

**YUQORI SAMARALI MIKROTO‘LQIN–VAKUUM QURITGICHLARDA
ENERGIYA TEJAMKOR QURITISH JARAYONINI TASHKIL ETISH**

Baxshullayeva Mubashira Bahodir qizi

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

Annotatsiya. *Tezisdan mikroto‘lqin–vakuum quritish texnologiyasining yuqori samaradorligini ta’minlovchi fizik va energetik omillar tahlil qilingan. Mikroto‘lqin energiyasining hajmiy yutilishi, vakuum sharoitida suvning qaynash haroratining pasayishi, namlikning ichki qatlamlardan sirtga ko‘chishi hamda quritish davomiyligining qisqarishi yoritilgan. Zamonaviy tadqiqotlar asosida mikroto‘lqin quvvati, vakuum darajasi, mahsulot yuklamasi va impulsli boshqaruv rejimlarining energiya sarfi hamda yakuniy mahsulot sifatiga ta’siri ko‘rib chiqilgan. Quritgich samaradorligini oshirish uchun real vaqt monitoringi, quvvatni bosqichma-bosqich boshqarish va issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirishga asoslangan yondashuv taklif etiladi.*

Kalit so‘zlar: *mikroto‘lqin, vakuum, quritish, energiya samaradorligi, maxsus energiya sarfi, issiqlik-massa almashinuvi, quritish kinetikasi, impulsli rejim.*

Abstract. *The thesis analyzes the physical and energy-related factors that determine the high efficiency of microwave-vacuum drying. Volumetric absorption of microwave energy, reduction of the boiling temperature of water under vacuum, internal moisture transfer, and shortening of drying time are discussed. Based on recent studies, the effects of microwave power, vacuum level, product load, and pulsed control modes on energy consumption and final product quality are considered. An approach based on real-time monitoring, staged power control, and reduction of heat losses is proposed to improve dryer efficiency.*

Keywords: *microwave, vacuum, drying, energy efficiency, specific energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics, pulsed mode.*

KIRISH

Quritish oziq-ovqat, qishloq xo‘jaligi, farmatsevtika va biologik xomashyoni uzoq muddat saqlashda keng qo‘llaniladigan energiya talabchan jarayonlardan biridir. An’anaviy konvektiv quritish qurilmalari konstruktiv jihatdan sodda bo‘lsa-da, issiqlikning tashqi sirtidan ichkariga uzatilishi sababli jarayon uzoq davom etadi va issiqlik yo‘qotishlari ortadi. Issiqlikka sezgir mahsulotlarda esa yuqori harorat rang, ta’min, vitaminlar va biologik faol birikmalar degradatsiyasini kuchaytirishi mumkin. Shu sababli quritish vaqtini kamaytiradigan, past haroratda ishlaydigan va energiyani bevosita mahsulot hajmida hosil qiladigan usullarga ehtiyoj ortib bormoqda.

Mikroto‘lqin–vakuum quritish (MVD) ana shunday kombinatsion texnologiyalardan biri hisoblanadi. Mikroto‘lqin elektromagnit maydoni mahsulot tarkibidagi qutbli

molekulalar, ayniqsa suv bilan o‘zaro ta’sirlashib, issiqlikning hajm bo‘ylab hosil bo‘lishini ta’minlaydi. Vakuum muhitida esa bosimning kamayishi suvning qaynash haroratini pasaytiradi. Natijada ichki namlik intensiv bug‘lanadi va hosil bo‘lgan bug‘ bosimi namlikni mahsulot ichidan tashqi sirt tomon harakatlantiradi. 2021-yildagi keng qamrovli sharhda VMD tizimlari statik, aylanuvchi, uzluksiz va maxsus konstruksiyalarga ajratilib, energiya samaradorligi qurilma konfiguratsiyasi hamda mahsulotning dielektrik xususiyatlariga kuchli bog‘liq ekani ko‘rsatilgan [1].

Mikroto‘lqin–vakuum quritishning energetik mexanizmi

Mikroto‘lqinli qizdirishda energiya avvalo namligi yuqori bo‘lgan zonalarda yutiladi. Bu holat quritishning dastlabki bosqichida yuqori namlik chiqarish tezligini hosil qiladi. Vakuum kameradagi past bosim bug‘lanish uchun zarur bo‘lgan harorat darajasini kamaytirgani sababli termik shikastlanish xavfi pasayadi. Biroq jarayonning so‘nggi bosqichida mahsulot namligi kamaygani sari mikroto‘lqin energiyasining yutilishi o‘zgaradi. Agar quvvat bir xil yuqori qiymatda saqlansa, lokal ortiqcha qizish va “hot spot” zonolari vujudga kelishi mumkin. Shu sababli zamonaviy yuqori samarali quritgichlar quvvatni namlik miqdoriga mos ravishda bosqichli yoki impulsli boshqarishga ehtiyoj sezadi.

