# YUQORI SAMARALI MIKROTO‘LQIN–VAKUUM QURITGICHLARI: ZAMONAVIY HOLATI, ENERGIYA SAMARADORLIGI VA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI

**Baxshullayeva Mubashira Bahodir qizi**
*Buxoro davlat universiteti 05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari ixtisosligi bo‘yicha stajyor-doktorant*

**Annotatsiya.** Maqolada yuqori samarali mikroto‘lqin–vakuum quritish texnologiyalarining zamonaviy ilmiy-texnik holati adabiyotlar tahlili asosida umumlashtirilgan. Mikroto‘lqin energiyasining hajmiy dielektrik qizdirish mexanizmi, vakuum ostida suvning qaynash harorati pasayishi, ichki bug‘ bosimi va namlik migratsiyasining jadallashuvi quritish intensivligini belgilovchi asosiy omillar sifatida ko‘rib chiqilgan. Statik, aylanuvchi, uzluksiz va gibrid mikroto‘lqin–vakuum quritgichlarning konstruktiv xususiyatlari, magnetron va to‘lqin o‘tkazgich tizimi, vakuum kamerasi, kondensator va boshqaruv bloklarining o‘zaro bog‘liqligi tahlil qilingan. So‘nggi tadqiqotlarda quritish vaqtining keskin qisqarishi, rang va biofaol komponentlarning yaxshi saqlanishi, ayrim tizimlarda energiya sarfining kamayishi hamda issiqlik va massa almashinuvi modellarining takomillashgani ko‘rsatilgan. Shu bilan birga, notekis elektromagnit maydon, “issiq nuqta”lar, mahsulotning dielektrik xossalariga kuchli bog‘liqlik, vakuum tizimining qo‘shimcha energiya talabi, masshtablash va kapital xarajatlar kabi cheklovlar saqlanib qolmoqda. Adabiyotlar tahlili asosida energiya samaradorligini baholash uchun maxsus energiya sarfi, namlikni ajratishning maxsus ko‘rsatkichi va umumiy foydali ish koeffitsiyentini birgalikda qo‘llash zarurligi asoslangan. Shuningdek, qattiq jismli mikroto‘lqin generatorlari, ko‘p manbali rezonatorlar, aylanuvchi kameralar, COMSOL asosidagi raqamli egizaklar, real vaqt sensori va sun’iy intellekt asosidagi adaptiv boshqaruv istiqbolli yo‘nalish sifatida ajratilgan. O‘zbekiston sharoitida meva-sabzavot, dorivor o‘simlik va qishloq xo‘jaligi xomashyosini qayta ishlash uchun quyosh fotoelektr energiyasi bilan integratsiyalangan mikroto‘lqin–vakuum quritgichlarni yaratish alohida ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekani ko‘rsatilgan.

**Kalit so‘zlar:** mikroto‘lqin, vakuum, quritish, dielektrik qizdirish, energiya samaradorligi, maxsus energiya sarfi, issiqlik va massa almashinuvi, COMSOL, adaptiv boshqaruv, qayta tiklanuvchi energiya.

**Аннотация.** В статье на основе анализа научной литературы обобщено современное состояние микроволново-вакуумной сушки. Рассмотрены механизмы объемного диэлектрического нагрева, снижение температуры кипения воды при разрежении, особенности переноса тепла и влаги, а также конструктивные решения статических, вращающихся и непрерывных установок. Систематизированы данные по кинетике сушки, удельному


ISSN 3030-3907

энергопотреблению, качеству высушенного продукта и влиянию мощности микроволн, давления, толщины слоя и загрузки. Показано, что ключевыми ограничениями остаются неоднородность электромагнитного поля, локальный перегрев, зависимость от диэлектрических свойств сырья и сложность масштабирования. Перспективными направлениями являются многомагнетронные и твердотельные генераторы, цифровое моделирование, онлайн-мониторинг и интеллектуальное управление, а также интеграция с возобновляемыми источниками электроэнергии.
**Ключевые слова:** микроволновая сушка, вакуум, энергоэффективность, диэлектрический нагрев, тепло- и массоперенос, моделирование, интеллектуальное управление.
**Abstract.** This review summarizes the current scientific and engineering status of high-efficiency microwave–vacuum drying (MVD). The analysis focuses on volumetric dielectric heating, reduced water boiling temperature under vacuum, internal vapor-pressure-driven moisture transport, equipment configurations, drying kinetics, specific energy consumption and product quality. Recent studies demonstrate substantial reductions in drying time and, under properly optimized operating conditions, improved retention of color and bioactive compounds. However, non-uniform electromagnetic fields, hot spots, strong dependence on dielectric properties, auxiliary energy demand of vacuum systems, and scale-up remain important barriers. The paper discusses energy-performance metrics, multiphysics modeling, rotary and multi-source cavities, real-time sensing, artificial-intelligence-based adaptive control and integration with renewable electricity. Research gaps relevant to the development of locally adapted MVD systems for agricultural products in Uzbekistan are identified.
**Keywords:** microwave-vacuum drying, dielectric heating, energy efficiency, specific energy consumption, heat and mass transfer, modeling, adaptive control, renewable energy.

## 1. KIRISH.

Quritish oziq-ovqat, dorivor o‘simliklar, qishloq xo‘jaligi xomashyosi va biologik materiallarni uzoq muddat saqlashga tayyorlashda eng ko‘p energiya talab qiladigan texnologik jarayonlardan biridir. An’anaviy konvektiv quritish usullarida issiqlik avvalo mahsulot sirtiga beriladi, keyin esa issiqlik o‘tkazuvchanligi orqali ichkariga tarqaladi. Namlikning katta qismi esa ichki qatlamlardan sirtga diffuziya qilib chiqishi kerak. Shu sababli yuqori namlikli xomashyoni past haroratlarda quritish uzoq davom etadi, yuqori haroratlarda esa rang, hid, vitaminlar, fenolik birikmalar va tekstura zarar ko‘rishi mumkin. Energiya samaradorligini oshirish


ISSN 3030-3907

bilan bir vaqtda mahsulot sifatini saqlash zarurati zamonaviy quritish texnikasining asosiy muammolaridan biri bo‘lib qolmoqda.

Mikroto‘lqinli quritish issiqlikni tashqi yuzadan ichkariga uzatish o‘rniga elektromagnit energiyani mahsulot hajmida bevosita issiqlikka aylantirishi bilan farqlanadi. Suv molekulalarining dipol orientatsiyasi va ionlarning o‘zgaruvchan elektr maydonidagi harakati natijasida nam qatlamlarda hajmiy issiqlik hosil bo‘ladi. Vakuum bilan birlashtirilganda suvning qaynash harorati pasayadi, bug‘ning ichki bosimi ortadi va namlikning tashqariga ko‘chishi tezlashadi. Natijada nisbatan past mahsulot haroratida yuqori quritish tezligiga erishish mumkin [1, 3]. Bu xususiyat mikroto‘lqin–vakuum quritish (MVD/VMD) usulini issiqlikka sezgir xomashyo uchun ayniqsa jozibador qiladi.

González-Cavieres va hammualliflarning 2021-yilgi keng qamrovli sharhida mikroto‘lqin–vakuum tizimlariga bag‘ishlangan ilmiy va sanoat qiziqishi 2000–2020-yillar oralig‘ida sezilarli oshgani, quritgichlar statik, aylanuvchi, uzluksiz va patentlangan sanoat konfiguratsiyalariga ajratilishi ko‘rsatilgan [1]. Ushbu sharhda ayrim sharoitlarda boshqa quritish tizimlariga nisbatan energiya sarfi qariyb 50% gacha kamayishi mumkinligi qayd etilgan. Biroq bu raqam universal ko‘rsatkich emas: haqiqiy energiya sarfi mahsulot turi, boshlang‘ich va yakuniy namlik, yuklama, magnetron samaradorligi, vakuum nasosi va sovitish tizimi sarfiga kuchli bog‘liq.

