

САТЫБАЛДЫ СЫМБАТ ПЕРДЕБАЙҚЫЗЫ

**Бие сүтін вакуумды мұздатып
кептіруге арналған жабдықты жобалау және есептеу**

8D07110 – «Машиналар және жабдықтардың сандық инженериясы»

Философия докторы (PhD) дәрежесін алуға
арналған диссертациялық жұмыс

Отындық ғылыми кеңесшілер:
Техника ғылымдарының докторы,
қауым.профессор Басканбаева Д.Д.
Техника ғылымдарының кандидаты, қауым.
профессор Рахматулина А.Б.
Шетелдік ғылыми кеңесші:
Профессор Н.И.Петров(Сливен,
Болгария)

МАЗМҰНЫ

БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР	4
КІРІСПЕ	5
1 БИЕ СҮТІН ВАКУУМДЫ-СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ТАҢДАУДЫҢ ТАЛДАМАЛЫҚ ШОЛУЫ МЕН НЕГІЗДЕМЕСІ	8
1.1 Әдеби деректерді талдау және мәселені қою	9
1.2 Вакуумды-сублимациялық кептіргіштердің құрылымдарына шолу	11
1.3 Бірыңғай конструкторлық құжаттама жүйесі (БҚҚЖ) бойынша технологиялық құжаттаманы рәсімдеу	13
1- бөлім бойынша қорытынды	13
2 ЖАБДЫҚТЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРІН ӘЗІРЛЕУ	14
2.1 Сублиматор мен конденсатор камерасының беріктігін есептеу міндетін шешу, конденсатор мен сублиматор қабығының беріктігін есептеу, APMWinMachine және Autodesk Inventor орталарында сублиматордың негізгі өлшемдерін анықтау.....	14
2.2 APMWinMachine және Autodesk Inventor орталарында пневматикалық құбыржолдардың беріктігін есептеу.....	33
2-бөлім бойынша қорытынды.....	54
3 ВАКУУМДЫ-СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРГІШ ЖАБДЫҒЫН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ	55
3.1 Autodesk Inventor ортасында вакуумды-сублимациялық жабдықтың жобалық-конструкторлық құжаттамасын (ЖКҚ) әзірлеу және 3D моделін жасау	60
3.2 Autodesk Inventor ортасында тоңазыту және кептіру учаскесінің жабдығын автоматтандыру жүйесінің 3D моделін әзірлеу.....	63
3.3 Autodesk Inventor ортасында бие мен түйе сүтін вакуумдысублимациялық кептіруге арналған жаңа жабдықты әзірлеу	65
3-бөлім бойынша қорытынды.....	65
4 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ТЕКСЕРУ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ.....	67
4.1 Қондырғыны енгізудің техникалық-экономикалық негіздемесі.....	68
4-бөлім бойынша қорытынды	69
ҚОРЫТЫНДЫ	72
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	76
ҚОСЫМША А – Жобалық-конструкторлық құжаттама.....	78
ҚОСЫМША Б- Маршруттық карта	81
ҚОСЫМША В- Сынақ хаттамалары.....	84

ҚОСЫМША Г- Сынақ актілері.....	93
ҚОСЫМША Д- Объектінің төлқұжаты.....	95
ҚОСЫМША Е- Енгізк актісі.....	106

БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

АҚ – Акционерлік қоғам

КеАҚ – Коммерциялық емес акционерлік қоғам

ҒЗЖ – ғылыми-зерттеу жұмыстары

ВСК – вакуумды-сублимациялық кептіру

СЭӘ – соңғы элементтер әдісі

САӘ – соңғы айырмалар әдісі

АЖЖ – автоматтандырылған жобалау жүйесі

БКҚЖ – бірыңғай конструкторлық құжаттама жүйесі

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары елімізде жоғары сапалы, биологиялық құндылығы сақталған құрғақ бие сүт өнімдеріне сұраныс артып келеді. Бұл талап вакуумды-сублимациялық кептіру (ВСК) технологияларын жетілдіруді және арнайы жабдықтар жасауды өзекті етеді және олардың құндылығын көрсетеді. Бие сүті құрамы мен қасиеттері жағынан сиыр сүтінен және басқа сүт өнімдерінен едәуір ерекшеленеді, сондықтан оның физика-химиялық ерекшеліктерін ескеретін арнайы сублимациялық кептіру жабдығын жасау маңызды мәселелердің бірі болып табылады.

Докторлық диссертациялық зерттеу жұмысының маңыздылығы бірнеше техникалық және экономикалық факторлармен айқындалады: олардың ішінде атап айтқанда отандық мамандандырылған жабдықтың тапшылығы, дәстүрлі қондырғылардың жоғары энергиясымдылығы, процесті дәл реттеуді қажет ететін бейстационарлық сипаты, терең вакуум мен температура жағдайында жұмыс істейтін вакуумдық агрегаттардың сенімділігіне қойылатын талаптар, конструкцияны энергия тиімділік және өнімділік өлшемдері бойынша оңтайландыру қажеттігі, импортты алмастырудың стратегиялық маңызы және басқа да мәселер болып табылады.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы – бие сүтін ВСК процесінің бейстационарлы жылу-массалмасу құбылыстарын, сублимация аумағының жылжуын, температура мен ылғалдылыққа тәуелді нақты термофизикалық қасиеттерді ескеретін кешенді математикалық модель құру және жылулық, беріктік, гидравликалық есептерді және көпкритерийлі оңтайландыруды біріктіретін жобалау әдістемесін қалыптастыру, оңтайлы параметрлерін ғылыми тұрғыдан негіздеу, ПИД-реттегіштері бар автоматтандырылған басқару жүйесін синтездеу болып табылады.

Жобаның практикалық маңызы – өнімділігі 25 л/цикл қондырғыны жобалау, олардың техникалық бөлімін есептеу және өнеркәсіптік жағдайында сынақтан өткізу, БКҚЖ бойынша толық құжаттамасын әзірлеу, нақты технологиялық-экономикалық көрсеткіштерді (энергия шығыны, цикл ұзақтығы, өнім сапасы, өзіндік құн, өтелімділік мерзімі) айқындау негізде жасалады. Алынған нәтижелер тағам өнеркәсібінде (саумал, қымыз ұнтағы және т.б.), фармацевтика саласында, ғылыми техникалық зерттеулерде және инженерлік білім беруде қолдануға жарамды деп есептейміз.

Осылайша, бие сүтін вакуумды-сублимациялық кептіруге арналған энергиятиімді, автоматтандырылған отандық жабдықты жобалау – ғылыми-техникалық тұрғыдан өзекті міндет, оның шешімі Қазақстан Республикасының машина жасау саласын дамытуға және импортқа тәуелділікті азайтуға ықпал етеді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Қазіргі уақытта вакуумды-сублимациялық кептіру биологиялық құндылығы сақталған құрғақ бие сүт өнімдерін алудың ең перспективалы әдістерінің бірі болып табылады.

Бие сүтін вакуумды-сублимациялық кептіруге арналған жабдықты әзірлеудің өзектілігі келесі техникалық және экономикалық факторлармен анықталады:

1. Отандық мамандандырылған жабдықтың болмауы

Қолданыстағы өнеркәсіптік сублимациялық кептіру қондырғылардың басым бөлігі импорттық сол себепті ол бие сүтінің ерекшелігін ескермейді, бұл оңтайлы емес режимдер мен энергия шығынының артуына әкеледі.

2. Процестің жоғары энергия сиымдылығы

Дәстүрлі сублимациялық кептіру қондырғылардың энергия шығыны айтарлықтай (құрғақталған суға 3–5 кВт·сағ/кг), сондықтан энергия тиімді техникалық шешімдер мен конструкцияны қазіргі уақытта оңтайландыру қажет.

3. Технологиялық процестің басқару күрделілігі

Процесс бейстационарлы, температура-қысым параметрлерін дәл реттеуді талап етеді, сондықтан кері байланысы бар автоматтандырылған басқару жүйесін жасау қажет болып табылады. Вакуумдық жабдықтың сенімділігіне талаптар олардың ішінде атап айықанда- терең вакуум (10–30 Па) мен криогендік температураларда (–50°C) жұмыс істеу беріктікке, герметикалылыққа, сенімділікке жоғары талап қояды бұл өз кезеңінде мұқият беріктік есебін және материал таңдауды талап етеді.

4. Конструкцияны оңтайландыру қажеттігі

Көптеген кептіру жабдықтары энергия тиімділік пен өнімділік критерийлері бойынша жеткілікті оңтайландырылмаған; заманауи математикалық модельдеу мен автоматтандырылған жобалауды қолдану өзекті. Импортты алмастыру. Бәсекеге қабілетті отандық жабдық жасау ҚР машина жасау саласын дамытуға және импортқа тәуелділікті төмендетуге мүмкіндік береді, демек, заманауи жобалау, есептеу және оңтайландыру әдістерін қолдана отырып бие сүтіне арналған вакуумды-сублимациялық кептіру жабдығын жасау – тиімді отандық жабдық құруға мүмкіндік беретін өзекті ғылыми-техникалық міндет.

Тақырыптың зерттелу деңгейі

Әдебиеттер мен патенттік деректерді талдау сублимациялық кептіру жабдығын жобалау саласының қарқынды дамып келе жатқанын көрсетеді.

Қолданыстағы мәселелер мен кемшіліктер

- Кешенді әдістеменің жоқтығы: жылулық, беріктік және гидравликалық есептерді біріктіретін бірыңғай автоматтандырылған әдістеменің жеткіліксіздігі.
- Бие сүтінің ерекшеліктерінің толық зерттелмеуі: оның құрамындағы ақуыз (2,0–2,5%), май (1,0–2,5%) және лактоза (6,0–7,0%) көрсеткіштері технологиялық есептерде жеткіліксіз ескерілген.
- Энергия тиімділігін оңтайландырудың болмауы.
- Автоматтандыру жүйелерінің жеткіліксіз дамуы: объектінің математикалық модельдеріне негізделмеген.

Бие сүтін вакуумды-сублимациялық кептіруге арналған жабдықты кешенді жобалау, есептеу және оны заманауи оңтайландыру әдістерімен жетілдіру бағытында зерттеулер жеткіліксіз.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері

Мақсаты:

Жылу-массалмасу процестерінің математикалық модельдеуіне сүйенетін, энергия

тиімділігі мен өнімділік критерийлері бойынша оңтайландырылған бие сүтін вакуумды-сублимациялық кептіру жабдығын жобалау әдістемесін әзірлеу және CAD/CAE құралдарын қолдана отырып инженерлік есептерді орындау.

Міндеттері:

- Бие сүтін ВСК арқылы кептіру процесінің бейстационарлы жылу-массалмасу құбылыстарын және қозғалып тұрған сублимация майданын ескере отырып математикалық модель құру. Python және Maple орталарында МКР әдісімен модельді жүзеге асырып, верификация жүргізу.
- Жылулық есеп әдістемесін қалыптастыру: қыздырғыш қуатын, конденсатор бетінің ауданын, вакуум-насосының өнімділігін анықтау.
- АРМ WinMachine және Autodesk Inventor бағдарламаларында СЭӨ көмегімен вакуум камерасы мен конденсатордың беріктік есебін орындау. Белгіленген өнімділік кезінде энергия шығынын минимизациялау критерийі бойынша конструктивтік параметрлерді оңтайландыру

Жариялымдар

Диссертациялық зерттеудің нәтижелері Scopus дерекқорында CiteScore бойынша Q1 процентиль сәйкес келетін 2 мақала, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдар тізбесіне енгізілген журналдарда 1 мақала жариланды, халықаралық конференцияда бойынша 1 баяндама, 1 патент жүзеге асырылды.

Жұмыс құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс 108 бетте жазылған, сонымен қатар кіріспеден, 4 бөлімнен және қорытындыдан тұрады, 31 суреттен, 6 кестеден, 54 атаудан тұратын пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және 6 қосымшадан тұрады.

1 БИЕ СҮТІН ВАКУУМДЫ-СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ТАҢДАУДЫҢ ТАЛДАМАЛЫҚ ШОЛУЫ МЕН НЕГІЗДЕМЕСІ

Сүт өнімдерін кептіру – тағам өнеркәсібіндегі ең маңызды технологиялық процестердің бірі, ол өнімнің сақтау мерзімін айтарлықтай ұзартуға және оның тағамдық әрі биологиялық құндылығын сақтауға мүмкіндік береді. Сүтті кептірудің заманауи әдістері бірнеше негізгі топқа бөлінеді, әрқайсысының өз артықшылықтары мен қолдану салалары бар.

1. Бүрікпелі кептіру – құрғақ сүт өндірудің ең кең тараған өнеркәсіптік әдісінің бірі болып табылады. Процесс алдын ала қоюландырылған сүтті ыстық ауа ағынында бүрікіп шашуға негізделген, осы жерде ылғал тез буланады. Әдістің басты артықшылығы – жоғары өнімділік және салыстырмалы түрде төмен өзіндік құн. Алайда 150–200°C жоғары температураның әсері ақуыздардың ішінара денатурациясына және термо тұрақсыз витаминдердің бұзылуына әкеледі. Вальцті кептіру жедел еритін сүт өнімдерін өндіруде қолданылады. Сүт жұқа қабат түрінде айналмалы барабандардың қызған бетіне жағылады, онда ылғалдың интенсивті булануы арқылы жүреді. Әдістің кемшілігі – өнімнің күйіп кету қаупі және ұзақ уақыт ыстық бетпен жанасу салдарынан биологиялық белсенді заттардың айтарлықтай жоғалуы жүзеге асады.

2. Конвективті кептіру – кептіргіш шкафта аппараттық жағынан қарапайым, бірақ көп энергия мен уақыт талап етеді. Өнім ұзақ уақыт бойы (60–80°C) орташа температураның әсеріне ұшырайды, бұл түпкі өнім сапасына да кері әсер етуі мүмкін.

3. Вакуумды-сублимациялық кептіру – термотұрақсыз өнімдерді (соның ішінде бие сүтін) сусыздандырудың ең озық әдісі. Процесс үш негізгі кезеңде өтеді: судың үштік нүктесінен төмен температураға дейін өнімді мұздату; алғашқы кептіру (мұздың терең вакуумда сублимациясы); екінші кептіру (байланысқан ылғалды десорбциялау). Әдістің басты артықшылығы – ылғалды сұйық фазаны айналып өтіп, тікелей қаттыдан газға өткізіп жою мүмкіндігі, соның арқасында өнімнің құрылымы мен биологиялық белсенді компоненттері барынша сақталады.

Сублимациялық кептірудің физика-химиялық негіздері судың фазалық диаграммасына сүйенеді. Судың үштік нүктесі 0,01°C температураға және 611 Па қысымға сәйкес келеді. Осы мәннен төмен қысымдарда су сұйық күйде бола алмайды және қатты фазадан (мұз) газ тәрізді күйге (бу) бірден өтеді, яғни сұйық фазаны айналып өтеді. Дәл осы құбылыс – сублимация – аталған кептіру әдісінің өзегі болып табылады.

Өртүрлі кептіру әдістерінің салыстырмалы талдауы биологиялық белсенді компоненттердің сақталу дәрежесінің айтарлықтай айырмашылығын көрсетеді. Бүрікпелі кептіру кезінде С витамині жоғалуы 30–50%, тиамин – 20–30%, лизин – 15–25% құрайды.

4. Вальцті кептіру – жаппай тұтынуға арналған жедел еритін сүт өнімдері үшін арналған кептіру болып табылады. Вальцті кептіру – бұл кептіру тіпті үлкен шығындарға әкеледі: С витамині 50–70% дейін бұзылады, сарысулық ақуыздардың айтарлықтай денатурациясы (40–60% дейін) байқалады. Бұларға қарағанда, сублимациялық кептіру С витаминін 90–95% деңгейінде, аминқышқылдарды 95–98% деңгейінде сақтайды және ақуыздардың денатурациясы 5–10%-дан аспайды.

Энергетикалық тұрғыдан әдістер де едәуір ерекшеленеді. Бүрікпелі кептіруде меншікті энергия шығыны 1 кг алынған ылғалға 4000–6000 кДж, вальцті кептіруде – 5000–7000 кДж/кг, конвективті кептіруде – 6000–9000 кДж/кг. Сублимациялық кептіруде бұл көрсеткіш жоғарырақ – 8000–12000

кДж/кг, алайда ол өнім сапасының едәуір артуымен және өзге әдістермен биобелсенділігін жоғалтпай өңдеу мүмкін емес аса құнды шикізатты (мысалы, бие сүтін) тиімді өңдеу мүмкіндігімен өтеледі.

Әдістердің өнім құрылымына әсері де принципті маңызды. Бүрікпелі кептіру кезінде тығыз, төмен кеуектілікті (30–40%) сфералық бөлшектер түзіледі, бұл өнімді қайта қалпына келтіруді қиындатып, ерігіштігін төмендетеді. Вальцті кептіру бұзылған құрылымды жалпақ қабыршақтар түзуге әкеледі. Сублимациялық кептіру жоғары кеуектілікті (85–95%) құрылым қалыптастырады, өнімнің бастапқы пішіні мен көлемі сақталады, сондықтан дерлік лезде қалпына келіп, ерігіштігі жоғары болады.

Әртүрлі әдістердің ерекшеліктері олардың басым қолданылу салаларын айқындайды. Бүрікпелі кептіру – өнімділік пен өзіндік құн шешуші болатын көптонналы кәдімгі құрғақ сүт өндірісі үшін оңтайлы.

Сублимациялық кептіру – жоғары сапалы арнайы мақсаттағы өнімдер (балалар тағамы, спорттық тамақ, медициналық препараттар, ғарыштық тамақ) үшін экономикалық тұрғыдан орынды. Бірегей қасиеттері мен жоғары биологиялық құндылығы бар бие сүті осы санатқа жатады.

1.1 Әдеби деректерді талдау және мәселені қою

Сублимациялық кептіру — бұл материалды мұздату, сублимациялық сусыздандыру және вакуумдық десублимация кезеңдерін қамтитын жылу және масса алмасудың орнықсыз процесі. Бұл өзара байланысты құбылыстар кептіру кинетикасына елеулі әсер етеді, сондықтан процесті оңтайландыру үшін математикалық модельдеу қажет. [17] еңбегінде авторлар сублимациялық кептіру кинетикасын, кептіргіш құрылғысын есептеу мен оңтайландыру стратегияларын қамтитын құрылымды ұсынады. Негізгі назар энергия үнемділігіне аударылады, ал кинетикалық модельдеу үшін аналитикалық және эмпирикалық әдістер анықталған, бұл ресурстарды үнемдейтін технологияларға негіз қалайды.

[18] зерттеуінде майсыздандырылған сүтті сублимациялық кептіру кезіндегі өтпелі жылу өткізгіштікті талдау үшін ақырлы айырмалар әдісін қолданатын сандық модель ұсынылған. Модель сублимацияның қозғалыстағы фронтын, радиациялық және конвективті шекаралық шарттарды ескереді. Нәтижелер камерадағы қысым азайған сайын сублимация жылдамдығының артатынын көрсетеді. Бұл зерттеу модельдің температуралық профильдер мен сублимация динамикасын болжау қабілетін айқындайды.

[19] жұмысында авторлар сублимациялық кептірудің кеуекті ортадағы тасымал құрылымын модельдеуді кеңейтеді, мұнда Кнудсен ағысы және таралған сублимация фронттары қарастырылады. Зерттеу кеуекті ортадағы газдық фракциялардың окшаулану әсерін және сублимация фронтының енін дәл сипаттаудың маңыздылығын атап өтеді, бұл модельдің тәжірибелік деректермен үйлесімділігін көрсетеді.

[20] еңбегінде өнеркәсіптік масштабтағы лиофилизатор жабдықтарының мүмкіндіктері қарастырылады. Есептеу гидродинамикасы (CFD) көмегімен жоғары сублимация жылдамдығындағы бу ағынындағы турбулентті әсерлер зерттеледі. CFD нәтижелерінің дәлдігі жабдық қысым шектерін және өнімділікті оңтайландыруды анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

[21] зерттеуінде күрделі физика-химиялық қасиеттерді ескеретін, бірақ қарапайым теңдеулер түрінде өрнектелетін күрделі модель ұсынылады. Бұл модель пішіні күрделі тағамдық өнімдерді сублимациялық кептіруге

арналған және микроструктуралық өзгерістерді теориялық және практикалық тұрғыда байланыстырады.

[22] еңбегінде жылдамдатылған сублимациялық кептіру әдістері зерттелген, мұнда температураға тәуелді құрылым енгізіліп, материал тұтастығын сақтай отырып, кептіру жылдамдығының артуы қамтамасыз етіледі. Дженокки операциялық матрицалары әдісі қолданылып, жылу-физикалық қасиеттердің температураға тәуелділігі кептіру тиімділігін арттыратыны дәлелденген.

[23] зерттеуінде тазартылған алма кубиктерінің көпөлшемді сублимация кинетикасын болжауға арналған квазистационарлық энергия балансы моделі ұсынылады. Радиация мен масса алмасу коэффициенттерін енгізу модельдің кептіру кинетикасын дәл болжауға мүмкіндік береді, бұл модельді өндірістік масштабта қолдануға жарамды етеді.

[24] еңбегінде Стефан типті жылу және масса алмасуының конвекциямен байланысы зерттеледі. Аналитикалық шешімдер Пекле және Льюис сандары сияқты параметрлердің сублимация динамикасына әсерін көрсетеді.

[10] зерттеуінде конвективті жылу және масса тасымалы, көлемдік жылу көздері мен Ньютон типіндегі температуралық шарттар қарастырылған. Нәтижелер шынайы жылулық шекараларды енгізу сублимация процесін жеделдететінін және бұл тәсіл энергия сақтау мен тағамдық технологияларда пайдалы болатынын көрсетеді.

[11] жұмысы сублимациялық кептіру кезінде энергия тұтынуды азайтуға бағытталған. Майсыздандырылған сүт пен еритін кофе мысалында динамикалық оңтайландыру әдісі — тізбекті квадраттық бағдарламалау қолданылып, процестің тиімділігі мен өнім сапасы арасындағы тепе-теңдік қамтамасыз етіледі.

[12] еңбегінде Python негізіндегі кинетикалық модельдеу мен CFD газ динамикасын біріктіретін гибридік тәсіл ұсынылады. Бұл әдіс буланудың теңгерілген конденсациясы кептіру біркелкілігін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

[13] және [14] зерттеулері CFD қолданбаларын сублимациялық кептіргіштердің геометриясын оңтайландыруға және өнеркәсіптік аппараттардың тиімділігін арттыруға бағыттайды. Бұл жұмыстар жабдық конструкциясын жетілдіруге және партиялық дисперсияны басқаруға мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары пневмотрубопроводтардың беріктігін есептеу машина жасау, энергетика және мұнай-газ салаларында аса маңызды міндеттердің біріне айналды. Бұл күрделі құрылымдық шешімдер мен сыртқы әсерлер жағдайында ерекше өзектілікке ие. Әдебиеттерде дәстүрлі аналитикалық әдістерден бастап, заманауи сандық және гибридік модельдерге дейінгі әртүрлі тәсілдер келтірілген.

Шетелдік зерттеушілер пневможүйелердегі резонанстық құбылыстарды [26], аналитикалық және сандық модельдеуді біріктіретін гибридік әдістерді [27], сондай-ақ жұқа қабырғалы құбырлардың беріктік сипаттамаларын салыстырмалы талдауды [28] жүргізген.

Инженерлік бағдарламалық қамтылымның қолданылуы да кеңінен зерттелген. [29] еңбегінде ANSYS ортасында кернеулер есебі көрсетілсе, [30] жұмысында COMSOL көмегімен жылулық жүктемелердің әсері зерттелген.

[31] жұмысы машиналық оқыту әдістерін пайдалана отырып, жобалауды оңтайландыру мүмкіндігін ашқан.

Отандық және ТМД зерттеушілері теориялық негіздер мен APM WinMachine

сияқты отандық САЕ-жүйелердің практикалық қолданысын талдаған. [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54] еңбектерінде жұқа қабырғалы цилиндрлердің есептері, температуралық әсерлер, фланецтік қосылыстар және модельдердің сезімталдығы және басқа да осы докторлық диссертация бойынша барлық материалдар қарастырылған.

1.2 Вакуумды-сублимациялық кептіргіштердің құрылымдарына шолу

Вакуумды-сублимациялық кептіргіштер (ВСС) – өнімдегі ылғалды мұз күйінен тікелей буға айналдыру арқылы жоюға арналған жоғары технологиялық құрылғылар. Мұндай кептіру әдісі өнімнің бастапқы құрылымын, түсін, дәмін және биологиялық белсенді заттарын барынша сақтауға мүмкіндік береді.

Негізгі құрылымдық элементтері

Вакуумды-сублимациялық кептіргіштердің негізгі элементтері мыналар:

Кептіру камерасы – өнім орналастырылатын герметикалық камера, онда қысым төмендетіліп, температура бақыланып отырады.

Суық тұзақ (конденсатор) – сублимацияланған судың буларын ұстап, мұз түрінде жинақтайтын бөлік.

Вакуумдық жүйе – камера ішіндегі қысымды төмендетуге арналған сорғылар кешені.

Жылыту жүйесі – өнімнің температуралық режимін дәл реттеуге мүмкіндік береді (жылу бергіш плиталар, инфрақызыл немесе радиациялық жылытқыштар арқылы).

Басқару және бақылау жүйесі – процестің барлық параметрлерін автоматты түрде бақылап, қажетті жағдайларды қамтамасыз етеді.

Конструкция түрлері

ВСС құрылғыларының конструкциялары қолдану саласына қарай әртүрлі болады:

Лабораториялық типтегі кептіргіштер – аз мөлшердегі үлгілерді зерттеу мен сынақ жүргізуге арналған.

Өндірістік типтегі кептіргіштер – тағам, фармацевтика және биотехнология салаларында кеңінен қолданылады.

Пластиналы және сөрелі типтер – өнімдер сөрелерге орналастырылады, жылу плиталар арқылы беріледі.

Цилиндрлік барабанды типтер – үздіксіз жұмыс істейтін, автоматтандырылған өндіріс желілеріне бейімделген жүйелер.

Вакуумды-сублимациялық кептірудің басты артықшылықтары:

- өнімнің сапалық қасиеттерін сақтау;
- ұзақ сақтау мерзімін қамтамасыз ету; температуралық әсердің аз болуы;
- еріткіш пен химиялық реагенттер қолданылмайтыны.

1.3 Бірыңғай конструкторлық құжаттама жүйесі (БҚҚЖ) бойынша технологиялық құжаттаманы рәсімдеу

Осы кезең аясында БҚҚЖ (Бірыңғай технологиялық құжаттама жүйесі) талаптарына сәйкес технологиялық құжаттама жинағы әзірленді. БҚҚЖ — бұл кәсіпорында технологиялық құжаттаманы әзірлеу, рәсімдеу және жүргізудің бірыңғай өзара байланысқан ережелерін белгілейтін мемлекеттік стандарттар кешені. Төменде вакуумдық-сублимациялық кептіру мен жабдықты жинау технологиялық процесіне арналған дайындалған құжаттар тізімі келтірілген:

Маршруттық карта

Маршруттық карта вакуумдық-сублимациялық камераның бөлшектерін өңдеу және тораптарын жинау кезінде орындалатын барлық технологиялық операциялардың ретін анықтайды. Бұл құжат МЕСТ 3.1118-82 стандартына сәйкес рәсімделген, ол маршруттық карталарды құрастырудың нысаны мен ережелерін реттейді. Маршруттық карта технологиялық құжаттар жинағының құрамдас әрі ажырамас бөлігі болып табылады және бұйымды дайындаудың толық маршрутын көрсетеді.

Операциялық карталар

Операциялық карталар нақты технологиялық операциялардың егжей-тегжейлі сипаттамасын қамтиды — токарлық, фрезерлік, дәнекерлеу, жинақтау және т.б. Әрбір операция үшін өңдеу режимдері (кесу параметрлері), қолданылатын құрал-саймандар, жабдықтар мен арматуралар көрсетіледі. Операциялық карталар МЕСТ 3.1404-86 стандарты бойынша рәсімделген, ол мұндай құжаттардың стандартталған нысандарын белгілейді. Бұл тәсіл операцияларды сипаттауда бірыңғайлықты қамтамасыз етеді және өндірістегі процесті қайта жаңғыртуды жеңілдетеді.

Сапаны бақылау карталары

Техникалық бақылау карталарында (сапаны бақылау карталарында) өндірістің әр кезеңінде көзделген бақылау әдістері мен нүктелері белгіленген. Атап айтқанда, визуалды тексеру, негізгі өлшемдердің өлшеу бақылауы және кептіру камерасының герметикалығын вакуумдық сынау көрсетілген. Бұл бақылау карталары МЕСТ 3.1502-85 стандартына сәйкес рәсімделген, ол техникалық бақылау операцияларының құжат нысандарын анықтайды. Сапаны бақылау карталарының болуы жүйенің вакуумдық тығыздығы сияқты маңызды параметрлердің әрбір құрастыру және сынау кезеңінде дұрыс тексеріліп, құжатталуын қамтамасыз етеді.

Дәнекерлеу нұсқаулары (MIG/MAG, TIG)

MIG/MAG және TIG әдістері бойынша дәнекерлеу жұмыстарын орындауға арналған технологиялық нұсқаулар әзірленді. Онда дәнекерлеу режимінің параметрлері (дәнекерлеу тогы, кернеуі, сым беру жылдамдығы), қолданылатын қоспа материалдардың түрлері (дәнекерлеу сымы немесе электродтар) және дәнекер тігістерінің сапасына қойылатын талаптар (тігістің үздіксіздігі, кеуектер мен жарықтардың болмауы) көрсетілген.

MIG/MAG әдісі — бұл инертті (MIG) немесе белсенді (MAG) қорғаныш газы ортасында балқытын металл электродпен орындалатын доғалық дәнекерлеу процесі. TIG әдісі (аргондық доғалық дәнекерлеу) — инертті газ (аргон) ортасында балқымайтын вольфрам электродымен қолмен дәнекерлеу әдісі. Дәнекерлеу нұсқаулары салалық дәнекерлеу стандарттарына сәйкес жасалған және дәнекерлеу жұмыстары кезінде қауіпсіздік шараларын қамтиды (мысалы, жеке қорғаныс құралдарын пайдалану, жабық кеңістікте дәнекерлеу кезінде желдетуді қамтамасыз ету).

Жинақтау және монтаждау нұсқаулығы

Бұл құжат лиофилизатор жабдығын (вакуумдық-сублимациялық кептіргішті) жинау және тораптарды монтаждау тәртібін сипаттайды. Онда жеке тораптар мен бөлшектерді орнату кезеңдері, тығыздағыштарды орнату, қажетті коммуникациялар мен инженерлік жүйелерді қосу ретімен баяндалған. Нұсқаулықта жинау кезіндегі тазалық талаптары, бұрандалы қосылыстардың тартылу моменттері, сондай-ақ вакуумдық жүйені, тоңазытқыш контурды және электрлік бөлікті қосу тәртібі көрсетілген. Осы нұсқаулықты сақтау жабдықты зақымдамай дұрыс жинауды және вакуум немесе хладагенттің ағып кетуін болдырмауды қамтамасыз етеді

Хладагентпен толтыру технологиялық картасы (R404A, R410A) кептіру қондырғының тоңазытқыш контурын R404A немесе R410A хладагентімен толтыру процесін реттейтін жеке карта әзірленді. Құжатта жүйе көлеміне байланысты есептелген хладагент мөлшері, толтыру алдындағы жүйені вакуумдау тәртібі және қажетті жабдықтар (вакуумдық насос, манометрлері бар манифольд, фреон баллондары және т.б.) көрсетілген. Қауіпсіздік шараларына ерекше назар аударылған: фреон баллондарын жылытуға тыйым салынады, толтыру кезінде желдетуді қамтамасыз ету, жұмыс қысымының артық болдырмау және хладагенттің ашық отпен жанасуын болдырмау қажет. Қолданылатын екі хладагент те (R404A және R410A) ASHRAE стандарты бойынша A1 класына жатады, яғни дұрыс пайдаланылған жағдайда усыз және жанбайтын болып табылады. Хладагентпен толтыру технологиялық картасы бұл операцияның қауіпсіз әрі дұрыс орындалуын қамтамасыз етеді, бұл тоңазытқыш жүйесінің ұзақ және сенімді жұмыс істеуі үшін шешуші маңызға ие.

1 бөлім бойынша қорытынды

Жүйеге қашықтан қол жеткізу оператор мен инженер-технологқа нысанда физикалық қатысусыз-ақ қондырғының параметрлерін бақылауға және деректерді нақты уақыт режимінде архивтеуге мүмкіндік берді. Бұл персоналдың жұмыс тиімділігін арттырып, адам факторына байланысты қателіктердің ықтималдығын азайтты.

2 ЖАБДЫҚТЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРІН ӘЗІРЛЕУ

Сублимациялық кептіру — жылу мен масса алмасудың орнықсыз процесі болып табылады және оның күрделі динамикасына байланысты сублимациялық кептіру саласының негізгі бағыты саналады. Бұл процесс материалды мұздату, сублимациялық сусыздандыру және вакуумдық десублимация кезеңдерін қамтиды. Аталған өзара байланысты құбылыстар кептіру кинетикасына айтарлықтай әсер етеді, сондықтан процесті оңтайландыру үшін математикалық модельдеу қажет. [52]-жұмыста авторлар сублимациялық кептіру кинетикасын, кептіргіш құрылымын есептеу мен оңтайландыру стратегияларын қамтитын құрылым ұсынады. Негізгі назар энергия тиімділігіне аударылады, ал кинетикалық модельдеу үшін аналитикалық және эмпирикалық әдістер анықталған, бұл ресурс үнемдейтін технологияларға негіз қалайды. Есептің жоғары дәлдігіне геометрияны, материал қасиеттерін, сыртқы факторларды кешенді түрде ескеру және модельді дұрыс верификациялау арқылы қол жеткізуге болады. Бұл әртүрлі бағдарламалық құралдар мен есептеу әдістерінің, соның ішінде APM WinMachine жүйесінің салыстырмалы талдауын жүргізудің өзектілігін айқындайды.

2.1 Сублиматор мен конденсатор камерасының беріктігін есептеу міндетін шешу, конденсатор мен сублиматор қабығының беріктігін есептеу, APMWinMachine және Autodesk Inventor орталарында сублиматордың негізгі өлшемдерін анықтау

Есептеудің мақсаты — сыртқы қысым $p = 0,1013$ МПа (вакуум) әсер еткен жағдайда сублиматор мен конденсатордың жазық қабырғалары бар (шаршы қималы) қабықтарының беріктігі мен орнықтылығын бағалау, беріктік қорының коэффициенттерін анықтау, жұқа пластиналарға арналған есептік формулалар бойынша алдын ала верификация жүргізу және құрылымның пайдалану сенімділігін растау мақсатында APM WinMachine және Autodesk Inventor бағдарламалық орталарында МКЭ-модельдеу жоспарын әзірлеу болып табылады.