Energetik baholashda quritgichning faqat umumiy elektr quvvatini emas, balki chiqarilgan namlik massasiga to‘g‘ri keladigan maxsus energiya sarfini ham hisobga olish maqsadga muvofiq. U shartli ravishda quyidagicha ifodalanadi:

$$SEC = E / m_{suv}$$

bu yerda SEC – maxsus energiya sarfi, E – quritish sikli davomida sarflangan elektr energiyasi, m_{suv} – mahsulotdan chiqarilgan suv massasi. Mazkur ko‘rsatkichni kamaytirish uchun magnetron ishlash vaqtini optimallashtirish, vakuum nasosining ortiqcha ishlashini cheklash, kameraning issiqlik izolyatsiyasini yaxshilash va kondensatsiya tizimidagi bosim yo‘qotishlarini kamaytirish zarur.

Zamonaviy tajriba natijalari va ularning tahlili

So‘nggi tadqiqotlar MVD jarayonining quritish tezligi va mahsulot sifatiga ijobiy ta’sirini tasdiqlaydi. Belonio va hammualliflar papayya barglarini 100–300 W mikroto‘lqin quvvati hamda 60,0–86,7 kPa vakuum darajalarida quritib, mikroto‘lqin–vakuum rejimida maksimal quritish tezligi va samarali namlik diffuziyasi issiq havo quritishiga qaraganda sezilarli yuqori bo‘lishini aniqlagan [2]. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, vakuum darajasi va mikroto‘lqin quvvatini birgalikda optimallashtirish nafaqat jarayon tezligini, balki biologik faol komponentlarning saqlanishini ham yaxshilashi mumkin.

Shukla, Padilla-Zakour va Chen uzum siqindisini 8 kPa vakuum ostida 540, 1080 va 2160 W quvvatlarda quritib, mikroto‘lqin quvvati oshishi bilan quritish tezligi va samarali namlik diffuziyasi ortishini ko‘rsatgan [3]. Bunday tendensiya quritish vaqtini kamaytiradi, ammo yuqori quvvat rejimlari mahsulotning qizish tezligini ham oshirishi sababli temperatura va namlik bo‘yicha teskari aloqa zarur bo‘ladi.

2025-yilda Wang va hammualliflar Pinelliae Rhizoma xomashyosi uchun quritish kinetikasi, matematik modellar va sun’iy neyron tarmoqlarni birlashtirgan optimallashtirish yondashuvini qo‘llagan. Tadqiqotda MVD quritish vaqtini sezilarli qisqartirgani va ANN

modellari jarayon ko'rsatkichlarini bashoratlashda foydali ekani ko'rsatilgan [4]. Bu natija yuqori samarali quritgichlarda faqat apparat konstruksiyasini emas, balki algoritmik boshqaruvni ham rivojlantirish zarurligini ko'rsatadi.

2026-yilda Keçeli va hammualliflar Washington Navel apelsin bo'laklarida vakuum-mikroto'lqin quritishni issiq havo quritishiga muqobil sifatida baholab, optimallashtirilgan rejimlar quritish kinetikasi va sifat ko'rsatkichlariga sezilarli ta'sir qilishini qayd etgan [5]. Makovic va hammualliflarning lavlagi chipslari bo'yicha tadqiqotida esa 8 kPa vakuum va 900–1800 W diapazondagi quvvatlarda 21–27 minutlik quritish vaqtlariga erishilgan hamda mikroto'lqin quvvati ortishi bilan o'rtacha quritish tezligi oshgani ko'rsatilgan [6]. Bu ma'lumotlar yuqori quvvatning samarali ekanini, biroq optimal rejim mahsulot geometriyasi va boshlang'ich namlikka mos ravishda tanlanishi kerakligini tasdiqlaydi.

Yuqori samarali quritgich uchun taklif etiladigan boshqaruv tamoyillari

Mikroto'lqin–vakuum quritgichning yuqori energetik samaradorligi birgina magnetron quvvatini oshirish bilan ta'minlanmaydi. Qurilma “energiya manbai – vakuum tizimi – mahsulot – kondensator – boshqaruv tizimi” yagona kompleks sifatida ko'rilishi kerak. Amaliy nuqtai nazardan quyidagi yondashuvlar maqsadga muvofiq: quritishning boshlang'ich bosqichida yuqoriroq quvvatdan foydalanish, kritik namlik darajasiga yaqinlashganda quvvatni pasaytirish; kamera bosimini barqaror saqlash; mahsulot qatlamini aylantirish yoki aralashtirish orqali elektromagnit maydon notekisligini kamaytirish; bug' oqimini kondensatorga tez chiqarish; massa yo'qotilishi, bosim va haroratni real vaqt rejimida kuzatish.

Impulsli mikroto'lqin rejimi ayniqsa istiqbolli hisoblanadi. “Quvvat berish – tanaffus” sikllari davomida ichki harorat va namlikning qayta taqsimlanishi sodir bo'ladi. Natijada energiyaning lokal ortiqcha yutilishi kamayishi va mahsulotda bir tekisroq qurish sharoiti hosil bo'lishi mumkin. Bunda optimal impuls davomiyligi va tanaffus vaqti mahsulotning dielektrik xususiyatlari, geometrik o'lchami va vakuum darajasi bilan uyg'unlashtirilishi lozim.