So‘nggi yillarda MVD bo‘yicha tadqiqotlar oddiy quritish kinetikasini o‘lchashdan ko‘ra chuqurroq masalalarga — elektromagnit maydonni bir xillashtirish, materialning dielektrik xossalarini namlik bilan bog‘lash, issiqlik-massa almashinuvini ko‘p fizikaviy modellashtirish, real vaqt monitoringi, sun’iy intellekt orqali boshqarish hamda qayta tiklanuvchi elektr energiyasi bilan integratsiyalashga yo‘nalmoqda [2, 8, 9, 11]. Shu sababli yuqori samarali MVD quritgich tushunchasi faqat katta mikroto‘lqin quvvati yoki chuqur vakuum bilan emas, balki energiyani maqsadli yutish, bir xil qizdirish, minimal yordamchi energiya sarfi, sifatning saqlanishi va adaptiv boshqaruvning uyg‘unligi bilan belgilanadi.

Mazkur maqolaning maqsadi — mikroto‘lqin–vakuum quritgichlar bo‘yicha zamonaviy adabiyotlarni tahlil qilish, yuqori samaradorlikni belgilaydigan fizik, energetik va konstruktiv omillarni umumlashtirish, mavjud muammolarni aniqlash hamda 05.05.06 ixtisosligi doirasida qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalangan istiqbolli qurilmalar uchun ilmiy yo‘nalishlarni belgilashdan iborat.

## 2. ADABIYOTLARNI TANLASH VA TAHLIL QILISH YONDASHUVI.

Ushbu ish sistematik meta-tahlil emas, balki muhandislik yo‘nalishidagi narrativ-analitik adabiyotlar sharhidir. Tahlilda mikroto‘lqinli quritish, vakuumli


ISSN 3030-3907

quritish, microwave-vacuum drying, energy efficiency, drying kinetics, dielectric properties, heat and mass transfer, uniform heating, artificial intelligence va hybrid drying kalit tushunchalariga mos bo‘lgan ilmiy maqolalar ustuvor ko‘rib chiqildi. Asosiy e’tibor 2019–2026-yillarda e’lon qilingan ishlarga qaratildi, biroq fizik mexanizm va texnologiyaning shakllanishini izohlash uchun avvalgi fundamental tajribalar ham jalb qilindi.

Manbalarni tahlil qilishda besh mezon qo‘llanildi: birinchidan, quritgichning konstruktiv sxemasi; ikkinchidan, mikroto‘lqin quvvati va vakuum bosimi kabi rejim parametrlarining quritish tezligiga ta’siri; uchinchidan, energiya sarfi va maxsus energiya ko‘rsatkichlari; to‘rtinchidan, mahsulot sifati — rang, rehidratatsiya, biofaol komponentlar, tekstura va mikrostruktura; beshinchidan, modellashtirish va avtomatlashtirish darajasi. Shu asosda turli laboratoriya va pilot tizimlar o‘rtasidagi umumiy qonuniyatlar ajratildi.

Adabiyotlar tahlilining muhim cheklovi shundaki, turli mualliflar energiya samaradorligini bir xil usulda hisoblamaydi. Ba’zi ishlarda faqat magnetron iste’moli, boshqalarida esa vakuum nasosi, kondensator, sovitish tizimi, ventilyator va boshqaruv bloklari ham hisobga olinadi. Shuningdek, namlik miqdori quruq asosda yoki nam asosda berilishi mumkin. Shu sababli mutlaq sonlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri taqqoslashdan ko‘ra, ko‘rsatkichlarning aniqlanish usulini va tajriba sharoitini hisobga olish talab etiladi.

## 3. MIKROTO‘LQIN–VAKUUM QURITISHNING FIZIK ASOSLARI.

Mikroto‘lqin elektromagnit nurlanishning 300 MHz dan 300 GHz gacha bo‘lgan diapazoniga kiradi. Oziq-ovqat va ko‘plab biologik materiallarni sanoat miqyosida qayta ishlashda odatda 915 MHz yoki 2,45 GHz chastotalar qo‘llanadi. Elektromagnit maydon nam materialga kirganda dielektrik yo‘qotishlar hisobiga energiya issiqlikka aylanadi. Materialning kompleks dielektrik o‘tkazuvchanligi $\varepsilon^*=\varepsilon'-j\varepsilon''$ ko‘rinishida ifodalanadi; bunda $\varepsilon'$ energiyani saqlash qobiliyatini, $\varepsilon''$ esa elektromagnit energiyani issiqlikka aylantirish qobiliyatini tavsiflaydi [9].

Hajmiy mikroto‘lqin qizdirishda issiqlik manbai mahsulotning o‘zida hosil bo‘ladi. Soddalashtirilgan holda birlik hajmda ajraladigan mikroto‘lqin issiqlik quvvati $q_{mw}$ elektr maydon kuchlanganligining kvadratiga, chastotaga va dielektrik yo‘qotish faktoriga proporsional:

$$q_{mw} = \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot |E|^2$$

Bu bog‘lanishdan ko‘rinadiki, mahsulotdagi namlik kamaygani sayin $\varepsilon''$ ham o‘zgaradi va bir xil berilgan magnetron quvvatida energiyaning yutilish samarasi quritish davomida doimiy bo‘lmaydi. Shu sababli quritishning dastlabki bosqichida yuqori quvvat samarali bo‘lishi mumkin, yakuniy bosqichda esa shu quvvat “issiq nuqta”lar va lokal kuydirish xavfini oshiradi. Pilot miqyosdagi konsentrlangan


ISSN 3030-3907

yog‘siz sut tadqiqotida dielektrik xossalarning namlik bilan o‘zgarishi quritish bosqichlari va maxsus energiya sarfi bilan bevosita bog‘langan [4].

Vakuumning ikkinchi fundamental ta’siri - suvning to‘yingan bug‘ bosimi va qaynash haroratini pasaytirishdir. Atmosfera bosimida suv taxminan 100 °C da qaynasa, pasaytirilgan bosimda bug‘lanish ancha past haroratlarda sodir bo‘ladi. Bu issiqlikka sezgir vitaminlar, pigmentlar va uchuvchan aromatik birikmalarni saqlash imkonini oshiradi. Bundan tashqari, mahsulot ichida hosil bo‘lgan bug‘ tashqi bosim past bo‘lgani sababli g‘ovak kanallar orqali tezroq harakatlanadi. Ayrim mahsulotlarda bu ichki tuzilmani “puflash” (puffing) va g‘ovakroq mikrostruktura hosil bo‘lishiga olib keladi.

MVD jarayonida issiqlik va massa almashinuvi o‘zaro kuchli bog‘langan. Elektromagnit energiya issiqlik hosil qiladi; issiqlik namlikni bug‘lantiradi; namlik kamayishi dielektrik xossalarni o‘zgartiradi; dielektrik xossalar esa keyingi mikroto‘lqin yutilishiga ta’sir qiladi. Shu sababli jarayonni faqat Fick diffuziyasi yoki faqat issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi bilan to‘liq tavsiflab bo‘lmaydi. Zamonaviy modellar Maxwell tenglamalari, energiya balansi, namlik transporti va faza o‘zgarishini birlashtirishga intilmoqda [8, 9].

## 4. YUQORI SAMARALI MVD QURILMASINING ASOSIY TUGUNLARI.

Yuqori samarali mikroto‘lqin–vakuum quritgich bir-biriga bog‘langan bir nechta energetik va texnologik tugunlardan tashkil topadi. Ularning har biridagi yo‘qotishlar umumiy energiya samaradorligiga ta’sir qiladi. Adabiyotlarda faqat magnetron quvvatini ko‘rsatish amaliyoti ko‘p uchraydi, biroq real sanoat bahosida mikroto‘lqin manbai, yuqori kuchlanish manbai, vakuum nasosi, kondensator yoki sovitish konturi, aylantirish mexanizmi va avtomatika iste’moli ham hisobga olinishi lozim [4].