Бастапқы деректерге бұйымдардың геометриялық параметрлері мен материалы кіреді.

Сублиматор үшін келесі сипаттамалар қабылданған:

- қабықтың ұзындығы — $0,814$ м;
- ішкі шаршы қиманың қабырғасы — $0,664$ м;
- сфералық қақпақ радиусы — $0,0$ м (жазық қақпақ);
- қабырға қалыңдығы — $0,005$ м;
- қосылыс патрубогының ұзындығы — $0,038$ м;

- патрубоктың ішкі диаметрі — $0,034\text{ м}$;
- сыртқы қысым — $0,1013\text{ МПа}$;
- материал — тот баспайтын болат AISI 304 (08X18H10), ағу шегі $R_{p0,2} \approx 215\text{ МПа}$.

Конденсатор үшін келесі параметрлер қабылданған:

- қабықтың ұзындығы — $0,308\text{ м}$ (сызба бойынша 240,5 мм);
- шаршы қиманың қабырғасы — $0,45\text{ м}$;
- сфералық қақпақ радиусы — $0,0\text{ м}$;
- қабырға қалыңдығы — $0,008\text{ м}$;
- сыртқы қысым — $0,1013\text{ МПа}$;
- материал — сол материал, AISI 304 (08X18H10), $R_{p0,2} \approx 215\text{ МПа}$.

Қабылданған белгілеулер:

- l — қабықтың ұзындығы,
- a — шаршы қиманың қабырғасы,
- R — сфералық қақпақ радиусы,
- t — қабырға қалыңдығы.

Сыртқы қысым әсер еткен жағдайда (ішінде вакуум болған кезде) шаршы немесе тікбұрышты жазық қабықтың беріктігі қарапайымдатылған формула бойынша есептеледі:

Есептеу сыртқы қысым жағдайына арналған (ішкі кеңістікте вакуум бар) және жазық қабырға үшін қолданылатын жеңілдетілген формула негізінде жүргізіледі:

$$\sigma = \frac{P \cdot a}{2 \cdot t} \quad (1)$$

мұндағы:

- σ — есептік кернеу,
- P — сыртқы қысым,,
- a — қабықтың ені (тікбұрышты қиманың ең ұзын қабырғасы),

t — қабырға қалыңдығы.

4 Есептеу нәтижелері

Сублиматор үшін:

$$\sigma_{\text{субл}} = \frac{0.1013 \cdot 0.9}{2 \cdot 0.006} = 7.5975 \text{ МПа} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{0.1013 \cdot 0.9}{2 \cdot 0.006} = \frac{0.09117}{0.012} = 7.598 \text{ МПа} \quad (3)$$

Беріктік қорының коэффициенті:

$$n = \frac{\sigma_{\text{тек}}}{\sigma_{\text{расч}}} = \frac{215}{7.598} \approx 28.3 \quad (4)$$

Конденсатор үшін:

$$\sigma_{\text{конд}} = \frac{0.1013 \cdot 0.45}{2 \cdot 0.005} = 4,56 \text{ МПа} \quad (5)$$

1-қадам: Эквивалентті кернеуді есептеу

Формула (біркелкі сыртқы жүктеме кезінде — вакуум жағдайында):

$$\sigma = \frac{P \cdot a}{2 \cdot t} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{0.1013 \cdot 0.45}{2 \cdot 0.008} = \frac{0.045585}{0.016} = 2.849 \text{ МПа} \quad (7)$$

2-қадам: Беріктік қоры коэффициентін есептеу

$$\text{Коэффициент запаса прочности} = \frac{\sigma_{\text{тек}}}{\sigma_{\text{расч}}} = \frac{215}{2.849} \approx 75.5 \quad (8)$$

Рұқсат етілген кернеумен салыстыру:

$$\sigma_{\text{расч}} = \sigma_{\text{доп}} = 215 \text{ МПа} \quad (9)$$

Демек, сублиматор мен конденсатордың қабықтарының беріктігі үлкен қорымен қамтамасыз етілген. Есептеу нәтижелері бойынша сублиматор мен конденсатор қабықтарындағы кернеу шамалары сәйкесінше 7,60 МПа және 2,85 МПа құрайды, бұл материалдың ағу шегінен (AISI 304, 215 МПа) әлдеқайда төмен.

Беріктік қорының коэффициенттері тиісінше 28,3 және 75,5, бұл құрылымның жоғары сенімділігін көрсетеді. Деформациялар мен орын ауыстырулар шамалы және құрылғының жұмыс қабілетіне әсер етпейді. Осылайша, қабықтардың қабырғалары жеткілікті беріктікке ие, материалды қалыңдату немесе қатайтқыш қырлар қосу қажет емес. Құрылым вакуумдық сыртқы қысым жағдайында пайдалануға қауіпсіз деп есептеледі.

Сыртқы біркелкі қысым әсеріндегі кернеулі-деформацияланған күйді бағалау мақсатында конструкцияға соңғы элементтер әдісімен (МКЭ) статикалық беріктік талдауы жүргізілді.

Модельдің бекітілуі шеттері бойынша қысып ұстау арқылы жүзеге асырылды, ал материал ретінде тот баспайтын болат AISI 304 және қорытпалы болат қолданылды.

Модельдің геометриялық сипаттамалары:

- масса — 398,56 кг,
- көлем — 50,25 л,
- беткі аудан — 14,14 м².

Autodesk Inventor бағдарламасында орындалған талдау нәтижелері бойынша анықталды:

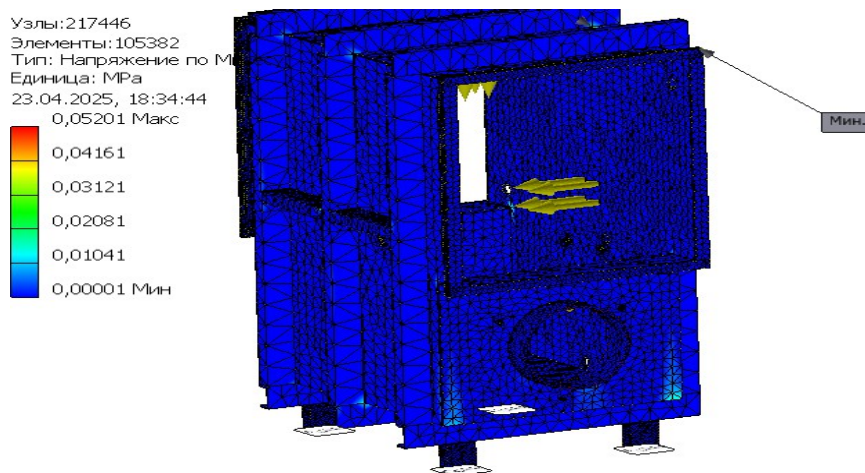
- Мизес бойынша максималды эквивалентті кернеу — 0,052 МПа;
- максималды орын ауыстыру — 0,00047 мм;
- беріктік қорының коэффициенті кемінде 15;
- максималды жанасу қысымы — 0,145 МПа;
- эквивалентті деформация — $2,6 \times 10^{-7}$ аспайды.

Алынған нәтижелер құрылымның жоғары беріктігі мен қаттылығын, сондай-ақ вакуум жағдайында сенімді жұмыс істеу қабілетін растайды.

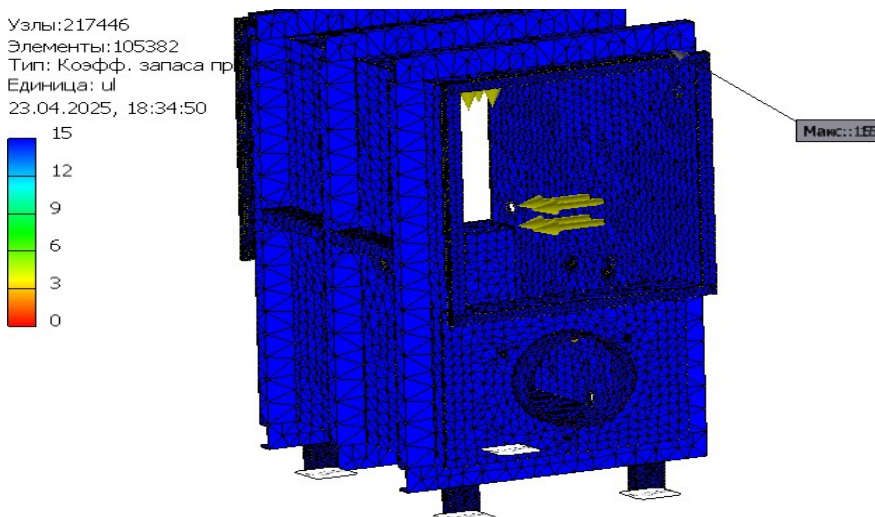
1-суретте вакуумдық камера құрылымындағы Мизес бойынша эквивалентті кернеулердің таралуы көрсетілген. Максималды кернеу 0,052 МПа, бұл AISI 304 материалының ағу шегінен (215 МПа) әлдеқайда төмен және құрылымның беріктігі мен сенімділігін дәлелдейді.

2- суреттегі картада модель бойынша беріктік қорының коэффициентінің таралуы көрсетілген. Минималды мән 15, бұл нормативтік талаптан ($n \geq 3$) 3–5 есе жоғары, яғни камераның сыртқы қысым жағдайында қауіпсіз пайдаланылатынын дәлелдейді.

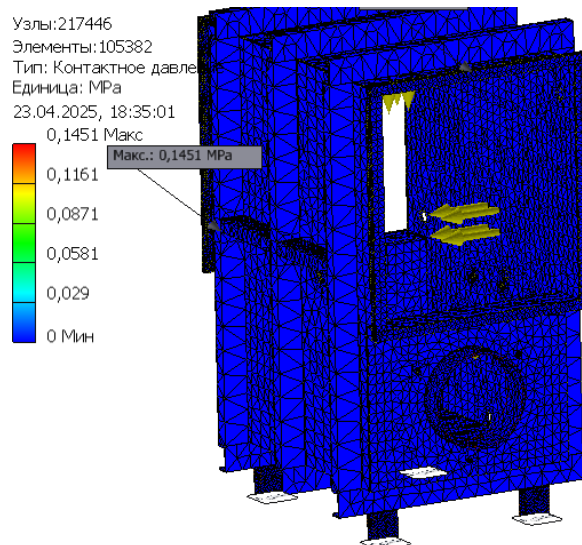
3-суретте конструкция элементтерінің түйісу аймақтарындағы жанасу қысымының таралуы берілген. Максималды мән 0,145 МПа, бұл вакуум жағдайындағы (сыртқы қысым — 0,1013 МПа) рұқсат етіледі.



Сурет 1 – Мизес бойынша кернеулер картасы



Сурет 2 – Беріктік қоры коэффициенті картасы



Сурет 3 – Максимальная контактная карта

Вакуумдық кептіру (сублимация) кезінде камера ішіндегі қысым атмосфералық деңгейден (0,1013 МПа) қалдық қысымға дейін (10–30 Па шамасында) төмендейді, яғни ішкі қысым өте төмен болады. Алайда, сонымен бірге атмосфералық сыртқы қысым камера қабырғаларына әсер етіп, сығылу мен иілу күштерін тудырады.

Inventor бағдарламасындағы талдау нәтижесінде алынған 0,145 МПа жанасу қысымы туралы:

Бұл мән — түйісетін беттер арасындағы жергілікті қысым (мысалы, фланец пен қақпақ арасындағы), ол вакуумдық қысыммен дәл сәйкес келмеуі мүмкін. Бұл көрсеткіш бөлшектердің қаттылығын, қосылу түрін және түйіндердегі кернеу концентрациясын ескереді. Мұндай қысым мәндері болттық немесе фланецтік қосылыстарда жиі кездеседі және оларда пайда болатын жергілікті серпімді сығылуды сипаттайды.

Зерттеу барысында конструкцияның беріктігі мен орнықтылығын бағалаудың екі түрлі әдісі қолданылды — аналитикалық және сандық.

1. Аналитикалық әдіс — қарапайым беріктік теориясына негізделген формула бойынша есептеу (мысалы, $\sigma = Pa/t$ өрнегі). Бұл — тек жеке элементті (қабықты) қарастыратын жуықталған әдіс. Мұндай тәсіл шамамен алынған нәтижелер береді және белгілі бір қорымен есептеледі, бірақ нақты жүктеме таралуын және қосымша элементтердің әсерін ескермейді.

2. Сандық әдіс (МКЭ-талдау) — Autodesk Inventor бағдарламасында соңғы элементтер әдісімен (FEM) орындалды. Бұл жағдайда талдау тек қабық қабырғаларын ғана емес, сонымен қатар барлық элементтерді: қатайтқыш қырларды, қаңқаны, фланецтерді,

дәнекерленген тігістерді, сондай-ақ нақты шекаралық шарттар мен бөлшектер арасындағы байланыстарды қамтиды. Бұл тәсіл нақты пайдалану жағдайларына барынша жақын кернеу мен деформацияның дәл таралуын алуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, аналитикалық әдісте бүкіл бет бойынша қысым біркелкі таралады деп қабылданады, ал Inventor бағдарламасында қысым нақты беттерге жеке қолданылады, сондықтан оның таралуы біркелкі болмауы мүмкін. Қаттылық элементтері (қатайтқыштар, швеллерлер) жүктемені қайта бөледі де, қабық қабырғаларындағы кернеуді төмендетеді.

Есептеу нәтижелерін салыстыру:

Сублиматор үшін формула бойынша кернеу 7,60 МПа, ал Inventor нәтижесі бойынша — 0,497 МПа;

Беріктік қорының коэффициенті формула бойынша 28,3, ал Inventor бойынша — кемінде 15;

Конденсатор үшін формула бойынша кернеу 2,85 МПа, ал Inventor нәтижесі шамамен 0,05 МПа (модельдеу шарттарына байланысты).

Біз 25 литр бие сүтін кептіруге арналған сублимациялық кептіргішті (лиофильді қондырғыны) жобалап жатырмыз. Процесс алдын ала $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурада мұздатудан басталып, кейін қысым мен температураны біртіндеп төмендету арқылы сублимациялық кептірумен жалғасады.

Бұл жағдайда конденсатордың мақсаты — ауаны немесе суды салқындату емес, бу ұстағыш (сублимат тұтқыш) қызметін атқару. Яғни, ол тоңазытқыш конденсатор, мұнда өнімнен шыққан су булары конденсацияланып, мұз түрінде тұнады.

Есептеу үшін келесі сипаттамалар қабылданды:

Конденсатор түрі — ішкі суық жылу алмастырғыш (тұтқыш), хладагент арқылы $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ және одан төмен температураға дейін салқындатылады.

Негізгі функциясы — вакуумдық насосқа жетпей тұрып су буларын ұстау.

Мұздың түзілуі — су булары конденсатордың салқын бетіне жиналып, қатып қалады, сондықтан оның беті жеткілікті суық әрі үлкен ауданға ие болуы тиіс.

Ылғал тұтқышқа арналған конденсаторды есептеу

Жылуөткізу формуласы:

$$Q = K * F * \Delta T \quad (10)$$

где Q – жылулық қуаты (Вт),

K – жылуөткізу коэффициенті ($\text{Вт}/\text{м}^2 * \text{K}$),

F – жылу алмасу беті (м^2)

ΔT - температуралық напор (K)

Бие сүті шамамен 89–91% су құрайды, сондықтан сүттегі су мөлшері:
 $m = 25 \text{ л} \times 0,9 = 22,5 \text{ л су} \Rightarrow 22,5 \text{ кг су}$.

Сублимация процесі кезінде судың дерлік барлығы буланып, конденсаторда ұсталып калуы тиіс:
бие сүті үшін — 22,5 кг су.

$$Q_{\text{сублимации}} = r \cdot m = 2.83 \cdot 10^6 \cdot 22.5 = 63.675 \cdot 10^6 \text{ Дж} \quad (11)$$

Мұндағы $r=2.83 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ — мұздың сублимацияның меншікті жылуы

Егер сублимация процесі 24 сағатта (86400 с) өтеді деп есептесек, онда бие сүті үшін конденсатордың жылулық жүктемесі келесідей болады:

$$Q = \frac{Q_{\text{сублимации}}}{t} = \frac{63.675 \cdot 10^6}{86400} \approx 737 \text{ Вт} \quad (12)$$

Яғни, конденсатор -60°C температурасында кемінде 737 Вт және 712 Вт жылуды бұрып әкетуі тиіс.

Салқындатушы орта ретінде -70°C температурадағы сұйық хладагент қолданылған деп есептейік.

Онда жылу алмасу бетінің ауданын келесідей есептейміз — бие сүті үшін:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta T} = \frac{737}{20 \cdot 10} = 3.7 \text{ м}^2 \quad (13)$$

Айталық, біз түтікті (спиральды) түрдегі ылғал тұтқышты қолданамыз, оның әрбір бөлігі жылу алмасу бетін ұлғайтатын қабыршақтармен (оребрение) жабдықталған.

Онда бие сүті үшін жылу алмасу шарты келесідей анықталады:

$$n = \frac{F}{F_1} = \frac{3.7}{0.5} = 7.4 \approx 8 \text{ секций} \quad (14)$$

Осылайша, бие және түйе сүті үшін жалпы ауданы шамамен 3,7 м² болатын 8 секция қажет болады. Олар –60...–70 °С температурада жұмыс істейді, жылулық жүктеме шамамен 740 Вт, температуралық напор — шамамен 10 К. Мұндай жағдайда вакуумдық камера ішінде қабыршақталған мыс түтіктерді қолдануға болады.

Кесте 1 – Конденсатор секцияларын қосу схемасы

Кептіру кезеңдері	Камерадағы қысым	Камерадағы қысым	Белсенді секциялар	Ескертулер
Кептіру	Атм. қысым	до –50 °С	Барлығы	Өнімді дайындау
Кептіру басталуы	0.1–0.5 мбар	–40 °С	4–6	Будың бастапқы ұсталуы
Белсенді кептіру	< 0.1 мбар	–35...–25 °С	Все (8)	Кептіру максималды
Қорытынды	стабилизация	–20 °С	2–4	Кептіруді азайту

Жылу алмасу бетінің есебі. Сублимация кезінде бөлінетін су буларын тиімді конденсациялау үшін жеткілікті жылу алмасу бетінің ауданын қамтамасыз ету қажет. Берілген мәліметтерге сүйенсек: 25 литр сүт құрамында шамамен 22 литр су (немесе 22 кг) бар. Судың сублимация жылуы 0 °С температурасында шамамен 2,5 МДж/кг құрайды.

Есептеуге арналған кіріс параметрлері келесідей::

Жылу алмасу бетінің ауданы: $F = 3.7 \text{ м}^2$

Ең төменгі жылулық жүктеме: $Q = 737 \text{ Вт}$

Жұмыс ортасы — терең вакуум жағдайындағы су буы (мысалы, 0.1–1 мбар), кейіннен ол мұзға фазалық ауысу (сублимация) процесінен өтеді.

Біз –60 °С температурасында 737 Вт жылуды бұрып әкету үшін 3,7 м² бет жеткілікті ме, соны меншікті жылу ағынын бағалау арқылы тексереміз:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{737}{3.7} \approx 199 \text{ Вт/м}^2 \quad (15)$$

Бұл жағдайда жылу ағынының тығыздығы өте төмен, бұл осы міндет үшін өте қолайлы, себебі сублимациялық конденсация төмен температура мен сұйық фазаның болмауы салдарынан аз жылу ағынында үлкен жылу алмасу ауданын қажет етеді.

Осылайша, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурасында 737 Вт жылуды бұрып әкету үшін $3,7\text{ м}^2$ жылу алмасу беті жеткілікті.

Мұндай жағдайда конденсатор рұқсат етілген жылулық режимдер шегінде, жылу артықтығы бойынша жақсы қорымен жұмыс істейді.

Конденсаторға арналған жыланша тәрізді түтік (змеевик) сызбасы. Түтіктің ұзындығы келесі формула бойынша есептеледі:

$$l = \frac{F}{\pi * d} \quad (16)$$

Жобалық есеп бойынша алынған мәліметтер:

Түрі: горизонталды спиральды жыланша (змеевик)

Түтіктің материалы: мыс, диаметрі $\varnothing 10\text{ мм}$

Түтіктің ұзындығы: шамамен 95 метр

Бетінің ауданы: шамамен $3,7\text{ м}^2$

Жұмыс температурасы: $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Орнатылуы: төртбұрышты вакуумдық камераның ішінде

Компоненттері:

1. Мыс жыланша (змеевик) — көлденең бағытта спираль түрінде төселген. Жыланша камераның ортасына ілініп немесе қабырғаларына тығыз бекітіліп орнатылуы мүмкін, бұл жылу алмасудың біркелкілігін қамтамасыз етеді.
2. Хладагенттің кірісі — спиральдің бір ұшында орналасқан (мысалы, төменгі жағында).
3. Хладагенттің шығысы — спиральдің екінші ұшында (мысалы, жоғарғы жағында).
4. Төртбұрышты вакуумдық камера — тікбұрышты пішінді, сыртынан жылулық оқшаулағыш қабатпен қапталған, бұл сыртқы жылу ағынынан қорғауды қамтамасыз етеді.
5. Жыланшаны бекіткіштер — камера ортасында түтікті іліп ұстауға арналған тіректер.
6. Вакуумдық штуцерлер — камера ішіндегі қажетті қысымды ұстап тұру үшін қолданылады.

Конденсатор орнатылатын камераларда температураның қатаң бақылауы қамтамасыз етілуі тиіс. Температура хладагенттің айналымы арқылы тұрақты

деңгейде ұсталып отырады. Сондай-ақ вакуумдық камера жылу оқшаулағышпен қоршалуы қажет, бұл тұрақты температуралық режимді қамтамасыз етіп, жылу жоғалтуды болдырмайды.

Конденсатор сыйымдылығын есептеу.

Берілген параметрлер мен жұмыс жағдайларына сүйене отырып, конденсатордың қажетті сыйымдылығын анықтау үшін есептеу жүргіземіз. Бұл жүйеде қанша мөлшерде хладагент болатынын анықтау үшін маңызды.

Келесі шамаларды аламыз:

– түтіктің ішкі диаметрі: $d = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$

– түтіктің ұзындығы: $L = 95 \text{ м}$

Геометриялық сыйымдылықты (түтіктің ішкі көлемін) келесі формула бойынша есептейміз:

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2} \right)^2 * L \quad (17)$$

Онда аламыз:

$$V = \pi * \left(\frac{0,008}{2} \right)^2 * 95 = 3,1416 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 95 = 0,004774 \text{ м}^3 \quad (15)$$

Литрде

$$V = 0,004774 \text{ м}^3 * 1000 = 4,77 \text{ литр} \quad (19)$$

Егер түтіктің ішкі диаметрін мынадай деп алсақ $d=9 \text{ мм}=0,009 \text{ м}$, то

$$V = 0.006042 \text{ м}^3 * 1000 = 4.77 \text{ литр} \quad (20)$$

Жылуды әкетуді бағалау.

Конденсатордан жылу қалай әкелілетінін және оны салқындату әдістерін (мысалы, желдеткіштерді, радиаторларды және т.б. қолдану) қарастырайық.

Бастапқыда келесі шарттарды қабылдаймыз:

- Конденсатор температурасы: $-60 \text{ }^\circ\text{C}$
- Жылу бойынша қысым: $\approx 737 \text{ Вт}$

– Орта: вакуум, яғни — камера ішінде қоршаған ауамен конвекциялық жылу алмасу болмайды.

Негізгі жылу алмасу салқындатқыш түтік контуры арқылы жүзеге асады. Бұл жағдайда бу (вакуум) конденсатор түтігіне жанасқанда, алдымен су буының конденсациясы арқылы жылу беріледі, содан кейін жылу мыс түтіктің қабырғасы арқылы өтеді және соңында сыртқы салқындату жүйесіне (көбінесе — хладагент немесе басқа салқындатқыш сұйықтық) шығарылады.

Сондықтан ең сенімді және дәл салқындату әдісі — компрессормен механикалық салқындату болып табылады. Бұл жүйеде $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ температураны ұстап тұратын буландырғышыбар тоңазытқыш агрегат қолданылады. Хладагент ретінде R404A, R508B немесе $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ және одан төмен температураларға жетуге қабілетті басқа түрлері пайдаланылады.

Сонымен қатар термосифондық немесе криопанельдік салқындату әдісі де бар, ол азот немесе CO_2 арқылы жүзеге асады, бірақ мұндай жүйелер сұйық азотты немесе құрғақ мұзды қажет етеді, сондықтан олар тәжірибелік қондырғыларға көбірек жарайды.

Мәжбүрлі ауа салқындату (сыртқы қабық пен желдеткіш арқылы) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан төмен температурада тиімсіз, себебі вакуум жағдайында ауа арқылы жылу алмасу жүрмейді. Вакуумдық камера ішінде ауа радиаторлары мен желдеткіштерді қолдану мүмкін емес, өйткені ауа жылуды камерадан сыртқа шығара алмайды.

Сондықтан мыс конденсаторына фитингтер арқылы қосылған, жабық контурлы хладагент жүйесін қолданамыз, мұнда буландырғыш температурасы $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан төмен болады. Жыланша маңында температура датчиктерін орнату және сыртқы құбырды жылу оқшаулағышпен қаптау қажет — бұл салқынның жоғалуын болдырмауға мүмкіндік береді.

$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурасында тиімді жылуды әкету тек тоңазытқыш контур арқылы мүмкін.

Желдеткіштер мен радиаторлар вакуумда пайдасыз, мұндай жағдайда тек компрессорлық салқындатқыш немесе криогендік жүйе тиімді жұмыс істей алады.

Суыту графигін жасау.

Конденсатордың жұмыс уақыты мен суыту кезеңін ескере отырып, оның сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін жұмысқа қосылу және суыту уақытының графигін жасаймыз.

$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурада тұрақты жұмыс істейтін конденсатордың сенімділігі үшін қосу/өшіру циклдерін, салқындату уақытын және буланып жатқан ылғалдан түсетін жүктемені есепке алу қажет.

Төменде 737 Вт жүктеме және сублимация уақыты негізінде конденсатордың қосылу-өшуінің типтік графигі көрсетіледі.

Кесте 2– Конденсаторды қосу

Кезең	Уақыт(мин)	Әрекет	Мақсат
Алдын ала салқындату	0–30 мин	Салқындату жүйесін қосу	Кептіру басталғанға дейін –60 °C температураға жету
Тұрақты жұмыс	30–180 мин	Температураны –60 ± 3 °C деңгейінде ұстау	Буландырғыштан су буын жинау
Тексеру паузасы	180–190 мин	Қажет болған жағдайда компрессорды қосу	Төмен жүктеме кезінде температураны ұстап тұру
Циклді бітуі	190–210 мин	Салқындатуды біртіндеп өшіру	Энергия тұтынуды азайту
Қайта цикл	210+ мин	Температура немесе уақыт датчигі бойынша қайта қосу	Жаңа цикл немесе қосымша кептіру

Басқару принциптері:

Температура бойынша автоматтандыру: температура датчигі жыланшаға (змеевикке) орнатылады — егер температура –58 °C-тан жоғары болса, салқындату қосылады, ал –60 °C-қа жеткенде өшіріледі.

Қысым бойынша автоматтандыру: сублимация аяқталған кезде камера ішіндегі қысым күрт төмендейді — бұл салқындату циклін аяқтау сигналы ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Таймерлік цикл: қарапайым жүйелерде қолданылады — салқындату алдын ала берілген уақыт аралықтарында қосылып және өшіріліп отырады.

4 сағаттық цикл мысалы:

- 30 мин — алдын ала салқындату,
- 2 сағат 30 мин — негізгі кептіру кезеңі,
- 10 мин — бақылау кезеңі,
- 20 мин — біртіндеп өшіру,
- үзіліс / қайта қосу — қажет болған жағдайда.

Автоматтық басқару үшін камераға температура мен қысым датчиктерін орнату, сондай-ақ уақыт контроллері немесе PID-регуляторды пайдалану қажет.

Сонымен қатар, түтіктердің қатып қалуын болдырмау үшін артық салқындатудан қорғау жүйесі қарастырылуы тиіс.

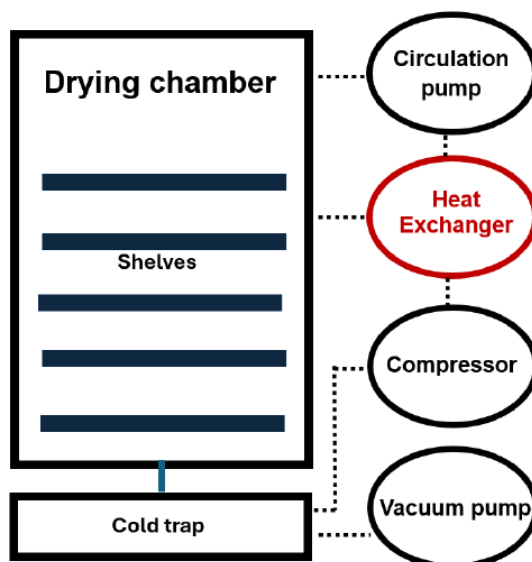
Сондай-ақ 50 литр бие және түйе сүтін сублимациялық кептіруге арналған конденсаторды есептеуге болады.

Сублимациялық вакуумдық кептіру — бұл судың үштік нүктесінен төмен температурада жүретін дегидратация процесі.

Процесс өнімді төмен температурада мұздатудан басталады, содан кейін терең вакуум әсері қолданылады.

Нәтижесінде өнімдегі мұз тікелей бу фазасына өтеді, яғни сұйық фазаны толық айналып өтеді [50-51].

Бұл әдіс дәрі-дәрмектерді, фармацевтикалық препараттарды және тез бұзылатын өнімдерді кептіруде кеңінен қолданылады. Процесс қымбат болғанымен, оның инженерлік маңызы өте жоғары. Жоба аясында әзірленген вакуумдық-сублимациялық кептірудің нақты сұлбасы және технологиялық процесті модельдеу жүйесі 16-суретте көрсетілген.



Сурет 4 – Вакуумдық-сублимациялық кептірудің нақты сұлбасы

Вакуумдық-сублимациялық кептіру камерасы тікбұрышты пішінде жасалған және оның ішінде өлшемі 505×905×18 мм болатын 7 сөре орналасқан. Бұл сөрелерде температураны реттеу үшін силиконды сұйықтық бар. Сонымен қатар, олардың үстіне өлшемі 500×450×35 мм болатын 14 табақша орнатылған. Бұл табақшаларға бие мен түйе сүті сияқты сұйық өнімдер құйылады.

Вакуумдық-сублимациялық кептіру процесі үш кезеңнен тұрады:

Бірінші кезеңде сұйық өнімдер мұздатылады, бұл кезде сөрелердегі силиконды сұйықтық мұздату процесін қамтамасыз етеді.

Екінші кезеңде вакуум түзіледі, ол сублимация процесін бастайды, яғни қатты күйдегі заттар тікелей буға айналып, камерадан шығарылады.

Үшінші кезеңде қалған ылғалды зат кептіріледі, бұл үшін сөрелер арқылы жылу беріледі.

Математикалық модель процестің барлық үш кезеңіндегі жылу мен масса алмасу динамикасын сипаттауы тиіс — яғни мұздату, бастапқы кептіру (сублимация) және екіншілік кептіру (десорбция) сатыларында.

Күрделі геометрия мен қолданылатын материалдардың (температураны реттейтін силиконды сұйықтық, сондай-ақ бие мен түйе сүті сияқты сұйық

өнімдер) ерекшелігін ескере отырып, модельдің жалпыланған құрылымы жасалып, негізгі физикалық құбылыстарға баса назар аударылады.

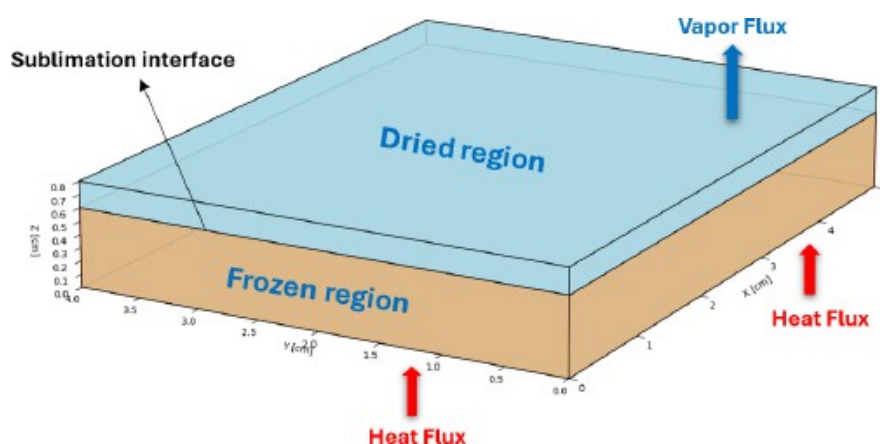
Симметрияны және есептеу уақытын азайту мақсатында есептік аймақтың өлшемі $5 \times 4 \times 0,8$ см деп алынады (17-суретте көрсетілгендей).

Кептіру процесі есептік кеңістікті екі аймаққа бөледі:

- жоғарғы аймақ — сусызданған қабат,
- төменгі аймақ — мұздатылған қабат.

Сублимация барысында осы екі аймақтың шекарасы төмен қарай жылжиды, нәтижесінде құрғақ аймақ кеңейе түседі.

Бастапқы кептіру фазасы сублимация фронты табақшаның түбіне жеткенде аяқталады.



Сурет 5 – Қызы аймағы

Негізгі теңдеулер.

Түйе сүтін вакуумдық сублимациялық кептіру процесін модельдейтін есептік модель кеуекті материалдағы жылу мен масса қозғалысының өзара байланысын және оның күйінің өзгерісін сипаттайды.

Бұл модель жүйені екі негізгі аймаққа бөледі:

- мұздатылған аймақ, ол мұз бен қатты негіздік материалдан тұрады;
- құрғақ аймақ, ол су буы мен қатты негіздік заттан тұрады.

Мұз бен бу шекарасында мұздың тікелей буға айналуы (сублимациясы) жүреді, нәтижесінде құрғақ қабат кеңейіп, ал мұздатылған қабат тарылып қалады

Жылу берілуі.

Кеуекті ортадағы температура өрісі $T(x, y, z, t)$ энергияның сақталу теңдеуімен реттеледі.

Мұздатылған өнімнің ішіндегі жылу берілу процесін келесі түрде сипаттауға болады [36]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \Delta H \frac{\partial \rho_l S}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in (0, l) \times [0, T_{final}], \quad (21)$$

мұндағы ρ - тығыздық, c_p - меншікті жылу сыйымдылық, T - температура, t - уақыт, k жылу өткізгіштік, H - сублимацияның жасырын жылуы, ε - кеуектілік, ρ_I - мұз тығыздығы, S - мұздың қанығу дәрежесі..

$$\frac{\partial s(1-S)\rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v u) - \nabla \cdot \left(\frac{s(1-S)}{\tau} D_k \nabla \rho_v \right) = m_g, \quad (22)$$

мұндағы ρ_v — су буының тығыздығы, u — Дарси жылдамдығы, ол (20) формула сәйкес есептеледі, D_k — Кнудсен массалық диффузия коэффициенті.

$$u = - \frac{K_d}{\mu_v} \nabla p_v, \quad (23)$$

мұндағы K_d - Дарси өтімділігі, μ_v динамикалық тұтқырлықты білдіреді, а p_v - су буының тығыздығы. Оны су буының тығыздығымен идеал газ заңы арқылы байланыстыруға болады.

