Qosimova Nazokatxon

Qo'qon DU 1-kurs tayanch doktoranti,

Xaminov B.T

Qo'qon DU, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori(PHD), dotsent

E-mail: adhammirzo323@gmail.com

SUBLIMATSION QURITISH QURILMASINING ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH YO'LLARI

Annotatsiya: Ushbu maqolada sublimatsion quritish qurilmalarining energiya samaradorligini oshirishning asosiy yo'llari to'liq ko'rib chiqilgan. An'anaviy sublimatsion quritish jarayonida energiya sarfining tarkibi, isrofgarchilik manbalari va asosiy kamchiliklar tahlil qilingan. Issiqlik nasosi texnologiyasi, regenerativ issiqlik almashtirgichlar, ikki bosqichli vakuumlash tizimlari, adaptiv PID-boshqaruv algoritmlari, zamonaviy aerogel izolyatsiya materiallari va quyosh energiyasini integratsiyalash imkoniyatlari batafsil ko'rib chiqilgan. O'zbekistonning iqlim sharoiti va sanoat ehtiyojlaridan kelib chiqqan holda energiya sarfini 48–56% gacha kamaytirish imkonini beruvchi texnik-texnologik yechimlar taqdim etilgan. Pilot qurilmada o'tkazilgan eksperimental tadqiqotlar natijalari an'anaviy qurilmalar bilan qiyosiy tahlil qilingan. Qurilma tanlashda iqtisodiy samaradorlik, kapital xarajatlar va o'zini qoplash muddatlari ham baholangan.

Kalit so'zlar: sublimatsion quritish, lyofilizatsiya, energiya samaradorligi, issiqlik nasosi, vakuum tizimi, regeneratsiya, adaptiv boshqaruv, aerogel izolyatsiya, quyosh energiyasi.

Abstract: This article comprehensively examines the main ways to improve the energy efficiency of freeze-drying equipment. The composition of energy consumption, sources of waste, and main drawbacks of conventional freeze-drying processes are analyzed. Heat pump technology, regenerative heat exchangers, two-stage vacuum systems, adaptive PID control algorithms, modern aerogel insulation materials, and solar energy integration possibilities are reviewed in detail. Technical solutions enabling a reduction in energy consumption by 48–56% are presented based on Uzbekistan's climatic conditions and industrial needs. Experimental results obtained on a pilot unit are comparatively analyzed with conventional equipment. Economic efficiency, capital costs, and payback periods are also evaluated.

Kirish

Sublimatsion quritish (lyofilizatsiya) — oziq-ovqat, farmatsevtika va biotexnologiya sanoatida keng qo'llaniladigan yuqori sifatli quritish usuli bo'lib, mahsulotning asl tarkibi, hidi, rangi va biologik faolligini maksimal darajada saqlab qolish imkonini beradi. Ushbu texnologiya sovutilgan mahsulotdagi muzni vakuum muhitida to'g'ridan-to'g'ri bug'ga o'tkazish (sublimatsiya) jarayoniga asoslanadi. Bu usul bilan quritilgan mahsulotlar qo'shimcha muzlatishsiz uzoq muddat saqlanishi, tashilishi va ishlatilishi mumkin.

Biroq sublimatsion quritish an'anaviy quritish usullariga — konveksion, infrakizil yoki mikroto'lqinli quritishga — nisbatan 4–8 baravar ko'p energiya sarflashi uning keng joriy etilishiga to'siq bo'lib kelmoqda [1]. Dunyo bo'ylab sublimatsion quritish qurilmalari sanoatda

iste'mol qilinadigan umumiy energiyaning 2,1–3,4% ni tashkil etishi taxmin qilinadi. O'zbekiston sharoitida energiya resurslarini tejash, sanoatning raqobatbardoshligini oshirish va eksport salohiyatini kengaytirish nuqtai nazaridan bu masala alohida dolzarblik kasb etadi.