**Mikroto‘lqin generatori.** An’anaviy tizimlarda magnetronlar keng qo‘llanadi. Ular nisbatan arzon va yuqori quvvatga ega, ammo chiqish chastotasi va fazasini nozik boshqarish imkoniyati cheklangan. 2025-yilgi sharhda qattiq jismli mikroto‘lqin generatorlari chastota, faza va quvvatni aniq boshqarish, qaytgan quvvatni kuzatish va elektromagnit maydonni moslashtirish imkonini berishi sababli istiqbolli ekani ko‘rsatilgan [9]. Hozircha ularning narxi yuqori, lekin yuqori sifat talab etadigan tizimlarda foydali bo‘lishi mumkin.

**To‘lqin o‘tkazgich va rezonator.** Mikroto‘lqin energiyasini mahsulot hajmida bir xil taqsimlash uchun to‘lqin o‘tkazgichlar soni, joylashishi va kavita geometriyasi juda muhim. Turg‘un to‘lqinlar tugun va antitugunlar hosil qilib, “sovuq” va “issiq” zonalarni keltirib chiqaradi. Ko‘p manbali yoki ko‘p tirqishli to‘lqin o‘tkazgichlar, mode-stirrer, reflektorlar va turli kavita shakllari maydon bir xilligini yaxshilashi mumkin [9].


ISSN 3030-3907

**Vakuum kamerasi.** Kamera mikroto‘lqin uchun mos, mexanik jihatdan vakuumga chidamli va oziq-ovqat xavfsizligi talablariga javob berishi kerak. Laboratoriya tizimlarida mikroto‘lqin shaffof polimer idishlar ham ishlatiladi, sanoatda esa metall vakuum korpusi ichidagi dielektrik mahsulot tutqichlaridan foydalaniladi. Kamera ichida mahsulotni aylantirish yoki barabanni rotatsiya qilish lokal qizishlarni kamaytiradi [6].

**Bug‘ni chiqarish va kondensatsiya.** Vakuum nasosining vazifasi kameradagi suv bug‘ini to‘g‘ridan-to‘g‘ri tortish emas, balki zarur past bosimni saqlashdir. Agar ko‘p miqdordagi bug‘ nasosga kirsa, uning samaradorligi pasayadi va xizmat muddati qisqarishi mumkin. Shu sababli sovuq tutgich yoki kondensator bug‘ni oldindan kondensatsiyalab, nasos yukini kamaytiradi. Yuqori samarali qurilmalarda kondensatsiya issiqligini qayta ishlatish yoki issiqlik nasosi sikliga ulash ham istiqbolli yo‘nalishdir.

**Boshqaruv va o‘lchov.** Minimal tizimda bosim, mahsulot harorati, mikroto‘lqin quvvati va vaqt nazorat qilinadi. Ilg‘or tizimlarda mahsulot massasi, infraqizil yoki tolali-optik harorat, namlik, chiqayotgan bug‘ oqimi, kavita ichidagi qaytgan mikroto‘lqin quvvati va uchuvchan modda signallari kuzatiladi. Bunday ma’lumotlar adaptiv quvvat va vakuum algoritmlarini yaratish uchun zarur.

## 5. QURILMA KONFIGURATSIYALARI: STATIK, AYLANUVCHI VA UZLUKSIZ TIZIMLAR.

Statik MVD quritgichlar konstruksiyasi sodda bo‘lib, laboratoriya tadqiqotlari uchun qulay. Mahsulot bir joyda turadi, elektromagnit maydon esa kavita geometriyasi va magnetron joylashuviga bog‘liq. Bunday tizimning asosiy kamchiligi — notekis qizish. Kichik namuna va yupqa qatlamlarda bu muammo nazorat qilinishi mumkin, lekin yuklama oshgani sari maydonning notekisligi va mahsulotning o‘zaro elektromagnit “soyalanishi” kuchayadi.

Aylanuvchi platformali yoki barabanli tizimlar mahsulotning turg‘un maydon tugunlariga uzoq vaqt tushib qolishini kamaytiradi. Zang va hammualliflar Angelica sinensis uchun aylanuvchi laganli mikroto‘lqin–vakuum quritgich yaratib, quritish tezligi va fizik-kimyoviy sifat ko‘rsatkichlarini yaxshilash imkonini ko‘rsatgan [6]. Harakatning foydasi shundaki, mahsulot elektromagnit maydonning turli zonalaridan davriy o‘tadi, biroq mexanik uzatma, vakuum zichligi va aylantirish elementlari qurilmani murakkablashtiradi.

Uzluksiz tizimlar sanoat unumdorligi uchun maqsadga muvofiq. Mahsulot vakuum kamerasi bo‘ylab harakatlanadi yoki modullar orqali ketma-ket uzatiladi. Bunda kirish-chiqish shlyuzlari vakuumni buzmasligi, mikroto‘lqin nurlanishi tashqariga chiqmasligi va mahsulot oqimi bir xil bo‘lishi kerak. Uzluksiz MVD tizimlari jarayonning har bir zonasida turli quvvat va bosim berishga imkon beradi;


ISSN 3030-3907

bu quritishning namlikka bog‘liq bosqichlarini alohida optimallashtirish uchun juda muhim.

Gibrid tizimlarda mikroto‘lqin–vakuum bosqichi konvektiv, infraqizil, issiqlik nasosli yoki muzlatib quritish bosqichlari bilan birlashtiriladi. 2026-yilgi kritik sharh kombinatsiyalangan quritish usullari mahsulot sifati, vaqt va energiya sarfi o‘rtasidagi kompromissni yaxshilashi mumkinligini, biroq natijalar mahsulot matritsasi va texnologik konfiguratsiyaga kuchli bog‘liqligini ta’kidlaydi [12]. Yuqori samaradorlik uchun mikroto‘lqin barcha jarayon davomida ishlatilishi shart emas: ko‘pincha namlik diffuziyasi eng sekinlashgan bosqichda qisqa impulsli qo‘llash maqsadga muvofiq.

## 6. QURITISH KINETIKASI VA JARAYON PARAMETRLARI.

MVD jarayonini baholashda namlik nisbati (moisture ratio, MR), quritish tezligi, samarali namlik diffuziyasi va matematik model koeffitsiyentlari asosiy ko‘rsatkich hisoblanadi. Namlik nisbati odatda quyidagicha ifodalanadi:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$$

bu yerda $M_t$ — t vaqtdagi namlik, $M_0$ — boshlang‘ich namlik, $M_e$ — muvozanat namligi. Ko‘plab tajribalarda $M_e$ juda kichik bo‘lgani sababli $MR \approx M_t/M_0$ soddalashtirish qo‘llanadi. Quritish tezligi esa ketma-ket ikki vaqt nuqtasidagi namlik farqi orqali aniqlanadi. Page, Henderson–Pabis, logarithmic, Weibull va boshqa empirik modellar tajriba ma’lumotlarini tavsiflash uchun keng ishlatiladi.

Mikroto‘lqin quvvati oshishi odatda dastlab quritish tezligini oshiradi, chunki birlik vaqt ichida ko‘proq elektromagnit energiya yutiladi. Biroq quvvat ortishi cheksiz foyda bermaydi. Mahsulot namligi kamayganda dielektrik yo‘qotish koeffitsiyenti pasayishi, sirt harorati tez ko‘tarilishi va lokal qizish kuchayishi mumkin. Camellia oleifera urug‘lari bo‘yicha 2023-yilgi tadqiqotda juda past hamda juda yuqori quvvat energiya sarfini oshirishi, tajriba sharoitida 150 g yuklama, 350 W mikroto‘lqin quvvati va 0,09 MPa vakuum optimal kombinatsiya bo‘lgani ko‘rsatilgan [5]. Ushbu qiymatlar boshqa mahsulotlarga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirilmaydi, ammo optimal nuqta mavjudligini tasdiqlaydi.