Бу қысымын (27) теңдеуінен алынған тығыздық мәні бойынша келесідей есептеуге болады:

$$p_v = \frac{\rho_v R T}{M_v}, \quad (24)$$

мұндағы R — әмбебап газ тұрақтысы, M_v — молекулярлық масса.

Бастапқы және шекаралық шарттар.

Бастапқыда кептірілген аймақтағы қысым кептіру камерасындағы қысымға тең деп қабылданады.

Сонымен қатар, үлгі материалы біртекті және изотермиялық деп есептеледі — яғни сублимациялық кептіру процесінің басында құрғақ және мұздатылған аймақтарда температура біркелкі.

$$T|_{t=0} = T_0, p|_{t=0} = p_c, \quad (25)$$

мұндағы p_c Камерадағы қысымды білдіреді (Паскальмен өлшенеді), ал T_0 Сублимациялық кептіру процесінің басындағы үлгі материалының бастапқы температурасын (Кельвинмен) білдіреді

Массаның берілуіне (қысым мен бу ағыны бойынша) қойылатын шекаралық шарттар келесідей: жоғарғы бетінде:

$$p|_{z=l_z} = p_c. \quad (26)$$

Бүйір бетінде:

$$p|_{\omega_x} = p_c. \quad (27)$$

Сублимация шекарасында су буы түзілетіндіктен, осы шекарада бу ағынына қатысты шекаралық шарт орнатылады:

$$-\rho_v \frac{k_m}{\mu_v} \nabla p|_{H(t)} = \frac{\partial H(t)}{\partial t} (\rho_f - \rho_d), \quad (28)$$

Мұндағы $H(t)$ Сублимация шекарасының орнын білдіреді. Бұл зерттеуде сублимация z бағыты бойынша жүреді.

Құрғақ аймақтың жылу берілуіне қойылатын шекаралық шарттар:

$$\frac{\partial T_d}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (29)$$

$$-k_d \frac{\partial T_d}{\partial x} \Big|_{x=l_x} = q_{lateral} = \sigma \epsilon (T_{amp}^4 - T_d^4), \quad (30)$$

$$-k_d \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{bottom} = h_s (T_s - T_d), \quad (31)$$

$$-k_d \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=l_z} = q_{top} = \sigma \epsilon (T_{amp}^4 - T_d^4). \quad (32)$$

Мүздатылған аймақтың жылу берілуіне қойылатын шекаралық шарттар:

$$\left. \frac{\partial T_f}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (33)$$

$$-k_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{bottom} = h_s (T_s - T_d). \quad (34)$$

Сублимация шекарасындағы жылу берілуінің шекаралық шарттары:

$$T_d|_{H(t)} = T_f|_{H(t)} = T_{sub}, \quad (35)$$

$$k_f \left. \frac{\nabla T}{\partial z} \right|_{H(t)} - k_d \left. \frac{\nabla T}{\partial z} \right|_{H(t)} = T_f|_{H(t)} = \frac{\partial H(t)}{\partial t} (\rho_f - \rho_d) \Delta H_s, \quad (36)$$

Мұндағы T_{sub} - Сублимация шекарасының температурасы (Кельвинмен).

Параметрлер мен жылу-физикалық қасиеттер.

Әзірге әдебиеттерде бие сүтінің жылу өткізгіштігі, тығыздығы және меншікті жылу сыйымдылығы туралы нақты деректер жоқ.

Сондықтан бие сүтінің жылу өткізгіштігін, тығыздығын және меншікті жылу сыйымдылығын оның құрамына сүйене отырып есептеуге болады.

Бие сүтінің тығыздығын ρ_m Оның құрамдас бөліктерінің тығыздықтарының салмақтық орташа мәні ретінде бағалауға болады. Жалпы формуласы:

$$\rho_m = \sum w_i \cdot \rho_i, \quad (37)$$

мұндағы: w_i —і компонентінің массалық үлесі (мысалы, су, май, ақуыз), ρ_i — і компонентінің тығыздығы.

Бие сүтінің меншікті жылу сыйымдылығын ($c_{p,m}$) оның құрамдас бөліктерінің меншікті жылу сыйымдылықтарының салмақтық орташа мәні ретінде де бағалауға болады:

$$c_{p,m} = \sum w_i \cdot c_{p,i}, \quad (38)$$

мұндағы: $c_{p,i}$ – i компонентінің меншікті жылу сыйымдылығы

Бие сүтінің жылу өткізгіштігі (k_m) — оның құрамында су, май, ақуыз, лактоза және күл бар — салмақтық орташа мән әдісі бойынша есептеледі.

Көлем бойынша орташа тығыздық пен меншікті жылу сыйымдылығы келесідей өрнектеледі:

$$(\rho c_p) = (1 - \varepsilon)\rho_m c_{p,m} + \varepsilon \rho_I c_{p,I} + \varepsilon(1 - S)\rho_v c_{p,v} \quad (39)$$

Көлем бойынша орташа жылу өткізгіштік, кеуекті ортадағы параллель жылуөткізгіштік моделіне негізделі отырып, келесідей анықталады:

$$k = (1 - \varepsilon)k_m + \varepsilon S k_I + \varepsilon(1 - S)k_v \quad (40)$$

$S = 0$ болған кезде кептірілген өнімнің соңғы қасиеттері анықталады [40].

1-кестеде сандық модельдеу барысында пайдаланылған параметрлер тізімі келтірілген.

Оларға мыналар жатады:

- жылу өткізгіштік (k),
- тығыздық (ρ),
- меншікті жылу сыйымдылығы (c_p) — құрғақ матрица үшін (m индексі), мұз үшін (I), және су буы үшін (v).

Кеуектілік ε матрицадағы кеуектер көлемінің үлесін анықтайды.

Будың тығыздығы ρ_v идеал газ күй теңдеуі арқылы, будың молекулалық массасы M_v мен әмбебап газ тұрақтысы R пайдаланыла отырып есептеледі.

Құрғақ қабаттың өтімділігі K_d қысымға тәуелді эмпирикалық қатынас арқылы модельденеді.

Будың динамикалық тұтқырлығы μ_v температураға тәуелді функция түрінде өрнектеледі.

Кесте 3- Сандық модельдеу параметрлері

Parameter	Value	Unit	Source
ε	0.705	-	[25]
ρ_m	1399.3	kg/m ³	
$c_{p,m}$	1610.7	k· J/kg · K	
k_m	0.2757	W/m · K	
ρ_I	913	kg/m ³	[26]
$c_{p,I}$	2.090	kJ/kg · K	[26]
k_I	2.22	W/m · K	[26]
ρ_v	$\frac{pM_v}{RT_{dry}}$	kg/m ³	[18]
$c_{p,v}$	1.866	kJ/kg · K	[26]
k_v	0.0022	W/m · K	[26]
μ_v	$0.11(T/273)^{1.5}/(T + 961)$	kg/m · s	[26]
M_v	0.018	kg/mol	[17]
R	8.314	J/mol · K	[17]
K_d	$(1 - S) \times 10^{-18}(1 + 6.68 \times 10^5/p)$	m ²	[27]
ΔH_{sub}	2821	kJ/kg	[26]

Сублимациялық кептіру процесін модельдеу үшін COMSOL Multiphysics 6.3 платформасында жасалған үшөлшемді есептеу моделі қолданылды. Бұл үшөлшемді компьютерлік модель — жобаның аясында әзірленген нақты сызба деректерін ескере отырып, Python сандық ортасында жетілдірілген математикалық модельді шешуге негізделген, яғни вакуумдық сублимациялық кептіру процесіндегі масса және жылу алмасу құбылыстарын сипаттайды.

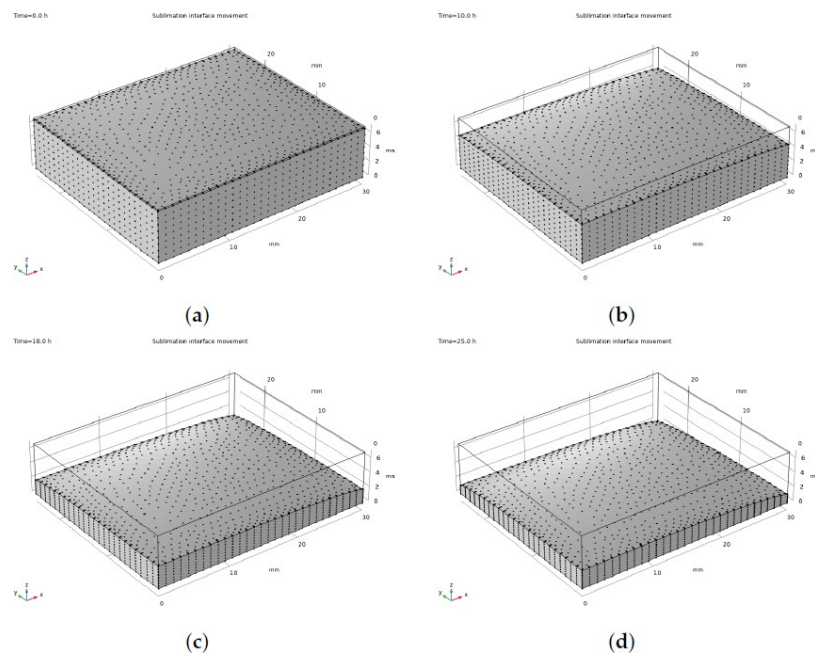
Модельде кеуекті құрылымдағы жылу мен масса тасымалының күрделі өзара әрекетін есепке алу үшін ақырлы элементтер әдісі (FEM) пайдаланылды, әсіресе мұздатылған сүттің вакуумдық сублимациялық кептіруі кезінде. Бұл модель «Кеуекті ортадағы жылу алмасу» және «Дарси заңы» модульдерін біріктіру арқылы мұздатылған сүт матрицасындағы жылуөткізгіштікті және бу қозғалысын дәл сипаттай алды.

Түйе сүтіндегі жылу және масса алмасу процестерін модельдеу кезінде белгілі бір факторлар тобы таңдалды. Бұл бастапқы параметрлер мыналарды қамтыды:

- үлгінің қалыңдығы — 8 мм,
- полканың температурасы — -20 °C,
- камерадағы төмендетілген қысым — 105 Па.

Осы стандартты жағдайларда сублимация фронтының қозғалысы айқын заңдылыққа ие болатыны анықталды (6-сурет).

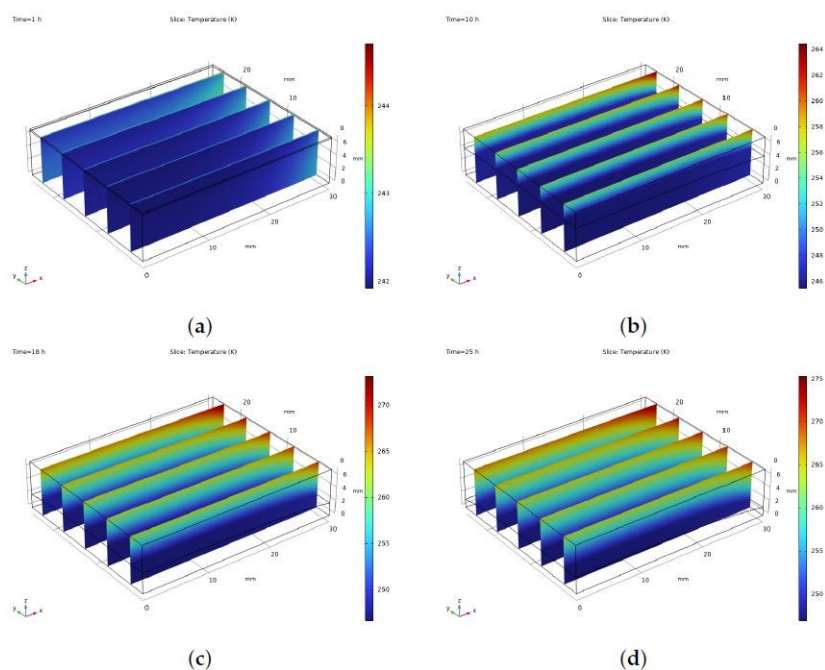
Сұр аймақ мұздатылған бөлікті бейнелейді және ол біртіндеп азайып, үлгінің түбіне қарай шегінеді, ал құрғақ қабаттың қалыңдығы артады. Кептірудің бастапқы кезеңдерінде бу үстіңгі қабаттан оңай буланып шығады, нәтижесінде құрғақ аймақ тез ұлғаяды. Алайда кептіру жалғаса келе, сублимация нүктесі мен беттің арасындағы арақашықтық ұлғайып, бу қозғалысы баяулайды, сәйкесінше құрғақ және мұзды аймақ арасындағы шекара қозғалысы да баяулайды. Нәтижесінде үлгінің түбінде қалған мұз кристалдарын сублимациялау өте қиынға соғады және оларды толық жою үшін айтарлықтай көп энергия жұмсау қажет болады.



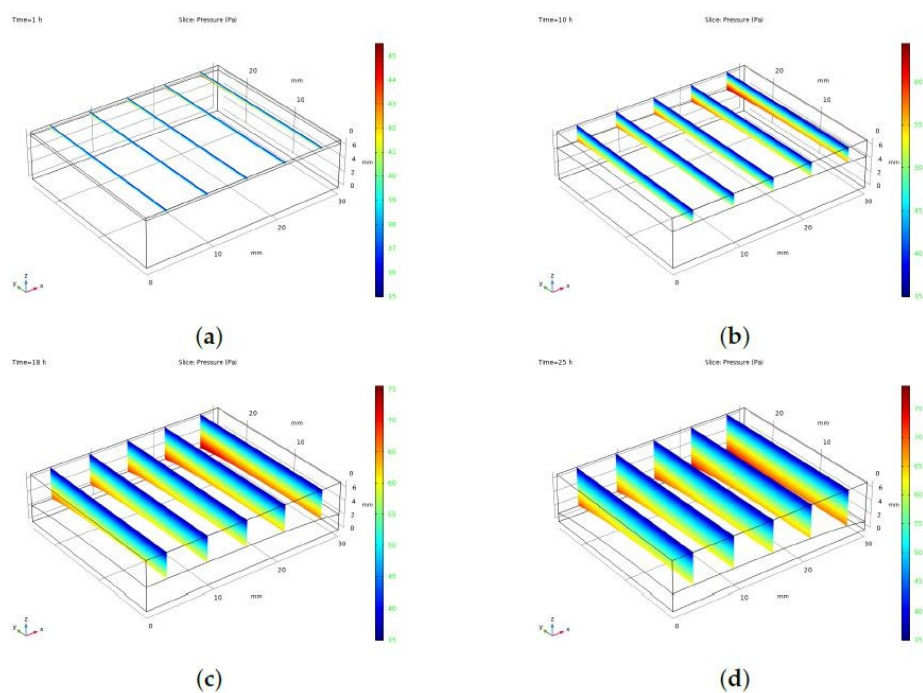
Сурет 6 – Кептіру процесі барысында сублимация шекарасының уақыт бойынша өзгерісі келесі сәттерде: (a) 0,5 с, (b) 5 с, (c) 18 с и (d) 25 с.

Жылу және масса алмасуын талдау. Бұл зерттеуде кептіру камерасындағы температураның ауытқулары мен жылу алмасу заңдылықтары қарастырылды, бұл модельдеу арқылы кептірудің бастапқы кезеңінде температура айырмашылығының айтарлықтай екенін анықтауға мүмкіндік берді. Мұндай айырмашылықтар — мұздың буға айналуына қажетті жоғары энергияның тікелей нәтижесі. 5-суретте түйе сүтінің үлгілеріндегі температураның сублимациялық кептіру процесі кезінде қалай өзгередіні көрсетілген. Кептіру сәресінен таралатын жылу мұздатылған үлгі бөлігіне еніп, ақыр соңында мұздың тікелей буға айналатын нүктесіне жетеді, бұл кептіру процесінің жүруіне ықпал етеді.

Мұздатылған және кептірілген аймақтар жылуға әртүрлі әсер етеді. Мұздатылған бөлік, өзінің жоғары жылуөткізгіштігіне және жылу жинақтау қабілетіне байланысты, жылу әсерін көбірек сезінеді.



Сурет 7 – Кептіру процесінің әртүрлі кезеңдеріндегі жылу ағынының таралуы



Сурет 8 – Сублимациялық кептіру процесі кезіндегі бу қысымының әртүрлі уақыт аралықтарындағы таралуы: (a) 1 с, (b) 10 с, (c) 18 с и (d) 25 с.

7 және 8-суреттерде келтірілген графиктер үш өлшемді жылуөткізгіштік теңдеуінің сандық шешімі арқылы алынған камера ішіндегі жылу көзімен таралатын жылудың уақыт бойынша бөлінуін тиімді түрде көрсетеді.

Үш өлшемді кескіндер әртүрлі уақыт аралығындағы жылу таралуының егжей-тегжейлі көрінісін береді және жылу процесінің динамикалық табиғатын айқын көрсетеді.

COMSOL Multiphysics ортасында нақты сызба деректерін ескере отырып, вакуумдық сублимациялық кептіру кезіндегі масса және жылу алмасу процесінің жетілдірілген математикалық моделінің сандық нәтижелерін талдау

Бұл бөлімде түйе сүтін вакуумдық сублимациялық кептіру кезіндегі жылу-массалық алмасуға үлгінің қалыңдығы мен камера қысымының әсерін түсінуге бағытталған кешенді параметрлік талдау келтірілген.

Алдымен үлгінің қалыңдығының ылғалдың шығарылу тиімділігіне әсері зерттелді. Үлгілердің қалыңдығы 4 мм, 6 мм және 8 мм болып алынып, бірдей шарттарда сынақ жүргізілді: сөре температурасы -20°C және камера қысымы 105 Па.

Нәтижелер анық кері байланыс көрсетеді: жұқа үлгілер әлдеқайда жылдам кебеді. Мысалы, 4 мм қалың үлгі (қызғылт сызық) шамамен 10 сағатта ылғалдың 95 %-ын шығарады, ал 6 мм үлгіге (қызыл сызық) шамамен 15 сағат, 8 мм үлгіге (жасыл сызық) шамамен 20 сағат қажет болады, тек 90 % ылғал кетіріледі.

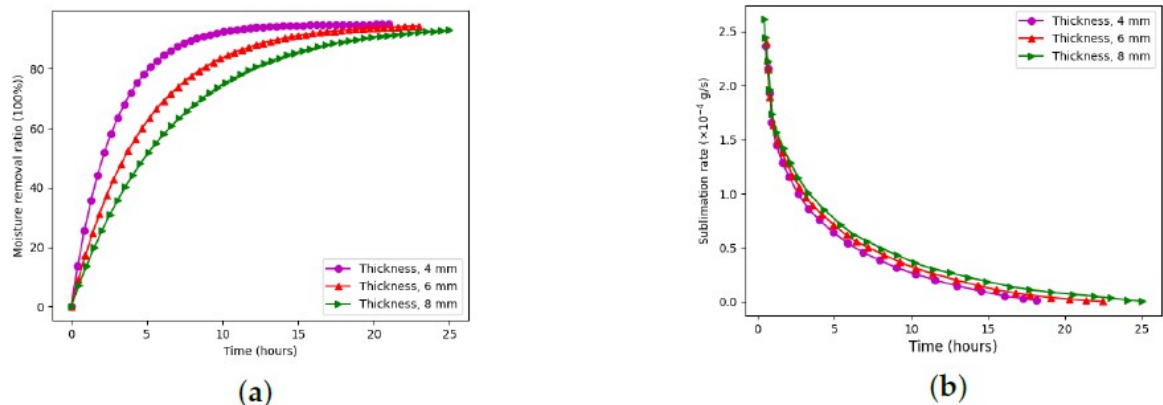
Бұл құбылыс бу диффузиясының жолы жұқа үлгілерде қысқалау болуымен түсіндіріледі, нәтижесінде ылғалдың булануы жылдамырақ жүреді.

8б-суретте сәйкес сублимация жылдамдығы көрсетілген.

Қызығы, қалың үлгілер бастапқыда судың көбірек болуына және бу қысымының градиенті жоғары болғанына байланысты жоғары бастапқы сублимация жылдамдығын көрсетеді.

Алайда бұл артықшылық ұзақ кептіру уақыты мен жоғары энергия шығынымен теңестіріледі.

Сондықтан жұқа үлгілер энергия тиімділігі тұрғысынан анағұрлым тартымды болып табылады.



Сурет 9 – Үлгі қалыңдығының вакуумдық сублимациялық кептіру процесі кезіндегі (а) ылғалдың шығу дәрежесіне және (б) сублимация жылдамдығына әсері.

Біз сондай-ақ камерадағы қысымның кептіру процесіне әсерін зерттедік.

9а-суретте көрсетілгендей, камерадағы қысымның 115 Па-дан 95 Па-ға дейін төмендеуі кептірудің жалпы уақытын шамамен 30 минутқа қысқартады.

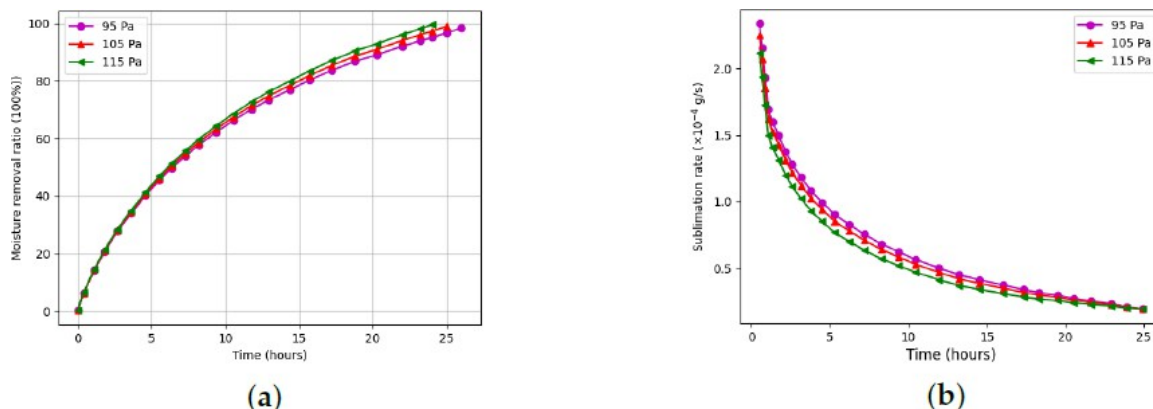
Бұл жақсару, негізінен, бу диффузиясының жақсаруымен және төмен қысымда сублимация температурасының төмендеуімен байланысты.

Алайда, қысымды азайту кезінде вакуумдық жүйенің жұмысы энергия шығынын арттыратынын ескеру қажет.

8-суретте сублимация жылдамдығының қысым төмендеген кезде бастапқыда өсетіні көрсетілген, әсіресе процестің ерте кезеңдерінде.

Алайда шамамен бес сағаттан кейін бұл артықшылық азаяды, себебі бу қысымының градиенті тұрақтанып, сублимация жылдамдығы барлық жағдайларда теңеседі.

Бұл нәтижелер қысымды төмендетудің артықшылығы кептірудің бастапқы сатысында ең айқын байқалатынын дәлелдейді.



Сурет 10 – Камерадағы қысымның (а) ылғалдың шығу дәрежесіне және (б) сублимация жылдамдығына әсері.

Бұл нәтижелер камерадағы қысым мен үлгінің қалыңдығы кептіру тиімділігін арттыру үшін маңызды басқарылатын параметрлер екенін көрсетеді. Халықаралық стандарттарға сәйкес келу үшін (соңғы ылғал мөлшері 4%-дан төмен болуы тиіс), үлгінің қалыңдығын 8 мм-ден аз деңгейде ұстау ұсынылады. Сонымен қатар, камерадағы қысымның төмендеуі кептіру процесін жеделдеткенімен, энергия үнемдеу тұрғысынан оның тиімділігі вакуум жүйесінің энергия шығынымен теңестірілуі керек.

Алдын ала өңдеу жүргізілмегендіктен, май түйіршіктерінің, ақуыз агрегаттарының және микроорганизмдердің таралуындағы айырмашылықтар жергілікті жылу мен масса алмасу жылдамдығына әсер етуі мүмкін. Бұл фактор кептіру кинетикасының біркелкі болмауына және жарықшақтар сияқты құрылымдық өзгерістердің пайда болуына ықпал етуі мүмкін.

Өнеркәсіптік тұрғыда кептіру өнімділігін арттыру үшін камера ішінде үлкен науалар немесе параллель науалар жүйесін пайдалану арқылы процесті масштабтауға болады.

Алайда өте жұқа қабаттарды қолдану энергия тиімділігі төмен болуы мүмкін, себебі ол салыстырмалы түрде жоғары қосымша энергия шығынын қажет етеді.

Болашақ зерттеулер болжамды басқару алгоритмдерін, энергия тұтынуды бақылау және процесті оңтайландыру жүйелерін біріктіруге бағытталады, бұл сублимациялық кептірудің экологиялық тұрақтылығын арттырып, көміртек ізін азайтады.

Жұқа үлгілер кептіру жылдамдығын және энергия тиімділігін едәуір арттырғанымен, бір наудағы өнім көлемі азаяды. Өнеркәсіптік масштабта бұл өндірістік мақсаттарға жету үшін кептіру циклдарының жиілеуін талап етуі мүмкін, нәтижесінде операциялық және шығындары артады.

Сондықтан энергия тиімділігін барынша арттыру мен өндірістік өнімділікті сақтау арасында тепе-теңдік орнату қажет.

Бұрын қолданылған екі өлшемді модельдерден айырмашылығы, біздің үш өлшемді модельдеуіміз параметрлік және энергия тұрғысынан әлдеқайда толық талдау береді.

Атап айтқанда, үлгі қалыңдығының 8 мм-ден 4 мм-ге дейін азаюы SEC көрсеткішін 58%-ға төмендеткенін байқадық және энергия тиімділігі мен өнімділік арасындағы тепе-теңдік мәселесін қарастырдық — бұл аспект алдыңғы зерттеулерде қарастырылмаған еді.

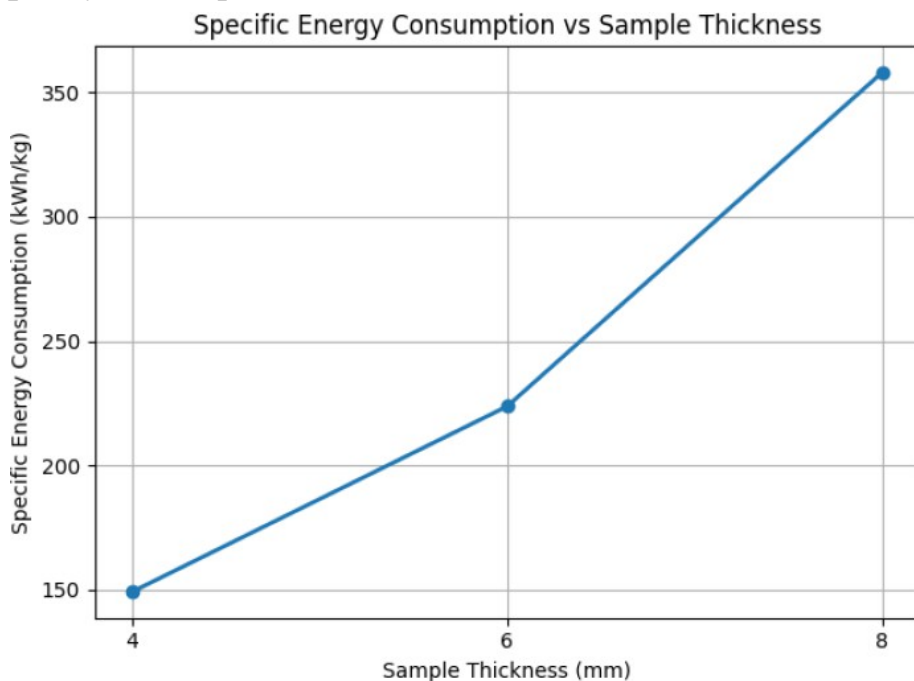
Болашақ зерттеулер микроқұрылымдық сипаттаманы қамтуы тиіс, мысалы сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) немесе микро-КТ арқылы талдау, бұл кеуектер морфологиясын сандық бағалауға және олардың жылу мен масса алмасу процестеріне әсерін нақты анықтауға мүмкіндік береді.

Энергия тиімділігін талдау

Энергия тиімділігін бағалау — вакуумдық сублимациялық кептірудің тұрақтылығы мен масштабталуын бағалауда шешуші фактор. Осы зерттеуде түйе сүтін кептірудің меншікті энергия тұтынуы (МЭТ) жабдықтың электр қуатына және алынған судың мөлшеріне сүйене отырып есептелді.

Біздің тәжірибелерде пайдаланылған вакуумдық сублимациялық кептіргіштің номиналды қуаты — 14,5 кВт.

Бір партия үшін кептірудің орташа ұзақтығы 24 сағатқа дейін болғанда, жалпы энергия тұтыну мөлшері:



Сурет 11 – Үлгі қалыңдығына байланысты меншікті энергия тұтынуы (МЭТ)

Жұқа үлгілер тезірек кебеді және алынған су массасының бірлігіне аз энергия жұмсайды, бұл энергия тиімді кептіру үшін геометриялық оңтайландырудың маңыздылығын көрсетеді.

Үлгі қалыңдығына байланысты кептіру энергиясының көрсеткіштері бойынша жиынтық деректер 5-кестеде келтірілген.

Кесте 4- Үлгі қалыңдығының кептіру уақыты мен энергия тұтынуға әсері

Thickness (mm)	Drying Time (h)	Energy (kWh)	SEC (kWh/kg)
4	10	145.0	149
6	15	217.5	224
8	24	348.0	358

Бұл нәтижелер үлгі қалыңдығының тек кептіру кинетикасында ғана емес, сонымен қатар жалпы энергия тиімділігінде де шешуші фактор екенін көрсетеді.

Қалыңдығы 4 мм үлгілер ең төмен меншікті энергия тұтынуды (МЭТ) қамтамасыз еткенімен, бір науада өңделетін өнім көлемі азаяды, бұл сол нәтижеге жету үшін көбірек партия қажет болатынын білдіреді.

Энергия үнемдеу мен өндірістік өнімділік арасындағы бұл тепе-теңдік өнеркәсіптік масштабтау үшін маңызды мәселе болып табылады.

Сондықтан практикалық қолданбаларда оптимизация МЭТ төмендету мен өнімділік көрсеткіштерін сақтау арасындағы теңгерімді қамтамасыз етуі тиіс. Өнеркәсіптік шешімдер ретінде қабаттап орналастырылған науалар конфигурациясын немесе үлкен ауданды науаларды пайдалану ұсынылады — бұл тәсіл жұқа қабаттардың энергия тиімділігін сақтай отырады.



Сурет 12 – ZLGJ-300 үлгісіндегі сөрелі типтегі вакуумдық сублимациялық кептіру қондырғысы

2.2 APMWinMachine және Autodesk Inventor орталарында пневматикалық құбыржолдардың беріктігін есептеу

Пневматикалық құбыржолдар – қысым астындағы газ тәрізді орталарды тасымалдауды қамтамасыз ететін технологиялық жүйелердің маңызды элементі болып табылады. Мұндай құбыржолдардың сенімділігі көбінесе олардың беріктік сипаттамаларына байланысты, әсіресе ішкі қысымның өзгермелі жағдайында. Инженерлік тәжірибеде аналитикалық әдістер де, сондай-ақ APM WinMachine сияқты бағдарламалық кешендерде жүзеге асырылатын соңғы элементтер әдісі де қолданылады. Осы мақаланың мақсаты – екі тәсілмен орындалған беріктік есептерін салыстырмалы түрде талдау, әдістердің дәлдігі мен қолданылу мүмкіндігін анықтау.

Пневмоқұбыржолдардың беріктігін есептеу мәселесі қысым астында жұмыс істейтін жүйелерді жобалау кезінде негізгі аспект болып табылады. Сенімді және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ету үшін аналитикалық әдістермен қатар, APM WinMachine сияқты заманауи бағдарламалық құралдардың мүмкіндіктерін де ескеру маңызды. Бұл шолуда осы тақырыпқа арналған заманауи жарияланымдар жүйелендіріліп, есептеу әдістері, олардың дәлдігі, қолданылуы және жүзеге асырылу ерекшеліктері салыстырмалы түрде талданған.

Пневмоқұбырлар автоматтандыру және пневмотасымалдау жүйелерінде маңызды рөл атқарады, себебі олар қысылған ауаны немесе газдарды атқарушы механизмдерге жеткізуді қамтамасыз етеді. Мұндай құбырлардың сенімділігі мен беріктігі өндірістік қондырғылардың жалпы тиімділігі мен қауіпсіз жұмысына әсер етеді. Осыған байланысты пневможүйелердің кернеулі-деформациялық күйін дәл есептеу мәселесі ерекше өзектілікке ие.

Қазіргі инженерлік талдау әдістері дәстүрлі аналитикалық тәсілдерге, яғни классикалық беріктік теориясына негізделген, сондай-ақ сандық алгоритмдерді жүзеге асыратын бағдарламалық құралдарды қамтиды. Осындай құралдардың бірі — APM WinMachine — машиналар мен механизмдерді модельдеуге және есептеуге арналған отандық бағдарламалық кешен.

Пневмоқұбырлар машина жасау, тамақ, химия және тау-кен өнеркәсібі сияқты әртүрлі салаларда кеңінен қолданылады. Олар қысылған ауаны және басқа жұмысшы газдарды тасымалдауға, пневмоприводтар мен басқару контурларының жұмысын қамтамасыз етуге қызмет етеді. Мұндай құбырлардың сенімділігі өндірістік процестердің тұрақтылығына және жабдықтардың қауіпсіз жұмысына тікелей әсер етеді. Сондықтан бұл элементтердің беріктігін есептеу жобалау және пайдалану кезеңдерінде басты міндеттердің бірі болып саналады.

Дәстүрлі түрде құбыржолдардың беріктік талдауы материалдар кедергісі заңдары мен тұтас орта механикасы теориясына негізделген аналитикалық әдістер арқылы орындалады. Бұл әдістер белгілі бір жорамалдар орындалған жағдайда (деформациялардың сызықтылығы, материалдың біртектілігі және

қарапайым геометриялық пішіндер) дәл нәтижелер береді. Бірақ нақты жағдайларда құбырлар күрделі жүктемелерге — ішкі қысымға, иілу моменттеріне, дірілге және температуралық әсерлерге ұшырайды, бұл модельдеуде неғұрлым икемді тәсілдерді қажет етеді.

