп, цифрлық егіздерді тамақ өндеуге енгізудің негізгі принциптерін қорытындылады. Бұл зерттеулер MATLAB PDE Toolbox көмегімен жылу режимдерін модельдеу және оңтайландыруды қоса алғанда, термодинамикалық процестердің цифрлық модельдерін одан әрі дамытудың ғылыми және практикалық негізін құрайды.

Бұл эксперименталды зерттеу жұмысының мақсаты – шынайы тамақ өнеркәсібінде қолданылатын қондырғыларды (электрлік пеш-шкафты) және арнайы өлшеу құралдарын (тепловизорды) қолдана отырып, өндірістік термодинамикалық өрісті бақылау және алынған температуралық картаны бұл зерттеу жұмысының алдында жасалған «Тамақ өнеркәсібінде цифрлық егіздерді құру үшін MATLAB PDE TOOLBOX көмегімен термодинамикалық процестерді модельдеу» атты зерттеу жұмысының нәтижесімен [11] салыстыру мақсатында деректер қорын жинау. Яғни бұл эксперименттік жұмыс жасалғанға дейін жылу берудің негізгі механизмдері зерттеліп, математикалық моделі негізінде MATLAB PDE Toolbox көмегімен цифрлық модельдеу жүргізілген болатын. Сол математикалық модельдің, MATLAB PDE Toolbox құралындағы моделдеудің дұрыстығын тексеру мақсатында осы эксперименттік зерттеу жұмысы жүргізілді. Бұл зерттеу жұмысынан жинақталған деректер қорымен салыстыру және анализ жүргізу үшін бөлек арнайы зерттеу жүргізілетін болады.

Зерттеу шеңберінде келесі қадамдар жүзеге асырылды:

- ◆ Нан өнімдерін өндіруде қолданылатын ASTAR маркалы электрлік шкаф-пеш зерттеу нысаны ретінде таңдалды [12];

- ◆ UTi120S тепловизоры [13], VICTOR 304F пирометрі және MGprof аналогтық термометрі сияқты контактілі және бейконтактілі аспаптар көмегімен термомониторинг жүйесі ұйымдастырылды;

- ◆ модельдік және эксперименттік температуралық деректердің салыстыруы жүргізілді;
- ◆ жабық кеңістікте инфрақызыл бақылаудың ерекшеліктері мен қателіктері анықталды.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы – температураның эксперименттік өлшемдерін термодинамикалық үдерістердің егжей-тегжейлі модельдеуімен біріктіру арқылы бейімделетін цифрлық егізді жасау. Мұндай тәсіл түрлі режимдерде температураның таралуын болжауға, өнім геометриясына байланысты жылыту үдерісін бейімдеуге және пісірудің оңтайлы шарттарын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [14].

Зерттеудің практикалық маңыздылығы – әзірленген модельді энергия тұтынуды оңтайландыру, өнім ақауларын болдырмау, өндірістегі қалдықтарды азайту, модель негізінде термодинамикалық процесстердің таралуын бастапқы параметрлерді білу арқылы ғана болжау және цифрлық егіздерге негізделген интеллектуальды басқару жүйелерін енгізу үшін қолдануға болатындығымен айқындалады [15].

Осылайша, ұсынылған жұмыс пісіру камераларының термодинамикасын модельдеу бойынша бұрынғы зерттеулердің логикалық жалғасы бола отырып, мониторинг құралдарын, эксперименттік валидацияны қамтып, функционалдық цифрлық егізге көшу арқылы жаңа деңгейге көтерілуді мақсат қылып ұстанады [16].

Материалдар мен әдістер

Қазіргі заманғы тамақ өнеркәсібінде, әсіресе нан пісіру өндірісінде, жылулық режимдерді дәл бақылау дайын өнімнің сапасы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін аса маңызды. Жеткіліксіз қыздыру, температураның біркелкі таралмауы немесе шамадан тыс қызу технологиялық ақауларға, дәмдік қасиеттердің жоғалуына немесе санитарлық нормалардың бұзылуына алып келуі мүмкін. Сондықтан, пештерге арналған цифрлық егіздерді әзірлеу мен енгізу жылу камерасының ішіндегі жылу процестерін міндетті түрде эксперименттік және есептік сипаттауды қажет етеді [17].