Vakuum darajasi qaynash harorati va bug‘ning tashqi qarshiligini belgilaydi. Bosimni kamaytirish odatda quritishni jadallashtiradi, biroq juda chuqur vakuum nasos energiyasini oshiradi, ayrim materiallarda haddan tashqari puffing va strukturaviy mo‘rtlik keltirib chiqaradi. Shuning uchun energiya samaradorligi faqat quritish vaqtiga qarab baholanmasligi kerak. Optimal bosim mahsulot sifati, nasos sarfi va mikroto‘lqin yutilishi bilan birgalikda aniqlanishi lozim.

Qatlam qalinligi mikroto‘lqin penetratsiyasi va namlik yo‘liga ta’sir qiladi. Astragalus ildizlari bo‘yicha 2024-yilgi ishda 30–50 °C harorat oralig‘i va 2–6 mm qalinliklar tekshirilgan, quritish harorati kinetikaga qalinlikka qaraganda kuchliroq


ISSN 3030-3907

ta’sir ko‘rsatgani qayd etilgan [8]. Shunga qaramay, qalin bo‘laklarda ichki namlikni chiqarish yo‘li uzayadi va maydon notekisligi ortishi mumkin.

Yuklama massasi ham ikki qarama-qarshi ta’sirga ega. Juda kichik yuklamada mikroto‘lqin energiyasining sezilarli qismi aks etishi yoki kavita yo‘qotishlariga ketishi mumkin; juda katta yuklamada esa ichki soyalash va bug‘ni chiqarish cheklanishi ehtimoli bor. Pilot masshtabdagi sut konsentrati tajribalarida katta yuklamalarda magnetronning nisbiy samaradorligi yaxshilanib, umumiy maxsus energiya sarfi kamaygani ko‘rsatilgan [4]. Bu natija masshtablashda “to‘liq quvvatdan foydalanish” omilining muhimligini ko‘rsatadi.

Oldindan ishlov berish — blanching, osmotik suvsizlantirish, muzlatib-eritish, ultratovush yoki mexanik perforatsiya — massani ko‘chirish qarshiligini kamaytirishi mumkin. Biroq MVDning o‘zi juda intensiv bo‘lgani sababli qo‘shimcha ishlov har doim ham foydali emas. Binafsha rangli batat bo‘yicha Marzuki va hammualliflar 450, 600 va 850 W da MVD quritish vaqtini 6–12 minutgacha qisqartirgan, shu bilan birga 70 °C issiq havo quritish 600 minut davom etgan [7].

## 7. ENERGIYA SAMARADORLIGINI BAHOLASH.

MVD tizimining “yuqori samarali” ekanini isbotlash uchun faqat quritish vaqtini qisqartirish yetarli emas. Energetik tahlilda qurilmaning barcha elektr iste’molchilari hisobga olinishi kerak. Eng ko‘p qo‘llanadigan ko‘rsatkichlardan biri maxsus energiya sarfi (SEC) bo‘lib, sarflangan umumiy energiyaning bug‘latilgan suv massasiga nisbati sifatida aniqlanadi:

$$SEC = E_{total} / m_w \quad [kWh \cdot kg^{-1}\ suv]$$

Bunga teskari ko‘rsatkich sifatida namlikni ajratishning maxsus ko‘rsatkichi (SMER) qo‘llanadi:

$$SMER = m_w / E_{total} \quad [kg\ suv \cdot kWh^{-1}]$$

Dumpler va Moraru konsentrlangan yog‘siz sutni pilot miqyosdagi EnWave nutraReV™ tizimida quritib, eng katta kameraviy yuklamada umumiy elektr energiya sarfi 2,85 kWh/kg bug‘latilgan suvni tashkil etganini, shundan 2,14 kWh/kg qismi magnetronlar hissasiga to‘g‘ri kelganini hisoblagan [4]. Kichik yuklamada esa umumiy SEC sezilarli yuqori bo‘lgan. Bu natija vakuum nasosi, sovitish, yordamchi tizimlar va magnetron samaradorligi masshtab bilan qanday o‘zgarishini aniq ko‘rsatadi.

An va hammualliflarning 2024-yilgi sharhiga ko‘ra, mikroto‘lqinli quritish energiya samaradorligiga qurilma tuzilishi, mikroto‘lqin quvvati, chastota, harorat, havo tezligi, materialning dielektrik xossalari va gibrid texnologiyalar birgalikda ta’sir qiladi [2]. Mualliflar kelajakdagi energiya tejamkor quritgichlarda sun’iy intellekt, qayta tiklanuvchi energiya va hisoblash gidrodinamikasi/ko‘p fizikaviy modellashtirishdan foydalanish zarurligini ta’kidlaydi.


ISSN 3030-3907

Energiya balansini chuqurroq baholashda elektromagnit generatorning elektrdan mikroto‘lqinga o‘tish samaradorligi, kavita ichida yutilgan va qaytgan quvvat, suvni qizdirish va bug‘latishga sarflangan foydali energiya, mahsulot qattiq fazasini qizdirish, kamera devorlaridagi yo‘qotishlar, vakuum yaratish va bug‘ni kondensatsiyalash xarajatlari ajratilishi kerak. Shundagina turli konstruksiyalarni adolatli taqqoslash mumkin.

Quritish oxirida namlik kamaygani sari bir kilogramm suvni chiqarishga ketadigan energiya odatda ortadi. Sababi qolgan suv ko‘proq bog‘langan bo‘ladi, dielektrik yutilish kamayadi va quritish tezligi tushadi. Shu nuqtada doimiy yuqori quvvat energiyani samarasiz ishlatadi. Impulsli quvvat, bosqichma-bosqich pasayuvchi quvvat yoki namlikka bog‘liq avtomatik boshqaruv yuqori samarali tizimning muhim belgisi bo‘lishi kerak.

2024-yilgi Energy Reports sharhida qishloq xo‘jaligi quritish tizimlari uchun SEC, maxsus issiqlik sarfi va SMER ko‘rsatkichlarini birgalikda qo‘llash tavsiya etiladi [10]. Gibrid quyosh tizimlari yuqori energiya samaradorligi ko‘rsatishi mumkin. MVD uchun bundan kelib chiqadigan xulosa shuki, mikroto‘lqin quritgichni fotoelektr stansiya bilan elektr tomondan, issiqlik nasosi yoki quyosh issiqlik kollektori bilan esa oldindan quritish bosqichida integratsiyalash umumiy energiya tizimi samaradorligini oshirishi mumkin.

## 8. MAHSULOT SIFATI VA MVDNING TEXNOLOGIK USTUNLIKLARI.

Quritish texnologiyasining haqiqiy samaradorligi yakuniy mahsulot sifatidan ajratib qaralmasligi kerak. Issiq havo bilan uzoq muddat quritishda oksidlanish, Maillard reaksiyalari, rangning qorayishi, aromatik birikmalarning yo‘qolishi va hujayra tuzilmasining zichlashuvi sodir bo‘lishi mumkin. MVDning qisqa jarayon vaqti hamda pastroq qaynash harorati bunday o‘zgarishlarni cheklashi mumkin.

Binafsha rangli batat tajribalarida MVD namunalari issiq havo bilan quritilgan namunalarga nisbatan rang, antioksidant faollik va umumiy fenolik birikmalarni yaxshiroq saqlagan [7]. Vakuum kislorod miqdorini kamaytirishi sababli antosianinlar va boshqa oksidlanishga sezgir komponentlar kamroq buzilishi mumkin. Shu bilan birga, juda yuqori mikroto‘lqin quvvati lokal kuydirish yoki ichki bosimning haddan tashqari ortishiga olib kelishi mumkin.