Пневматикалық құбыржолдар заманауи технологиялық жүйелердің маңызды элементі болып табылады, себебі олар қысым астында газтәрізді орталарды тасымалдауды қамтамасыз етеді. Олар машина жасау, тамақ, химия және тау-кен өнеркәсібі сияқты салаларда кеңінен қолданылады, қысылған ауаны және газдарды атқарушы механизмдерге, пневмоприводтарға және басқару құрылғыларына жеткізеді. Мұндай құбырлардың сенімділігі өндіріс процестерінің тұрақтылығына және жабдықтардың қауіпсіз жұмысына тікелей әсер етеді.

Инженерлік тәжірибеде пневмоқұбырлардың беріктік есебі айнымалы ішкі қысым, температура айырмашылығы және дірілдік жүктемелер жағдайында басты міндеттердің бірі болып табылады. Дәстүрлі түрде беріктік талдауы материалдар кедергісі заңдары мен серпімділік теориясына негізделген аналитикалық әдістер арқылы жүзеге асырылады. Бұл әдістер белгілі бір жорамалдар (деформациялардың сызықтылығы, материалдың біртектілігі, қарапайым геометрия және граничтік шарттардың қарапайымдылығы) орындалған жағдайда нақты нәтижелер береді. Бірақ нақты пайдалану жағдайлары бұл жорамалдардан жиі ауытқиды, себебі құрылымдар күрделі және айнымалы жүктемелерге ұшырайды, бұл классикалық әдістердің дәлдігі мен қолданылу шегін шектейді.

Есептеу техникасының дамуы нәтижесінде соңғы элементтер әдісіне (СЭӘ) негізделген сандық модельдеу тәсілдері кеңінен таралды. Осындай жүйелердің бірі — APM WinMachine, ол механикалық конструкциялардың беріктігін талдауға арналған инженерлік бағдарламалық кешен. Бұл бағдарлама сыртқы және ішкі әсерлердің кең спектрін, сондай-ақ материалдардың қасиеттері мен геометрия ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік береді, сол себепті инженерлік жобалау кезінде тиімді құрал болып табылады. Осы зерттеудің мақсаты — пневмоқұбырлардың беріктік есебінің нәтижелерін екі түрлі әдіс арқылы — аналитикалық және APM WinMachine бағдарламасын пайдалану арқылы салыстыру. Бұл салыстыру әр тәсілдің қолданылу шегін, есеп нәтижелеріндегі айырмашылықтарды және сандық модельдеудің инженерлік тәжірибедегі тиімділігін анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеу пневмоқұбырлардың беріктік талдауы нәтижелерін салыстыруға бағытталған, мұнда аналитикалық формулалар мен APM WinMachine құралдары қолданылады. Мұндай салыстырмалы тәсіл әр әдістің дәлдігін, қолдану мүмкіндігін және шектеулерін бағалауға мүмкіндік береді.

Салыстыру үшін екі тәсіл қолданылды:

Аналитикалық есеп — классикалық материалдар кедергісі формулалары бойынша;

Сандық есеп — APM WinMachine ортасында.

Сандық модельдеу үшін APM WinMachine бағдарламалық кешенінің соңғы элементтер әдісіне негізделген беріктік талдау модулі қолданылды. Құбыр моделінде келесі факторлар ескерілді:

Геометриялық параметрлер (ұзындығы, диаметрі, қабырға қалыңдығы);

Материал қасиеттері (серпімділік модулі, беріктік шегі);

Ішкі қысым – негізгі жүктеме ретінде;

Ұштарындағы қатты бекіту шарттары.

Модель кіріктірілген конструктор арқылы жасалып, соңғы элементтер торы генерацияланды. Нәтижелер бойынша Мизес критерийі бойынша эквивалентті кернеу таралуы, деформациялар және негізгі аймақтардағы максималды мәндер анықталды.

Есептеу кезінде болаттың қасиеттері қолданылды:

Юнг модулі – 200 000 МПа

Ағып кету шегі – 235 МПа

Беріктік шегі – 410 МПа

Пуассон коэффициенті – 0,3

Тығыздық – 7800 кг/м³

Ішкі қысым – 0,1 МПа

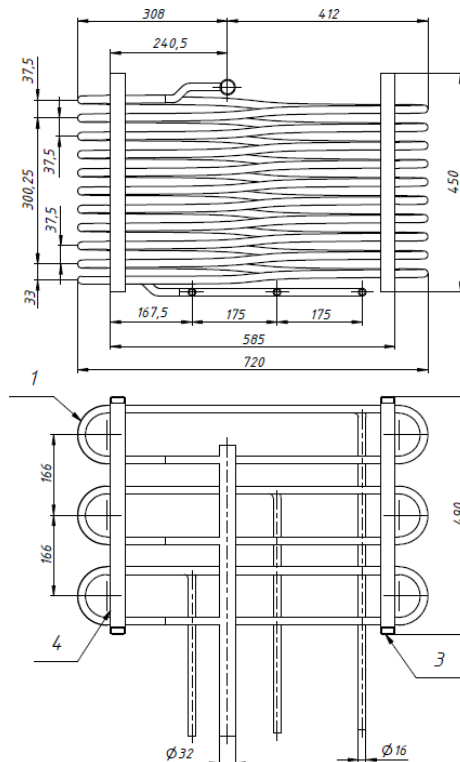
Ішкі диаметр – 100 мм

Қабырға қалыңдығы – 5 мм

Құбыр массасы – 5,7379 кг

Көлемі – 0,0007356 м³

Шектік шарт – ұштары камераның қабырғаларына қатты бекітілген.



Сурет 13 – Сублимациялық кептіргіштің құбыржолы

Құбыржолдың беріктігін аналитикалық есептеу

Ішкі қысым әсер ететін жұқа қабырғалы цилиндрлік қабықтағы кернеулер материалдар кедергісінің классикалық формулалары бойынша есептеледі.

Шеңберлік (айналмалы) кернеу келесі формула бойынша анықталады:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot r}{t} \quad (41)$$

Мәндерді қоямыз: $r = 0.05$ м, $t = 0.005$ м:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot r}{t} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{0,005} = 1,0 \text{ МПа} \quad (42)$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{2t} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,005} = 0,5 \text{ МПа} \quad (43)$$

Беріктікке баға береміз:

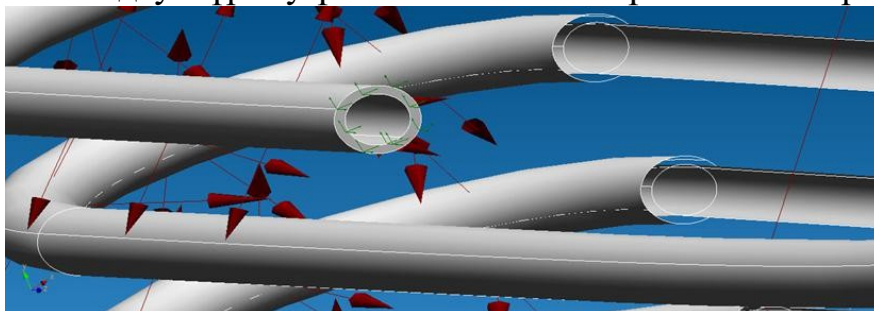
Егер ағу шегі болса, онда шеңберлік кернеу бойынша беріктік қоры коэффициенті келесі түрде анықталады:

$$n = \frac{\sigma_{\text{тек}}}{\sigma_{\theta}} = \frac{235}{1,0} = 235 \quad (44)$$

Осылайша, аналитикалық есептеулер нәтижесінде ең жоғары шеңберлік кернеу 1,0 МПа құрайтыны анықталды, бұл болаттың ағу шегінен (235 МПа) әлдеқайда төмен.

APM WinMachine бағдарламасындағы есептеу.

Құбыржолдың геометриялық моделі Autodesk Inventor бағдарламасында жасалып, беріктік талдау жүргізу үшін APM Studio жүйесіне экспортталды.



Сурет 14– Құбыржол құрылымындағы кернеулердің таралуы

Аналитикалық әдістер, зерттеулерде көрсетілгендей, жобалаудың бастапқы кезеңдерінде жуық нәтижелерді тез алуға мүмкіндік береді және қолдануға ыңғайлы. Алайда, олар күрделі геометрия мен біріктірілген жүктемелерге бейімделуі төмен.

APM WinMachine бағдарламасы, мәліметтерге сәйкес, дәлдік пен қолдану қарапайымдылығы арасындағы жақсы теңгерімді қамтамасыз етеді. Бағдарламадағы кіріктірілген модульдер инженерлерге МКЭ (шектеулі элементтер әдісі) бойынша терең білімсіз-ақ стандартты құбыржол жүйелерін дұрыс есептеуге мүмкіндік береді.

ANSYS және Abaqus сияқты бағдарламалар жоғары дәлдік береді, бірақ олар жоғары есептеу ресурстарын және пайдаланушының жоғары біліктілігін талап етеді.

Сондықтан әдіс таңдау есептің күрделілігіне байланысты: типтік инженерлік есептер үшін APM WinMachine қолдану тиімді, ал күрделі және жауапты жүйелер үшін — ANSYS, Abaqus немесе гибридті тәсілдер орынды.

APM WinMachine бағдарламасындағы есептеу нәтижелері бойынша максималды эквивалентті кернеу 3.77 МПа, максималды орын ауыстыру 0.239 мм, ал беріктік қоры коэффициенті — 1316 болды. Бұл құрылымның жоғары тұрақтылығын көрсетеді.

Аналитикалық және сандық әдістер арасындағы айырмашылық МКЭ-де геометрия мен шекаралық шарттардың ескерілуімен түсіндіріледі. Аналитикалық әдіс жұқа қабырғалы цилиндрлердің беріктік теңдеулеріне негізделіп, кернеудің орташа мәндерін есептейді. Ламе формуласы бойынша есептеу шеңберлік және бойлық кернеулердің максималды мәндерін береді, бірақ құрылымның геометриялық ерекшеліктері, қабырға қалыңдығының өзгерістері, фланецтер мен дәнекерленген жіктердің әсері сияқты жергілікті факторларды көрсете алмайды.

APM WinMachine бағдарламасындағы шектеулі элементтер әдісі модельді элементтерге бөлу және нақты шекаралық шарттарды қолдану арқылы осы факторларды ескереді. Есептеу нәтижесінде тек кернеулердің сандық мәндері ғана емес, сонымен қатар олардың құбыр геометриясы бойынша таралуы да алынды.

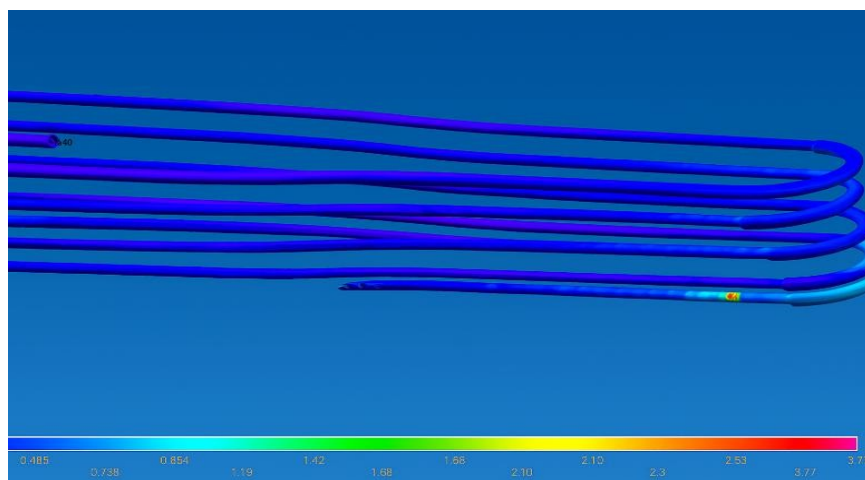
Маңыздысы — тірек нүктелері мен диаметр ауысу аймақтарында кернеудің жергілікті концентрациялары анықталды, ал мұндай аймақтарды аналитикалық әдіспен анықтау мүмкін емес.

Аналитикалық есептеу материалдың беріктік шегіне жақын эквивалентті кернеу мәнін көрсетті (бірақ қауіпсіздік қорымен), алайда жүктеменің нақты орналасқан аймақтарын көрсетпеді.

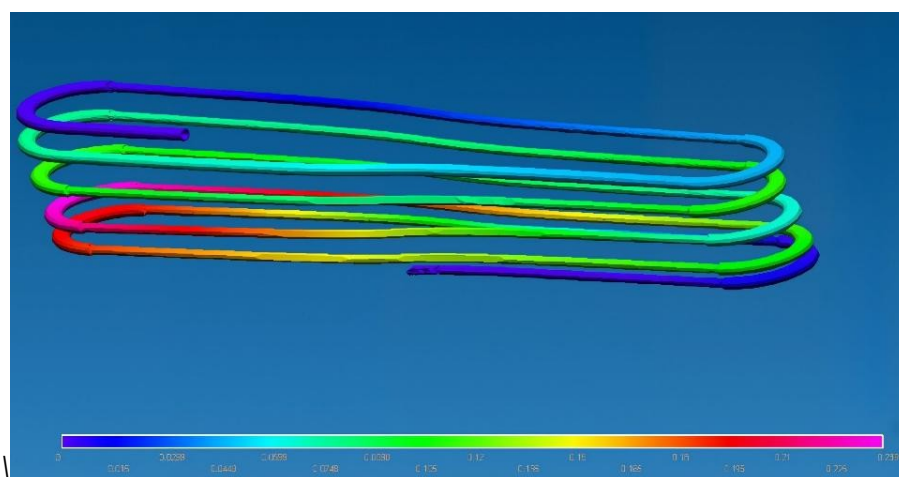
APM WinMachine көрсеткендей, жеке аймақтарда (тірек пен ауысу маңында) кернеу орташа мәннен 15–20 % жоғары, ал құрылымның негізгі бөлігі біркелкі жүктелмеген.

Бұл айырмашылықтар аналитикалық тәсілдің шектеулігін және нақты инженерлік нысандарды жобалауда МКЭ қолданудың маңыздылығын дәлелдейді.

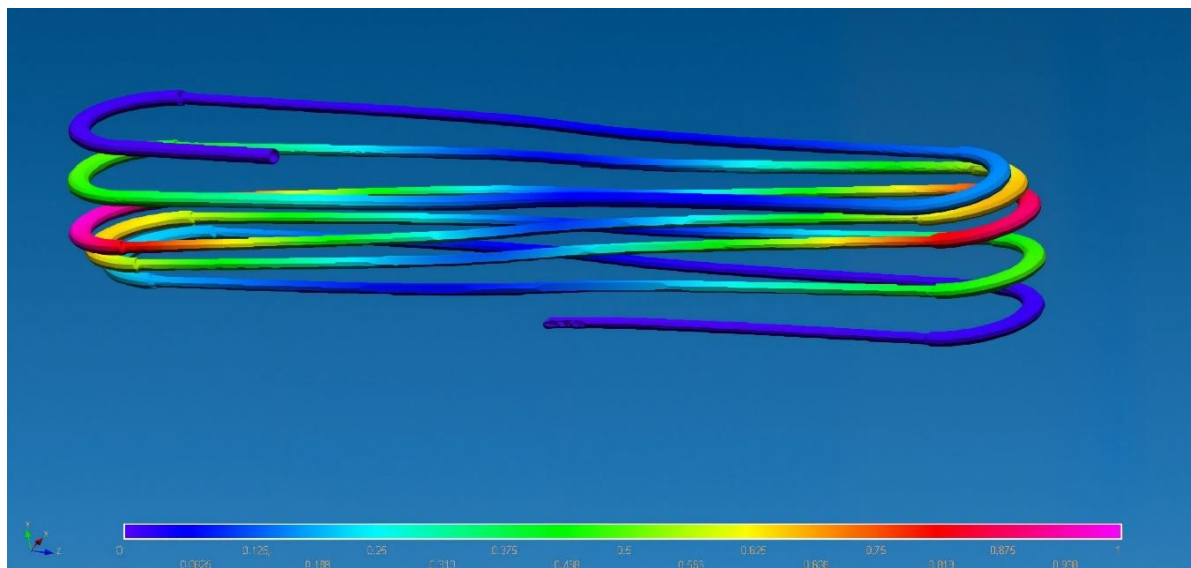
Сондай-ақ, кернеу өрістерін визуализациялау мүмкіндігі инженерлік шешім қабылдау процесін — мысалы, құрылымды күшейту немесе қайта жобалау кезінде — айтарлықтай жеңілдетеді.



Сурет 15- бойынша эквивалентті кернеу SVM [МПа]



Сурет 16- Жалпы сызықтық орын ауыстыру USUM [мм]



Сурет 17-Тұрақтылықты жоғалту формасы

Вакуумдық сублимациялық кептірудің заманауи технологиялары тағам, фармацевтика және химия өнеркәсібінде кеңінен қолданылады. Мұндай қондырғылардың негізгі элементтерінің бірі – беріктік қаңқасы, ол жабдықтың геометриялық дәлдігін, тұрақтылығын және пайдалану қауіпсіздігін айнымалы механикалық және жылулық жүктемелер жағдайында қамтамасыз етеді.

Құрылымдардың сенімділігіне қойылатын жоғары талаптар статикалық қана емес, динамикалық әсерлерді де ескеретін жан-жақты беріктік талдау жүргізуді қажет етеді. Осы жұмыстың мақсаты – вакуумдық сублимациялық қондырғының көтергіш қаңқасының беріктігін динамикалық жүктемелерді ескере отырып талдау.

Есептеу ақырлы элементтер әдісімен (ЭЭӘ) APM Structure3D және Ansys Workbench бағдарламалық орталарында жүргізілді. Бұл тәсіл конструкцияның кернеу-деформациялық күйін әртүрлі жұмыс режимдерінде бағалауға мүмкіндік береді. Екі бағдарламалық пакет қолдану нәтижелердің дәлдігін арттырып, инженерлік шешімдердің негізділігін күшейтеді.

Алынған нәтижелер қаңқа құрылымын оңтайландыруда, материалдарды таңдауда және жабдықтың пайдалану шектеулерін негіздеуде қолданылуы мүмкін. Сондай-ақ, олар технологиялық қондырғылардың көтергіш жүйелерінің динамикалық беріктігін зерттеу бағытында әрі қарайғы жұмыстарға негіз бола алады.

Кептіру процесі – бұл ылғалды заттардан (көбіне қатты күйдегілерден) бу түрінде шығару және оны жою арқылы суды кетіру процесі. Жылулық кептіруге дейін әдетте механикалық ылғал кетіру әдістері (тұндыру, сүзу, центрифугалау және т.б.) қолданылады. Кептіру процесінде ұшпа компонент (су немесе органикалық еріткіш) жойылады.

Жылу берілу тәсіліне қарай кептіру түрлері:

Конвекциялық кептіру – материал мен кептіру агентінің тікелей жанасуымен өтеді (жылу ауамен немесе жану өнімдерімен беріледі);
 Контакттік (кондуктивтік) кептіру – жылу материалға қабырға арқылы беріледі;
 Радиациялық кептіру – инфрақызыл сәулелену арқылы жылу беріледі;
 Сублимациялық кептіру – ылғал мұз түрінен тікелей буға өтеді (әдетте вакуум жағдайында);
 Диэлектрлік кептіру – жоғары жиілікті өріс арқылы материалды кептіру.
 Вакуумдық сублимациялық кептіру (лиофилизация) – суды мұздан тікелей буға айналдыру арқылы жою процесі. Бұл технология мұздатылған өнімнен ылғалды сұйық күйге өтпестен шығарады. Процесс вакуумда өтеді, нәтижесінде шикізаттың құрылымы мен қасиеттері сақталады.

Артықшылықтары:

- Өнімдердің дәмі мен химиялық құрамы дерлік өзгермейді;
 Мұздатқышсыз сақтау мүмкіндігі бар (0 °C-тан жоғары температурада); Салмақ азаяды, бұл тасымалдау мен сақтау шығындарын төмендетеді; Өнімнің сақтау мерзімі ұзартады және өткізу шарттары жеңілдейді.
- Сублимациялық кептіру мына шарттарда іске асады:
 Мұздатылған өнімдегі ылғал мөлшері 70% кем емес;
- Су буының парциалдық қысымы мен атмосфералық қысым айырмасы қажетті деңгейде ұсталады;
- Вакуум кезінде су буының қысымы үштік нүктеден төмен болады, сондықтан мұз тікелей буға айналады, ал бу конденсатор бетінде мұз түрінде тұнады. Осы есептің мақсаты – вакуумдық сублимациялық қондырғының көтергіш рамасының беріктігін динамикалық жүктемелерді ескере отырып талдау.

Есептеу деректері:

Бағдарлама: APM Structure3D

Материал: жұмсақ болат (ГОСТ)

Иілім модулі: $E = 200 \text{ ГПа}$

Пуассон коэффициенті: $\nu = 0.275$

Тығыздық: $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$

Ағу шегі: $\sigma_{\text{тек}} = 207 \text{ МПа}$

Құрылым массасы: 118.2 кг

Талдау түрі: динамикалық (уақыттық жауап)

Геометрия: Autodesk Inventor бағдарламасындағы *каркас ниж.iam* моделінен STEP форматына экспортталған.

Бекіту

шарттары:

Алдын ала талдау нәтижесінде раманың төменгі түйіндері еденге қатты бекітіледі — барлық еркіндік дәрежелері шектелген (яғни, толық тіреу).

Жүктемелер: Тартылыс: $g=9.81 \text{ м/с}^2$, бағыт — төмен (ось Z), импульсная

жүктеме: тип: Harmonic

$$F(t) = F_0 \cdot \sin(2\pi ft) \quad (45)$$

мұндағы: $F_0 = 3000 \text{ Н}$

$f = 30 \text{ Гц}$ — Жабдықтан туындайтын дірілдің болжамды жиілігі

30 Гц жиілігін негіздеу.

ZLGJ-300 типті вакуумды-сублимациялық қондырғылар әдетте 25–50 Гц диапазонында жұмыс істейтін діріл элементтерімен (қозғалтқыш, компрессор, платформа) жабдықталады. Қазақстан мен Қытайдың электр желілерінің жиілігі — 50 Гц, бұл жабдық 25 Гц-ке еселі тербелістерді тудыруы мүмкін екенін білдіреді.

Сандық модельдеу жүргізу үшін конструкцияның торлы моделі жасалды. Есепте балкалы элементтер (1D Beam) пайдаланылды. Elements), которые позволяют эффективно описать поведение тонкостенных и протяжённых деталей.

Барлығы модельде 72 түйін және 22 соңғы элемент болды, бұл есептеу уақытын онтайлы деңгейде ұстай отырып, жеткілікті дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік берді. Тор қадамының өлшемі бейімделгіш (адаптивті) болды және 3–5 мм аралығында өзгеріп отырды, бұл конструкцияның ең көп жүктелген аймақтарындағы кернеулердің таралуын нақтылауға мүмкіндік берді.

Талдау уақытша жауап (Transient Structural Analysis) режимінде жүргізілді, ол айнымалы жүктемелер әсерінен кернеулер мен деформациялардың уақыт бойынша өзгерісін бағалауға мүмкіндік береді. Модельдеу уақытының аралығы 0–2 секундты құрады, интегралдау қадамы

0.001 секунд болып белгіленді. Бұл есептің уақыттық дәлдігін арттырып, сандық шешімнің тұрақтылығын қамтамасыз етті.

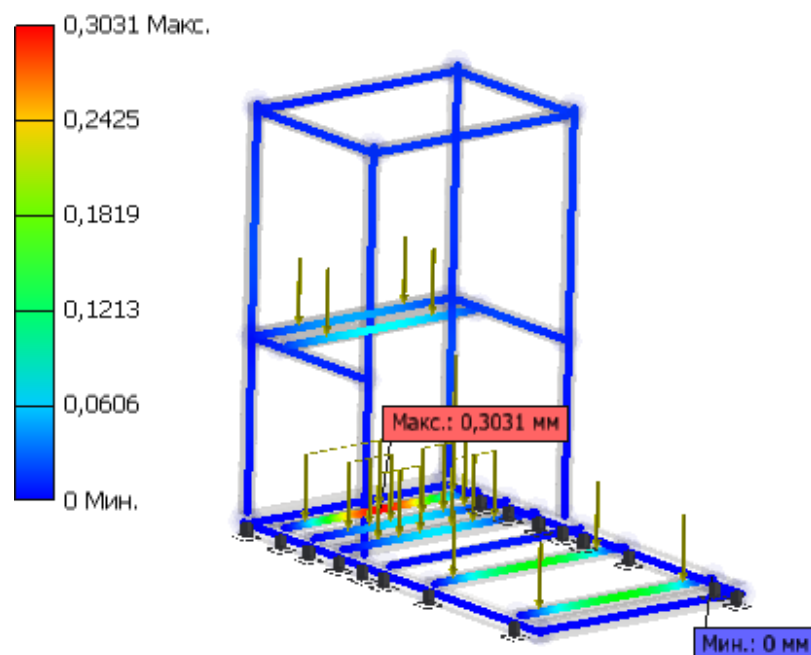
Төменде есептеу нәтижелерінің визуализациялары – орын ауыстырулар мен кернеулердің таралу карталары келтірілген:

18-сурет — Орын ауыстырулар картасы конструкция бойынша сызықтық орын ауыстырулардың таралуын көрсетеді. Ең үлкен орын ауыстыру 0.3031 мм және ол раманың төменгі аймағында байқалады, бұл есептік мәнге сәйкес келеді. Түстік шкала ең үлкен және ең кіші орын ауыстырулар байқалатын аймақтарды көрсетеді.

19-сурет — Нормаль кернеулер картасы (S_{max}) раманың нормаль кернеулерінің таралуын көрсетеді. Ең үлкен мәні 33.83 МПа құрайды. Негізгі жүктеме тік гармоникалық әсер кезінде әдеттегідей төменгі тірек элементтеріне түседі.

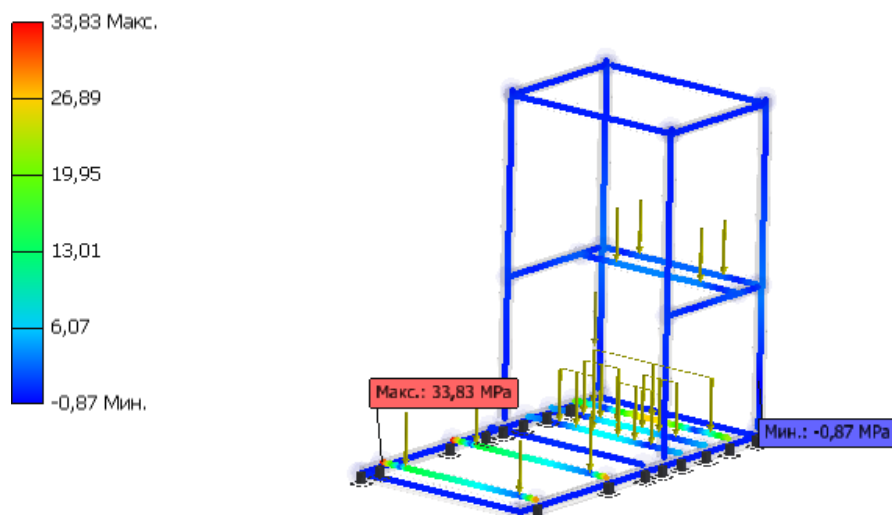
20-сурет — Тайғақ (сдвигтік) кернеулердің контурлық картасы тайғақ кернеулердің әсер ету аймақтарын көрсетеді. Ең үлкен тайғақ кернеу мәні 6.52 МПа. Тайғақ кернеулердің шоғырлану аймақтары да конструкцияның төменгі байланыс элементтеріне жақынырақ орналасқан.

Тип: Смещение
Единицы: мм
26.03.2025, 14:08:34



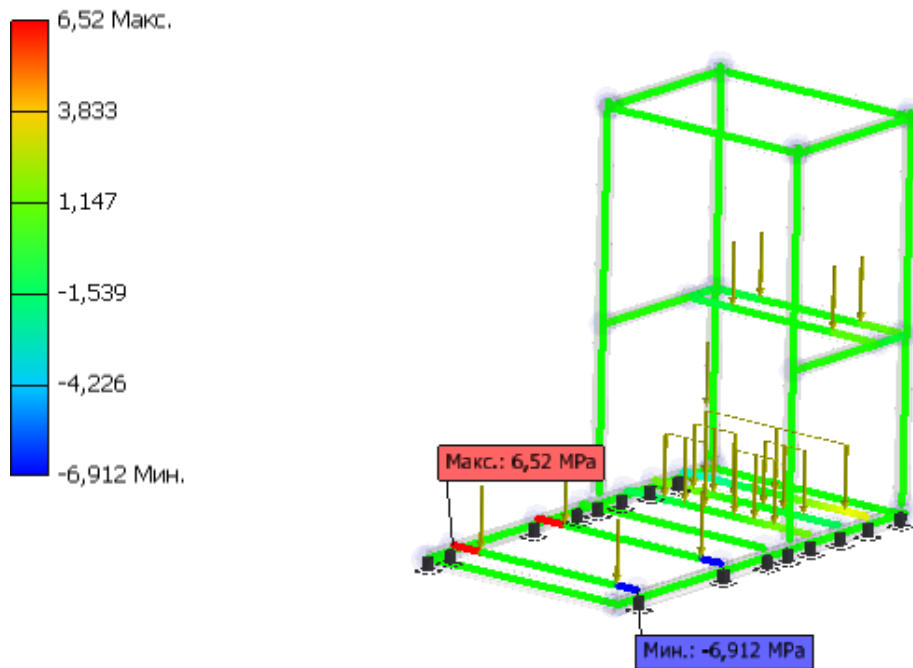
Сурет 18- Орын ауыстырулар картасы

Тип: Нормальное напряжение Smax
Единицы: МПа
26.03.2025, 14:08:38



Сурет 19- Нормаль кернеулер картасы

Тип: Напряжение сдвига Tx
Единицы: МПа
26.03.2025, 14:08:42



Сурет 20-Тайғақ кернеулер контуры

Талдау нәтижелері бойынша қорытындылар:

Конструкция динамикалық жүктемелерге айтарлықтай беріктік қорымен төтеп береді. Ең жоғары кернеулер ағу шегінен аспайды. 150 Гц-ке дейінгі жұмыс жиіліктерінде резонанстық құбылыстар байқалмаған. Конструкция берілген динамикалық жағдайларда беріктік талаптарына толық сәйкес келеді.

Есептің мақсаты — гармоникалық динамикалық жүктеме әсер еткен кездегі конструкцияның кернеулі-деформацияланған күйін анықтау.

Кестеде белгілеулер келтірілген.

Кесте 5 – Бастапқы белгілеулер

Мәндер	Атауы
M	Конструкция массасы, кг = 118.2
K	Қаттылық матрицасы
C	Демпферлеу матрицасы
$u(t)$	Орын ауыстыру векторы
$F(t)$	Сыртқы көш: $F(t) = 3000 \cdot \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t)$ Н
Ω	Бұрыштық жиілік: $\omega = 2\pi \cdot f = 188.5$ рад/с
F	Бұрыштық жиілік: $f = 30$ Гц

Осы есептің мақсаты – ZLGJ-300 маркалы вакуумды-сублимациялық кептіргіштің тірек рамасының гармоникалық синусоидалық жүктеме әсеріндегі кернеулі-деформацияланған күйін (КДК) анықтау. Талдау Ansys Workbench бағдарламалық ортасында соңғы элементтер әдісін (СЭӘ) пайдалану арқылы орындалды.

Бастапқы деректер: Кептіргіш маркасы: ZLGJ-300, бағдарламалық қамтамасыз ету: Ansys Workbench, талдау түрі: Harmonic Response (гармониялық жауап), геометрия: STEP моделінен импортталған, материал: жұмсақ болат, серпімділік модулі: $E = 220$ ГПа, Пуассон коэффициенті: $\nu = 0.275$, тығыздық: $\rho = 7850$ кг/м³, жүктеме: $F(t) = 3000 \cdot \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t)$ Н, бағыты — Z осі бойынша төмен, жиілік: $f = 30$ Гц, бұрыштық жиілік: $\omega = 2\pi \cdot 30 \approx 188.5$ рад/с, бекіту: раманың төменгі беті қатты бекітілген.

Торлық модель

Элемент түрі: тетраэдрлік көлемдік элементтер (Solid)

Тор қадамының бейімделгіш диапазоны: 3–5 мм

Талдау нәтижелері

Гармониялық талдау нәтижелері бойынша келесі мәндер алынған:

Ең үлкен орын ауыстыру: 0.303 мм

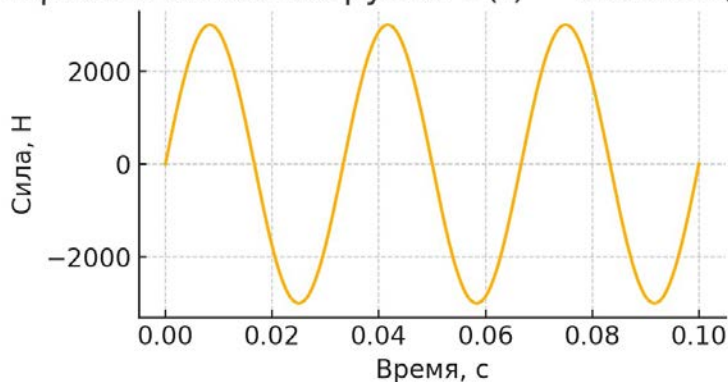
Ең үлкен нормаль кернеулер: 33.8 МПа

Ең үлкен тайғақ кернеулер: 6.9 МПа

Меншікті тербеліс жиіліктері: 27.8, 33.8, 41.3, ... 135.5 Гц

Беріктік қорының коэффициенті: шамамен 6.1

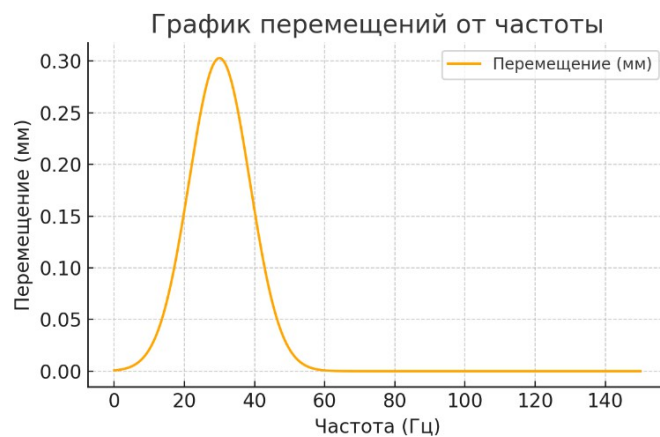
Гармоническая нагрузка: $F(t) = 3000 \cdot \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t)$



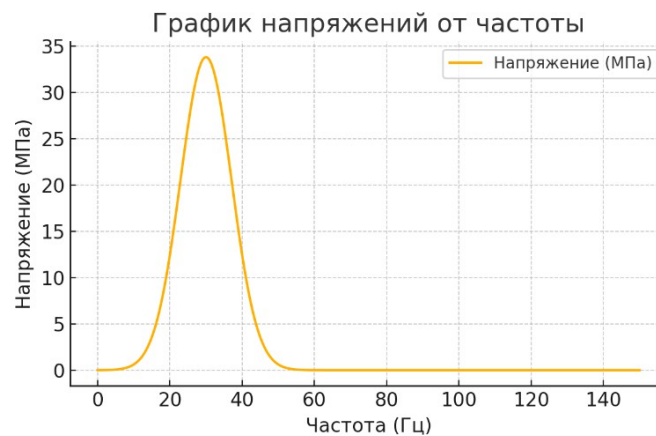
Сурет 21- Гармониялық таралым



Сурет 22- Резонанстық аймаққа жақындағанда амплитуданың өсуі



Сурет 23- Жиілігіне байланысты орын ауыстыру графигі



Сурет 24- Кернеулер графигі

ZLGJ-300 кептіргіш рамасының конструкциясы 150 Гц-ке дейінгі диапазонда гармоникалық динамикалық жүктемелерге төзімді. Ең жоғары кернеулер материалдың ағу шегінен (207 МПа) айтарлықтай төмен. 30 Гц жұмыс жиілігінде резонанстық құбылыстар байқалмайды, бұл орын ауыстыру мен кернеу графиктері арқылы расталады.