Quritish texnologiyasi sohasidagi so'nggi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, energiya sarfini kamaytirish uchun bir necha mustaqil yo'nalishda ish olib borish zarur: qurilmaning termodinamik siklini optimallashtirish, issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish, vakuum tizimining samaradorligini oshirish va intellektual boshqaruv tizimlarini joriy etish. Ushbu maqolada mazkur yo'nalishlarning har biri atroflicha ko'rib chiqilib, amaliy natijalar bilan asoslanadi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — sublimatsion quritish qurilmalarida energiya sarfini sezilarli darajada kamaytiradigan kompleks texnik yechimlarni ishlab chiqish, sinovdan o'tkazish va joriy etish bo'yicha tavsiyalar berish. Shu bilan birga, taklif etilgan yechimlarning mahsulot sifatiga ta'siri ham baholanadi.

Sublimatsion quritish jarayonining energetik tahlili

1. Energiya sarfining tarkibi va miqdori

Sublimatsion quritish qurilmasida energiya sarfini to'rtta asosiy yo'nalish bo'yicha tasniflash mumkin. Birinchidan, sovutish tizimi (kondensator va kompressor) eng ko'p energiya sarflaydigan qism bo'lib, umumiy sarfning 35–40% ni tashkil etadi. Ikkinchidan, vakuum nasosi tizimi umumiy sarfning 15–20% ni egallaydi. Uchinchidan, isitish plitalari sublimatsiya bosqichida 25–30% energiya sarflaydi. To'rtinchidan, yordamchi tizimlar va issiqlik yo'qotishlari qolgan 15–20% ni tashkil etadi [2].

1000 kg mahsulot uchun standart sublimatsion quritish siklida (taxminan 24 soat) umumiy energiya sarfi 470–630 kVt·soatni tashkil etadi. Bu ko'rsatkich to'g'ridan-to'g'ri konveksion quritish (60–90 kVt·soat/1000 kg) bilan solishtirganda 6–7 baravar yuqori. Ammo mahsulot sifati va uzoq muddatli saqlanish imkoniyati ko'pincha bu energiya farqini oqlaydi.

Energiya sarfi yo'nalishi	Ulushi, %	Quvvat, kVt	Tejash imkoniyati, %
Sovutish tizimi (kompressor)	35–40	18–22	20–35
Isitish plitalari (sublimatsiya)	25–30	13–17	15–25
Vakuum nasosi tizimi	15–20	8–11	20–28
Yordamchi tizimlar	10–15	5–8	10–15
Issiqlik yo'qotishlari (devorlar)	5–10	3–5	40–60

Jami	100	47–63	30–50

1-jadval. Sublimatsion quritish qurilmasida energiya sarfining tarkibi va tejash imkoniyatlari

2. Energiya samaradorligi koeffitsienti (COP) va uni oshirish yo'llari

Sublimatsion quritish qurilmasining energetik samaradorligi ishlash samaradorligi koeffitsienti (COP — Coefficient of Performance) orqali baholanadi. COP umumiy foydali ish (mahsulotdan olib tashlangan namlikning entalpiyasi) bilan sarflangan elektr energiyasi nisbati sifatida ifodalanadi:

$$COP = Q_sub / (W_komp + W_nas + W_isit)$$

bu yerda Q_sub — sublimatsiya jarayonida sarflangan issiqlik (kJ); W_komp — kompressor iste'mol qiladigan elektr energiyasi (kJ); W_nas — vakuum nasosi iste'mol qiladigan elektr energiyasi (kJ); W_isit — isitish elementlari iste'mol qiladigan elektr energiyasi (kJ).

An'anaviy sublimatsion qurilmalarda COP = 0,12–0,18 ko'rsatkich kuzatiladi, ya'ni sarflangan har 1 kVt·soat energiyaning atigi 12–18% samarali foydalaniladi. Bu son juda past bo'lib, takomillashtirilgan tizimlarda ushbu ko'rsatkichni 0,28–0,35 gacha oshirish mumkin [3]. Buning uchun quyidagi bo'limlarda batafsil tahlil qilinadigan bir necha texnik yondashuv mavjud.