Бұл жұмыс кезеңінің мақсаты – пісіру камерасының ішіндегі температураның таралуын эксперименттік зерттеу және кейіннен жылу өткізгіштік теңдеулеріне негізделген термодинамикалық модельмен салыстыруға деректер жинау. Модельдің дұрыстығын тексеру

үшін кеңістіктегі және өнім дайын болғанға дейінгі уақыт аралығындағы әртүрлі нүктелерде температураның таралуы жайлы өлшеулер жүргізілді. Зерттеуге жататын негізгі жылулық процестері мен жылу берудің негізгі механизмдері:

Кондукция (жылу өткізгіштік): молекулалардың, атомдардың немесе электрондардың өзара әрекеттесуіне байланысты жылу энергиясын зат арқылы беру [18]. Өткізгіштік қатты денелерде, сұйықтарда және газдарда болады, бірақ осы мақаланың контекстінде қатты материалдар арқылы жылу алмасуға баса назар аударылады. Яғни пеш-шкафтың астыңғы бөлігінде орналасқан қыздыру элементтері арқылы металл өнімдерінен жасалған ыдыс арқылы тамақ өніміне жылудың берілу механизміне назар аударылады. Өткізгіштік модельдеу цифрлық егіздерді құруға тікелей әсер ететін пештер немесе жылу алмастырғыштар сияқты өндірістік активтер ішінде температураның қалай бөлінетіні туралы түсінік береді.

Конвекция: жылу энергиясын сұйық немесе газ ағындары арқылы беру. Тамақ өнеркәсібінің өндірістік процестерінде конвекция, мысалы, өнімдер ауа, сұйықтық ағынымен қыздырылған немесе салқындаған кезде пайда болуы мүмкін. Бұл мақалада конвекция пеш-шкаф ішіндегі жылу таралуы ішкі фактор ретінде қарастырылады [19]. Мысалы, бұл зерттеу жұмысында ұсынылған пеш-шкаф ішінде 2 қыздырғыш элемент болады: астыңғы және үстіңгі қыздыру элементтері. Астыңғы қыздыру элементтері кондукция механизмі бойынша жұмыс істесе, үстіңгі қыздыру элементтері конвекция принципі бойынша, пеш камерасының ішіндегі ыстық ауаның таралуы бойынша жұмыс істейді.

Жылу өткізгіштік теңдеуі. Жылулық процестерді модельдеудің негізгі математикалық құралы жылу теңдеуі – температураның $T(x,y,z,t)$ кеңістікте және уақытта таралуын сипаттайтын ішінара дифференциалдық теңдеу болады [20]. Жалпы, былай жазылады:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

мұндағы, (1-формула): ρ – материалдың тығыздығы, кг/м³; c – меншікті жылу сыйымдылығы, Дж/(кг·°C); T – температура, К; k – жылу өткізгіштік коэффициенті, Вт/(м·°C); Q – жылу көздерінің қарқындылығы, Вт/м³; t – уақыт, с; $\nabla \cdot (k \nabla T)$ – жылу ағынының дивергенциясы. Теңдеу өткізгіштік пен ішкі жылу көздерінің температураның өзгеруіне қалай әсер ететінін сипаттайды. Бұл жағдайда жылу алмасуды сипаттайтын шекаралық шарттар арқылы конвекцияның әсері ескеріледі [20].

Тәжірибелік зерттеуді жүргізу үшін тамақ өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын объект – бақыланатын температура режимінде консистенциялық күйдегі жартылай дайын өнімді термиялық өндеуге арналған ASTAR электр пеш-шкафы таңдалды. Бұл зерттеу ASTAR өнеркәсіптік пешінің пісіру камерасының ішіндегі температура режимін эксперименттік бағалауды қамтыды. Негізгі мақсат қашықтан және контактілі деректерді жинау әдістерін қамтамасыз ететін өлшеу құрылғыларының бірнеше түрін пайдаланып камераның әртүрлі аймақтарында температураның таралуын тіркеу болды. Бұл жылу берудің математикалық моделін тексеру және реттеу үшін қажетті ақпаратты жинауға кешенді көзқарасқа мүмкіндік берді. Тәжірибе нақты өндірістік жағдайларға жақын жағдайларда стандартты қыздыру параметрлерін сақтай отырып және зерттелетін өнімді камераның ішіне орналастыра отырып жүргізілді.