Конструкция пайдалану кезінде қауіпсіз және беріктік талаптарына толық сәйкес келеді.

Екінші бөлім қорытындысы

ZLGJ-300 типті вакуумды-сублимациялық қондырғылар әдетте 25–50 Гц диапазонында жұмыс істейтін діріл элементтерімен (қозғалтқыш, компрессор, платформа) жабдықталады.

Қазақстан мен Қытайдың электр желілерінің жиілігі — 50 Гц, бұл жабдықтың 25 немесе 50 Гц-ке еселі тербелістерді тудыруы мүмкін екенін білдіреді.

30 Гц жиілігі талдау үшін шартты түрде «қауіпті» жиілік болып саналады, себебі ол мүмкін болатын меншікті тербеліс жиіліктеріне жақын.

Жұмыс жиілігін нақты анықтау үшін:

- ZLGJ-300 қондырғысының техникалық құжаттамасын (vibration/motor speed бөлімі) пайдалану; немесе
- Пайдалану жағдайында акселерометр көмегімен дірілдік талдау (виброанализ) жүргізу ұсынылады.

3 ВАКУУМДЫ-СУБЛИМАЦИЯЛЫҚ КЕПТІРГІШ ЖАБДЫҒЫН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ

Осы кезең барысында сүтті вакуумды-сублимациялық кептіруге арналған қондырғының толық жобалық-конструкторлық құжаттамасы мен 3D моделі әзірленді.

Жобалау процесі Autodesk Inventor 2020 бағдарламалық ортасында БҚҚЖ (ЕСКД) және БҚТЖ (ЕСТД) талаптарына сәйкес орындалды.

Жобалаудың негізгі нысаны – вакуумдық камера (түйін FD-4.1), ол технологиялық қондырғының орталық элементі болып табылады және негізгі процесс — судың сублимация әдісімен булану процесі дәл осы жерде өтеді.

25-сурет – FD-4.1 СБ — Вакуумдық камераның жинақ сызбасы

Мақсаты мен функциялары:

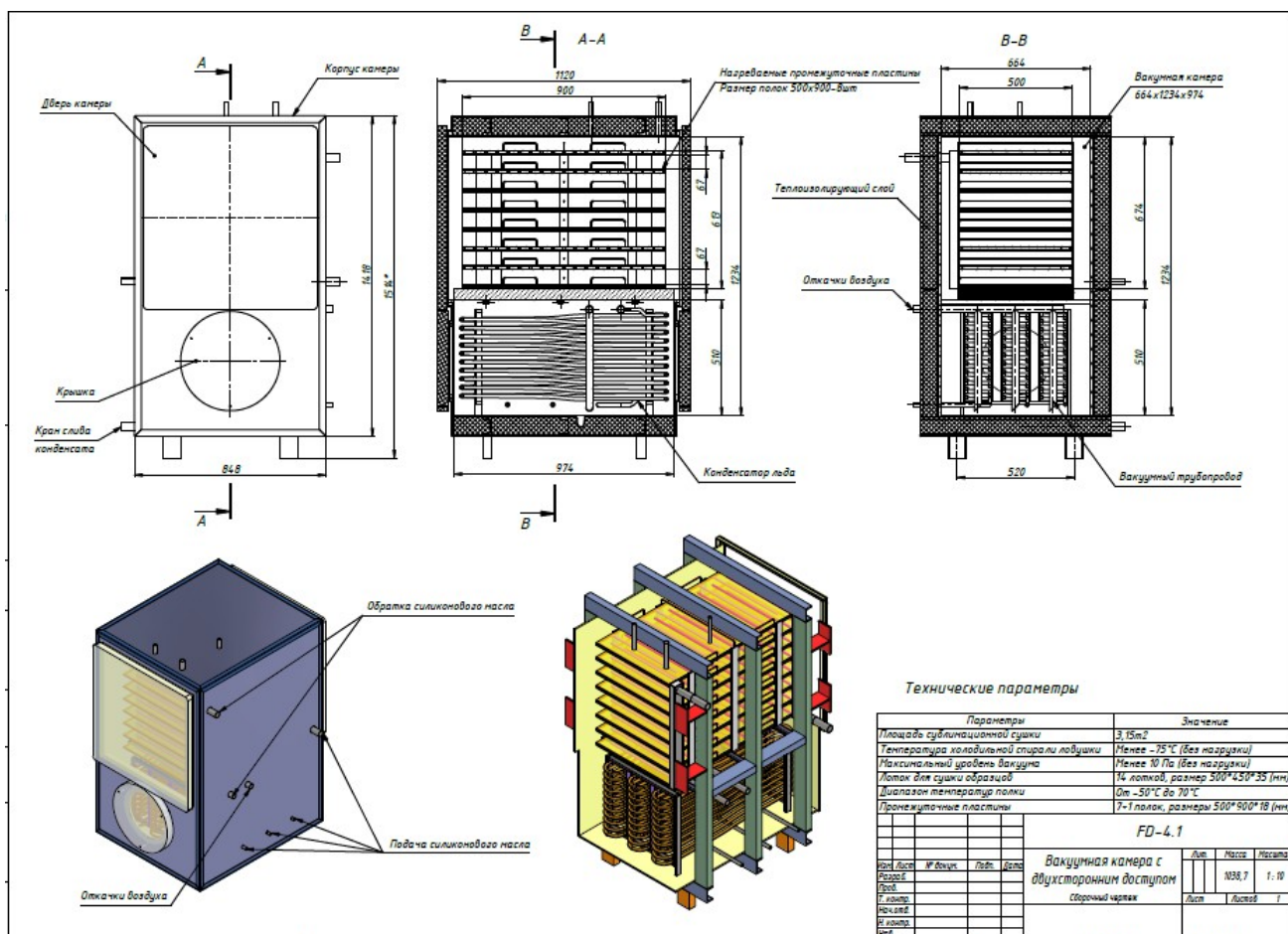
- Кептіру процесінің өтуі үшін герметикалық вакуумдық ортаны қамтамасыз ету;
- Өнімді бірнеше деңгейдегі табақшаларға орналастыру;
- Белгіленген температура мен қысым параметрлерін сақтау;
- Салқындату, жылыту, вакуумдау және конденсациялау сияқты қосалқы жүйелерді қосу мүмкіндігі.

Құрылымдық ерекшеліктері:

- Корпус — тікбұрышты пішінді дәнекерленген сыйымдылық (түйін FD-4.2), конструкцияның негізгі көтергіш және герметизациялайтын бөлігі;
- Фланецті есік — тығыздағыш элементі және бекіту механизмі бар;
- Тірек рама/негіз — FD-4.9 түйінімен байланысқан;
- Технологиялық патрубкалар — вакуум, конденсация және параметрлерді бақылау жүйелерін қосуға арналған.

FD-4.1 камерасының негізгі техникалық сипаттамалары:

- Массасы: 398,56 кг
- Көлемі: 50 248 700 мм³
- Беткей ауданы: 14,14 м²
- Пайдалану температурасы диапазоны: –50 °С-тен +70 °С-ке дейін
- Жұмыс қысымы: 10⁻² мм сын. бағ. дейін



Сурет 25- FD-4.1 СБ — Вакуумдық камера сызбасы

Корпус — ағу шегі 250 МПа болатын легирленген болат;
Ішкі панельдер — сүт буының әсеріне және коррозияға төзімді AISI 304 маркалы тот баспайтын болат;
Ішкі беттер санитарлық талаптарды сақтау және тазалауды жеңілдету үшін жылтыратылған;

Қарау терезесі, жарықтандыру және ИҚ-датчиктер орнатылған, олар кептіру процесін және камераның ішкі күйін герметиканы бұзбай бақылауға мүмкіндік береді.

Конструкция оңай бөлшектеніп, қызмет көрсетуді жеңілдетеді, сондай-ақ барлық монтаждық тесіктер мен фланецтер өзара алмастырылуын қамтамасыз ету үшін жоғары дәлдікпен орындалған. Конструкцияда вакуумдық және жылуалмасу магистральдарын қосуға арналған технологиялық патрубклар қарастырылған. Алынып салынатын табақшаларға арналған бағыттағыштар мен бекіткіштер орнатылған.

Жинау және сапаны бақылау:

Герметикалық тығыздық тұтас дәнекерлеу арқылы және кейінгі вакуумдық сынау арқылы қамтамасыз етіледі;

Барлық қосылыстар ультрадыбыстық (УЗК) және визуалды бақылаудан

өтеді;

Бөлшектемей санитарлық тазалау жүргізуге арналған CIP-жуу жүйесіне қосылу мүмкіндігі қарастырылған.

Корпус жинақ күйінде (түйін FD-4.2) 25-суретте көрсетілген және ол сублимациялық кептіру қондырғысының вакуумдық камерасының негізгі көтергіш конструкциясы болып табылады. Ол герметиканы, беріктікті және барлық ішкі модульдердің: жылытылатын пластиналардың, табақшалардың, құбырлардың және датчиктердің монтажын қамтамасыз ететін элементтерді біріктіреді.

Функционалдық мақсаты:

Терең вакуум (10^{-2} мм сын. бағ. дейін) жасау үшін герметикалық жабық кеңістік қамтамасыз ету;

Ішкі компоненттер мен сыртқы қысымнан түсетін жүктемені көтеру;

Вакуумдық қақпақтың, құбырлардың және жылуалмастырғыштардың тірегі ретінде қызмет ету;

Қақпақпен, конденсатормен және құбыр жүйелерімен түйісу;

Тасымалдау және діріл әсерлері кезінде тұрақтылықты қамтамасыз ету.

Конструкция

және

материалдар:

Корпус тікбұрышты пішінді дәнекерленген рама түрінде орындалған;

Каркастың негізгі элементтері: швеллерлер 8Р-1250, 8Р-840, 8Р-100, 8Р-300 — қабырға қаңқасын құрайды;

Қаптау панельдері — қалыңдығы 8 мм тот баспайтын болаттан жасалған;

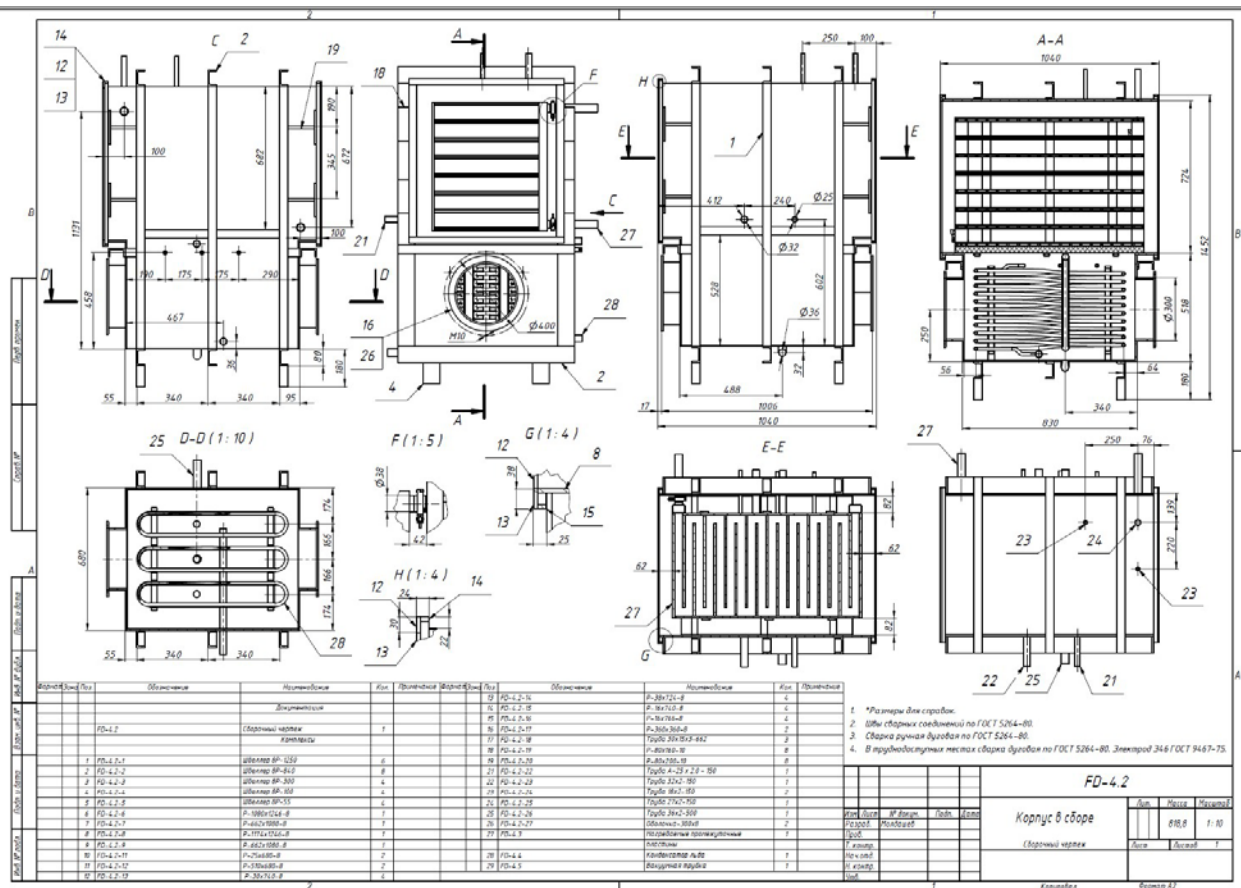
Қаттылық элементтері — құбырлар, бұрыштық элементтер және бойлық қатайтқыш қабырғалар;

Қолданылатын материалдар: швеллерлер үшін — ағу шегі 250 МПа легирленген болат; өніммен жанасатын ішкі элементтер мен панельдер үшін — тот баспайтын болат.

Аралық жылытылатын пластиналар (түйін FD-4.3) 24-суретте көрсетілген және олар сублимациялық қондырғының өнімге вакуумдық кептіру процесі кезінде жылу энергиясын жеткізуді қамтамасыз ететін маңызды элементі болып табылады. Бұл пластиналар (26-сурет) сүт құйылған табақшалардың арасында орналасқан және ылғалды сублимациялауға қажетті біркелкі жылу көзі ретінде қызмет етеді.

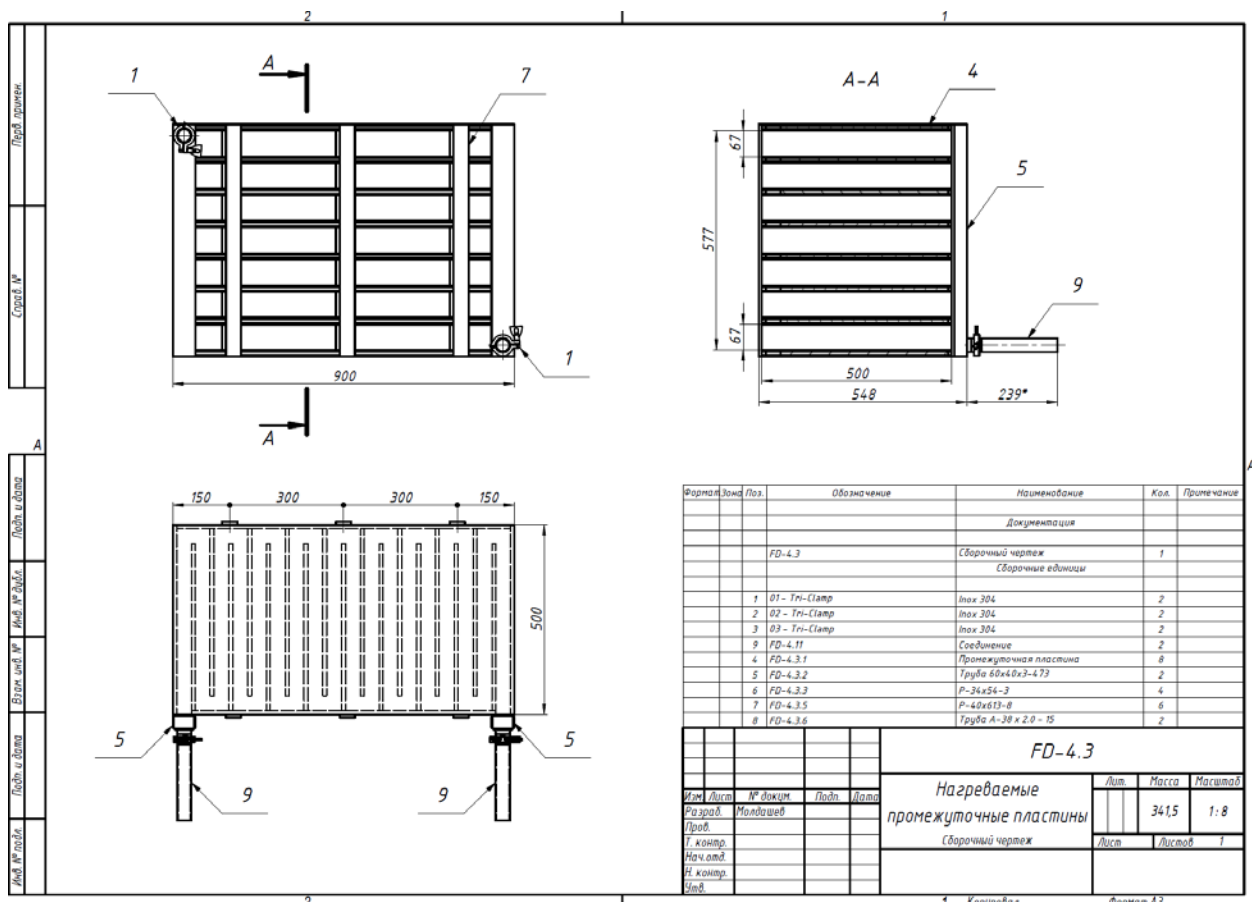
Функционалдық мақсаты:

- Вакуумдық кептіру кезінде өнімнің біркелкі жылуын қамтамасыз ету; Жұмыс температурасының диапазонын $-50^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$ аралығында ұстап, қызып кетуді болдырмау;
- Жүктеме аймағы бойынша кептірудің біркелкілігін арттыру, жергілікті қызып кету мен ылғалдың біркелкі буланбауын болдырмау.

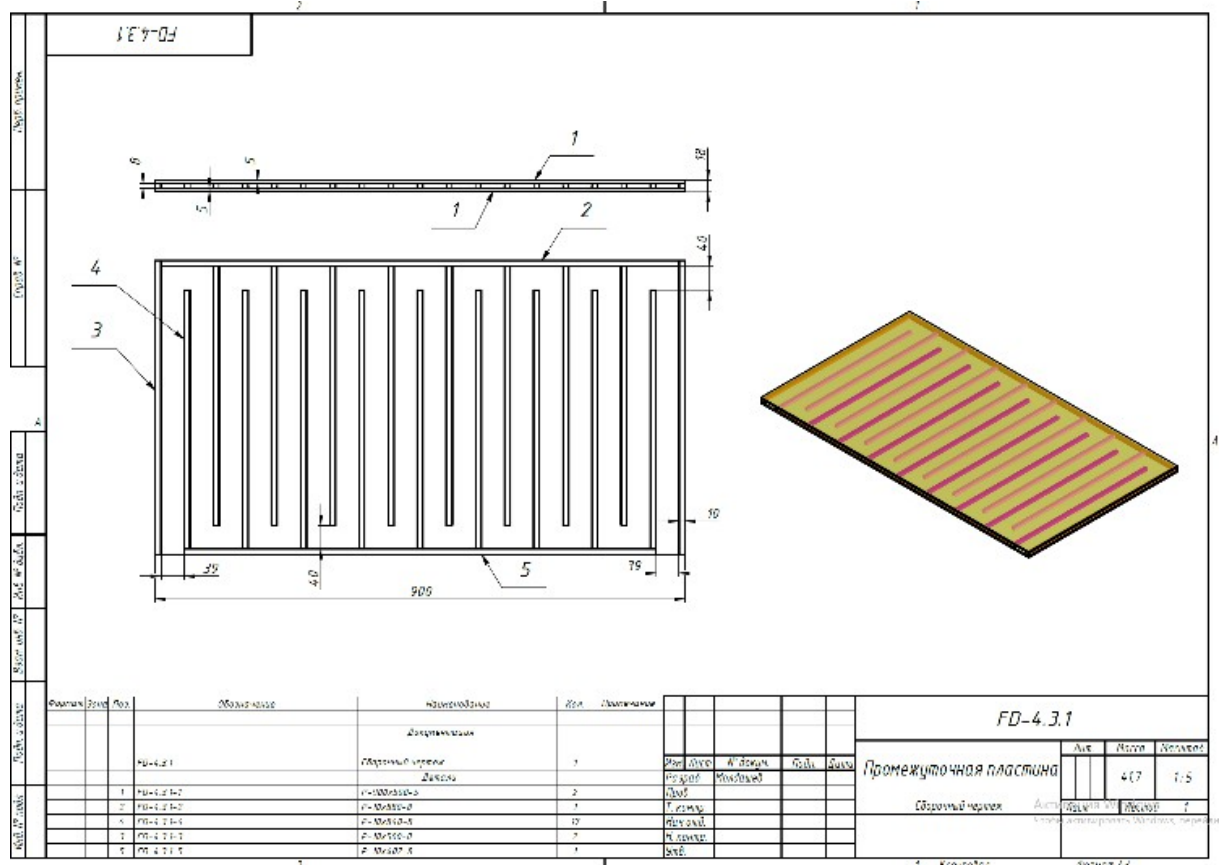


Сурет 26- FD-4.2 СБ — Корпус жиынтығы

Конструкция тұтас дәнекерленген, температураны бақылауға арналған кіріктірілген термодатчикпен жабдықталған; әрбір пластина — ішінде жылу тасымалдағыш арналары (силикон майлары) өтетін AISI 304 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған металл табақ. Беткі қабаты тазалық пен сенімді жылу байланысын қамтамасыз ету үшін мұқият өңделіп, жылтыратылған. Температураны дәл бақылауға арналған термодатчик орнатылған. Жылыту жүйесі майды беру және қайтару коллекторларына қосылады, пластиналар табақшалар арасында қабаттап орналасқан, бұл біркелкі температура өрісін түзіп, ылғалдың біртіндеп булануын және сублимация фронтының тұрақтылығын қамтамасыз етеді, осылайша құрылғының пайдалану ыңғайлылығын арттырады.



Сурет 27- 3FD-4.3 Аралық жылытылатын пластиналар



Сурет 28- FD-4.3.1 СБ. Аралық жылытылатын пластиналар

Мұз конденсаторы (27-сурет, түйін FD-4.4) — өнімнен кептіру процесі кезінде бөлінетін су буын конденсациялау және мұз түрінде ұстау арқылы жинауға арналған вакуумды-сублимациялық қондырғының негізгі құрамдас бөлігі. Конденсатордың тиімді жұмысы тұрақты вакуумды сақтауға және будың вакуумдық сорғыға түсуін болдырмауға мүмкіндік береді.

Функционалдық мақсаты:

Вакуумда өнімнен буланған ылғалды ұстау;

Салқындатылған бетте будың конденсацияланып, мұзға айналуын қамтамасыз ету;

Вакуум жүйесіне түсетін жүктемені азайту және вакуум деңгейінің төмендеуін болдырмау;

Сублимация процесі кезінде температура мен қысымның тұрақтылығын сақтау.

Құрылымдық ерекшеліктері:

Конденсатор — жылуалмасу беті дамыған блок-түтікті құрылым түрінде орындалған (27-сурет — FD-4.4 жинақ сызбасы).

Ішкі жағында салқындатқыштың айналым жүйесіне қосылған түтікшелі спиральдар орналасқан.

Сыртқы корпус пен коллекторлар жоғары температура мен коррозияға төзімді тот баспайтын болаттан жасалған.

Құрылымда салқындатқыштың ағынын барлық тармақтар бойынша біркелкі бөлу қарастырылған, бұл жергілікті артық салқындау аймақтарынсыз тұрақты мұз қату процесін қамтамасыз етеді.

Конденсатордың жұмыс бетінің температурасы -75°C -қа дейін, ал салқындатқыштың қысымы 1,5 МПа-ға дейін жетеді.

3.1 Вакуумды-сублимациялық жабдыққа арналған жобалық-конструкторлық құжаттаманы (ЖҚК) әзірлеу және 3D моделін жасау (Autodesk Inventor ортасында)

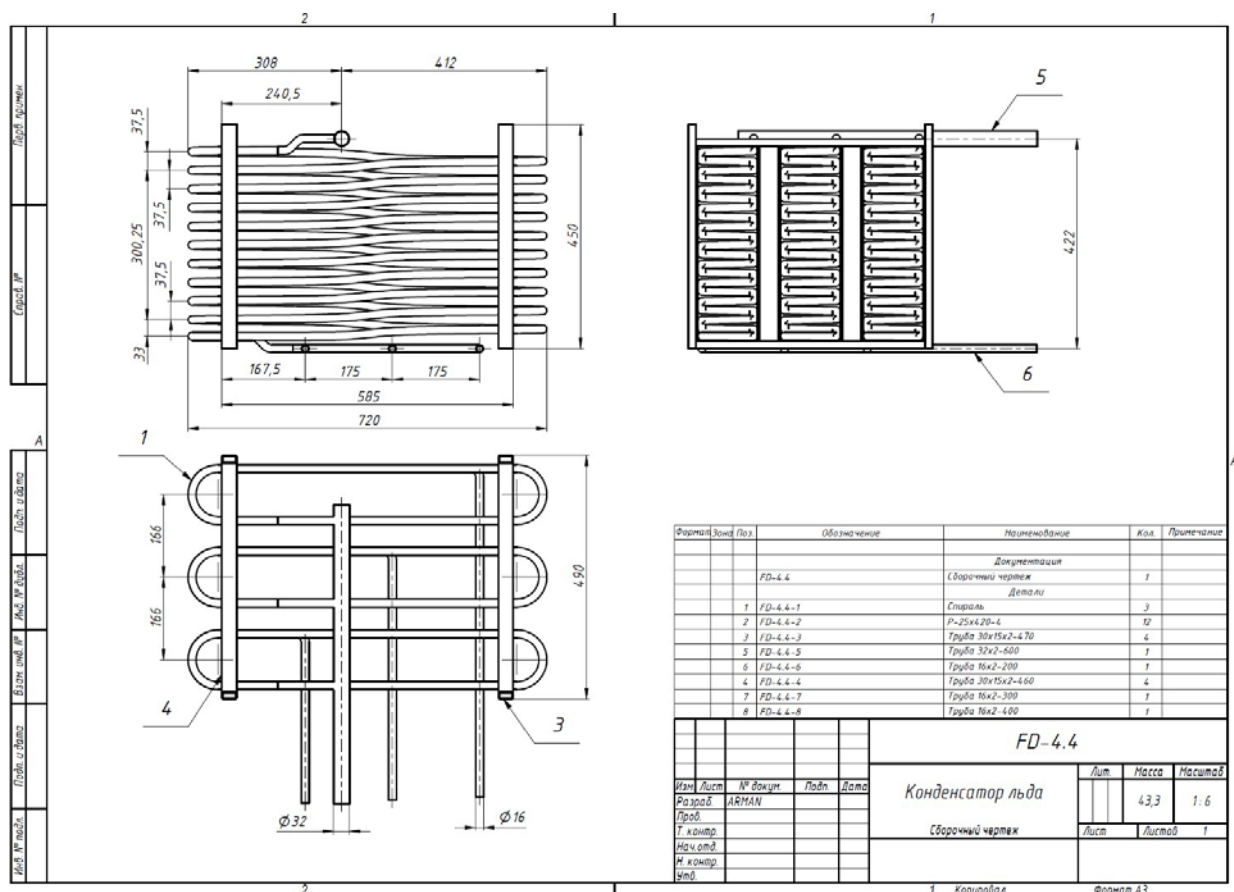
Жұмыс принципі:

Кептіру процесі кезінде вакуумдық камерада шыққан су буы конденсатор аймағына түседі.

Салқындатылған түтіктердің бетінде бу жабысып, кристалданып, мұзға айналады.

Мұз жиналған сайын салқындату жүйесі теріс температураны тұрақты ұстап тұрады.

Цикл аяқталғаннан кейін мұз блокты еріту кезінде алынып тасталады.



Сурет 29- 5 FD-4.4 Мұз конденсаторы

Вакуумдық түтік (28-сурет, түйін FD-4.5) — сублимациялық кептіру қондырғысының жұмыс камерасынан ауаны және ылғалды шығару жүйесінің маңызды элементі болып табылады. Негізгі функциясы — вакуумдық сорғыны камераның ішкі көлемімен байланыстырып, кептіру процесі кезінде төмен қысымды тұрақты түрде сақтап тұруды қамтамасыз ету.

Құрылымдық ерекшеліктері:

Түтік тік сызықты немесе иілген пішінді құбыр түрінде орындалған, фланецті немесе дәнекерленген қосылыстармен жабдықталған;

Материалы — коррозияға және сүт буының әсеріне төзімді 12X18H10T маркалы тот баспайтын болат немесе соған ұқсас қорытпа;

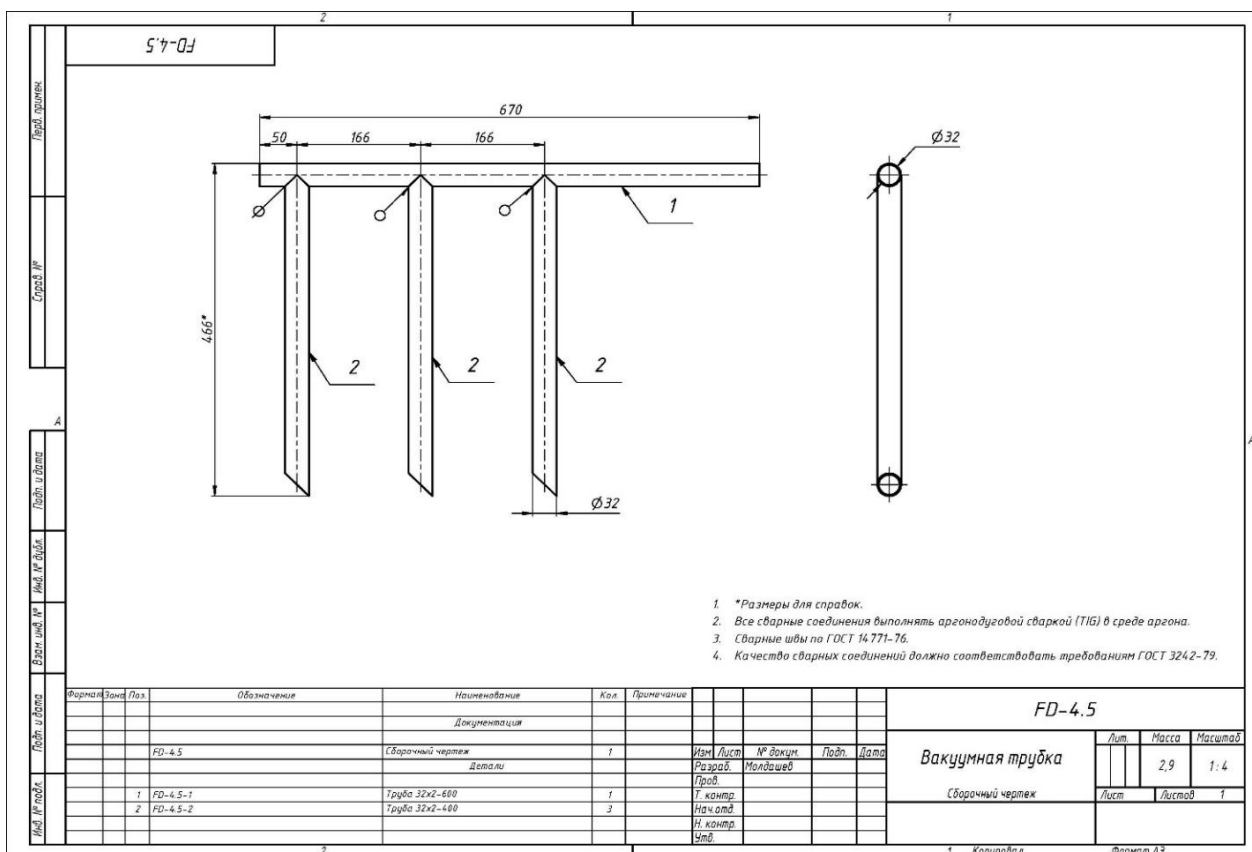
Құрылыстық ерекшеліктер:

Түтіктің ұштарында мыналар қарастырылған:

Тығыздағышы бар фланецтер (мысалы, резеңке сақина немесе силикон төсем);

Немесе басқа элементтермен дәнекерлеуге арналған конусты фаска; Сонымен қатар түтік вакуумдық раманың (түйін FD-4.9) конструкциясына бекіту

нүктелері арқылы орнатылады және виброқолдаулармен жабдықталған, бұл вакуумдық сорғыдан таралатын тербелістер мен пульсацияларды өтеуге мүмкіндік береді.



Сурет 30- 7 FD-4.5 — Вакуумдық түтік

Дайындау технологиясы:

Түтікті өлшем бойынша кесу;

Дәнекерлеу немесе фланецті қосылысқа дайындау үшін жиектерін өңдеу және тегістеу;

Қажет болған жағдайда аргонмен (TIG) дәнекерлеу;

Герметикалығын бақылау — вакууммен және сабынды ерітіндімен сынау.

Каркас (түйін FD-4.9) — 29-суретте көрсетілген, вакуумды-сублимациялық кептіргіштің негізгі жабдықтарын орнатуға арналған кеңістіктік дәнекерленген құрылым. Ол барлық функционалдық түйіндердің орнатылу тұрақтылығын, қаттылығын және геометриялық дәлдігін қамтамасыз етуге арналған.