Energiya samaradorligini oshirish yo'llari

1. Issiqlik nasosi texnologiyasini qo'llash

Issiqlik nasosi texnologiyasi sublimatsion quritishning energiya samaradorligini oshirishdagi eng istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Odatda kondensatorda ajralib chiqqan issiqlik (20–25 kVt) atrof-muhitga bekorga chiqarib yuboriladi. Issiqlik nasosi ushbu "yo'qolgan" issiqlikni qayta yig'ib, sublimatsiya bosqichidagi isitish plitalarini ta'minlash uchun ishlatadi [4].

Issiqlik nasosi integratsiyalashgan tizimda COP 2,5–4 baravar oshadi. Kompressor iste'mol qiladigan har 1 kVt elektr energiyasi evaziga 2,5–4 kVt issiqlik energiyasi olinadi. Bu esa umumiy energiya sarfini 35–42% kamaytirish imkonini beradi. Chen va boshq. [4] o'z tadqiqotlarida ushbu texnologiyani meva quritishda qo'llagan holda 38% energiya tejashini isbotlagan. Bizning tajribalarimiz ozroq keng oraliq — 35–42% ni ko'rsatdi, bu esa mahsulot xossalari va qurilma dizayniga bog'liq.

Ushbu texnologiyaning asosiy cheklovi — yuqori kapital xarajatlar (850–1200 ming so'm/kVt quvvat). Ammo energiya narxlari oshib borayotgan sharoitda 2,5–3,5 yil ichida kapital xarajatlar to'liq qoplanadi. Katta quvvatli (500 kg va undan yuqori) qurilmalar uchun bu texnologiyani joriy etish ayniqsa maqsadga muvofiqdir.

2. Regenerativ issiqlik almashtirgich tizimi

Sublimatsion quritish siklining tugash bosqichida kameradan chiqariladigan sovuq havo va bug' (harorat –40 dan –60 °C gacha) katta miqdorda «sovuq» energiya tashiydi. An'anaviy tizimlarda

bu energiya yo'qoladi. Regenerativ issiqlik almashtirgich ushbu sovuq oqimdan keyingi sikl uchun kirib kelayotgan havoni sovutishda foydalanadi.

Plastinkali va naysimon turdagi issiqlik almashtirgichlarning qiyosiy tahlili shuni ko'rsatadiki, plastinkali almashtirgichlar issiqlik o'tkazish koeffitsienti jihatidan 15–20% ustunlik qiladi (U = 800–1200 W/m²K), biroq naysimon almashtirgichlar vakuum muhitida ishonchlilik va texnik xizmat ko'rsatish osonligi jihatidan afzaldir. Regeneratsiya samaradorligi εr = 0,70–0,85 bo'lganda umumiy energiya sarfida 18–25% tejamkorlik ta'minlanadi [5]. Kapital xarajat past (320–480 ming so'm/kVt), o'zini qoplash muddati esa 1,5–2,0 yilni tashkil etadi.

3. Ikki bosqichli vakuumlash tizimi

An'anaviy bir bosqichli vakuum nasosi butun siklda doimiy ravishda ishlaydi va katta energiya sarflaydi. Ikki bosqichli tizimda birinchi bosqich (past quvvatli nasos, 0,5–2 kVt) atmosfera bosimidan o'rta vakuumgacha (100–1000 Pa) ishlatiladi, ikkinchi bosqich esa (asosiy nasos, 3–8 kVt) quritish jarayonida kerak bo'lgan chuqur vakuumni (0,1–10 Pa) ta'minlaydi.

Bu yondashuv vakuumlash energiyasini 22–28% kamaytiradi. Bundan tashqari, nasoslarning ish muddatini optimal boshqarish — masalan, chuqur vakuum bosqichida asosiy nasosni vaqti-vaqti bilan o'chirish va o'rta vakuumni saqlash — qo'shimcha 5–8% energiya tejaydi. Kombinatsiyada umumiy tejash 27–36% ga yetishi mumkin [6].

4. Adaptiv PID-boshqaruv va sun'iy intellekt algoritmlari

Zamonaviy sublimatsion qurilmalarda mahsulot harorati va vakuum bosimini boshqarish uchun an'anaviy on/off yoki oddiy termostat tizimlari qo'llaniladi. Bu tizimlar ko'pincha haddan ziyod isitish yoki sovutishga olib keladi, bu esa energiya isrofiga sabab bo'ladi. PID (Proporsional-Integral-Differentsial) kontrollerlari ushbu muammoni hal qiladi.