Жоғарғы және төменгі қыздыру элементтері арасындағы жылу градиентін, сондай-ақ камераның ортасына орналастырылған консистенциялық күйдегі жартылай дайын өнім бөлігін қыздыру жылдамдығын анықтауға ерекше назар аударылды. Температура өрісінің ең сенімді суретін алу үшін қашықтықтан және пеш-шкаф камерасының ішінен өлшеу әдістері қолданылды. Құрылғылардың үш түрі қолданылды: инфрақызыл тепловизор, пирометр және механикалық термометр, олардың әрқайсысы техникалық шектеулері мен артықшылықтарын ескере отырып, белгілі бір жағдайларда қолданылды.

Эксперимент стандартты өндірістік циклды имитациялайтын пештің табиғи жұмыс жағдайында жүргізілді. Өлшеулерді бастамас бұрын бастапқы параметрлер жазылды –

пеш-шкафтың үстіңгі және астыңғы қыздыру элементтерінің қосқан кездегі бастапқы температурасы, камера ішіндегі бастапқы температура, консистенциялық күйдегі жартылай дайын өнімнің температурасы және қыздыру элементінің қуаты. Жылулық режимінің тұрақтылығы мен қайталану мүмкіндігін бағалау үшін камераның әртүрлі аймақтарында бірнеше өлшемдер жүргізілді. Алынған деректер пісіру камерасының цифрлық егізін құруға және өндірістегі жылу процестерін оңтайландыруға бағытталған зерттеу жұмыстарына негіз болды. Зерттеуде қолданылған материалдар, құрылғылар және әдістер төменде келтірілген.



Сурет 1 – ASTAR электр пеш-шкафы

Зерттелетін объектінің ASTAR пеш шкафының сипаттамасы. Зерттеудің негізгі нысаны нан және кондитерлік өнімдерді термиялық өңдеуге арналған, конвекциялық және кондукциялық ASTAR электр пеш-шкафы болды. Пештің дизайны мыналарды қамтиды: жылу оқшаулағышы бар герметикалық жұмыс камерасы, екі кіріктірілген қыздыру элементтері – біркелкі жылытуды қамтамасыз ететін төменгі және жоғарғы қыздыру элементтері; режимдер үшін механикалық немесе электронды басқару панелі, ыстыққа төзімді шыны терезесі және ішкі жарықтандыруы бар.

Типтік техникалық сипаттамалар: қуаты: 6,6 кВт, қуат кернеуі: 220В / 380В, 50 Гц, температура диапазоны: 0°C-тан +400°C-қа дейін, басқару: механикалық (аналогтық температура мен уақытты басқару), өлшемдері: 1250×850×600 мм, салмағы: 78 кг.



Сурет 2 – Өлшеу құралдары

Пісіру камерасының ішіндегі температура сипаттамаларын бақылау үшін нәтижелердің дәлдігі мен сенімділігін арттыру үшін өлшеу құралдарының бірнеше түрі қолданылды. Келесідей құралдар пайдаланылды: VICTOR 304F инфрақызыл пирометр – қауіпсіз қашықтықтан нүктелік температураны өлшеуге арналған; SMART SENSOR AR320 инфрақызыл термометр – қолдану сипаты пирометрмен ұқсас; UNI-T UT120S тепловизоры – өнімнің бетінде және пештің қабырғаларында температураның таралуын визуализациялауға арналған; +50°C-тан +300°C-қа дейінгі өлшеу диапазоны бар MGrprof кіріктірілген термометр – пісіру аймағындағы температура туралы тікелей деректерді алу үшін камераның ішіне орналастырылған.

Инфрақызыл құрылғыларды пайдалану кезінде сәулеленудің пештің алдыңғы шыны қабырғалары арқылы өтпейтіні анықталды. Осыған байланысты өлшемдерді қабылдау үшін пештің есігін периодты түрде ашу қажет болды, бұл да жылу процестерінің динамикасына әсер ететін фактор ретінде тіркелді. Бірнеше құрылғыларды біріктіру температура градиенттерін нақтылауға және MATLAB PDE Toolbox-та жасалған математикалық модельді тексеруге мүмкіндік берді [21].

UTi120S тепловизоры – инфрақызыл диапазондағы жылу сәулеленуін визуализациялауға арналған портативті құрылғы. Ол заттың бетіндегі температураның таралуын термограмма түрінде көрсетеді. Бұл тәжірибеде тепловизор пісіру камерасының температуралық аймақтарын бағалау үшін пайдаланылды. Құрылғының негізгі сипаттамалары: температураны өлшеу диапазоны: -20°C -тан $+400^{\circ}\text{C}$ -қа дейін, IR матрицасының ажыратымдылығы: 120×90 пиксель, өлшеу дәлдігі: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ немесе $\pm 2\%$, жауап беру уақыты: < 500 мс, көрінетін кескінге IR кескінін қою мүмкіндігі.