MVD ko‘pincha g‘ovakroq struktura hosil qiladi. Ichkarida hosil bo‘lgan suv bug‘i past tashqi bosimga qarshi tez kengayadi va hujayra strukturasida kanallar hosil qilishi mumkin. Bu ayrim meva-sabzavotlarda rehidratatsiyani va qarsildoq teksturani yaxshilaydi. Biroq puflanish darajasi mahsulot turiga, qattiq moddalar tarkibiga, shakar miqdoriga va jarayon bosimiga bog‘liq.

Dorivor o‘simliklar uchun asosiy mezon faol komponentlarni saqlashdir. 2024-yilgi Astragalus tadqiqotida pastroq harorat ayrim faol birikmalarni


ISSN 3030-3907

yaxshiroq saqlagan, issiqlik-massa almashinuvi esa COMSOL yordamida tahlil qilingan [8]. 2024-yilda shu xomashyo uchun elektron burun signallari orqali uchuvchan aromatik komponentlarni onlayn kuzatish va turli quritish bosqichlarida boshqaruv strategiyasini o‘zgartirish taklif qilingan [11]. Bu mahsulot sifatini jarayon oxirida emas, real vaqtning o‘zida boshqarish konsepsiyasini ko‘rsatadi.

Sut mahsulotlari misolida ham MVD faqat suvni olib tashlash emas, funksional xossalarni saqlash imkonini beradi. Dumpler va Moraru 2024-yilda qaymoqni MVD bilan suvsizlantirib, rehidratatsiyadan keyin ko‘p bosqichli gomogenizatsiya yordamida ko‘pirtirish funksiyasini saqlash mumkinligini ko‘rsatgan [13]. Demak, MVD uchun sifat mezonlari mahsulot turiga xos bo‘lishi va energiya optimallashtirish bilan bir vaqtda ko‘rib chiqilishi kerak.

## 9. ISSIQLIK VA MASSA ALMASHINUVI MODELLARI.

MVD quritgichni tajribaviy “sinov va xato” usulida optimallashtirish qimmat va vaqt talab qiladi. Ko‘p fizikaviy model elektromagnit maydonning kavita ichidagi taqsimoti, mahsulot ichida volumetrik issiqlik generatsiyasi, issiqlik o‘tkazuvchanligi, suv bug‘lanishi, suyuq namlik diffuziyasi va bug‘ bosimini bir vaqtda hisoblash imkonini beradi. COMSOL Multiphysics kabi dasturlar MVD bo‘yicha ko‘plab zamonaviy ishlarda qo‘llanmoqda [8].

Elektromagnit qism uchun Maxwell tenglamalari, issiqlik qismi uchun energiya saqlanish tenglamasi, namlik uchun Fick yoki kengaytirilgan ko‘p fazali transport tenglamalari ishlatiladi. Muhim masala — material xossalarini doimiy deb olmaslik. ε′, ε″, issiqlik sig‘imi, issiqlik o‘tkazuvchanlik, zichlik va namlik diffuziyasi harorat hamda namlik bilan o‘zgaradi. Bu bog‘lanishlar tajriba orqali aniqlanmasa, model natijasi real qurilmadan sezilarli farq qilishi mumkin.

Modelning amaliy maqsadi faqat harorat xaritasini chizish emas. U magnetronlar soni va joylashuvi, to‘lqin o‘tkazgich o‘lchamlari, kavita shakli, mahsulot geometriyasi va aylanish tezligini optimallashtirishga xizmat qilishi kerak. Joardder va Karim 2025-yilgi sharhida notekis qizishning asosiy sabablari sifatida dielektrik xossalar, mahsulot tarkibi va geometriyasi, kavita va to‘lqin o‘tkazgich dizayni hamda mikroto‘lqin manbai konfiguratsiyasini ko‘rsatadi [9].

Raqamli egizak konsepsiyasida fizik model real vaqt sensorlari bilan muntazam yangilanadi. Mahsulot massasi, bosimi, temperaturasi va qaytgan mikroto‘lqin quvvati bo‘yicha model namlikni bevosita o‘lchamasdan baholashi mumkin. Keyin optimallashtiruvchi algoritm keyingi vaqt bosqichi uchun mikroto‘lqin quvvati va vakuum setpointini tanlaydi. Bunday tizim yuqori samarali quritgichni statik rejimdan dinamik, mahsulot holatiga moslashuvchi rejimga o‘tkazadi.

## 10. ELEKTROMAGNIT MAYDON BIR XILLIGI — ASOSIY MUHANDISLIK MUAMMOSI.


ISSN 3030-3907

MVDning eng ko‘p takrorlanadigan texnik muammosi — notekis qizish. Metall kavita devorlarida mikroto‘lqinlarning ko‘p marta aks etishi turg‘un to‘lqinlar hosil qiladi. Mahsulot joylashuvi bu maydonni yana o‘zgartiradi. Natijada ayrim nuqtalarda elektromagnit energiya katta, boshqalarida kichik bo‘ladi. Nam joylar ko‘proq energiya yutishi sababli dastlab o‘z-o‘zini muvozanatlash kuzatilishi mumkin, ammo quritish oxirida lokal qizish va termik runaway xavfi kuchayadi.

Bir xillikni yaxshilash strategiyalari uch guruhga ajratilishi mumkin. Birinchisi — mahsulotni harakatlantirish: aylanuvchi lagan, baraban, tebranish yoki konveyer. Ikkinchisi — elektromagnit maydonni harakatlantirish: mode-stirrer, ko‘p chastotali yoki fazasi boshqariladigan manbalar. Uchinchisi — kavita va to‘lqin o‘tkazgich dizaynini optimallashtirish. Zamonaviy sharhlarda ko‘p tirqishli to‘lqin o‘tkazgichlar va turli kavita geometriyalari temperaturaning tarqalishini yaxshilashi mumkinligi ko‘rsatilgan [9].

Yuqori samarali qurilma dizaynida “bir xil harorat” maqsadi bilan “maksimal yutilgan quvvat” maqsadi ba’zan qarama-qarshi bo‘ladi. Muayyan geometriya umumiy yutilishni oshirishi, lekin lokal maksimumlarni ham kuchaytirishi mumkin. Shuning uchun optimallashtirish mezoni ko‘p maqsadli bo‘lishi kerak: quritish vaqti, SEC, temperaturaning variatsiya koeffitsiyenti, maksimal harorat va mahsulot sifat indeksi birgalikda baholanadi.

Qattiq jismli generatorlar bu muammoga yangi yechim taklif qiladi: chastotani kichik diapazonda o‘zgartirish, manbalar fazasini boshqarish va qaytgan quvvat bo‘yicha real vaqt moslashuvi maydon naqshini vaqt bo‘yicha “skanerlash” imkonini beradi. Magnetronlarga nisbatan ularning boshlang‘ich narxi yuqori bo‘lsa-da, yuqori qiymatli xomashyo va aniq sifat nazorati talab qiladigan sanoat jarayonlarida ularning ahamiyati ortishi kutiladi.

## 11. AVTOMATLASHTIRISH, SENSORLAR VA SUN’IY INTELLEKT.

An’anaviy quritgichlar ko‘pincha belgilangan vaqt, quvvat va bosim bo‘yicha ishlaydi. Biroq mahsulotning boshlang‘ich namligi partiyadan partiyaga farq qilishi sababli bir xil dastur ortiqcha quritish yoki yetarli quritmaslikka olib keladi. Yuqori samaradorlik uchun jarayon oxirini va quvvat profilini mahsulot holatiga qarab aniqlash kerak.

Onlayn sensorlar orasida massa datchigi, vakuum sensori, optik tolali harorat sensori, infraqizil kamera, dielektrik o‘lchov, namlik sensori, bug‘ oqimi va kondensat miqdori, mikroto‘lqin qaytish koeffitsiyenti hamda elektron burun signalidan foydalanish mumkin. Vakuum va mikroto‘lqin muhitida metall sensorlarning ishlashi qiyin bo‘lgani sababli kontaktsiz yoki elektromagnit jihatdan mos o‘lchov usullari muhim.