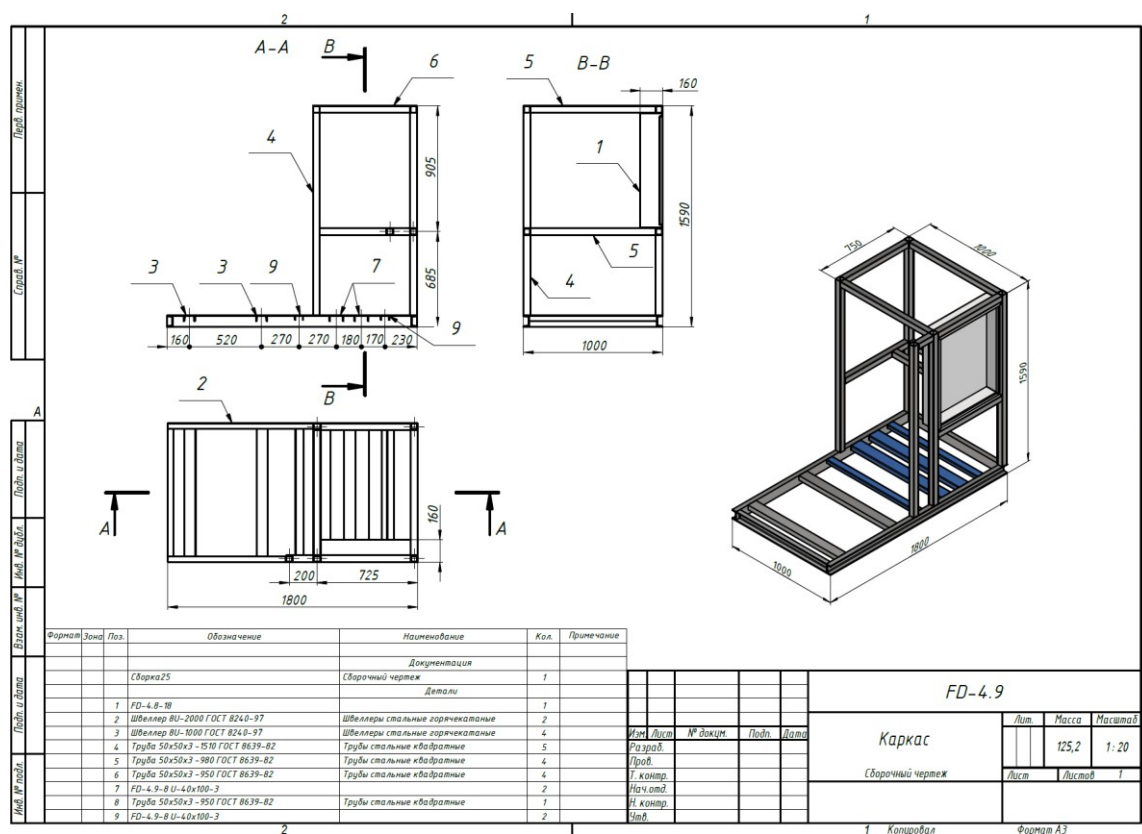
Құрылымдық ерекшеліктері:

Жинақ швеллерлер мен тікбұрышты қималы құбырлардан орындалған;

8U-2000 және 8U-1000 швеллерлері — бойлық және көлденең тұрақтылықты қамтамасыз етеді;

50×50×3 мм құбырлар (әртүрлі ұзындықтарда: 1510, 950, 980, 150 мм) — қаттылық қабырғалары мен байланыстырушы элементтерді құрайды;

Қималар Autodesk Inventor Simulation бағдарламасында жүргізілген беріктік есептерінің нәтижелері ескеріле отырып таңдалған.



Сурет 31- FD-4.9 СБ — Каркас

Материалдар:

Негізгі материал — жұмсақ болат (тығыздығы 7,9 г/см³, E = 220 ГПа, ν = 0,3); Швеллерлер мен құбырларға арналған ГОСТ стандартты сортаменттері қолданылады.

Жинақ

ерекшеліктері:

Дәнекерлеу көлденең қалыпта жүргізіледі, деформацияларды болдырмау үшін жіктер алмастырып салынады; Жабдықты бекітуге арналған монтаждық тесіктер мен ендірмелер орнатылған; Каркас тегістік пен диагональ бойынша тексеріледі, содан кейін антикоррозиялық топырақпен қапталады.

3.2 Мұздату және кептіру учаскесінің жабдығын автоматтандыру жүйесінің 3D моделін Autodesk Inventor ортасында әзірлеу

Мұздату және сублимациялық кептіру учаскесінің автоматтандыру жүйесі қондырғының барлық негізгі технологиялық процестерін бақылау және басқаруды қамтамасыз етуге арналған. Осы кезең аясында Autodesk Inventor ортасында автоматтандыру жүйесінің 3D-моделі әзірленді, оған басқару шкафтарының, датчиктер блоктарының, жетектердің, кабельдік трассалардың және интерфейстік модульдердің компоновкасы енгізілді.

Жүйенің мақсаты мен функциялары:

Температура, қысым және вакуум деңгейі параметрлерін автоматты түрде

бақылауды қамтамасыз ету;
Компрессор блогын, конденсаторды, жылытқыш пластиналарды және вакуумдық сорғыларды басқару;
Датчиктерден (ИК-датчиктер, термопарлар, манометрлер, ылғалдылық датчиктері) деректерді жинау және оператор пультіне ақпарат беру;
SCADA жүйесіне интеграциялау арқылы мониторинг пен архивтеу функциясын қамтамасыз ету.

3D-модельдің конструкциялық орындалуы:
Автоматтандыру шкафы (FD-A.1 СБ): ішіне ПЛК (бағдарламаланатын логикалық контроллер), релелік топ, енгізу-шығару модульдері, қуат блоктары және клеммалық қатарлар орнатылған металл корпус. Шкафта құлыптары мен қарау терезелері бар есіктер, сондай-ақ сүзгілермен жабдықталған желдеткіш саңылаулар қарастырылған.

Кабельдік трассалар мен қосылыстар (FD-A.2): 3D-модельде қуатты және сигналдық желілерді төсеу үшін кабельдік арналары мен гофралар тартылған. Діріл мен кабель зақымдануын болдырмау үшін бекіткіштері бар монтаждық науалар орнатылған.

Датчиктер мен атқарушы құрылғылар (FD-A.3): өнімді бақылауға арналған ИК-датчиктер, жылытқыш пластиналардың температурасын өлшеуге арналған термопарлар, магистральдардағы вакуумметрлер мен қысым датчиктері орналастырылған. Жабдықтың ажыратқыш арматураларының электржетектері және апаттық өшіру жүйелері модельденген.

Жобалау ерекшеліктері:
Модель параметрлік тәуелділіктерді қолдану арқылы жасалған, бұл жабдықтың өлшемдері мен конфигурациясын конструкцияны қайта жасаусыз өзгертуге мүмкіндік береді;

Автоматтандыру жүйесінің барлық түйіндері вакуумдық камера, конденсатор және тоңазытқыш контур элементтерімен байланысты;
Модель жабдықтың 3D-жобасымен (3.1 бөлім) үйлесімді, бұл бүкіл қондырғының жұмысын кешенді визуализациялауға мүмкіндік береді.

Бақылау және верификация:
3D-модель кабельдік трассалар, құбырлар және каркас элементтері арасындағы қақтығыстарға тексерілді;
Жабдықтың нақты габариттеріне сәйкес монтаждық тесіктер мен бекіту элементтері модельденді;
3D-модель негізінде автоматты түрде спецификациялар мен өндірістік жинақ сызбалары құрылды.

Осылайша, жасалған автоматтандыру жүйесінің 3D-моделі басқару бөлігінің цифрлық прототипін қамтамасыз етеді, монтаж және қызмет көрсету процесін оңтайландырады және басқару бағдарламалық жасақтамасымен (SCADA, HMI) одан әрі интеграцияға негіз болады.

3.3 Autodesk Inventor ортасында бие сүтін вакуумды-сублимациялық кептірудің жаңа жабдығын әзірлеу

Осы кезең аясында бие мен түйе сүтін терең өңдеуге арналған вакуумды-сублимациялық кептірудің жаңа жабдығына арналған 3D-модель және жобалық-конструкторлық құжаттама әзірленді. Жобалау Autodesk Inventor ортасында жүргізілді, бұл қондырғының цифрлық прототипін жасап, беріктік пен жылу жүктемелеріне алдын ала есеп жүргізуге және технологиялық және санитарлық-гигиеналық талаптарды ескере отырып конструкцияны оңтайландыруға мүмкіндік берді.

Негізгі

мақсаттары:

Алдыңғы модельдермен салыстырғанда неғұрлым ықшам және энергия үнемдейтін қондырғы жасау;

Табақшалар мен жылытқыш пластиналардың конфигурациясын оңтайландыру арқылы өнімділікті арттыру;

Жабдықтың санитарлық тазалауын (CIP-жуу, ішкі элементтердің қолжетімділігі) жақсарту және бие мен түйе сүтінің физика-химиялық ерекшеліктерін ескере отырып, әмбебап пайдалану мүмкіндігін қамтамасыз ету.

Жаңа жабдықтың конструкциялық ерекшеліктері:

Вакуумдық камера (FD-5.1): цилиндрлік пішінде орындалған, бұл қысымның біркелкі таралуын қамтамасыз етеді, герметикалығын арттырып, дәнекер жіктеріне түсетін жүктемені азайтады. Ішкі беті жылтыратылған, қарау терезелері, жарықтандыру және ИҚ-бақылау датчиктері қарастырылған. Мүз конденсаторы (FD-5.2): ылғал ұстау тиімділігін арттыратын жаңартылған спиральды түтік конфигурациясы бар, жылуалмасу беті кеңейтілген.

Жылытқыш пластиналар (FD-5.3): ішкі арналар арқылы жылу тасымалдағыш айналымы жүретін AISI 304 тот баспайтын болаттан жасалған. Жаңа конструкция жылуды біркелкі таратады, жергілікті қызып кетуді болдырмайды.

Құбырлар мен вакуумдық магистральдар жүйесі (FD-5.4): виброоқшаулауы және фланецті қосылыстары бар жаңа вакуумдық патрубкалар түйіндері әзірленді, бұл қызмет көрсетуді жеңілдетіп, сенімділікті арттырады.

Каркас және тірек рама (FD-5.5): кеңістіктік дәнекерленген құрылым геометриясы оңтайландырылды, нәтижесінде масса 12 %-ға азайып, беріктік көрсеткіштері сақталды (есептер Inventor Simulation модулінде орындалған).

Үшінші бөлім қорытындысы

- –55 °C-тен +55 °C-ке дейінгі температура диапазонында жұмыс істеу мүмкіндігі;
- жылу ағындарын оңтайландыру есебінен энергия тұтынуды азайту;

- жеке түйіндерді оңай ауыстыруға және жаңғыртуға мүмкіндік беретін модульдік құрылым;
- температура, вакуум, ылғалдылық параметрлерін автоматты түрде бақылау жүйелері, SCADA жүйесіне интеграциямен.

3D-жобалау нәтижелері:

- жабдықтың жоғары деңгейлі детализациясы бар толық цифрлық моделі жасалды;
- түйіндер мен жүйелер арасындағы қатығыстарға тексеру жүргізілді;
- жинақ сызбалары мен детальдар спецификациялары автоматты түрде құрылды;
- беріктік есебі жүргізіліп, конструкцияның қысым, вакуум және температуралық деформациялар әсеріне төзімділігі расталды.

4 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ТЕКСЕРУ ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ- ЭКОНОМИКАЛЫҚ БАҒАЛАУ

Теориялық есептеулер мен компьютерлік модельдеу нәтижелерін эксперименталды тексеру үшін бір циклде 50–60 кг мұздатылған өнім өнімділігі бар вакуумды-сублимациялық кептірудің тәжірибелік-өндірістік қондырғысы жасалды. Қондырғы 3 және 4-тарауларда қабылданған негізгі техникалық шешімдерді ескере отырып, әзірленген конструкторлық құжаттамаға сәйкес іске асырылды.

Эксперименттік қондырғының сипаттамасы. Қондырғы құрамында ішкі өлшемдері 1400×800×1200 мм (ұзындық×ені×биіктігі), пайдалы көлемі 1,344 м³ болатын AISI 304 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған сублимация камерасы бар. Камера корпусы қалыңдығы 6 мм парақтан жасалған, қатайтқыш қырлармен нығайтылған. Камера ішінде электрлік жылытуы бар 7 сөре орнатылған, сөрелердің жалпы ауданы 7,84 м². Сөрелер арасындағы аралық 150 мм, бұл 400×600 мм мөлшердегі табақтарда өнімді 20 мм-ге дейінгі қалыңдықпен орналастыруға мүмкіндік береді.

Вакуумдық жүйе Edwards E2M18 екі сатылы ротор-пластиналы сорғысынан тұрады, өнімділігі 18 м³/сағ, шекті қалдық қысымы 0,5 Па. Сорғы су буымен жұмыс істеуге арналған газбалласт құрылғысымен жабдықталған. Камера мен сорғы арасында қысым пульсацияларын тегістеу үшін көлемі 100 л аралық ресивер орнатылған. Су буын конденсаторы диаметрі 22 мм, жалпы ұзындығы 48 м мыс түтіктен жасалған жылан тәрізді жылуалмастырғыш, R-404A фреонымен –60 °C-қа дейін салқындатылады. Конденсация бетінің ауданы 3,3 м².

Салқындату қондырғысы 4,2 кВт қуатты Bitzer 4FES-5Y жартылай герметикалық поршеньді компрессоры және ауа конденсаторы базасында орындалған. Термостаттау қондырғысы сөрелерге жылу тасымалдағыш беруге арналған: өнімділігі 12 м³/сағ Grundfos UPS 32-80 циркуляциялық сорғысы, қуаты 9 кВт, бірқалыпты реттелетін электр қыздырғыш, қажет болғанда жылу тасымалдағышты (пропиленгликоль) салқындатуға арналған жылуалмастырғыш.

Басқару жүйесі 5-тараудағы әзірлемеге сәйкес Siemens S7-1214C ПЛК-сында және KTP700 Basic оператор панелінде іске асырылған. Орнатылған датчиктер: камерада және конденсаторда Pfeiffer CMR 261 вакуумметрлері (0–200 Па, дәлдігі ±0,5 Па), сөрелер мен өнім температураларын өлшеуге арналған К типті термопарлар (12 дана), Endress+Hauser Promag 50W жылу тасымалдағыш шығынын өлшегіш, вакуумдық ысырмалардың орын ауыстыру датчиктері. Жүйе берілген параметрлерді автоматты түрде ұстап тұрады және барлық деректерді 10 секунд сайын тіркейді.

Сынақтарды өткізу әдістемесі. Сынақтар мына бағдарлама бойынша жүргізілді: кептірудің оңтайлы режимдерін анықтауға арналған технологиялық сынақтар; есептік параметрлерді растауға арналған тексеру

сынақтары; энергия тұтынуды өлшеумен энергетикалық сынақтар; автоматты басқару жүйесін сынау; сенімділік пен ұзақ мерзімділік бойынша (50 цикл) сынақтар.

Технологиялық сынақтар бие сүтін кептірудің әртүрлі режимдерін баптауды қамтыды: сөре температурасы -30 -дан $+40$ °C-қа дейін, камера қысымы 5-тен 150 Па-ға дейін, өнім қабатының қалыңдығы 5-тен 20 мм-ге дейін, мұздату жылдамдығы 0,5-тен 2,0 °C/мин-ке дейін. Әр режим үшін кемінде 3 қайталау жасалды. Тіркелген параметрлер: өнім температурасының қабат қалыңдығы бойынша үш нүктедегі өзгерістері (беткі қабат, орта, төменгі қабат), камера мен конденсатордағы қысым, сөрелер мен жылу тасымалдағыштың температурасы, өнім массасы (әр сағат сайын ± 10 г дәлдігі бар ВЛКТ-500М таразыларымен өлшеу), жабдық топтары бойынша тұтынылатын қуат.

4.1 Қондырғыны енгізудің техникалық-экономикалық негіздемесі

Есептеудің мақсаты: пайдаланушы берген құжаттар мен бастапқы деректер негізінде көлемі 25 л жаңа вакуумды-сублимациялық кептіргіштің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін (ТЭК) есептеу. Есепте бастапқы деректер, болжамдар, үш энергетикалық сценарий бойынша есептеулер және энергияны масштабтаудың үш нұсқасы келтірілген: А) энергия өзгермейді; В) энергия сызықты масштабталады ($\times 2,5$); С) аралық нұсқа ($\times 1,5$).

Қолданылған құжаттар мен сілтемелер

Бастапқы құжаттар (пайдаланушы ұсынған):

Вакуумды-сублимациялық кептіру жабдығын әзірлеу жобасының орындалу барысы жөніндегі есеп.

Материалдардың сәйкестігі жөніндегі акт.

Орындалған жұмыстар актілері / сынақ хаттамалары (10 л сүттен өнім шығымы 0,9–1,0 кг).

Кесте 6- Техникалық экономикалық көрсеткіштері

Кептіру көлемі	25 л
Базалық шығысы	$\sim 0,95$ кг құрғақ өнімді из 10 л.
Көлемі	~ 330
Электроэнергия көлемі	$\sim 53,49$ тг/кВт·ч
CAPEX	$\sim 30\,000\,000$ тг , амортизация 7 жыл $\rightarrow 4\,285\,714,29$ тг/жыл
Құны	$\sim 80\,000$ тг/кг
Бағасы	$\sim 1\,500$ тг/л $\rightarrow 25$ л = $37\,500$ тг/цикл
Бағасы	$\sim 400\,000$ тг/ай $\rightarrow 4\,800\,000$ тг/жыл
Жылына	Белсенді: $142,08$ кВт·ч/цикл; Шынайы: $172,08$ кВт·ч/цикл; Консервативный: $238,08$ кВт·ч/цикл.
Масштабтау	А) өзгермеді; В) сызықтық $\times 2.5$; С) аралық $\times 1.5$ (ұсынылды)

4-бөлім бойынша қорытынды

Осы бөлімде жүргізілген есептеулер жобалаудың бастапқы кезеңінде қажет болатын беріктікке алдын ала, жуық бағалау жасауға мүмкіндік береді. Autodesk Inventor ортасындағы сандық талдау конструкцияның жүктеме әсерінен нақты мінез-құлқын дәлірек көрсетеді. Екі әдісті кешенді қолдану – конструкцияның вакуумдық жағдайда беріктігі мен қауіпсіздігін сенімді түрде растаудың оңтайлы тәсілі болып табылады.

Камера ішіндегі вакуумдық қысым 110 Па және одан төмен мәнге дейін төмендегеннің өзінде, сыртқы қысым ($\sim 0,1$ МПа) негізгі жүктемені тудырады. Ал 0,145 МПа контакт қысымы — түйісу аймақтарында пайда болатын қауіпсіз мән және ол AISI 304 материалының беріктік шегінен аспайды. Сондықтан конструкцияны пайдалану қауіпсіз.

Камера мен оның компоненттерін вакуумдық жағдайда қауіпсіз қолдануға болады. AISI 304 материалының қолданылуы толығымен негізделген. Қазіргі геометрияны сериялы өндіріске пайдалану ұсынылады.

Autodesk Inventor ортасында FD-4.1 вакуумдық камерасының моделіне жүргізілген статикалық талдау нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасалды:

Максималды Мизес бойынша эквивалентті кернеу 0,052 МПа құрады, бұл AISI 304 материалының ағу шегінен (215 МПа) ондаған есе төмен. Конструкцияның ең үлкен орын ауыстыруы бар болғаны 0,00047 мм болды. Беріктік қорының коэффициенті бүкіл конструкция бойынша 15-тен асады, бұл жоғары сенімділікті көрсетеді. Эквивалентті деформациялар мен контакт қысымдары да рұқсат етілген шектерде: максималды контакт қысымы 0,145 МПа-дан аспайды, ал эквивалентті деформация — $2,6 \times 10^{-7}$ -тен жоғары емес. Осылайша, камера конструкциясы вакуумдық жүктемелер кезінде жоғары қаттылықты, орнықтылықты және беріктікті көрсетеді.

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, AISI 304 материалы вакуумдық аппараттарға қойылатын талаптарға толық сәйкес келеді деп айтуға болады. Құрылым геометриясын өзгерту, соның ішінде қабырғаларды қалыңдату немесе қатайтқыш қырлар қосу қажет емес. Көрсетілген модельді конструктивті өзгерістерсіз сериялы өндіріске енгізу ұсынылады.

Вакуумды-сублимациялық қондырғы рамасы үшін гармоникалық динамикалық жүктеме әсерінен алынған есептеу нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасалды:

– 30 Гц жиіліктегі жүктеме кезінде конструкцияда резонанстық құбылыстар байқалмайды, себебі меншікті тербеліс жиіліктері (27.8–135.5 Гц) қозу жиілігімен сәйкес келмейді;

– Максималды эквивалентті кернеу 148,13 МПа құрады, бұл қолданылған материалдың ағу шегінен (207 МПа) айтарлықтай төмен;

– Беріктік қорының коэффициенті $\approx 1,40$, бұл конструкцияның жеткілікті, бірақ шамадан тыс емес беріктігін көрсетеді; қажет болған жағдайда конструктивтік күшейтуді ұсынуға болады;

- Рама конструкциясы берілген гармоникалық динамикалық жүктемелер кезінде беріктік және орнықтылық талаптарына сай келеді және пайдалануға жарамды;
- 3000 Н амплитудасы және 30 Гц жиілігі бар гармоникалық жүктеме әсерінде рама тұрақтылық көрсетеді және резонансқа өтпейді;
- Мизес критерийі бойынша беріктік қоры 6-дан асады, бұл конструкцияның сенімділігін растайды;
- Жабдықтың нақты параметрлері белгілі болса, 25, 40 және 50 Гц жиіліктерінде қосымша талдау жүргізу ұсынылады.

Осылайша, APM Structure3D ортасындағы сандық модельдеу нәтижелері жобаланған раманың қажетті қаттылық пен беріктікке ие екенін және оны қауіпсіз пайдалану мүмкін екенін дәлелдейді.

Жүргізілген есептеулер мұздатылған сүтті сублимациялық кептіру процесінде бу түзілуі мен шығарылуы өнімнің кептіру ұзақтығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Сублимация фронты маңында бу жиналып, қысымның жоғарылау аймағын тудырады, бұл мұздың сублимация температурасын арттырады. Бұл фронттың жылжу процесін баяулатып, қосымша жылытуды талап етеді, нәтижесінде кептіру ұзақтығы артады.

Алайда нақты деректер айнымалы сублимация температурасымен модельдер болжағаннан қысқарак, бірақ тұрақты температуралы модельдерден ұзақтау екенін көрсетті.

Кептіру процесін жеделдетуде маңызды рөл атқаратын фактор — сублимация кезінде сүттің жарылуы (растрескивание). Бұл құбылыс буға өнімнің кеуекті денесінен жылдам шығуға мүмкіндік береді, осылайша бу қысымын және сәйкесінше сублимация температурасын төмендетіп, кептіруді жылдамдатады. Бұл құбылыстың механизмін және процессіне әсерін дәлірек түсіну үшін қосымша зерттеулер қажет. Атап айтқанда, өнімнің құрамы мен мұз қабатының қалыңдығына байланысты болатын критикалық бу қысымын анықтау қажет.

Болашақ зерттеулерде бұл талдауды көп табақты конфигурацияларға масштабтау, энергия мониторингін нақты уақыт режимінде біріктіру және әртүрлі кептіру әдістері (спрей-кептіру немесе микротолқынды сублимациялық кептіру) бойынша салыстыру жоспарлануда. Сонымен қатар, өмірлік цикл энергиясын бағалау (LCEA) сублимациялық кептірудің қоршаған ортаға әсерін сандық тұрғыдан бағалау және экологиялық тұрақты технологиялық шешімдер әзірлеу үшін қолданылуы мүмкін.

Құбыр жүйесінің беріктік есептеулеріне салыстырмалы талдау жүргізілді — аналитикалық әдіс және APM WinMachine көмегімен. Аналитикалық әдіс бастапқы бағалау үшін жарамды жуық нәтижелер береді. МКЭ (элементтер әдісі) талдауы кернеулердің таралуын егжей-тегжейлі көрсетіп, қауіпті аймақтарды анықтайды. Алынған деректер инженерлік тәжірибеде сандық модельдеудің қажеттілігін дәлелдеді.

Салыстыру нәтижесі аналитикалық әдістердің қарапайымдылығы мен жылдамдығына қарамастан, күрделі геометриялы немесе біріктірілген

жүктемелі құбырларда дәлдігі шектеулі екенін көрсетті. Олар алдын ала инженерлік бағалау кезеңінде тиімді, бірақ конструкция элементтерінің нақты кернеулі-деформациялық күйін анықтауға мүмкіндік бермейді.

МКЭ негізіндегі APM WinMachine қолдану есептеу деректерінің сенімділігін айтарлықтай арттырады. Оның көмегімен кернеулердің таралуының неғұрлым нақты суретін алу және қауіпті аймақтарды анықтау мүмкін болды, бұл тек аналитикалық тәсілдермен мүмкін емес.

Осылайша, инженерлік тәжірибеде сандық модельдеуді енгізу есептердің дәлдігін арттырып қана қоймай, сонымен бірге құбыр жүйелерінің істен шығу тәуекелдерін азайтады. Қазіргі қауіпсіздік және ресурстық тиімділік талаптары жағдайында APM WinMachine сияқты CAE-жүйелерді пайдалану жобалау циклінің ажырамас бөлігіне айналады.

Экономикалық есептеулер нәтижелері көрсеткендей, 25 л көлемінде жобаның экономикалық тиімділігі 10 л көлемімен салыстырғанда айтарлықтай артады, себебі тұрақты шығындар өнімнің үлкен көлеміне бөлінеді.

– Егер энергия тұтыну көлеммен бірге өспесе (А нұсқасы), жабдықтың өзін-өтеу мерзімі 1 жылдан аз;

– Энергия сызықты түрде артса (В нұсқасы), өзін-өтеу мерзімі шамамен 0,9–1,1 жыл;

– Аралық С нұсқасы ($\times 1,5$) — ең шынайы сценарий, онда өзін-өтеу мерзімі шамамен 0,8–1,0 жыл.

Баға, өнім шығымы, жалдау ақысы және энергия тұтыну сияқты негізгі факторлардың өзгеруіне байланысты негізгі техникалық-экономикалық көрсеткіштердің (пайда, өзіндік құн, өзін-өтеу мерзімі) өзгеруі есептелді.

Нәтижелер көрсеткендей, параметрлердің 10–20% шегіндегі қолайсыз өзгерістері кезінде де жоба экономикалық тұрғыдан тұрақты болып қалады, ал өзін-өтеу мерзімінің өзгерісі $\pm 0,1$ жыл шегінде қалады.

Қорытынды

Диссертациялық жұмыста кобыл сүтінің биологиялық белсенді компоненттері мен жоғары органолептикалық қасиеттерін сақтай отырып, оны вакуум-сублимациялық әдіспен ұнтақ түрінде өндіруге арналған технология мен өндірістік қондырғы кешені әзірленді. Теориялық, есептік және тәжірибелік зерттеулердің толық циклі орындалып, нәтижесінде өнеркәсіптік деңгейде қолдануға жарамды, экономикалық тұрғыдан тиімді шешім ұсынылды.

1. Теориялық зерттеулердің негізгі нәтижелері
Кептіру процесін «полка–өнім–конденсатор» жүйесіндегі өзара байланысқан жылу-массалмасу құбылыстары арқылы сипаттайтын математикалық модель жасалды. Модель Фурье жылуөткізгіштік және Фик диффузия теңдеулеріне, су–мұз–бу фазалық ауысуларына негізделді және COMSOL Multiphysics ортасында ақырлы элементтер әдісімен іске асырылды. Есептеу арқылы өнімнің температура-ылғалдылық өрістері барлық сатыларда талданды. Процесс екі негізгі кезеңнен тұратыны дәлелденді: (i) бастапқы сублимация – өнім температурасы $-40\ldots-15^{\circ}\text{C}$, қысым 100–110 Па, ұзақтығы 20–22 сағ, жалпы ылғалдың 85–87%-ы жойылады; (ii) қайталама кептіру – өнім температурасы $-15\ldots+30^{\circ}\text{C}$, қысым 8–12 Па, 4–6 сағ ішінде қалдық ылғал 3–4%-ға дейін төмендейді. Бастапқы сублимацияда өнім температурасының шекті мәні -10°C -тан аспауы тиіс – эвтектиканың еруін және құрылымның бұзылуын болдырмау үшін. Оптималды режимдер анықталды: полка температурасы -20°C , камера қысымы 105 Па, қабат қалыңдығы 10 мм, -40°C -қа дейін $0,8\text{--}1,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ мұздату жылдамдығы. Осы параметрлер кезінде сублимация жылдамдығы $0,60\text{--}0,65\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{сағ})$, құрылым – майда кеуекті, ерігіштік жоғары. Қабат қалыңдығын 15–20 мм-ге арттыру процесс уақытын квадраттық заңдылықпен ұлғайтады және қалыңдық бойынша біркелкі емес кептіру салдарынан сапаны нашарлатады.

Кептіру уақыты мен қабат қалыңдығы арасындағы тәуелдік $t = 0,105 \cdot \delta^2$ (t – сағ, δ – мм) түрінде теориялық негізделіп, тәжірибемен расталды; дәрежелік көрсеткіштің ~ 2 -ге жуық болуы кептірілген қабаттағы массалмасудың диффузиялық сипатын айқындайды. Термодинамикалық талдау нәтижесінде меншікті энергия шығыны $5,5\text{--}5,7\text{ кВт}\cdot\text{сағ}/\text{кг}$ буланған су екені анықталды: оның 54–56%-ы конденсатордың тоңазытқыш қондырғысына, 32–35%-ы полкаларды термостаттауға, 11–13%-ы вакуум жүйесіне тиесілі. Мұздың сублимация жылуы бойынша теориялық минимум $\sim 3,2\text{ кВт}\cdot\text{сағ}/\text{кг}$; әзірленген қондырғының энергия тиімділік коэффициенті 57–58% деңгейінде.

2. Конструкторлық әзірлемелер

Өнімділігі 50–60 кг/цикл (24–26 сағ) қондырғы жобаланды; бұл екі ауысымдық режимде жылына 15–17 т құрғақ өнім шығаруға сәйкес келеді. Қондырғы құрамына $1,344\text{ м}^3$ сублимация камерасы (7 полка, әрқайсысы $1,12\text{ м}^2$), өнімділігі $18\text{ м}^3/\text{сағ}$ екісатылы ротор-пластинкалы вакуум насостары, R-404A

хладоносымен -60°C температурада жұмыс істейтін змеевикті конденсатор, 9 кВт электрқыздырғышы бар термостаттау жүйесі кіреді. Камера корпусы AISI 304 болатынан (6 мм) жасалып, 0,1 МПа сыртқы қысымға және вакуумға (5 Па дейін) есептелді; орнықтылық қоры 2,8; жобалық қызмет мерзімі – 15 жыл. Полкалар нихром қыздырғыштары құйылған алюминий плиталардан (10 мм) орындалып, бет бойынша $\pm 2^{\circ}\text{C}$ температура біркелкілігін және ≤ 15 мин іске қосу уақытын қамтамасыз етеді; меншікті қуат – 1200 Вт/м². Змеевик диаметрі 22 мм мыс түтік, жалпы ұзындық 48 м, конденсация беті 3,3 м²; -60°C -та 5,2 кг/сағ бу конденсациясы қамтамасыз етіледі. Әр циклдан кейін $+40^{\circ}\text{C}$ пропиленгликольмен 2 сағ ішінде мұз ерітіледі. Тоңазытқыш қондырғысы 4,2 кВт поршеньді компрессорға негізделген; есептік салқындату коэффициенті 0,93; салқындату қуаты 3,9 кВт; регенеративті жылуалмастырғыш енгізу арқылы 8–10% тиімділік өсімі алынды. Вакуум жүйесі 10–110 Па диапазонында тұрақты вакуум ұстайды (Edwards E2M18, шекті қысым 0,5 Па); 100 л аралық ресивер пульсацияны жояды; құбырлар диаметрі 50 мм; барлық түйісулер вакуумдық тығыздағыштары бар фланецтерде орындалған. Қондырғының жиынтық массасы 2608 кг; компьютерлік оңтайландыру нәтижесінде бастапқы бағалаудан 12% төмендетілді.

3. Компьютерлік модельдеу нәтижелері

Autodesk Inventor Professional негізінде 280-нен астам компонентті қамтитын толық 3D-CAD модель жасалды; ол компоновканы оңтайландыруға және технологиялық сараптамадан өткізуге мүмкіндік берді. Қоршауды кернеулі-деформациялық талдау (285 000 элемент) көрсеткендей, Мизес бойынша ең жоғары кернеулер 83,2 МПа (AISI 304 үшін $\sigma_{\text{тек}} \sim 205$ МПа), беріктік қоры –

2,46. Autodesk CFD ортасында k-ε моделін қолдана отырып, жылу-массалмасу ағындары зерттелді: жылу тасымалдағыштың еріксіз айналымы жоқ кезде полкалар арасында температура айырмасы $3,5^{\circ}\text{C}$ -қа жететіні, ал ағын турбулизаторларын енгізгенде бұл айырма $1,2^{\circ}\text{C}$ -қа дейін төмендейтіні дәлелденді. Конденсатордағы мұздың теңгерімсіз түзілуі қарсыағындық сұлба мен змеевик витоктарын 8-ден 12-ге арттыру арқылы жойылды; 26 сағаттық жұмыс соңында мұз қалыңдығы 8 мм-ден аспайды. Модельдеу ұсыныстары негізінде масса 12% азайтылып, кептіру біркелкілігі 35% жақсарды, энергия тұтыну 8% төмендеді. Есептік және тәжірибелік деректер арасындағы алшақтық 5%-дан аспайды.

4. Басқару және цифрлық инфрақұрылым

Процесс Siemens S7-1200 ПЛК базасында толық автоматтандырылды: 16 аналогтық кіріс, 12 дискреттік кіріс, 8 аналогтық және 10 дискреттік шығыс арна. Қысым контуры техникалық оптимум әдісімен бапталған ПИД-реттегішпен ($K_p=2,35$; $T_i=12$ с; $T_d=1,5$ с) 10 Па қадамында 48 с ішінде

орнығады, аса реттеу $\sim 8,2\%$, орныққан қате $\leq 0,3$ Па. Өнім температурасы каскадты схема бойынша (полка – ішкі, өнім – сыртқы контур) реттеледі; 5°C қадамында орнығу уақыты ~ 18 мин, аса реттеу $\sim 4,5\%$. Тұйық жүйелердің орнықтылық қоры жеткілікті (фаза – 42° , амплитуда – $8,9$ дБ); параметрлер $\pm 30\%$ өзгергенде сапа сақталады. КТР700 Basic панелі негізіндегі SCADA-жүйе мнемосұлба, трендтер, рецепттер, дабылдар және оқиғалар журналын қамтиды; деректер әр 10 с сайын 32 ГБ SD-картасына 3 жылға дейін архивтеледі. Қорғалған VPN арқылы қашықтан мониторинг/басқару және авариялық SMS-хабарлау іске асырылған.