Құрылғының шектеуі пештің алдыңғы шыны панелі арқылы өлшеудің мүмкін еместігі болды – инфрақызыл сәулелер шағылысып, қорғалған.

VICTOR 304F пирометрі есік ашық тұрған камераның температурасын нүктелік өлшеу үшін пайдаланылды. Пирометрдің техникалық сипаттамалары: өлшеу диапазоны: -50°C -тан $+600^{\circ}\text{C}$ -қа дейін, оптикалық ажыратымдылық: 12:1; жауап беру уақыты: < 1 сек, қате: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Өлшеу жылдамдығы жоғары және ықшам өлшемі арқасында пирометр камераның ішіндегі температура градиенттерін, әсіресе есіктің қысқа мерзімді саңылаулары кезінде жылдам тексеру үшін пайдалы болды.



Сурет – VICTOR 304F пирометрімен бастапқы температураны өлшеу суреттері

3.1-сурет. Консистенциялық күйдегі жартылай дайын өнім бастапқы температурасын өлшеу ($20,1^{\circ}\text{C}$), өнімді камераға салмас бұрын температурасын жазады. Бұл цифрлық жылу алмасу үлгісінде бастапқы шекаралық шарттарды орнатуға мүмкіндік береді.

3.2-сурет. Камера ішіндегі астыңғы қыздыру элементтерінің температурасын өлшеу (248°C). Жазылған температура элементтің көрсетілген қыздыруын растайды.

3.3-сурет. Жоғарғы қыздыру элементінің температурасын өлшеу (296°C). Жылуды өлшеу камераның жоғарғы бөлігінде орналасқан қыздыру элементінің аймағында жүзеге асырылады. Бұл мән температура градиентін жоғарыдан төменге модельдеу үшін өте маңызды.

3.4-сурет. Камераның артқы қабырғасының, әрі пеш-шкаф ішіндегі температурасын өлшеу ($129,8^{\circ}\text{C}$). Өлшеу конвективті ауа ағындарымен жылу алмасуға қатысатын ішкі камераның артқы бөлігін қыздыру деңгейін көрсетеді.

MGprof термометрі. Температураны тікелей пісіру камерасының ішіндегі консистенциялық өнім бөлігінің қасында бақылау үшін аналогтық MGprof термометрі пайдаланылды. Бұл құрылғы пештерде пайдалану үшін арнайы жасалған және қуат көзіне қосылмай-ақ тұрақты деректерді қамтамасыз ете отырып, жоғары температураға төтеп бере алады. Негізгі параметрлер: өлшеу диапазоны: $+50^{\circ}\text{C}$ -тан $+300^{\circ}\text{C}$ -қа дейін; механикалық дизайн – қызып кетуге төзімді; дәлдік класы: $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$; орнату: пештің ішіндегі торға немесе науаға. Құрылғының артықшылығы – камераның ішіндегі температураны оны ашудың қажетінсіз үздіксіз бақылау мүмкіндігі, бұл пирометр мен тепловизордың шектеулерін өтеуге мүмкіндік берді.

Осылайша бастапқы температураларды өлшеп алғаннан бастап өнім толықтай дайын болғанға дейін (жобамен 40 минут шамасында) температура өлшемдері периодты түрде бақыланып, жазылып алынып отырды. Сонымен қатар бақылау барысында кейбір ақаулар орын алған болатын, ол жайлы және оны қалай болдырмау туралы қорытынды бөлімінде толыққанды сипаттайтын боламыз. Келесі бөлімде бақылау барысында алынған нәтижелерді сипаттайтын боламыз.

Нәтижелер мен талқылау

Тәжірибе кезеңінде сынақ үлгілерін пісіру кезінде ASTAR зертханалық пешінің ішіндегі жылу режимі туралы мәліметтер алынды. Өлшеу әр түрлі өлшеуіш құрылғыларды, соның ішінде пирометрді, тепловизорды және MGprof аналогтық термометрін қолдану арқылы жүргізілді, бұл температураның таралуының неғұрлым дәл және жан-жақты суретін алуға мүмкіндік берді. Температуралар пештің ішінде де, тікелей қыздыру элементтерінде де жазылды. Толық пісіру циклі кезінде белгіленген уақыт интервалдарына ерекше назар аударылды, ол шамамен 40 минутты құрады.