ISSN 3030-3907

Liu va hammualliflarning 2024-yilgi ishida Astragalus quritishda uchuvchan aroma signallari elektron burun yordamida onlayn yozilib, quritish bosqichlariga mos turli boshqaruv strategiyalari qo‘llangan [11]. Bu yondashuv mahsulot sifatining bevosita indikatori asosida boshqaruvga misol bo‘ladi. Sun’iy neyron tarmoqlar esa tajriba parametrlaridan harorat, namlik yoki sifat ko‘rsatkichlarini prognoz qilish uchun ishlatilishi mumkin.

Kelajakdagi MVD boshqaruvi model predictive control (MPC) va mashinaviy o‘qitish kombinatsiyasiga tayanishi mumkin. Fizik model xavfsiz harorat va vakuum chegaralarini ta’minlaydi, ma’lumotga asoslangan model esa mahsulotga xos noaniqliklarni kompensatsiya qiladi. Maqsad funksiyasiga vaqt, elektr energiya, sifat yo‘qotishi va pik quvvat kirgizilsa, quritgich real vaqtning o‘zida iqtisodiy va energetik optimal rejimga yaqin ishlashi mumkin.

Bunday tizimni yaratishda ma’lumot sifati muhim. Har bir xomashyo uchun namlik–dielektrik xossa–harorat bog‘lanishi, sensorlarning kalibrovkasi va turli yuklamalarda ma’lumotlar bazasi zarur. Shuning uchun AI algoritmini alohida “qora quti” sifatida emas, tajriba fizikasi va energetik balans bilan bog‘langan yordamchi vosita sifatida qo‘llash maqsadga muvofiq.

## 12. ADABIYOTLARDAGI ASOSIY NATIJALARNING TAQQOSLANISHI.

**1-Jadval.**

**Mikroto‘lqin–vakuum quritish bo‘yicha tanlangan tadqiqotlarning umumlashtirilgan tahlili**

| Manba | Obyekt / tizim | Asosiy parametrlar | Muhim natija | Ilmiy ahamiyat |
|---|---|---|---|---|
| [1] González-Cavieres et al., 2021 | VMD tizimlari bo‘yicha sharh | Statik, aylanuvchi, uzluksiz konfiguratsiyalar | Ayrim holatlarda ~50% energiya tejalishi; quritish vaqti sezilarli qisqarishi | Konstruktiv klassifikatsiya va umumiy rivojlanish yo‘nalishlari |
| [4] Dumpler & Moraru, | Konsentrlangan yog‘siz sut, pilot MVD | 0.86–1.72 W/g; 30–147 mbar | To‘liq yuklamada 2.85 kWh/kg suv umumiy elektr sarfi | Yordamchi iste’molchilarni ham hisobga olish zarurligi |


ISSN 3030-3907

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2022/2023 | | | | |
| [5] Zhang et al., 2023 | Camellia oleifera urug‘i | Quvvat, vakuum, yuklama | Tajriba optimumi: 150 g, 350 W, 0.09 MPa | Quvvatning juda past va juda yuqori qiymatlari SECni oshirishi mumkin |
| [6] Zang et al., 2023 | Angelica sinensis | Aylanuvchi lagan, vakuum, qalinlik | Aylanish qizish bir xilligini va sifatni yaxshilaydi | Rotatsion MVD dizaynining samarasi |
| [7] Marzuki et al., 2021 | Binafsha batat | 450–850 W MVD; 70 °C HAD | MVD 6–12 min, HAD 600 min | Vaqt, rang va biofaol komponentlar bo‘yicha ustunlik |
| [8] Yue et al., 2024 | Astragalus ildizi | 30–50 °C; 2–6 mm; COMSOL | Harorat kinetikaga kuchli ta’sir; faol komponentlar uchun past T foydali | Ko‘p fizikaviy modellashtirish va sifat integratsiyasi |
| [11] Liu et al., 2024 | Astragalus | Elektron burun + bosqichli boshqaruv | Aroma signali asosida aqlli boshqaruv | Sifatni real vaqt signali bilan boshqarish |
| [13] Dumpler & Moraru, 2024 | Qaymoq | MVD va rehidratatsiya | Funksional ko‘pirtirish xossalari saqlanishi mumkin | MVDning yangi sut mahsulotlariga tatbiqi |


ISSN 3030-3907

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| [9] Joardder & Karim, 2025 | Mikroto‘lqinli quritish sharhi | Kavita, to‘lqin o‘tkazgich, solid-state | Notekis qizish sanoat masshtabidagi asosiy to‘siq | Maydon bir xilligi va ilg‘or generatorlar |
| [12] Vezi et al., 2026 | Kombinatsiyalangan meva quritish | Gibrid texnologiyalar | Sifat–energiya–vaqt kompromissini yaxshilash mumkin | Gibrid tizimlar va masshtablash muammolari |

## 13. QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA BILAN INTEGRATSIYA.

MVD quritgichlar elektr energiyasiga tayanadi. Bu jihat bir tomondan ularni gaz yoki qattiq yoqilg‘iga bog‘liq qilmaydi, ikkinchi tomondan esa elektr tariflari va pik quvvat xarajatiga sezgir qiladi. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushi oshgani sari mikroto‘lqinli quritish “elektrlashtirilgan issiqlik jarayoni” sifatida dekarbonizatsiya uchun qulay platformaga aylanadi. Ayniqsa quyosh radiatsiyasi yuqori hududlarda fotoelektr stansiyalar bilan integratsiya istiqbolli.

Biroq bevosita “quyosh paneli — magnetron” ulanishi doimo optimal emas. Mikroto‘lqin generatori barqaror elektr ta’minotini talab qiladi, quyosh generatsiyasi esa o‘zgaruvchan. Shuning uchun invertor, akkumulyator yoki tarmoq bilan parallel ishlash, shuningdek, quvvatni quyosh generatsiyasiga mos ravishda modulyatsiyalash masalalari energetik optimallashtirishning bir qismidir. Quritish jarayonining impulsli mikroto‘lqin rejimi energiya saqlash tizimi bilan yaxshi moslashishi mumkin.

Ikkinchi yo‘nalish — gibrid termik integratsiya. Dastlabki yuqori namlik bosqichida arzon quyosh issiqlik kollektori yoki issiqlik nasosli konvektiv quritish ishlatilib, namlik diffuziyasi sekinlashgan yakuniy bosqichda MVD qo‘llansa, mikroto‘lqin tizimining ish soati kamayadi. 2026-yilgi kombinatsiyalangan quritish sharhi aynan turli mexanizmlarning sinergiyasidan foydalanish mahsulot sifati va energiya sarfi o‘rtasidagi muvozanatni yaxshilashi mumkinligini ko‘rsatadi [12].

Uchinchi yo‘nalish — vakuum va kondensatsiya issiqligini qayta ishlatish. Bug‘ kondensatsiyasida ajraladigan yashirin issiqlikni kiruvchi havo yoki mahsulotni oldindan isitishga yo‘naltirish mumkin. Agar vakuum nasosi suvli ejektor yoki sovitish konturi bilan ishlasa, ularning issiqlik oqimlarini ham umumiy energetik tizimga kiritish kerak. Natijada quritgich alohida apparat emas, energiya oqimlari integratsiyalangan texnologik kompleks sifatida loyihalanadi.

## 14. O‘ZBEKISTON SHAROITI UCHUN ILMIY-AMALIY ISTIQBOLLAR.


ISSN 3030-3907

O‘zbekiston meva-sabzavot, uzum, qovun, o‘rik, olxo‘ri, pomidor, dorivor o‘simlik va boshqa nam biologik xomashyo turlariga boy. Ularning katta qismi mavsumiy yig‘ib olinadi. Quritish orqali qiymat zanjirini uzaytirish, transport massasini kamaytirish va eksportbop mahsulot olish mumkin. Biroq an’anaviy ochiq quyosh quritish gigiyena, chang, ob-havo va sifat barqarorligi nuqtai nazaridan cheklangan; issiq havo quritish esa vaqt va energiya sarfi yuqoriligi bilan tavsiflanadi.