Asosiy optimallashtirish parametrlarining o'zaro bog'liqligi

Parametr	Oshirilganda kutiladigan ta'sir	Asosiy xavf	Boshqaruv chorasi
Mikroto'lqin quvvati	Quritish tezligi ortadi	Lokal qizish, sifat yo'qotilishi	Bosqichli yoki impulsli quvvat
Vakuum darajasi	Qaynash harorati pasayadi, massa almashinuvi tezlashadi	Nasos energiya sarfi ortadi	Optimal bosim diapazonini tanlash
Mahsulot yuklamasi	Qurilma unumdorligi ortadi	Maydon notekisligi va qurish farqi	Qatlam qalinligini me'yorlash

Quritish vaqti	Namlik kamayadi	Ortiqcha quritish	Namlik/masa bo'yicha avtomatik to'xtatish
----------------	-----------------	-------------------	---

Ilmiy-amaliy ahamiyati

Tahlil natijalari 05.05.06 – qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari ixtisosligi doirasida mikroto‘lqin–vakuum quritgichlarni energiya qurilmasi sifatida kompleks baholash zarurligini ko‘rsatadi. Kelgusida bunday tizimlarni quyosh fotoelektr stansiyasi yoki boshqa qayta tiklanuvchi elektr manbalari bilan integratsiyalash ayniqsa qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini yetishtirish hududlarida istiqbolli yo‘nalish bo‘lishi mumkin. Bunda quritish siklining quvvat talabi, akkumulyator yuklanishi, vakuum nasosi va magnetronning ish grafigi energetik boshqaruv tizimi orqali muvofiqlashtirilishi kerak.

Mahalliy xomashyo, jumladan meva-sabzavotlar uchun universal bitta rejim mavjud emas. Optimal quvvat zichligi, bosim, mahsulot qatlami va quritish davomiyligi tajriba asosida aniqlanishi lozim. Shu bois quritgichni yaratishda modulli konstruksiya, parametrlarni keng diapazonda boshqarish va energiya sarfini alohida o‘lchash imkoniyatlari ilmiy tajribalar uchun muhim hisoblanadi.

Xulosa

Mikroto‘lqin–vakuum quritish yuqori tezlikdagi hajmiy qizdirish va past bosimdagi intensiv namlik chiqarishni birlashtiradigan samarali texnologiyadir. Adabiyotlar tahlili jarayon samaradorligi mikroto‘lqin quvvati va vakuum darajasining oddiy oshirilishiga emas, ularning mahsulot xususiyatlariga mos boshqarilishiga bog‘liq ekanini ko‘rsatadi. Yuqori samarali quritgich uchun quvvatni bosqichli yoki impulsli boshqarish, kamera bosimini barqarorlashtirish, elektromagnit maydon bir tekisligini oshirish, kondensatsiya tizimini takomillashtirish va SEC ko‘rsatkichini real vaqt rejimida nazorat qilish maqsadga muvofiq. Bunday yondashuv quritish vaqtini qisqartirish, mahsulot sifatini saqlash va elektr energiyasi sarfini kamaytirishga xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products. Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 116. P. 626–638. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.005.
2. Belonio L.S.H., Varith J., Jaturonglumlert S., Narkprasom K., Narkprasom N., Arkanit K., Sujinda N. Performance of microwave-vacuum drying on flavonoids and saponins availability in Carica papaya leaves. Results in Engineering. 2025. Vol. 26. 104909. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104909.
3. Shukla V., Padilla-Zakour O.I., Chen C. Microwave vacuum drying of Concord grape (Vitis labrusca) pomace: drying kinetics and quality attributes for enhanced valorization. Sustainable Food Technology. 2025. Vol. 3. P. 1793–1804. DOI: 10.1039/D5FB00189G.
4. Wang P., Yang X., Huang X., et al. Modeling and Optimization of Microwave Vacuum Drying for Pinelliae Rhizoma: Integrating Drying Kinetics, Artificial Neural

Networks, and Quality Preservation. Food Science & Nutrition. 2025. Vol. 13, No. 8. e70672. DOI: 10.1002/fsn3.70672.

5. Keçeli N., Parıldı E., İpek S.L., Kola O. Vacuum Microwave Drying as an Efficient Alternative to Hot Air Drying: Optimization, Drying Kinetics, and Quality Retention of Washington Navel Orange Slices. Applied Sciences. 2026. Vol. 16, No. 7. 3530. DOI: 10.3390/app16073530.

6. Makovic D., Shukla V., Leitao S.B., Yu J., Padilla-Zakour O.I., Chen C. Microwave vacuum drying for crispy beet snacks: Process development, drying kinetics, and product qualities. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2026. Vol. 108. 104402. DOI: 10.1016/j.ifset.2025.104402.

7. Wang X., Shi K., Cao X., Guo J., Yi H., Chen Y., Pan S. Effects of different drying methods on the drying kinetics and quality characteristics of Orah (*Citrus reticulata*) slices. Food Science and Biotechnology. 2025. Vol. 34, No. 9. P. 1897–1906. DOI: 10.1007/s10068-024-01811-w.

Global
Science
Publication