Сурет 4 – UTi120S тепловизорымен және MGprof термометрімен температураның таралуын зерттеу

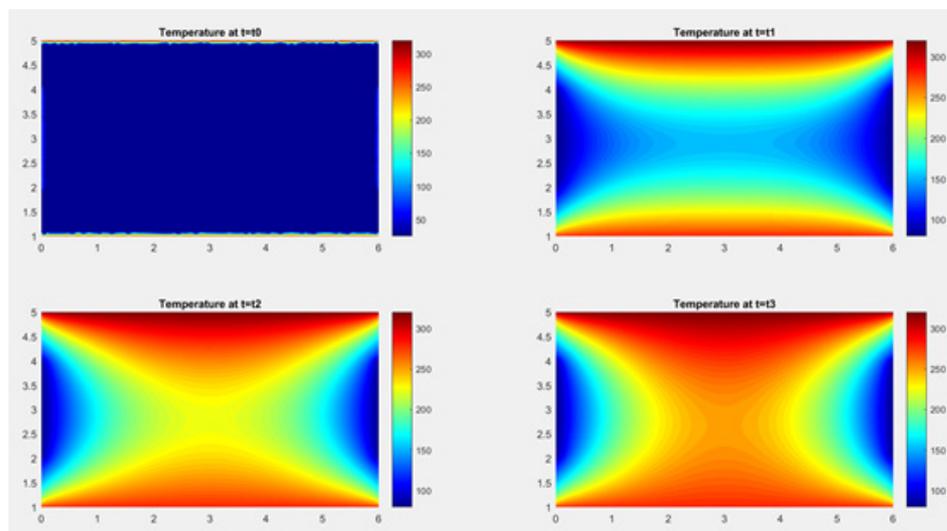
Жылытудың бастапқы кезеңдерінде камераның ішіндегі температура бірте-бірте көтеріліп, ең жоғары мәндерге шамамен 10–15 минутта жетті, содан кейін ол шамамен $165-170^{\circ}\text{C}$

тұрақты температура диапазонында болды. Сонымен қатар, жоғарғы қыздыру элементінің температурасы 358–360°C-қа жетті, ал төменгі элемент 248–251°C диапазонында болды. Жазылған термиялық кескіндер қыздырғыштар мен консистенциялық өнімі бар пішіндер орнатылған жұмыс аймағының арасында айқын температура градиентінің болуын көрсетті. Температураның тұрақтылығына жеткеннен кейін процестің соңына қарай температураның біртіндеп төмендеуі байқалды, бұл пештің термиялық инерциясы мен термостаттау сипаттамаларына сәйкес келеді. Алынған деректер жылу беру моделін тексеру үшін де, кейіннен төмендегі кестелер мен графиктерде берілген температура карталарының сызбасын салу үшін де пайдаланылды.

Кесте 1 – Температураның өзгеру динамикасы

Уақыт (мин)	Жоғарғы қыздыру элементі (°C),	Төменгі қыздыру элементі (°C),	Пеш ішіндегі орта температурасы (°C),
0	296.2	248.2	129.*
2	297.2	248.5	136.4
3	365.8	250.6	136.9
5	358.6	247.8	150.7
10	358.3	250.2	151.6
15	361.1	251.0	170.2
20	342.3	241.5	169.5
25	319.7	230.4	163.9
30	298.4	219.9	154.8
35	270.9	199.3	139.7
40	239.5	181.0	124.6

Ұсынылған деректер негізінде пісіру процесінде қыздыру, термиялық тұрақтандыру және салқындату фазаларын көрсететін температура қисықтарының тән трапеция пішінін атап өтуге болады. Алынған нәтижелер пеш камерасындағы температураның таралуының біркелкілігін және көрсетілген режимдерге сәйкестігін растайды. Бұл тәжірибелік техниканың жұмысқа қабілеттілігін және қолданылатын өлшеу құралдарының дәлдігін растайды.



Сурет 5 – MATLAB PDE Toolbox бағдарламасында осы зерттеу жұмысына сай модельделген пеш ішіндегі температуралық өрістердің таралуы.