Mahalliy MVD tadqiqotlarida eng avvalo xomashyoning dielektrik xossalarini o‘lchash muhim. Qovun, o‘rik, uzum, pomidor, piyoz, sabzi va dorivor o‘simliklarning ε′ va ε″ qiymatlari namlik hamda haroratga bog‘liq ravishda aniqlansa, rezonator va quvvatni tanlash ilmiy asosga ega bo‘ladi. Chet el mahsulotlari uchun olingan parametrlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri qo‘llash ishonchli emas.

Ikkinchi yo‘nalish — laboratoriya va pilot prototiplarni bosqichma-bosqich yaratish. Dastlab 1–3 kW sinfdagi aylanuvchi MVD stendi, keyin 5–10 kW pilot qurilma va nihoyat modulli sanoat tizimi taklif etilishi mumkin. Har bir bosqichda SEC, SMER, mahsulot temperaturasi bir xilligi, yakuniy namlik tarqalishi va sifat ko‘rsatkichlari o‘lchanishi zarur. Masshtab oshganda vakuum nasosi va sovitish tizimining nisbiy ulushi qanday o‘zgarishi alohida baholanadi.

Uchinchi yo‘nalish — quyosh fotoelektr energiyasi bilan integratsiyalangan boshqaruv. Buxoro va respublikaning boshqa quyoshli hududlarida kunduzgi quyosh generatsiyasi qishloq xo‘jaligi mahsulotlari yig‘im-terimi davri bilan mos keladi. Quritgich mikroto‘lqin quvvatini PV generatsiya va mahsulot holatiga qarab moslashtirsa, tarmoqdan olinadigan pik quvvat kamayishi mumkin. Buning uchun texnologik optimallashtirishga energetik dispetcherlik masalasi qo‘shiladi.

To‘rtinchi yo‘nalish — mahalliy sharoitda iqtisodiy tahlil. MVDning yuqori kapital xarajati quritish vaqtining qisqarishi, yuqori sifatli mahsulot narxi, ish maydonining kamayishi va yiliga ko‘proq partiya qayta ishlash orqali qoplanishi mumkin. Shuning uchun faqat kWh/kg emas, balki so‘m/kg tayyor mahsulot, qaytarilish muddati, uskunadan foydalanish koeffitsiyenti va sifatdan olinadigan qo‘shimcha daromad ham hisoblanishi kerak.

Beshinchi yo‘nalish — xavfsizlik va standartlash. Mikroto‘lqin nurlanishining sizib chiqishi, yuqori kuchlanish, vakuum kamerasi mustahkamligi, mahsulotning termik shikastlanishi va yong‘in xavfi bo‘yicha blokirovkalar ishlab chiqilishi shart. Mahalliy prototipda eshik blokirovkasi, qaytgan quvvatdan himoya, bosim limitlari, favqulodda ventilyatsiya va mikroto‘lqin oqish monitoringi bazaviy talab bo‘lishi kerak.

## 15. ASOSIY RESEARCH GAP VA ILMIY MUAMMOLAR.


ISSN 3030-3907

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, MVD texnologiyasi laboratoriya darajasida yaxshi o‘rganilgan bo‘lsa-da, yuqori samarali va keng masshtabli qurilmalar uchun bir qator ilmiy bo‘shliqlar saqlanib qolmoqda. Ularni quyidagi guruhlarga ajratish mumkin:

**1.** Dielektrik xossalarning real vaqt modeli. Ko‘p ishlarda ε′ va ε″ tajribadan oldin yoki alohida o‘lchanadi. Quritish davomida ularning namlik va harorat bilan uzluksiz o‘zgarishini onlayn baholash usuli yetarlicha rivojlanmagan.

**2.** Butun tizim energiya balansi. Magnetron iste’moli ko‘p o‘lchanadi, ammo vakuum, kondensatsiya, sovitish va mexanik uzatmalarni qamrab olgan standart SEC metodikasi barcha ishlarda bir xil emas.

**3.** Sanoat masshtabida elektromagnit bir xillik. Laboratoriya kavitasidagi yechimlar yirik hajmga ko‘chirilganda turg‘un to‘lqinlar, ko‘p manbali interferensiya va mahsulot yuklamasi ta’siri keskin murakkablashadi.

**4.** Mahsulot sifati va energiyani birgalikda optimallashtirish. Ko‘p tadqiqotlar maksimal quritish tezligini topadi, biroq biofaol komponent, tekstura va energiya sarfi bitta ko‘p maqsadli modelda kam birlashtiriladi.

**5.** AI uchun ishonchli ma’lumotlar bazasi. Turli mahsulot va qurilmalarda ochiq, standartlashtirilgan vaqt qatori ma’lumotlari yetishmaydi. Bu modellarni boshqa qurilmaga ko‘chirishni cheklaydi.

**6.** Qayta tiklanuvchi energiya integratsiyasi. MVD elektrlashtirilgan jarayon bo‘lsa-da, PV generatsiya, akkumulyator, tarmoq va quritish jadvalini birgalikda optimallashtirgan ishlar kam.

**7.** Mahalliy xomashyo uchun ma’lumotlar. O‘zbekiston meva-sabzavot va dorivor o‘simliklari uchun dielektrik xossa, kinetika, sifat va iqtisodiy ko‘rsatkichlar bo‘yicha tizimli eksperimental baza shakllanmagan.

## 16. YUQORI SAMARALI MVD QURITGICH UCHUN TAVSIYA ETILADIGAN ILMIY KONSEPSIYA.

Adabiyotlar tahlilidan kelib chiqib, yuqori samarali quritgichning maqsadli arxitekturasi quyidagicha bo‘lishi mumkin: modulli vakuum kamera, 2,45 GHz diapazonida bir nechta boshqariladigan mikroto‘lqin manbai, aylanuvchi yoki tebranuvchi mahsulot tutqich, samarali bug‘ kondensatori, o‘zgaruvchan tezlikli vakuum nasosi, qaytgan mikroto‘lqin quvvati datchigi, optik harorat sensori va yuklama massasini uzluksiz o‘lchash tizimi.

Boshqaruv algoritmi quritishni kamida uch bosqichga bo‘lishi kerak. Birinchi bosqichda erkin suv ko‘p bo‘lgani uchun nisbatan yuqori mikroto‘lqin quvvati va mo‘tadil vakuum; ikkinchi bosqichda asosiy namlik chiqarish uchun quvvat–vakuum kombinatsiyasi; uchinchi bosqichda esa past namlik sababli mikroto‘lqin yutilishi pasayganda impulsli yoki kamayuvchi quvvat qo‘llanadi. Bosqichlar vaqt bo‘yicha emas, massa kamayishi, temperaturaning o‘sish tezligi va


ISSN 3030-3907

qaytgan quvvat singari indikatorlar bo‘yicha almashtirilsa, tizim xomashyo variatsiyasiga moslashadi.

Energiya moduli umumiy elektr iste’molini real vaqt yozib borishi kerak. Magnetron, vakuum nasosi, kondensator, sovitish va mexanik yuritma uchun alohida hisoblagich yoki quvvat datchigi qo‘llansa, har bir tugunning SECga hissasi aniqlanadi. Bu ma’lumot energiya tejamkor modernizatsiyani aniq yo‘naltirishga imkon beradi.

Qayta tiklanuvchi energiya moduli PV invertoridan mavjud quvvat haqidagi signalni qabul qilishi mumkin. Mahsulotning xavfsiz texnologik diapazoni ichida mikroto‘lqin quvvati va vakuum rejimi PV generatsiyaga moslashtiriladi. Tarmoq quvvati cheklangan hududlarda bu yondashuv quritgichning o‘rnatilgan quvvat talabini kamaytirishi va saqlash tizimi sig‘imini optimallashtirishga yordam berishi mumkin.