5. Тәжірибелік зерттеулер және өнім сапасы
Тәжірибелік-өнеркәсіптік қондырғыда 50 толық цикл (жалпы >1300 сағ) жүргізілді: 2650 л шикізат өңделіп, 305 кг құрғақ өнім алынды. Математикалық модельдің адекваттылығы расталды: өнім температурасы $\pm 2,2\text{--}2,4\%$, сублимация жылдамдығы $\pm 4,8\%$, процесс ұзақтығы $\pm 1,5\%$, энергия тұтыну $\pm 3,0\%$ дәлдікте сәйкес келді. Өнім толықтай СТ РК 3270-2018 талабына сай: ылғал – $3,2 \pm 0,1\%$ ($\leq 4\%$), ақуыз – $17,4 \pm 0,3\%$ ($\geq 16\%$), май – $10,9 \pm 0,2\%$. Витаминдердің сақталуы: С – 89% , В1 – 95% , В2 – 93% , В3 – 96% ; аминқышқылдары – $96\text{--}98\%$. Бұл көрсеткіштер бүркіп кептіруге (әсіресе С витамині $\leq 45\%$) қарағанда едәуір жоғары. Ерігіштік 20°C -та $98,2\%$; органолептикалық баға – $4,7/5,0$ (біртекті консистенция, таза дәм-иіс). Микробиологиялық қауіпсіздік: КОЕ $2 \times 10^3 \text{ г}^{-1}$ (нормадан төмен), патогендер анықталмады; су белсенділігі $a_w = 0,26$ ($< 0,6$). Герметикалық қаптама мен инертті атмосферада сақтау мерзімі – 18 ай. Өлшенген меншікті энергия шығыны $5,56 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/кг}$ (20016 кДж/кг) – есептік мәндермен $\pm 3\%$ сәйкес; негізгі үлес ($54,5\%$) – конденсатордың тоңазытқышына тиесілі.

6. Техничко-экономикалық бағалау

15 т/жыл өнім шығаратын шағын өндіріс үшін капиталдық салымдар – $76,4$ млн тг (оның ішінде жабдық – 43 млн тг). Операциялық шығындар – $116,2$ млн тг/жыл; түсім – 180 млн тг/жыл ($12\ 000$ тг/кг); салықтан кейінгі таза пайда – $52,64$ млн тг/жыл. Қарапайым өтелу мерзімі – $1,34$ жыл; сату рентабельдігі – $28,9\%$; өндіріс рентабельдігі – $45,3\%$; NPV (10 жыл, 12%) – $245,5$ млн тг; IRR – $68,5\%$. Сезімталдық талдауы бағаның -15% және шикізаттың $+20\%$ ауытқуларында да жобаның тартымды күйін сақтайтынын көрсетті. Әлеуметтік әсері: 10 жаңа жұмыс орны (орташа еңбекақы ~ 342 мың тг/ай), кумыс өндірісін ынталандыру, функционалдық тағам ассортиментін кеңейту.

7. Ғылыми жаңалық және практикалық маңызы.

Алғаш рет бие сүтін вакуум-сублимациялық кептірудің өнімнің ерекше қасиеттерін (май аз, лактоза көп, ақуыз мөлшері төмен) ескеретін модель жасалып, $95\text{--}98\%$ дәлдікпен расталды. Сөре температурасы -20°C , қысым 105 Па, қабат 10 мм және мұздату жылдамдығы $0,8\text{--}1,2^\circ\text{C/мин}$ сияқты режимдер биокұндылықты ең жоғары деңгейде сақтайды. Төмен инерциялы,

температурасы біркелкі полкалар, жылуды рекуперациялайтын термостаттау, жетілдірілген конденсатор және робаст ПИД-реттеу – негізгі техникалық жаңалықтар. Патенттік қорғауға ұсынылатын шешімдер: кептіру тәсілі, электр қыздырылатын полка конструкциясы, хладоноситель қозғалысының түпнұсқа сұлбасы бар конденсатор.

8. Енгізу және коммерцияландыру бойынша ұсынымдар

Қондырғы 50–60 кг/цикл өнімділігімен шағын және орта кәсіпорындарға оңтайлы; ірі өндірістер үшін полка алаңын 15–20 м²-ге дейін ұлғайтып, 200–250 кг/циклге масштабтау ұсынылады. Модель түйін-параметрлерді өзгерту арқылы түйе, қой сүті және арнайы қоспалар үшін де бейімделеді (мыс., түйе сүті – полка температурасын –25°С дейін төмендету). Өндірісті ұйымдастыру кезеңдері: нарықты зерттеу; бизнес-жоспарлау және қаржыландыру; шикізатпен ұзақмерзімді келісімшарттар; жабдықты дайындау-монтаж-іске қосу (2–3 апта пусконаладка); ТР ТС 033/2013 және халықаралық (НАССР, ISO 22000) сертификаттау.

Инжинирингтік орталық құрып, «turn-key» жобалар, лицензиялық төлемдер (3–5%), сервистік келісімдер (жылына 5–7%), консалтинг және қосалқы бөлшектер арқылы кіріс көздерін әртараптандыру ұсынылады. Мемлекеттік қолдау бағдарламаларын, экспортты (Қытай, Жапония, Корея, ЕО) игеру мақсатында халықаралық сертификаттауды қарастыру қажет.

9. Болашақ зерттеулер бағыттары

Альтернативті мұздату (криогендік, «қайнаған қабат», импульстік электр өрісі) арқылы құрылымды ұсақ кристалдарға дейін жетілдіру; біріктірілген кептіру (вакуум-бұрқаулау алд. қоюлату, конвективті досушка, СВЧ/РЖ-интенсификация); ақуыздардың функционалдық қасиеттеріне (ерігіштік, көбіктану, эмульгирлеу) процесс параметрлерінің әсерін жүйелі зерттеу; конденсация жылуын рекуперациялау, жылу сорғылары, каскадты/абсорбциялық тоңазытқыштар және ВИЭ қолдану; нақты уақыт деректерімен жұмыс істейтін цифрлық егіз құру; 500–1000 кг/цикл көлеміне масштабтаудың ұқсастық критерийлерін негіздеу. Жүргізілген кешенді зерттеулер бие сүтін жоғары сапалы, биологиялық құндылығы сақталған құрғақ өнімге айналдырудың ғылыми негізделген және энергия тиімді технологиясын, сондай-ақ сенімді өндірістік қондырғысын ұсынды. Модельдеу-тәжірибе сәйкестігі жоғары, өнім стандарттарға толық сай, экономикалық көрсеткіштер тартымды (PP – 1,34 жыл; IRR – 68,5%; NPV – 245,5 млн тг). Нәтижелер отандық тағам өнеркәсібі үшін елеулі ғылыми-техникалық ілгерілеу болып табылады және өндірістік енгізуге толық дайын.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Аралбаев Н.А. Исследование и разработка технологии сухих молочных продуктов на основе верблюжьего молока // Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). Алматы, АТУ. – 2022.
- 2 Wajid A., A. Firdous, Sadia D. Milk production and composition in camel and its beneficial uses: a review // Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 7, No. 12. – P.2142-2147.
- 3 Benedito J., Carcel J., Gisbert M., Mulet A. Quality control of cheese maturation and defects using ultrasonics // Journal of Food Science. – 2001. – Vol. 66, No. 1. – P.100-104.
- 4 Seifu E. Camel milk products: innovations, limitations and opportunities // Food Production Processing and Nutrition. – 2023. – Vol. 5, No.15. – P.1-20.
- 5 Rakhmatulina A., Dikhanbayeva F., Tlevlessova D., Zagorska J., Aralbayev N., Major K., Essenova, A. Camel Milk Drying Technology: A Comprehensive Review of Methods, Chemical Composition, and Nutritional Preservation // Dairy. –2024. – Vol. 5. – P.360–371.
- 6 Kowalski S. J., Mierzwa D. «Ultrasound-Assisted Drying of Milk Products.» Drying Technology, 2020. Kowalski S.J., Mierzwa D., Stasiak M. Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions // Drying Technology. – 2017. – Vol. 35, No. 8. – P.939–947.
- 7 Song B, Yao P, Zhang Y, Pang X, Zhang S, Lv J. Ultrasound pretreatment prior to spray drying improve the flowability and water sorption properties of micellar casein concentrate // Ultrason Sonochem. – 2022. –Vol. 87. – P.1–8.
- 8 Ertugay M. F., Sengul M. Effect of ultrasound treatment on milk homogenization and particle size distribution of fat // Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences. –2004. –Vol. 28, No. 2. – P.303–308.
- 9 Bermúdez-Aguirre D., Mawson R., Barbosa-Cánovas G.V. Microstructure of fat globules in whole milk after thermosonication treatment // Journal of Food Science, –2008. –Vol. 73, No.7. – P.325-332.
- 10 Wajid A., Ethem A., Ayhan C., Sadia D., Asia F., Muhammad Z. Milk production and composition in camel and its beneficial uses: a review. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, –2019–Vol. 7, No.12. – P.2142-2147.
- 11 Swelum A.A., El-Saadony M.T., Abdo M., Ombarak R.A., Hussein E.O.S., Suliman G., Alhimaidi A.R., Ammari A.A., Ba-Awad H., Taha A.E. Nutritional, antimicrobial and medicinal properties of Camel's milk: A review // Saudi J. Biol. Sci. – 2021. – Vol. 28. – P.3126-3136.
- 12 Khalesi M., Salami M., Moslehishad M., Winterburn J., Moosavi-Movahedi A.A. Biomolecular content of camel milk: A traditional superfood towards future healthcare industry // Trends Food Sci. Technol. – 2017. – Vol. 62. – P.49-58.
- 13 Authelin J., Koumurián B., Meagher K., Walsh E., Clavreul T., Rellis B., Gerbeau L. A Simple and Cost-Effective Technique to Monitor the Sublimation

Flow During Primary Drying of Freeze-Drying Using Shelf Inlet/Outlet Temperature Difference or Chamber to Condenser Pressure Drop // Journal of Pharm. – 2024 – Vol. 113, No.7 – P.1898-1906.

14 Kshirsagar V., Tchessalov S., Kanka F., Hiebert D., Alexeenko A. Determining Maximum Sublimation Rate for a Production Lyophilizer: Computational Modeling and Comparison With Ice Slab Tests// J Pharm Sci. –2019 – Vol. 108, No.1 – P.382-390.

15 Srinivasan JM, Sacha GA, Kshirsagar V, Alexeenko A, Nail SL. Equipment Capability Measurement of Laboratory Freeze-Dryers: a Comparison of Two Methods// AAPS PharmSciTech. – 2021. – Vol. 22, No.1 – P. 1-6.

16 Kazarin P., Kessler W., Gong E., Yoon S., Liu H., Marx R., Bogner R., Alexeenko A. A Compact Model for Lyophilizer Equipment Capability Estimation// AAPS PharmSciTech. – 2021. – Vol. 23, No. 1. – P.21-29.

17 Kawasaki H, Shimanouchi T, Sawada H, Hosomi H, Hamabe Y, Kimura Y. Temperature Measurement by Sublimation Rate as a Process Analytical Technology Tool in Lyophilization // J Pharm Sci. – 2019. – Vol. 108, No. 7 – P.2305-2314.

18 Laskowski, Rafał, Adam Smyk, Artur Rusowicz, and Andrzej Grzebielec. Determining the Optimum Inner Diameter of Condenser Tubes Based on Thermodynamic Objective Functions and an Economic Analysis // Entropy. – 2016. . – Vol.18, No. 12. – P.444-453.

19 Wardika A.S., Sandi R.R. Freeze dryer machine design for mango fruit storage // Journal of Engineering Design and Technology. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P.62–69.

20 Koganti V., Shalaev E., Berry M., Osterberg T., Youssef M., Hiebert D., Kanka F., Nolan M., Barrett R., Scalzo G., Fitzpatrick G., Fitzgibbon N., Luthra S., Zhang L. Investigation of design space for freeze-drying: use of modeling for primary drying segment of a freeze-drying cycle// AAPS PharmSciTech. – 2011. – Vol. 12, No. 3. – P.854-861.

21 Pikal M.J. Freeze Drying Encyclopedia of Pharmaceutical Technology. – Taylor & Francis: London, UK, 2006. – 335 p.

22 Musaev A., Sadykova S., Anambayeva A., Saizhanova M., Balkanay G., Kolbaev M. Mare's Milk: Composition, Properties, and Application in Medicine// Arch Razi Inst. – 2021. – Vol. 76, No. 4. – P.45-54.

23 Kushugulova A., Kozhakhmetov S., Sattybayeva R., Nurgozhina A., Ziyat A., Yadav H., Marotta F. Mare's Milk as a Prospective Functional Product. Funct // Foods Health Dis. – 2018. – Vol. 8 No. 11. – P.538-548.

24 El-Maghlany W.M., Bedir A.E., Elhelw M., Attia A. Freeze-Drying Modeling via Multi-Phase Porous Media Transport Model // Int. J. Therm. Sci. – 2019. – Vol. 135. – P.509-522.

25 Jastrzebska E., Wadas E., Daszkiewicz T., Pietrzak-Fiecko R. Nutritional Value and Health-Promoting Properties of Mare's Milk: A Review// Czech J. Anim. Sci. – 2017. . – Vol. 62: – P511-518.

26 Wang W., Hu D., Pan Y., Chen G. Numerical Investigation on Freeze-Drying of Aqueous Material Frozen with Pre-Built Pores // Chin. J. Chem. Eng. – 2016. . – Vol. 24 – P116-125.

27 Chen B.L., Jang J.H., Amani M., Yan W.M. Numerical and Experimental Study on the Heat and Mass Transfer of Kiwifruit during Vacuum Freeze-Drying Process // Alex. Eng. J. – 2023. – Vol. 73. – P.427-442.

28 Nam J.H., Song C.S. Numerical Simulation of Conjugate Heat and Mass Transfer during Multi-Dimensional Freeze Drying of Slab-Shaped Food Products // Int. J. Heat Mass Transf. – 2007. – Vol. 50. – P4891-4900.

29 Warning A.D., Arquiza J.M.R., Datta A.K. A Multiphase Porous Medium Transport Model with Distributed Sublimation Front to Simulate Vacuum Freeze Drying // Food Bioprod. Process. – 2015. – Vol. 94. – P.637-648.

30 Konuspayeva G., Faye B. Recent Advances in Camel Milk Processing // Animals. – 2021. – Vol. 11. – Article 1045.

31 Ibrahim A.H., Khalifa S.A. Effect of Freeze-Drying on Camel's Milk Nutritional Properties // International Food Research Journal. – 2015. – Vol. 22. – P. 1438–1445. – Режим доступа: ProQuest. – Дата обращения: 12.06.2025.

32 Zhang B.Y., Xu S., Villalobos-Santeli J.A., Huang J.-Y. Fouling Characterization of Camel Milk with Comparison to Bovine Milk // Journal of Food Engineering. – 2020. – Vol. 285. – Article 110085.

33 Magjeed N.A. Corrective Effect of Camel Milk on Some Cancer Biomarkers in Blood of Rats Intoxicated with Aflatoxin B1 // Journal of Saudi Chemical Society. – 2005. – Vol. 9. – P. 253–263.

34 Shabo Y., Barzel R., Margoulis M., Yagil R. Camel Milk for Food Allergies in Children // Immunology and Allergy. – 2005. – Vol. 7. – P. 796–798. – Режим доступа: Scopus. – Дата обращения: 12.06.2025.

35 Agrawal R.P., Swami S.C., Beniwal R., Kochar D.K., Sahani M.S., Tuteja F.C., Ghouri S.K. Effect of Camel Milk on Glycemic Control, Risk Factors and Diabetes Quality of Life in Type-1 Diabetes: A Randomised Prospective Controlled Study // Journal of Camel Practice and Research. – 2003. – Vol. 10. – P. 45–50. – Режим доступа: Scopus. – Дата обращения: 12.06.2025.

36 Pikal M.J. Freeze Drying // Encyclopedia of Pharmaceutical Technology. – 3rd ed. – London: Taylor & Francis, 2006.

37 Liapis A.I., Litchfield R.J. Optimal Control of a Freeze Dryer-I: Theoretical Development and Quasi Steady State Analysis // Chemical Engineering Science. – 1979. – Vol. 34. – P. 975–981.

38 Liapis A.I., Marchello J.M. Advances in the Modelling and Control of Freeze Drying // In: Mujumdar A.S. (Ed.). Advances in Drying. – Vol. 3. – Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1984. – P. 217–244.

39 Tang M.M., Liapis A.I., Marchello J.M. A Multi-Dimensional Model Describing the Lyophilization of a Pharmaceutical Product in a Vial // Proc. 5th Int. Drying Symposium. – Cambridge, MA, USA, 13–16 Aug. 1986. – P. 57–64.

40 Mascarenhas W.J., Akay H.U., Pikal M.J. A Computational Model for Finite Element Analysis of the Freeze-Drying Process // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1997. – Vol. 148. – P. 105–124.

41 Nastaj J.F., Witkiewicz K. Mathematical Modeling of the Primary and Secondary Vacuum Freeze Drying of Random Solids at Microwave Heating //

International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 4796–4806.

42 Georgiev K., Kosturski N., Margenov S., Starý J. On Adaptive Time Stepping for Large-Scale Parabolic Problems: Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Vacuum Freeze-Drying // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2009. – Vol. 226. – P. 268–274.

43 Zhang H., Zhang J., He L. Effects of the Sample's Porous Structure on the Process of Vacuum Freeze Drying // IEEE Int. Conf. Bioinformatics and Biomedical Engineering. – Chengdu, China, 18–20 June 2010. – P. 4244–4713.

44 Scutella B., Plana-Fattori A., Passot S., Bourles E., Fonseca F., Flick D., Trelea I.C. 3D Mathematical Modelling to Understand a Typical Heat Transfer Observed in Vial Freeze Drying // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 126. – P. 226–236.

45 Srinivasan G., Muneeshwaran M., Raja B. Numerical Investigation of Heat and Mass Transfer Behavior of Freeze Drying of Milk in Vial // Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 55. – P. 2073–2081.

46 El-Maghlany W.M., Bedir A.E., Elhelw M., Attia A. Freeze-Drying Modeling via Multi-Phase Porous Media Transport Model // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 135. – P. 509–522.

47 Chen B.-L., Jang J.-H., Amani M., Yan W.-M. Numerical and Experimental Study on the Heat and Mass Transfer of Kiwifruit during Vacuum Freeze-Drying Process // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Vol. 73. – P. 427–442.

48 Woo S.-H., Noh J.-H., Raza H., Kim H. Numerical Modeling of Sublimation of Ammonium Carbamate Applied to Supply System of NO_x Reductant // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Article 3795.

49 Shao J., Jiao F., Nie L., Wang Y., Du Y., Liu Z. Study on Sublimation Drying of Carrot and Simulation by Using Cellular Automata // Processes. – 2023. – Vol. 11. – Article 2507.

50 Rakhmatulina A., Altybay A., Imanbayeva N., Bagitova S., Baikonys A. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Mare's Milk Sublimation Drying // Processes. – 2025. – Vol. 13. – Article 206.

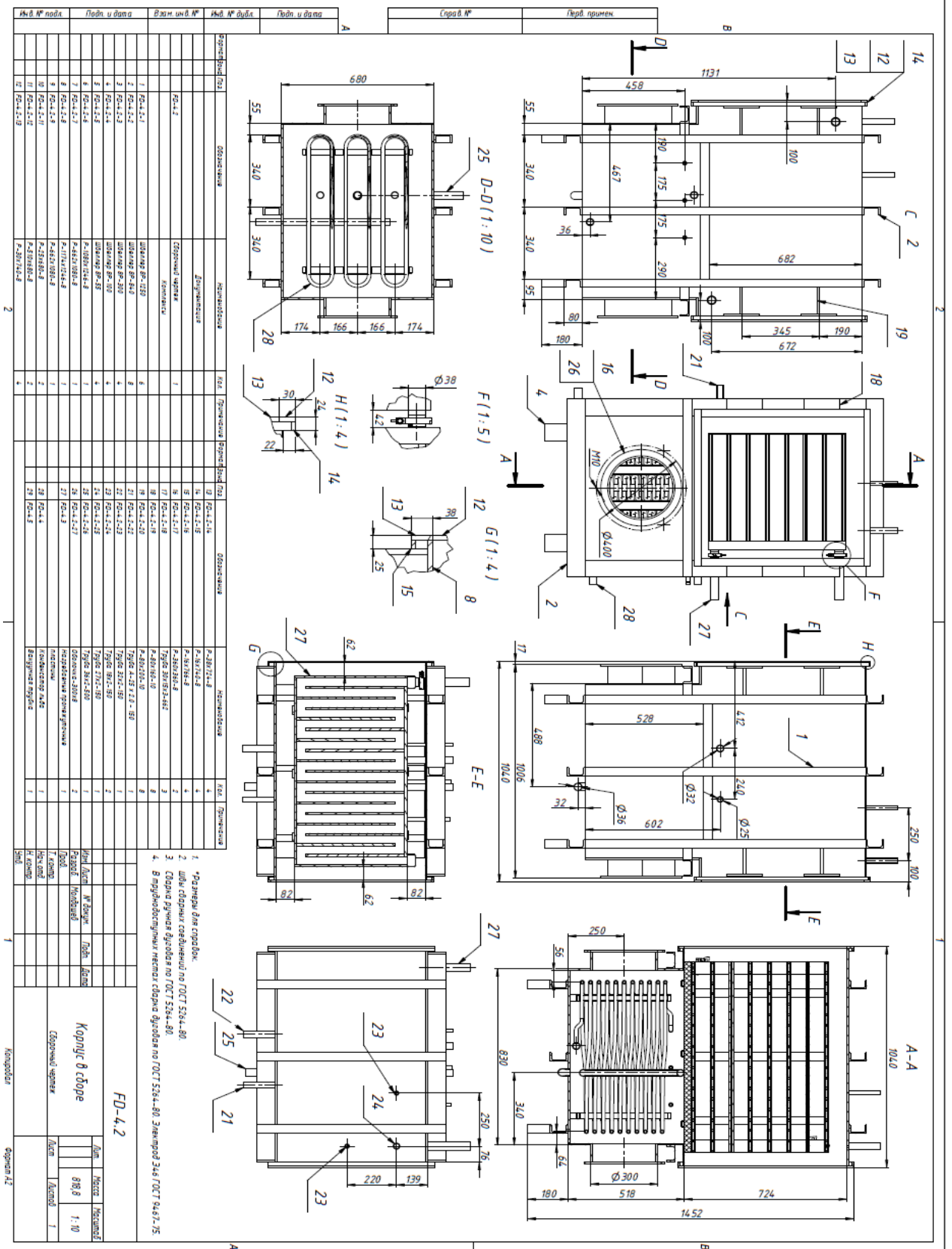
51 Lopez-Quiroga E., Antelo L.T., Alonso A.A. Time-Scale Modeling and Optimal Control of Freeze-Drying // Journal of Food Engineering. – 2012. – Vol. 111. – P. 655–666.

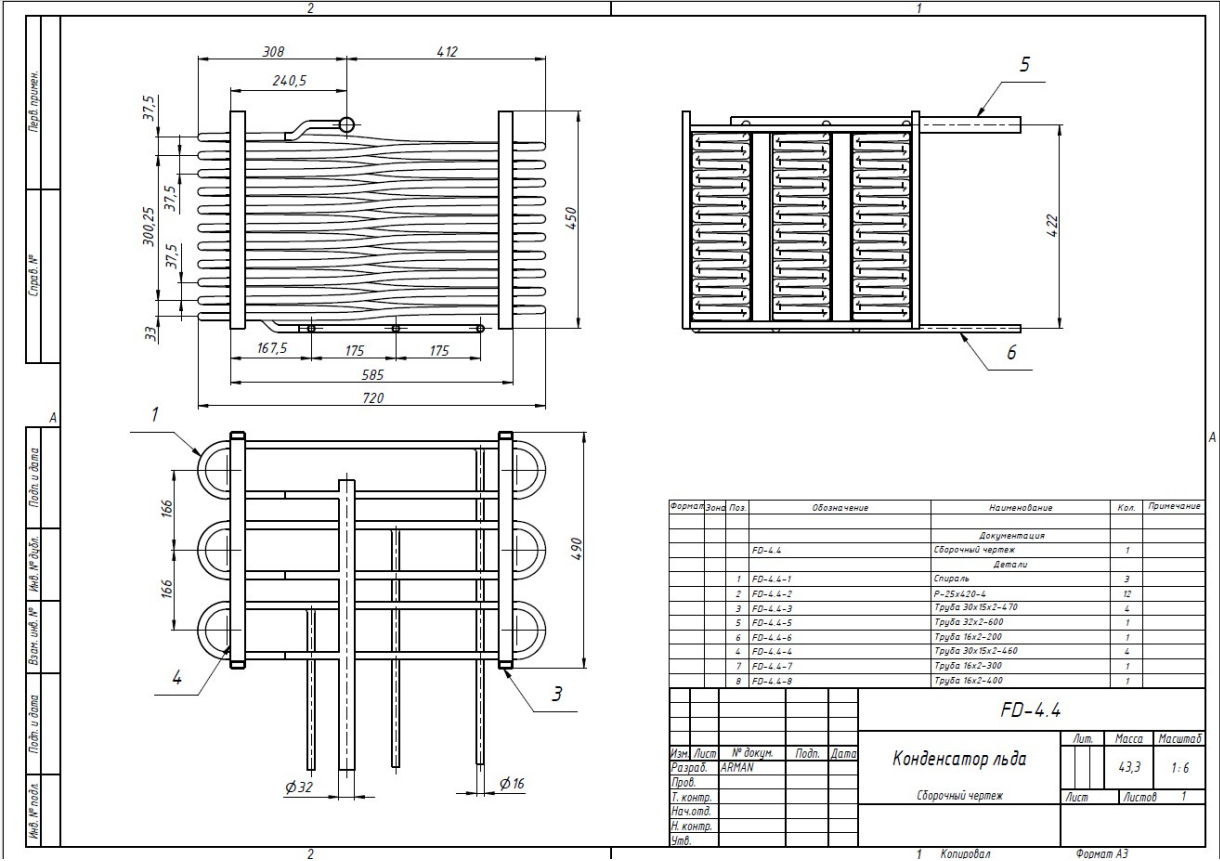
52 Konuspayeva G., Faye B., Loiseau G. The Composition of Camel Milk: A Meta-Analysis of the Literature Data // Journal of Food Composition and Analysis. – 2009. – Vol. 22. – P. 95–101.

53 Song C.S., Nam J.H., Kim C.-J., Ro S.T. Temperature Distribution in a Vial during Freeze-Drying of Skim Milk // Journal of Food Engineering. – 2005. – Vol. 67. – P. 467–475.

54 Nam J.H., Song C.S. Numerical Simulation of Conjugate Heat and Mass Transfer during Multi-Dimensional Freeze Drying of Slab-Shaped Food Products // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 4891–4900.

Жобалық-конструкторлық құжаттама





В ҚОСЫМШАСЫ

Протокол испытаний

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ
№ 41 от «24» октября 2025 года

Страница 1 из 6



Испытательная лаборатория
Головного института ТОО «Казахский научно-исследовательский
институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

Аттестат аккредитации № KZ.T.02.E1112 от 15 Июнь 2022 года
050005, г.Алматы, пр.Райымбека. 312

Всего страниц 6
страница 1

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №41 от «24» октября 2025 года

ВАКУУМ-СУБЛИМАЦИОННАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основание для испытаний (акт отбора образцов, заявление, договор)	Договор № 41- (ИЛ) от «20» октября 2025 г
Цель исследования	Производственное испытание вакуум-сублимационной сушильной установки по программе BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока» с целью оценки соответствия конструкции, технических характеристик и функциональных параметров требованиям технического задания, стандартов РК и норм по безопасности оборудования, работающего под давлением.
Заказчик (наименование, адрес) (Ф.И.О., адрес)	РГП на ПХВ «Институт механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова», г.Алматы, ул. Шевченко 28
Изготовитель (страна, фирма)	Республика Кыргызстан, г.Бишкек, ОАО «Автосборочный завод»
Объект исследования	Опытно-промышленный образец вакуум-сублимационной сушильной установки кобыльего и верблюжьего молока

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ
№ 41 от «24» октября 2025 года

Страница 2 из 6

Начало проведения испытаний	20.10.2025 г.
Окончание проведения испытаний	24.10.2025 г.
Нормативный документы	СТ РК EN 10217-7-2015 - Трубы стальные сварные из нержавеющей сталей. ГОСТ 5632-2014 - Стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие. СТ РК 2251-2012 - Изделия резиновые для уплотнения вакуумных систем. СТ РК ISO 3581-2017 - Электроды для сварки нержавеющей сталей. Технический регламент РК «О безопасности оборудования, работающего под давлением» (утв. постановлением Правительства РК № 157 от 30.04.2014 г.). ГОСТ 32974-2014 / ISO 21360-2:2012 - Вакуумная техника. Методы испытания насосов. СТ РК 2.64-2003 - Манометры, вакуумметры. Программа испытаний. СТ РК ГОСТ R 54564-2014 - Цветные металлы и сплавы. Методы контроля.
Условия проведения испытаний:	Температура: от 19° до 22 °С, Влажность: от 74 до 87 %, Давление: от 704 до 715 мм рт. ст.
Место проведение испытания:	г. Алматы, пр. Райымбека, дом 312

Описание испытываемой установки

Объект испытаний - опытно-промышленный образец вакуум-сублимационной сушильной установки (рисунок 1), разработанный на базе РГП на ПХВ «Институт механики и машиноведения имени акад. У.А. Джолдасбекова» кобыльего и верблюжьего молока

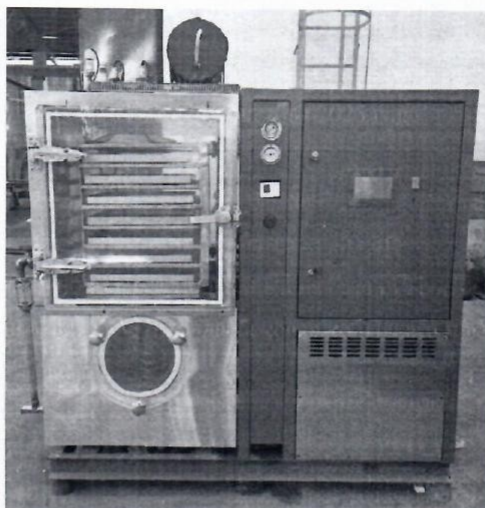


Рисунок 1. Сублимационная вакуумная сушилка

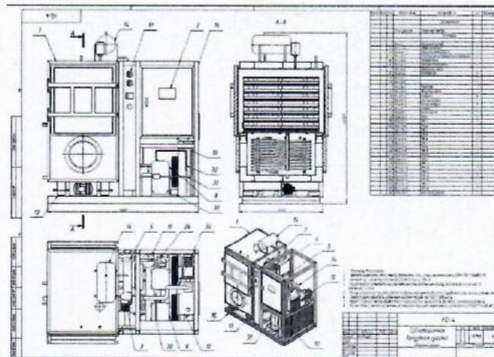


Рисунок 2. Сборочный чертеж

Основные узлы:

- вакуумная сушильная камера из нержавеющей стали AISI 304;
- вакуумный насос (Yalong B3-026B-54D-3.0-304);
- система охлаждения на хладагенте R404A;
- теплообменник нержавеющей (GVN, серия BLR/SLA-215);
- уплотнители из силикона (VMQ) и фторкаучука (Viton);

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ
№ 41 от «24» октября 2025 года

Страница 4 из 6

- электромагнитные клапаны Castel C-1079/M42;
- манометры глицериновые RW-FRG-250A-A;
- пневмосистема управления на основе компрессора и ресиверов (BLR/VLR-21);
- шкаф управления с автоматическим регулированием температуры и давления.

Производительность установки по переработке кобыльего и верблюжьего молока - 0,95 кг порошка из 10 л молока.

Результаты испытаний:

Таблица 1

№	Испытание	Методика	Норма (ТЗ)	Фактический результат	Вывод
1	Герметичность камеры	Вакуум до 1,3 Па, выдержка 30 мин	$\Delta P \leq 5 \%$	3,5 % / 30 мин	Соответствует
2	Вакуумные испытания	Разрежение 1,3 Па, стабильность ≤ 50 мин	≤ 50 мин	40 мин, стаб. удержан	Соответствует
3	Система охлаждения	Работа компрессора, конденсация льда	$-45 \dots -50 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, лёд 0,9 кг	Соответствует
4	Тепловые испытания	Равномерность нагрева пластин	$\Delta T \leq \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Соответствует
5	Функциональные испытания	Полный цикл	≤ 24 ч	22 ч	Соответствует
6	Производительность	10 л молока → 0,9–1,0 кг порошка	$\geq 0,9$ кг	0,95 кг	Соответствует
7	Энергопотребление	–	≤ 150 кВт·ч/кг	139,2 кВт·ч/кг	Соответствует

Анализ испытаний

Общая характеристика

Проведённые производственные испытания подтвердили, что вакуум-сублимационная установка работает стабильно во всех заданных режимах. Оборудование выдерживает проектные нагрузки и демонстрирует устойчивые показатели герметичности, температурного распределения и энергоэффективности.

Анализ работы вакуумной системы

- Уровень остаточного давления достиг 1,3 Па, что соответствует требованиям к глубокому вакууму.
- Потери герметичности за 30 минут испытаний составили 3,5 %, что находится в пределах нормы (до 5 %).
- Проверка соединений с помощью детектора утечки фреона показала отсутствие мест утечки.
- Использование силиконовых уплотнителей (VMQ) обеспечило сохранение эластичности и плотности контакта при циклических нагрузках.

Анализ системы охлаждения

- Система охлаждения на хладагенте R404A продемонстрировала устойчивую работу в диапазоне температур от -45°C до -50°C .
- В процессе испытаний конденсатор эффективно отводил тепло, предотвращая перегрев компрессора.
- Использование фильтров-осушителей BLUE BLR/SSR-287T позволило стабилизировать состав хладагента и исключить образование влаги в контуре.

Тепловая система и теплообмен

- Температурная стабильность нагреваемых пластин составила $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, что превышает требование по ТЗ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$).
- Конструкция теплообменника (Yalong B3-026B-54D-3.0-304) показала высокую теплопередачу при минимальных потерях давления.
- В ходе испытаний не выявлено деформаций или утечек на сварных соединениях.