MATLAB PDE Toolbox ішінара дифференциалдық теңдеулермен (PDE) сипатталған есептерді цифрлық түрде шешуге арналған аса жоғарғы саатылы құрал. Ол жылу беруді, құрылымдық механиканы, электромагниттік өрістерді және басқа физикалық процестерді қоса алғанда, мәселелердің кең ауқымын қамтиды. Осы орайда MATLAB бағдарламасы практикалық мәселелерді ұтымды шешу үшін кеңінен қолданылады, әрі күрделі есептеулерді жүзеге асырады. Тіпті осы мәселеде IoT сенсорларын арнайы сұлба, құрылғылар арқылы MATLAB бағдарламалық құралын бір есептеу құрылғысына біріктіруге болады.

Тамақ өнеркәсібіндегі заманауи шешімдерге термиялық процестерді (қыздыру, кептіру) бақылауға арналған IoT құрылғылары кіреді. Датчиктер нақты уақыт режимінде температура мен ылғалдылықты бақылайды, бұл параметрлерді оңтайландыруға, қуат тұтынуды азайтуға және өнім сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл деректер процестің цифрлық егізінің негізін құрайды. Жылу процестерінің динамикасын дәл шығару үшін жылу мен масса алмасуды есепке алатын физикалық және математикалық модельдер қолданылады. Физикалық модельдер мен машиналық оқытуды (ML) біріктіретін гибриді тәсіл цифрлық егіздердің мүмкіндіктерін жақсартады – олар шикізаттың өзгермелілігіне және процесс жағдайларына бейімделе алады, параметрлерді (ылғалдылық, температура) болжайды және ауытқуларды анықтай алады. Цифрлық егіз мониторинг, модельдеу, ML алгоритмдері мен басқаруды қамтитын бірыңғай платформаға біріктірілген. Бұл нақты уақыттағы процестерді оңтайландыруға мүмкіндік береді – энергия шығынын азайтады, сапаны жақсартады және өзгерістерге тез жауап береді және тұрақты өндіріске ықпал етеді.

Қорытынды

Зерттеу барысында ASTAR зертханалық электр пешінің көмегімен пісіру процесінде температуралық өрістерді бақылаудың тәжірибелік үлгісі жүзеге асырылды. Тәжірибеде пеш камерасының ішіндегі термодинамикалық процестерді жан-жақты бағалау үшін контактілі (MGprof механикалық пеш термометрі) және қашықтықтан өлшеу құрылғылары (пирометр, тепловизор) қолданылды. Зерттеу барысында қашықтықтан өлшеу құрылғыларының лазерлік сәулеленуі арнайы термиялық өңдеуден өтіп дайындалған шыныдан әлсіз өтетіндігі аңғарылды. Дегенменде жоғарыда аталған құрылғылардың нәтижесінде температуралық өрістер картасын құрастыра алдық, әрі. MATLAB PDE Toolbox бағдарламасында осы зерттеу жұмысына сай жылу таралуын моделдей алдық. Ендігі зерттеулерде жоғары температураға төзімді сенсорларды пайдаланған дұрыс, әрі олардың дерек тарату әдісін ойластыру қажет. Осылайша IoT құрылғыларын пайдалану арқылы, сонымен қатар ол сенсорлар мен құрылғылардан алынған деректерді алдағы зерттеулерде жылдам өңдеу үшін жасанды интеллектіге жіберіп, сол арқылы тамақ өнеркәсіп процесстерін жобалауға және автоматтандыруға болады. Бұл зерттеудің жаңалығы тек ауа температурасын бақылау ғана емес, сонымен қатар жылу циклінің әртүрлі фазаларындағы қыздыру элементтерінің температураларын тіркей отырып, нақты өндірістік жағдайларға жақын температуралық өрістерді практикалық тексеру. Үш негізгі кезең анықталды: жылдам қыздыру, термиялық тұрақтылық фазасы және біртіндеп салқындату. Тіркелген деректер өнімге нақты жылу жүктемелерін көрсететін трапеция тәрізді температура профилін және термодинамикалық процесстердің картасын құруға мүмкіндік берді.

Жұмыстың практикалық құндылығы тамақ өнеркәсібіндегі жылу процестерінің цифрлық егіздерін одан әрі құру үшін тәжірибелік базаны қалыптастыруда жатыр. Мұндай цифрлық модельдер өнім сапасын болжау, энергия шығындарын оңтайландыру және интеллектуалды басқару жүйелерін дамыту үшін қажет. Осылайша, осы зерттеудің нәтижелері тағам өндірісі саласында дәлірек және бейімделген цифрлық егіз негізін қалап, жылу процестерін талдауға кешенді көзқарастың жоғары маңыздылығын көрсетеді. Бұл зерттеуде жасалған барлық іс-әрекеттерді, өндіріс жағдайы туралы деректер қабылдауды IoT сенсорлары мен құрылғыларын қосу арқылы автоматтандырып, алдағы болашақтағы зерттеулерде ол деректерді жасанды

интеллект өңдеуіне жіберіп, алынған деректерді PML/CAD/CAM/CAE жүйелері арқылы оңтайландыру қажет.