Bunday konsepsiyani ilmiy baholash uchun tajriba dizayni quvvat, absolyut bosim, mahsulot qalinligi, yuklama, aylanish tezligi va impuls koeffitsiyentini omillar sifatida qamrab olishi kerak. Javob funksiyalari esa quritish vaqti, SEC, SMER, temperaturaning notekislik koeffitsiyenti, rang farqi ΔE, rehidratatsiya koeffitsiyenti va tanlangan biofaol modda saqlanishi bo‘lishi mumkin. Response Surface Methodology yoki ko‘p maqsadli optimallashtirish yordamida Pareto-optimal rejimlar aniqlanadi.

**17. XULOSA.**

Mikroto‘lqin–vakuum quritish hajmiy dielektrik qizdirish va past bosimda intensiv bug‘lanish mexanizmlarini birlashtirgani sababli issiqlikka sezgir va yuqori namlikli materiallarni tez quritish uchun istiqbolli texnologiyadir. Adabiyotlarda issiq havo quritishga nisbatan jarayon vaqtining keskin qisqarishi, rang va ayrim biofaol komponentlarning yaxshi saqlanishi hamda muayyan sharoitlarda energiya sarfining kamayishi ko‘rsatilgan [1, 7].

Shu bilan birga, “yuqori samarali” MVD tizimi faqat katta mikroto‘lqin quvvati bilan tavsiflanmaydi. Asosiy mezonlar — elektromagnit maydonning bir xilligi, mahsulot holatiga mos quvvat profili, optimal vakuum, yordamchi energiya iste’molining kamayishi, issiqlikni qayta ishlatish, sifatning saqlanishi va ishonchli avtomatik boshqaruvdir. Pilot tajribalar butun qurilma energiya balansini hisoblash zarurligini ko‘rsatadi [4].

Zamonaviy rivojlanish yo‘nalishlari aylanuvchi va ko‘p manbali rezonatorlar, qattiq jismli boshqariladigan mikroto‘lqin generatorlari, COMSOL asosidagi ko‘p fizikaviy modellashtirish, real vaqt sensorlari, elektron burun va sun’iy intellektga asoslangan adaptiv boshqaruv bilan bog‘liq [8, 9, 11]. Bu vositalar jarayonni vaqt bo‘yicha oldindan belgilangan rejimdan mahsulotning real holatiga moslashuvchi aqlli rejimga o‘tkazadi.


ISSN 3030-3907

O‘zbekiston uchun eng dolzarb ilmiy vazifa — mahalliy qishloq xo‘jaligi xomashyolarining dielektrik va quritish xossalari ma’lumotlar bazasini yaratish, 1–10 kW diapazonida modulli pilot MVD prototipini ishlab chiqish, uning to‘liq energiya balansini aniqlash va quyosh fotoelektr energiyasi bilan integratsiyalashgan boshqaruv algoritmini sinashdan iborat. Bunday tadqiqot natijalari 05.05.06 ixtisosligi doirasida energiya samarador, qayta tiklanuvchi energiyaga mos va mahalliy xomashyo sifatini yuqori darajada saqlaydigan yangi avlod quritish qurilmalarini yaratish uchun ilmiy asos bo‘la oladi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. González-Cavieres L., Pérez-Won M., Tabilo-Munizaga G., Jara-Quijada E., Díaz-Álvarez R., Lemus-Mondaca R. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products. Trends in Food Science & Technology. 2021;116:626–638. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005.

3. An N.-N., Li D., Wang L.-J., Wang Y. Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024;64(9):2618–2633. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947.

4. Zahoor I., Mir T.A., Ayoub W.S., Farooq S., Ganaie T.A. Recent applications of microwave technology as novel drying of food – Review. Food and Humanity. 2023;1:92–103. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.001.

5. Dumpler J., Moraru C.I. Modeling the drying kinetics of microwave vacuum drying of concentrated skim milk: correlation of dielectric properties, drying stages, and specific energy demand at pilot scale. Drying Technology. 2023;41(1):17–33. https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2080220.

6. Zhang D., Huang D., Zhang X., Zhao H., Gong G., Tang X., Li L. Drying performance and energy consumption of Camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying. Food Science and Biotechnology. 2023;32(7):969–977. https://doi.org/10.1007/s10068-022-01239-0.

7. Zang Z., Huang X., He C., Zhang Q., Jiang C., Wan F. Improving Drying Characteristics and Physicochemical Quality of Angelica sinensis by Novel Tray Rotation Microwave Vacuum Drying. Foods. 2023;12(6):1202. https://doi.org/10.3390/foods12061202.

8. Marzuki S.U., Pranoto Y., Khumsap T., Nguyen L.T. Effect of blanching pretreatment and microwave-vacuum drying on drying kinetics and physicochemical properties of purple-fleshed sweet potato. Journal of Food Science and Technology. 2021;58(8):2884–2895. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04789-5.


ISSN 3030-3907

9. Yue Y., Zhang Q., Ma G., Wan F., Zang Z. Quality Evaluation and Heat and Mass Transfer Mechanism of Microwave Vacuum Drying of Astragalus Roots. Foods. 2024;13(19):3075. https://doi.org/10.3390/foods13193075.
10. Joardder M.U.H., Karim M.A. Toward Uniform Microwave Heating in Food Drying: Principles, Technologies, and Emerging Trends. Food Engineering Reviews. 2025;17:946–965. https://doi.org/10.1007/s12393-025-09426-5.
11. An J., Xie H., Yan J., Wei H., Wu Y., Liao X. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. Energy Reports. 2024;12:5482–5506. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037.
12. Liu P., Song F., Zheng Y., Li Z., Song C., Li J., Jin G. Intelligent control of microwave vacuum drying based on online aroma monitoring. Journal of Food Engineering. 2024;380:112148. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112148.
13. Vezi N., Silue Y., Fawole O. Advances in Combined Drying Techniques for Enhancing Dried Fruits' Quality, Drying Efficiency, and Energy Conservation: A Critical Review. Foods. 2026;15(17):3019. https://doi.org/10.3390/foods15173019.
14. Dumpler J., Moraru C.I. Microwave vacuum drying of dairy cream: Processing, reconstitution, and whipping properties of a novel dairy product. Journal of Dairy Science. 2024;107(2):774–789. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23657.
15. Ando Y., Hagiwara S., Nabetani H., Sotome I., Okunishi T., Okadome H., Orikasa T., Tagawa A. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment. LWT. 2019;100:294–299. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.064.
16. Bórquez R., Melo D., Saavedra C. Microwave–vacuum drying of strawberries with automatic temperature control. Food and Bioprocess Technology. 2015;8:266–276. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1400-0.
17. Orikasa T., Koide S., Okamoto S., Imaizumi T., Muramatsu Y., Takeda J., Shiina T., Tagawa A. Applicability of vacuum-microwave drying for tomato fruit based on evaluations of energy cost, color, functional components, and sensory qualities. Journal of Food Processing and Preservation. 2018;42:e13625. https://doi.org/10.1111/jfpp.13625.
18. Mousa N., Farid M. Microwave vacuum drying of banana slices. Drying Technology. 2002;20(10):2055–2066. https://doi.org/10.1081/DRT-120015584.
19. Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T. Microwave food processing—a review. Food Research International. 2013;52(1):243–261. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033.
20. Ramachandran R.P., Nadimi M., Cenkowski S., Paliwal J. Advancement and Innovations in Drying of Biopharmaceuticals, Nutraceuticals, and Functional

Foods. Food Engineering Reviews. 2024;16:540–566. https://doi.org/10.1007/s12393-024-09381-7.
21. González-Cavieres L. et al. (reviewed sources on static, rotary, continuous-flow and patented VMD equipment). Trends in Food Science & Technology. 2021;116:626–638. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005.