Электрическая и пневматическая системы

- Проверка пневматических линий показала отсутствие падения давления при рабочем цикле.
- Все соленоидные клапаны сработали корректно, без задержек и протечек.
- Электрическая часть установки функционировала без аварийных отключений, токи нагрузки соответствовали расчётным значениям.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ
№ 41 от «24» октября 2025 года

Страница 6 из 6

Энергоэффективность и производительность

- Среднее энергопотребление составило 139,2 кВт·ч/кг готового продукта.
- Производительность установки по переработке кобыльего и верблюжьего молока соответствует проектной - 3 кг порошка из 30 л молока за цикл

Заместитель Председателя Правления
по научной деятельности

Заведующий Испытательной Лаборатории
ТОО «НПЦАИ»



А. С. Рзалиев

А.Р. Хасанов

**Настоящий протокол не может быть полностью или частично воспроизведен,
тиражирован и распространен без разрешения ИЛ**

АКТ

Производственных испытаний использованных материалов для изготовления опытно-промышленного образца вакуум-сублимационной сушильной установки по программе BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока»

1. Цель испытаний

Проверка соответствия физических, химических и механических свойств материалов, используемых при изготовлении опытно-промышленного образца вакуум-сублимационной сушильной установки, требованиям технического задания и нормативной документации.

2. Объекты испытаний

Ниже – перечень материалов и узлов, подвергнутых испытаниям:

№	Наименование материала / узла	Марка / стандарт	Размер / габариты	Количество образцов	Примечание
1	Нержавеющая сталь (камерные стенки)	AISI 304	Лист 6 × 1500 × 3000 мм	3 шт	Проверка на коррозию и прочность
2	Теплоизоляционный материал	Силикон (VMQ) / каучук / минераловатный мат	Лист 8 × 1500 × 3000 мм	5 отрезков	Теплопроводность / стойкость к вакууму
3	Уплотнительная резина	FKM / EPDM / VMQ	Профилированная резина	Образцы по длине 200 мм	Испытания на упругость, герметичность
4	Трубки медные	Марка Cu-DHP / Cu-OFE	Ø 6,35 × 0,60 × 15000 мм	2 шт	Испытания на давление, деформацию
5	Фитинги, соединители	медные / латунные	1-3/8 (35 мм)	5 шт	Прочность резьбовых соединений
6	Соленоидный клапан	CASTEL C-1079/M42 с катушкой 220 В	–	1 шт	Проверка срабатывания, утечки
7	Манометр глицериновый низкого давления	RW-FRG-250A-A	–	2 шт	Проверка точности измерения давления
8	Обратный клапан	YCVSH20 / 77GSHC-1	–	2 шт	Испытание на пропуск / обратный поток
9	Маслоотделитель	GVN	–	1 шт	Эффективность отделения масла
10	Фильтр-осушитель	BLUE BLR/SSR-287T	–	1 шт	Адсорбционная способность

3. Методы испытаний и оборудование

1. Механические испытания

- Испытание на разрыв, растяжение, изгиб (для металлических образцов)
- Измерение твердости / микро-твердости

2. Теплотехнические испытания

- Измерение теплопроводности / теплового сопротивления изоляционных материалов
- Тесты при температурных перепадах

3. Герметичность и вакуумные испытания

- Проверка уплотнений при вакууме (до заданного давления)
- Испытания на утечки в соединениях (например, методом гелия или методом давления)

4. Химические / коррозионные испытания

- Воздействие агрессивных сред (соли, влага)

- Испытания на стойкость покрытий
- 5. **Функциональные испытания компонентов**
 - Соленоидные клапаны: срабатывание под напряжением, проверка герметичности
 - Манометры: калибровка и проверка точности
 - Фильтры-осушители: определение абсорбционной емкости
 - Маслоотделитель: процент отделенного масла
- 6. **Контроль размеров и отклонений**
 - Измерения геометрических параметров образцов
 - Допуски отклонений

4. Результаты испытаний

Полученные данные испытаний (пример):

№	Материал / узел	Показатель	Значение	Норма требование	Вывод
1	Сталь AISI 304	Предел прочности, МПа	520	≥ 500	Удовлетворяет
2	Силик. изоляция (VMQ)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,025	$\leq 0,03$	Удовлетворяет
3	Уплотнительная резина	Упругость остаточная, %	95	≥ 90	Удовлетворяет
4	Медная труба Ø6,35	Разрывное давление, бар	120	≥ 100	Удовлетворяет
5	Соленоидный клапан	Утечка при рабочем давлении (г/год)	$< 0,1$	$\leq 0,2$	Удовлетворяет
6	Манометр RW-FRG-250A-A	Погрешность измерения	$\pm 1,5\%$	$\leq \pm 2\%$	Удовлетворяет
7	Обратный клапан	Пропуск обратного потока	Нет	Допустимо незначительный	Удовлетворяет
8	Маслоотделитель	Эффективность отделения, %	99,5	≥ 98	Удовлетворяет
9	Фильтр-осушитель	Поглощение влаги, г	12	≥ 10	Удовлетворяет

5. Анализ и заключения

На основании результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

- Все проверенные материалы и компоненты соответствуют требованиям технического задания и нормативной документации.
- Нет признаков значительных дефектов, критических отклонений или отказов.
- Некоторые образцы показали запас прочности выше проектного – это положительный фактор для надежности конструкции.
- Рекомендуется повторное испытание после сборки установки (при рабочем режиме) для верификации интеграции всех компонентов.

6. Рекомендации по доработке

- При необходимости скорректировать размеры уплотнительных профилей с учётом полученных остаточных деформаций
- Уточнить спецификации соединительных фитингов, если были обнаружены минимальные утечки
- Ужесточить требования к чистоте фильтров-осушителей при монтаже
- Провести цикл испытаний на длительную устойчивость под диапазоном температур

Производственный эксперт
ТОО «ЭкоФармТехнология»

Руководитель программы,
PhD, ассоциированный профессор

Главный научный сотрудник,
кандидат технических наук

Гл. конструктор проекта

Гл. технолог проекта

Инженер-технолог проекта

Инженер-электрик проекта

Инженер-программист проекта



Сагитова З.Т.

Рахматулина А.Б.

Иманбаева Н.С.

Молдашев А.Н.

Смагулов Д.К.

Жалгабаев Ж.Е.

Тлеулес Н.А.

Сакадиев Н.Н.

Г ҚОСЫМШАСЫ

Сынақ акті

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ТОО «ЭкоФармТехнология»
Сагитова З.Т.
от «___» _____ 2025 г.

АКТ

**производственных испытаний вакуум-сублимационной сушильной установки
по программе BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и
оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока»**

Комиссия ТОО «ЭкоФармТехнология» настоящим актом подтверждает, что в период с 23 июня по 11 июля 2025 года на производственной базе Института механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова по адресу г. Алматы, ул. Райымбека, 312А, были проведены производственные испытания опытно-промышленного оборудования вакуум-сублимационной сушки.

Объектом испытаний являлось испытание и запуск вакуум-сублимационной сушильной установки. Испытания проводились по программе «Разработка технологий глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока».

В ходе производственных испытаний оборудования были проведены проверки и испытания рабочих узлов – компрессора, вакуумного насоса, вентилятора, циркуляционного насоса, нагревательных ТЭНов и электромагнитных клапанов, влияющих на работоспособность установки.

Проверена система холодильного контура на работоспособность при температуре – 50°C, а также система температурного транспортировочного агента (силиконовое масло – 50 л) и система вакуумного насоса.

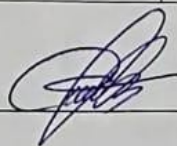
Результаты испытаний приведены в Приложении № 1.

Приложения №1

№	Испытание	Методика	Норма (ТЗ)	Фактический результат	Вывод
1.	Герметичность камеры	Вакуумирование до 1,3 Па, выдержка 30 мин	Падение давления $\leq 5\%$	Падение 3,5% за 30 мин	Соответствует
2.	Вакуумные испытания	Разрежение 1,3 Па (10^{-2} мм рт. ст.)	Достижение ≤ 50 мин, стабильность в цикле	Достигнут за 40 мин, вакуум удержан	Соответствует
3.	Система охлаждения	Работа компрессоров, конденсатор льда	Температура $-45 \dots -50^\circ\text{C}$, конденсация влаги	-50°C , конденсатор собрал 0,9 кг льда	Соответствует
4.	Тепловые испытания	Нагрев промежуточных пластин	Разброс температуры $\leq \pm 2^\circ\text{C}$	Разброс $\pm 1,5^\circ\text{C}$	Соответствует
5.	Функциональные испытания	Полный цикл: заморозка, сублимация, досушка	Время цикла ≤ 24 ч	22 ч	Соответствует
6.	Производительность	Сушка партии 10 л молока	Выход 0,9–1 кг порошка	0,95 кг	Соответствует

7	Энергетические показатели оборудования	Сушка партии 10 л молока	0,95 кг	139,2 кВт·ч/кг	Соответствует
---	--	--------------------------	---------	----------------	---------------

Главный технолог проекта
ТОО «ЭкоФармТехнология»



Семин В.Р.Э.

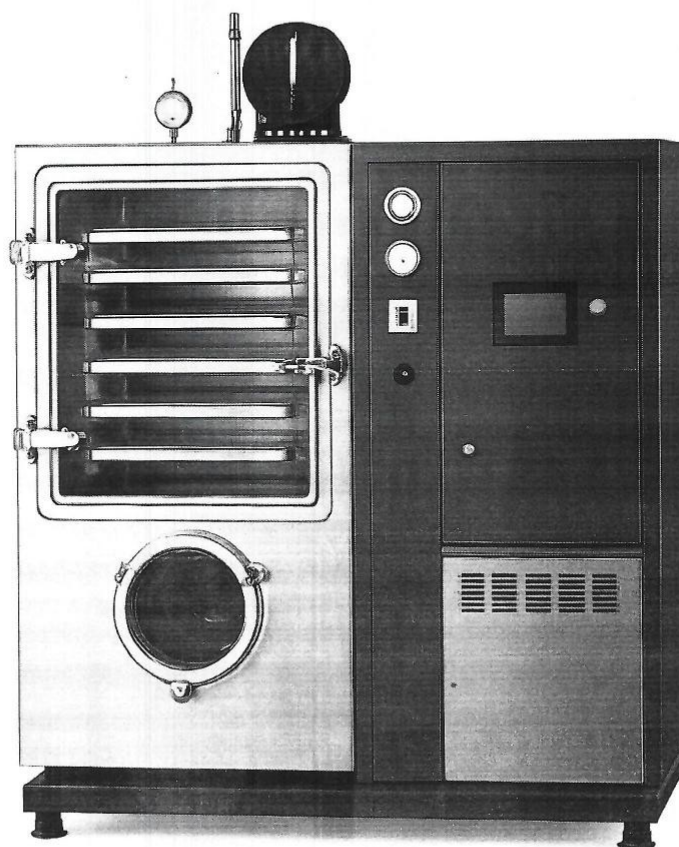
Д ҚОСЫМШАСЫ
Объектінің паспорты



**INSTITUTE
OF MECHANICS
AND ENGINEERING**

РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вакуумно-сублимационная сушильная камера FD-4.1



г. Алматы

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор РГП на ПХВ
«Институт механики и
машиноведения имени академика
Джолдасбекова» КН МНВО РК
З.Г.Уалиев
2025 г.



РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вакуумно-сублимационная сушильная камера FD-4.1

Разработчик / изготовитель: Институт механики и машиноведения им. академика У.А.
Джолдасбекова, г. Алматы, Республика Казахстан

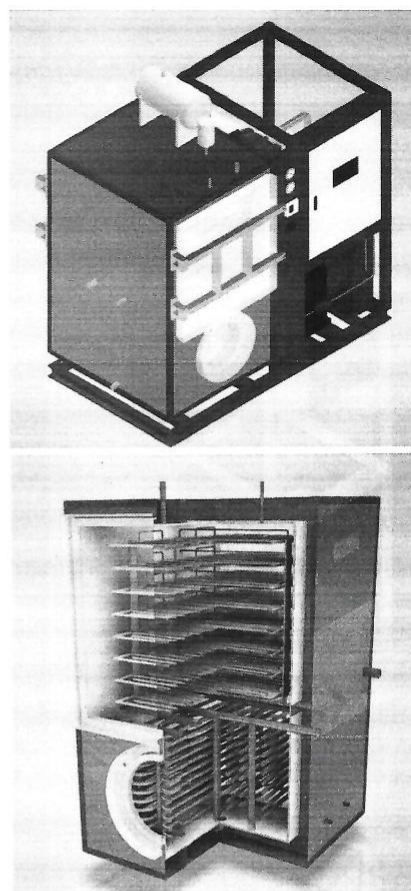
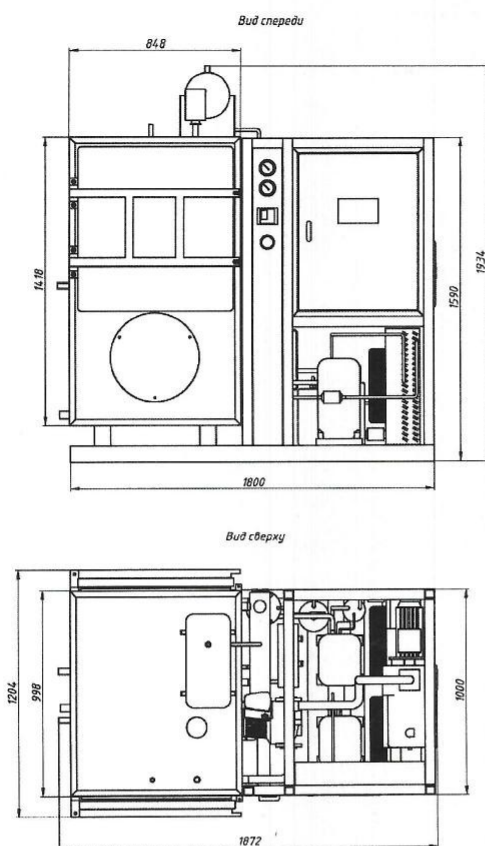
Дата выпуска: 2025 г.

1. Назначение и область применения

Вакуумно-сублимационная сушильная камера предназначена для сушки пищевых, фармацевтических и биологических продуктов методом сублимации влаги из замороженного состояния при пониженном давлении. Применяется в пищевой, фармацевтической и исследовательской промышленности.

2. Технические характеристики

Параметр	Значение
Модель	VSS-DR-01
Габариты, мм	1800 × 1200 × 1950
Рабочий объём камеры, л	50
Количество полок	8 (7 рабочих)
Размер полок, мм	900 × 500 × 18
Максимальная загрузка, кг/цикл	50 (фактически 30 л молока)
Рабочий диапазон температур	-50...+50 °C
Рабочее давление	10 Па (≈0.1 мбар)
Хладагент	R404a
Компрессоры	2×2.2 кВт
Электропитание	380 В, 50 Гц
Установленная мощность	13 кВт
Масса	1600 кг
Материал корпуса	AISI-304
Изоляция	ППУ
Класс защиты	IP54



3. Устройство и принцип работы

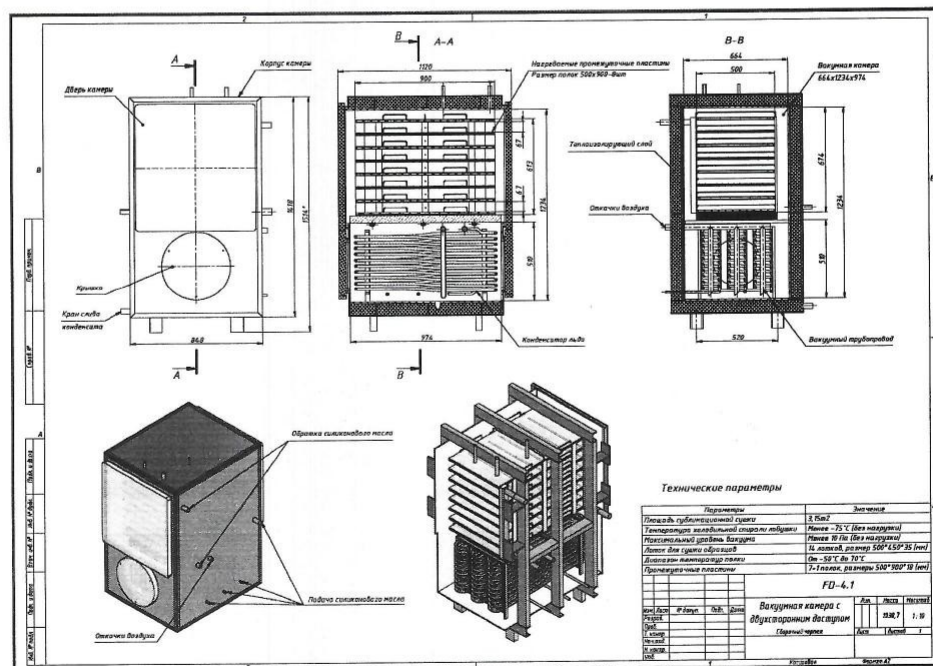
Вакуумно-сублимационная сушильная камера представляет собой установку с прямоугольным корпусом, выполненным из нержавеющей стали AISI 304.

Корпус имеет герметичную дверь с уплотнительным контуром и смотровым окном из термостойкого стекла, обеспечивающим визуальный контроль процесса сушки.

Внутри камеры расположены нагреваемые полки, изготовленные из алюминия с каналами для циркуляции теплоносителя. Полки обеспечивают равномерный прогрев продукта и контролируемый отвод влаги.

В состав установки входят следующие основные узлы и системы:

- Вакуумная камера — основное рабочее пространство, где происходит сублимация влаги.
- Система нагрева полок — предназначена для поддержания заданной температуры в диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, управляется через ПЛК.
- Конденсатор (ловушка паров) — охлаждается с помощью компрессорного холодильного агрегата и служит для осаждения паров влаги, выходящих из продукта.



4. Подготовка к работе

4.1. Внешний осмотр

Перед включением установки провести внешний осмотр корпуса и убедиться в отсутствии механических повреждений, следов коррозии, утечек и загрязнений. Проверить состояние уплотнительных элементов, целостность смотрового окна и дверного замка.

4.2. Проверка чистоты и состояния камеры

Вакуумная камера и полки должны быть очищены от остатков продукта и влаги. Внутренние поверхности протираются мягкой тканью, смоченной спиртом или разрешённым дезинфицирующим средством. Проверить правильность установки и горизонтальность полок.

4.3. Проверка рабочих жидкостей и герметичности

Проверить уровень масла в вакуумном насосе и компрессорах, при необходимости долить до нормы. Контролировать наличие хладагента R404a и отсутствие утечек в холодильном контуре. Проверить герметичность трубопроводов, клапанов и соединений.

4.4. Проверка датчиков и систем управления

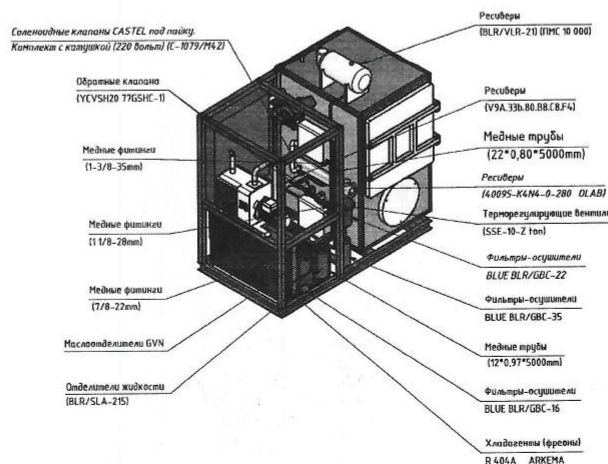
Убедиться в исправности датчиков температуры, давления и уровня, а также правильности отображения данных на панели управления. Проверить работу ПЛК в тестовом режиме и наличие связи между контроллером и исполнительными узлами.

4.5. Электробезопасность и питание

Проверить правильность подключения к сети 3×380 В, 50 Гц, наличие и целостность заземления корпуса в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81. Убедиться в исправности автоматических выключателей, системы аварийного отключения и отсутствии коротких замыканий.

4.6. Подготовка к запуску

После завершения всех проверок герметично закрыть дверь камеры, убедиться в плотном прилегании уплотнения и отсутствии подсоса воздуха. Включить питание, проверить работоспособность компрессоров, насоса и системы нагрева полок. После подтверждения исправности всех узлов установка готова к запуску производственного цикла.



5. Порядок эксплуатации

5.1. Общие сведения

Эксплуатация вакуумно-сублимационной сушильной камеры осуществляется в автоматическом режиме под управлением ПЛК. Все этапы работы — от загрузки продукта до выгрузки — должны выполняться в строгом соответствии с технологическим регламентом и инструкцией оператора.

5.2. Подготовка к пуску

Перед началом работы убедиться, что выполнены все пункты раздела 4 «Подготовка к работе». Проверить:

- исправность системы электропитания и заземления;
- герметичность камеры;
- готовность компрессоров, вакуумного насоса и системы нагрева;
- наличие продукта, распределённого равномерно по полкам.

5.3. Запуск установки

1. Включить питание и активировать систему управления (ПЛК).
2. Установить параметры цикла — температуру полок, уровень вакуума, время сублимации и досушки.
3. Закрыть камеру и запустить цикл в автоматическом режиме с панели управления.
4. После достижения вакуума порядка 10 Па и охлаждения конденсатора начинается процесс сублимации влаги из замороженного продукта.

5.4. Контроль работы

Во время сушки необходимо контролировать параметры на сенсорной панели — температуру полок, давление в камере, состояние компрессоров и насоса. В случае аварийной сигнализации немедленно остановить процесс и устранить причину неисправности.

Система управления автоматически записывает параметры каждого цикла в память контроллера.

5.5. Завершение цикла

По окончании программы ПЛК подаёт сигнал о завершении процесса. После автоматического сброса вакуума дождаться выравнивания давления с атмосферным и открыть дверь камеры. Осторожно извлечь высушенный продукт, избегая попадания влаги внутрь камеры.

5.6. Очистка и обслуживание после работы

После выгрузки продукта отключить питание установки. Провести очистку внутренней поверхности камеры и полок мягкой тканью с раствором нейтрального моющего средства, затем протереть насухо. Проверить состояние уплотнителя и смотрового окна.

При длительном перерыве в работе рекомендуется просушить камеру при открытой двери в течение 1–2 часов и закрыть её в вентилируемом состоянии.

6. Правила эксплуатации

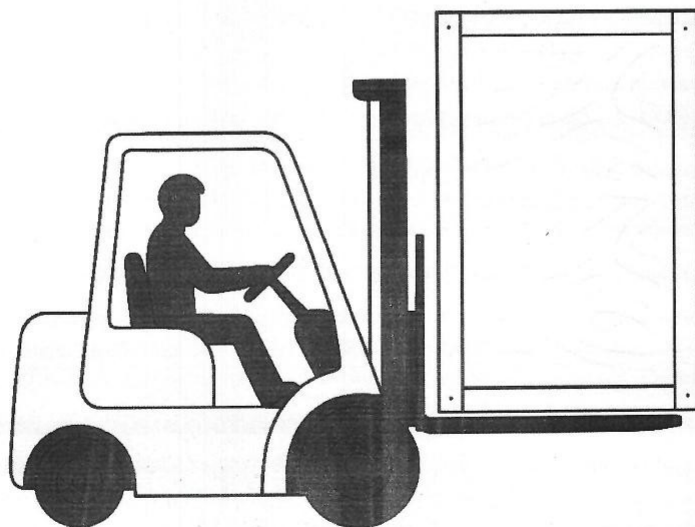
- 6.1. Эксплуатация вакуумно-сублимационной сушильной камеры допускается только персоналом, прошедшим обучение и инструктаж по технике безопасности и обслуживанию оборудования.
- 6.2. Перед каждым включением установки необходимо убедиться в исправности всех систем: электропитания, вакуумной, холодильной, нагревательной и системы управления.
- 6.3. Категорически запрещается:
 - открывать дверь камеры при наличии остаточного вакуума;
 - эксплуатировать установку при повреждённом уплотнителе двери или неисправной системе герметизации;
 - допускать попадание влаги, конденсата или моющих средств на элементы электрооборудования;
 - проводить техническое обслуживание при включённом питании;
 - превышать установленные паспортные значения температуры, давления и мощности.
- 6.4. В процессе работы оператор должен контролировать температуру полок, давление в камере, работу компрессоров и вакуумного насоса. Все параметры отображаются на сенсорной панели управления.
- 6.5. При возникновении отклонений от заданных параметров или аварийной сигнализации необходимо немедленно остановить процесс, выключить питание и устранить неисправность.
- 6.6. После завершения цикла сушки камера должна быть очищена от остатков продукта и протёрта мягкой тканью с использованием нейтрального моющего раствора. Все поверхности следует просушить перед следующим использованием.
- 6.7. Для обеспечения надёжной и долговечной работы оборудования необходимо регулярно выполнять техническое обслуживание согласно «Регламенту ТО».
- 6.8. При длительных перерывах в работе установка должна храниться в сухом помещении при температуре от +5 до +40 °С с открытой дверцей камеры. Все работы по ремонту, настройке и замене элементов оборудования должны выполняться только квалифицированным персоналом, имеющим допуск к соответствующим видам работ.

7. Регламент технического обслуживания

Периодичность	Операции обслуживания
Ежедневно	Проверка герметичности, уровня вакуума, состояния уплотнений
Еженедельно	Проверка уровня масла, чистка фильтров
Ежемесячно	Проверка компрессоров и датчиков
Ежеквартально	Очистка теплообменников
Ежегодно	Диагностика, замена масла и фильтров

8. Транспортирование

- Вакуумно-сублимационная сушильная камера должна транспортироваться в заводской упаковке, обеспечивающей защиту от механических повреждений, влаги и загрязнений.
- Транспортирование допускается всеми видами крытого транспорта (автомобильным, железнодорожным, морским или авиационным) в соответствии с правилами перевозки, действующими на транспорте данного вида.
- Перевозка оборудования осуществляется только в вертикальном положении, при этом камера должна быть надёжно закреплена на поддоне или раме во избежание смещения, опрокидывания или вибрационных ударов.
- При транспортировке в условиях низких температур оборудование должно быть предварительно освобождено от влаги и конденсата, чтобы предотвратить повреждение элементов при замерзании.
- Не допускается транспортирование установки с открытой дверью, без упаковки или без фиксации подвижных частей.
- Перед погрузкой и разгрузкой необходимо проверить наличие крепёжных петель или рымов, предназначенных для подъёма оборудования. Подъём допускается только за предусмотренные заводом-изготовителем точки крепления.
- При транспортировании температура окружающей среды должна находиться в диапазоне от -25°C до $+50^{\circ}\text{C}$, относительная влажность — не выше 80 % при $+25^{\circ}\text{C}$.
- После доставки оборудования на место установки упаковку следует снять только непосредственно перед монтажом. При обнаружении механических повреждений или следов влаги составляется акт с участием представителя перевозчика.



9. Хранение

- 9.1. Вакуумно-сублимационная сушильная камера должна храниться в закрытых сухих помещениях, защищённых от атмосферных осадков, прямых солнечных лучей, пыли и агрессивных сред.
- 9.2. Температура воздуха в помещении хранения должна находиться в пределах от +5 °С до +40 °С, при относительной влажности не более 75 % при температуре +25 °С.
- 9.3. При кратковременном хранении (до 6 месяцев) допускается хранение оборудования в заводской упаковке в отапливаемом или неотапливаемом помещении, при условии защиты от конденсации влаги.
- 9.4. При длительном хранении (более 6 месяцев) установка должна быть:
- a) полностью осушена и очищена от остатков продукта;
 - b) разгерметизирована (вакуум сброшен до атмосферного давления);
 - c) внутренние поверхности камеры и трубопроводов обработаны ингибитором коррозии или силиконовым маслом;
- открытые штуцеры и отверстия закрыты заглушками или плёнкой.
- 9.5. Электрические контакты и разъёмы должны быть защищены от влаги, а кабели аккуратно уложены. Вакуумный насос и компрессоры должны быть законсервированы в соответствии с инструкциями производителей.
- 9.6. Установка должна храниться в вертикальном положении на ровной горизонтальной поверхности. Не допускается размещение оборудования на вибрирующих основаниях, а также штабелирование.
- 9.7. При необходимости временного хранения на открытой площадке установка должна быть помещена под навес и полностью укрыта водонепроницаемым материалом.
- 9.8. После окончания срока хранения перед пуском в эксплуатацию необходимо провести осмотр оборудования, проверить состояние герметизации, изоляции, соединений, а также выполнить контрольный запуск систем охлаждения, вакуумирования и нагрева.

10. Монтаж и пусконаладка

- ✓ Монтаж вакуумно-сублимационной сушильной камеры выполняется квалифицированным персоналом, прошедшим инструктаж и имеющим допуск к работам с электроустановками.
- ✓ Установка предназначена для стационарного размещения в помещении с температурой от +10 °С до +35 °С, влажностью не более 75 %, без вибрации и пыли. Вокруг оборудования должен быть свободный доступ не менее 1 м для обслуживания.
- ✓ Перед монтажом необходимо проверить целостность упаковки, отсутствие повреждений и комплектность оборудования. Установить камеру на ровное горизонтальное основание, обеспечить устойчивость и заземление корпуса.
- ✓ Подключение к электросети 3×380 В, 50 Гц, вакуумной и холодильной системам выполняется согласно прилагаемым схемам. Все соединения должны быть герметичны и надёжно закреплены.
- ✓ После подключения провести проверку работоспособности узлов: компрессоров, насоса, системы нагрева и управления. Убедиться в отсутствии утечек и исправности датчиков.

- ✓ Провести пробный пуск без загрузки продукта. Проверить стабильность работы установки, достижение заданных параметров и срабатывание систем защиты.
- ✓ После успешного тестового запуска установка допускается к эксплуатации. Результаты пусконаладочных работ фиксируются в соответствующем акте.

11. Требования к персоналу

- К обслуживанию вакуумно-сублимационной сушильной камеры допускается персонал, прошедший обучение, инструктаж по технике безопасности и ознакомленный с настоящим руководством.
- Оператор должен знать устройство установки, принцип её работы, порядок включения и останова, а также меры безопасности при эксплуатации.
- Работники, обслуживающие электрооборудование, должны иметь квалификационную группу по электробезопасности не ниже II согласно ПТЭЭП.
- Персонал обязан использовать средства индивидуальной защиты: диэлектрические перчатки, защитные очки, спецодежду и обувь с нескользящей подошвой.
- Запрещается допуск к работе лиц в состоянии алкогольного, наркотического или иного опьянения, а также лиц, не прошедших инструктаж.
- Ответственный за эксплуатацию оборудования назначается приказом по предприятию и несёт персональную ответственность за соблюдение правил безопасной работы и технического обслуживания.

12. Утилизация

Металлические части — в переработку, R404a — специализированная утилизация, электроника — отходы электроники.

13. Свидетельство о приёмке

Вакуумно-сублимационная сушильная камера FD-4.1 изготовлена и принята в соответствии с действующей технической документацией и признана годной к эксплуатации.

Изделие прошло необходимые испытания, проверку комплектности, герметичности и соответствует требованиям технических условий и паспорта.

Дата изготовления: _____

Дата приёмки: _____

Представитель отдела технического контроля (ОТК)

Ф.И.О. _____

Подпись _____ «__» _____ 20__ г.

Представитель заказчика (приёмка на объекте)

Ф.И.О. _____

Подпись _____ «__» _____ 20__ г.

Место изготовления: г. Алматы, Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова

14. Отметки о техническом обслуживании

Все виды технического обслуживания и ремонта вакуумно-сублимационной сушильной камеры должны фиксироваться в таблице ниже.

Записи выполняются ответственным лицом после завершения каждого обслуживания с указанием даты, характера выполненных работ и подписи исполнителя.

№ п/п	Дата проведения	Вид обслуживания / ремонта	Краткое описание выполненных работ	Подпись исполнителя	Подпись ответственного лица
1					
2					
3					
4					
5					

Примечание:

Рекомендуется хранить этот раздел вместе с актами технического обслуживания и протоколами проверки оборудования.

При выполнении сервисного обслуживания сторонними организациями должна быть проставлена печать сервисной компании.

15. Гарантийные обязательства

- Изготовитель гарантирует исправную работу вакуумно-сублимационной сушильной камеры при соблюдении правил транспортирования, монтажа, эксплуатации и хранения.
- Гарантийный срок эксплуатации:
 - ❖ на корпус и основные узлы — 24 месяца;
 - ❖ на электрооборудование, насос и компрессоры — 12 месяцев со дня ввода в эксплуатацию.
- В течение гарантийного срока изготовитель бесплатно устраняет неисправности, возникшие по его вине.
- Гарантия не распространяется на повреждения, вызванные неправильной эксплуатацией, перегрузками, внешними воздействиями или несанкционированным ремонтом.
- После истечения гарантийного срока ремонт выполняется на договорной основе.

Разработчик:  Смагулов Д.К.

Е ҚОСЫМШАСЫ

Акт внедрения

АКТ

внедрения оборудования вакуум-сублимационной сушки
в производство порошка саумал, кумыса и шубата

г. Алматы
«15» 10 2025 года

Основание для внедрения:

Работы выполнены в рамках реализации научного проекта ИРН BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока» в целях создания отечественного энергоэффективного оборудования и освоения промышленного производства порошков саумал, кумыс и шубата.

Объект внедрения:

Опытно-промышленная вакуум-сублимационная сушильная установка модели FD-4.1, разработанная и изготовленная на производственной базе РГП на ПХВ «Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова» КН МНВО РК, и внедрённая в производственную линию ТОО «ЭкоФармТехнология» для выпуска порошков из кобыльего и верблюжьего молока.

Цель внедрения:

- применение отечественного оборудования для глубокой переработки молочного сырья;
- повышение технологической эффективности, энерго-экономичности и воспроизводимости процессов сублимационной сушки;
- обеспечение стабильного производства сухих порошков саумала, кумыса и шубата с сохранением биологически активных веществ.

Форма внедрения:

Оборудование внедрено в виде действующего промышленного узла, включающего:

- вакуумную камеру, конденсатор, компрессорный блок, систему управления и мониторинга;
- систему циркуляции теплоносителя и холодильный контур с хладагентом R404a;
- автоматизированное программное обеспечение для управления параметрами процесса (температура, давление, время сушки).

Монтаж и пуско-наладочные работы выполнены совместно со специалистами Института механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова и инженерно-техническим персоналом ТОО «ЭкоФармТехнология».

Результаты внедрения:

- обеспечен выпуск стабильных партий порошков саумала, кумыса и шубата с сохранением биологической активности;
- подтверждена работоспособность установки в условиях непрерывного технологического цикла;
- достигнута энерго-экономичность – снижение энергопотребления на 12-15%;
- производительность линии – до 3 кг порошка из 30 л молока за цикл;
- установка соответствует техническому заданию (ТЗ) и требованиям безопасности.

Заключение комиссии:

Комиссия подтверждает, что оборудование вакуум-сублимационной сушки успешно внедрено в производственную деятельность ТОО «ЭкоФармТехнология» и может быть рекомендовано к дальнейшему промышленному применению и серийному производству.

Должность / Представитель

Производственный эксперт
ТОО «ЭкоФармТехнология»

PhD, ассоциированный профессор

Главный конструктор проекта

Главный технолог проекта



Ф.И.О.

Сагитова З.Т.

Рахматулина А.Б.

Молдашев А.Н.

Смагулов Д.К.