Берілген мақала «BR24992975 Жасанды интеллект және IoT технологияларын қолдана отырып, тамақ өңдеу кәсіпорнының цифрлық егізін жасау» жобасының қолдауымен жазылған.

ӘДЕБИЕТТЕР

1 Ying Huang, Dr Abhijeet Ghadge, Nicky M Yates. Implementation of Digital Twins in the Food Supply Chain: A Review and Conceptual Framework. *International Journal of Production Research*, 28 (2023). <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2305804>

2 Pieter Verboven, Thijs Defraeye, Ashim K Datta, Bart Nicolai. Digital twins of food process operations: the next step for food process models? *Current Opinion in Food Science*, 35, 79–87 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>.

3 Tukembaeva, G.Ch., Temirov, B.K. Modelirovanie uravnenij termodinamiki dinamicheskimi sistemami. *Problemy avtomatiki i upravleniya*, 2, 109–115 (2023).

4 Das, S. *An Introduction to Finite Element Analysis Using Matlab Tools*. Springer, 2023.

5 Chalilov, H.M., Muhtorov, S. Building a computer model of heat exchange using the pde toolbox component matlab package. *Vestnik Instituta razvitiya obrazovaniya*, 1, 206–213 (2021).

6 Attaway, D.C. *Matlab: a practical introduction to programming and problem solving*. Butterworth-Heinemann, 2022.

7 Mishra, N. et al. Development of drying system by using internet of things for food quality monitoring and controlling. *Energy Nexus*, 11, 100219 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219>.

8 Kannapinn, M., Pham, M.K., Schäfer, M. Physics-based digital twins for autonomous thermal food processing: Efficient, non-intrusive reduced-order modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 81, 103143 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103143>.

9 Krupitzer, C., Noack, T., Borsum, C. Digital food twins combining data science and food science: system model, applications, and challenges. *Processes*, 10(9), 1781. <https://doi.org/10.3390/pr10091781>.

10 Purlis, E. Digital twin methodology in food processing: Basic concepts and applications. *Current Nutrition Reports*, 13(4), 914–920 (2024).

11 Makhambetov, K., Belgibaev, B.A., Kunicina N. Modeling Thermodynamic Processes Using MATLAB PDE TOOLBOX For Creating Digital Twins In The Food Industry. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*, 3, 40–48 (2025). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-5](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-5).

12 Feng, T. et al. The Oven-Controlled MEMS Oscillators in Timing and Sensing Applications: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 23(16), 17854–17867 (2023) <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3286897>.

13 Hou, F. et al. Review on infrared imaging technology. *Sustainability*, 14(18), C. 11161. <https://doi.org/10.3390/su141811161>.

14 Erdogdu F. Mathematical modeling of food thermal processing: Current and future challenges. *Current Opinion in Food Science*, 51, 101042 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101042>.

15 Isuru, A. et al. Digital twins in food processing: A conceptual approach to developing multi-layer digital models. *Digital Chemical Engineering*, 7, 100087 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100087>.

16 Koulouris, A., Misailidis, N., Petrides, D. Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products. *Food and Bioproducts Processing*, 126, 317–333 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.016>.

17 Zohdi, T.I. A voxel-based machine-learning digital-oven-twin for precise cooking // *Computational Mechanics*, 75(5), 1501–1518 (2025).

18 Han, J.C., Wright, L.M. *Analytical heat transfer*. Taylor & Francis, 2022, 595 p.

19 Cess, R.D. The interaction of thermal radiation with conduction and convection heat transfer. *Advances in heat transfer*. Elsevier, 1964. Vol. 1. P. 1–50. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70096-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70096-0).

20 Nerobeev, A.D., Dyachkin, O.D. *Metody resheniya uravnenij teploprovodnosti. Tekhnologii fiziki, avtomatizacii i informatiki. Aktual'nye issledovaniya v sovremennoj nauke*, 2020, pp. 50–51.

21 Mundar, Goran, Miha Kovačič, and Uroš Župerl. Development and Control of Virtual Industrial Process using Factory IO and MATLAB. *Tehnički glasnik* 18.3, 497–501 (2024). <https://doi.org/10.31803/tg-20240423112303>.

^{1*}Makhambetov K.I.,

PhD student, ORCID ID: 0009-0000-6047-8629,

*e-mail: 1998kaldybek@gmail.com

¹Belgibaev B.A.,

Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-6857-3775,

e-mail: bbelgybaev@list.ru

²Kunicina N.,

Professor, ORCID ID: 0000-0002-0980-0958,

e-mail: Nadezda.Kunicina@rtu.lv

¹Amirkhanova G.A.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-3933-5476,

e-mail: gulshat.aa@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Riga Technical University, Riga, Latvia

MONITORING AND MODELING OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN THE FOOD INDUSTRY FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS

Abstract

This article discusses an approach to developing digital twins for the food industry based on monitoring and numerical modeling of thermodynamic processes in a baking chamber (electric oven). The professional electric oven ASTAR, designed for the thermal processing of bakery products, was used as the experimental object. As part of the monitoring system, an infrared pyrometer (VICTOR 304F), a thermal imaging camera (UNI-T UTi120S), and an analog thermometer (MGprof) installed inside the oven chamber were employed. This setup allowed for the acquisition of reliable temperature data within the working chamber. Temperature data were collected periodically throughout the baking process, and based on these measurements, a temperature field map was generated. A mathematical model of heat transfer, implemented in two-dimensional (2D) format using MATLAB PDE Toolbox and incorporating Dirichlet and Neumann boundary conditions, was validated through comparison with the experimental results. The obtained results not only enable accurate modeling of temperature gradients and heat fluxes inside the baking chamber, but also lay the foundation for the creation of a digital twin capable of predicting system behavior in real time. The proposed approach can be applied to improve energy efficiency, automate quality control, and optimize technological processes in the food industry. This research contributes to addressing the challenges encountered in modeling and designing thermodynamic processes during the development of digital twins.

Keywords: digital twins, heat transfer, MATLAB PDE Toolbox, FEM, heat equation, boundary conditions, numerical modeling, temperature field analysis.

Received: July 9, 2025; revised: September 4, 2025; December 10, 2025; accepted: January 14, 2026.

^{1*}Махамбетов Қ.И.,

докторант, ORCID ID: 0009-0000-6047-8629,

*e-mail: 1998kaldybek@gmail.com

¹Бельгибаев Б.А.,

доцент, ORCID ID: 0000-0002-6857-3775,

e-mail: bbelgybaev@list.ru

²Куницина Н.,

профессор, ORCID ID: 0000-0002-0980-0958,

e-mail: Nadezda.Kunicina@rtu.lv

¹Амирханова Г.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-3933-5476,

e-mail: gulshat.aa@gmail.com

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Riga Technical University, г. Рига, Латвия

МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Аннотация

В данной статье рассматривается подход к созданию цифровых двойников для пищевой промышленности на основе мониторинга и численного моделирования термодинамических процессов в пекарной камере (электрическая печь-шкаф). В качестве объекта исследования использовалась профессиональная электрическая печь-шкаф ASTAR, предназначенная для термической обработки хлебобулочных изделий. В качестве системы мониторинга применялись инфракрасный пирометр VICTOR 304F, тепловизор UNI-T UTi120S и аналоговый термометр MGrrof, встроенный внутрь камеры печи. Это позволило получить достоверные данные о температурном поле внутри рабочей камеры. На основе этих устройств проводился периодический сбор температурных данных в течение всего времени приготовления продукции. На основе собранных данных была построена карта температурных полей. Математическая модель теплообмена, реализованная в двумерном (2D) формате в среде MATLAB PDE Toolbox с учетом граничных условий Дирихле и Неймана, была верифицирована путем сравнения с экспериментальными результатами. Полученные результаты не только позволяют точно моделировать температурные градиенты и тепловые потоки в пекарной камере, но и закладывают основу для построения цифрового двойника, способного прогнозировать поведение системы в режиме реального времени. Предлагаемый подход может быть использован для повышения энергоэффективности, автоматизации контроля качества и оптимизации технологических режимов в пищевой промышленности. Настоящее исследование вносит вклад в решение задач, возникающих при моделировании и проектировании термодинамических процессов в процессе создания цифровых двойников.

Ключевые слова: цифровые двойники, теплопередача, MATLAB PDE Toolbox, МКЭ, уравнение теплопроводности, граничные условия, численное моделирование, анализ температурных полей.