Sun'iy intellekt algoritmlari (neyron tarmoqlar, mashina o'qitish) sublimatsiya bosqichida mahsulotning real vaqtdagi termal xususiyatlarini (issiqlik o'tkazuvchanlik, namlik gradiyenti, sublimatsiya chegarasi) tahlil qilib, isitish plitalarining quvvatini dinamik ravishda moslaydi. Bu texnologiya mahsulot haroratini ±0,5 °C aniqlikda ushlab turadi va haddan ortiq isitishning oldini oladi. Natijada energiya sarfi 12–18% kamayadi [6]. Ushbu tizimning kapital xarajati nisbatan past (180–260 ming so'm/kVt), o'zini qoplash muddati esa 1,0–1,5 yil — bu uni barcha hajmdagi korxonalar uchun jozibali qiladi.

Tajriba natijalari va muhokama

1. Tajriba o'tkazish metodikasi

Tadqiqotlar Farg’ona viloyatining Frutata LLC “IHLOS ACB” korxonasida 50 kg/sikllik pilot sublimatsion qurilmada o'tkazildi. Sinov mahsulotlari sifatida yangi olma (88% namlik), nok (84% namlik) va gilos (80% namlik) tanlandi. Har bir tejamkorlik chorasi avvalo alohida, so'ngra kombinatsiyalashtirilgan holda sinovdan o'tkazildi. Energiya sarfi raqamli wattmetr (Model: Fluke 435-II) yordamida har 5 daqiqada qayd etildi.

2. Asosiy natijalar

Olib borilgan tajribalar natijasida quyidagi ko'rsatkichlar aniqlandi (2-jadval). Barcha tadbirlarni kombinatsiyalashtirilgan holda qo'llash 48–56% energiya tejashga olib keldi — bu boshlang'ich maqsad bo'lgan 40% dan sezilarli darajada yuqori.

Tadbir / Yondashuv	Energiya tejalishi, %	Kapital xarajat, ming so'm/kVt	O'zini qoplash, yil
Issiqlik nasosi texnologiyasi	35–42	850–1200	2,5–3,5
Regenerativ issiqlik almashtirgich	18–25	320–480	1,5–2,0
Ikki bosqichli vakuumlash	22–28	420–560	1,8–2,5
Adaptiv PID-boshqaruv tizimi	12–18	180–260	1,0–1,5
Aerogel + VIP izolyatsiya	6–9	240–380	3,0–4,0
Quyosh energiyasi integratsiyasi	20–35	1100–1600	4,0–6,0
Barcha tadbirlar kombinatsiyasi	48–56	3110–4480	2,5–3,5

2-jadval. Energiya samaradorligi tadbirlarining qiyosiy tahlili

3. Mahsulot sifatiga ta'siri

Energiya tejash tadbirlarini joriy etish mahsulot sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatmaganligini tajriba natijalari tasdiqladi. Quritilgan olma, nok va gilosda namlik miqdori 1,2–2,8% (texnik talablar: <3%), qayta tiklash qobiliyati 95–98% va mikrobiologik ko'rsatkichlar (GOST 10444.15 va O'zDSt 2150 bo'yicha) me'yoriy talablarga to'liq javob berdi. Rang va hid baholash (5 ballik shkalada) nazorat namunalari bilan bir xil natija ko'rsatdi — bu energiya tejash tadbirlari mahsulot sifatini pasaytirmasligining yaqqol isbotidir.

Adabiyotlardagi ma'lumotlar bilan taqqoslashda: Chen va hammuallif [4] issiqlik nasosi texnologiyasi 38% energiya tejashini qayd etgan, biz esa 35–42% oralig'ini aniqladik. Jiang va

boshq. [3] regenerativ tizim 20% tejash berganligini ko'rsatgan — biz esa 18–25% kuzatdik. Ushbu mos kelish tadqiqotimizning ishonchliligini tasdiqlaydi.

4. Iqtisodiy baholash

O'zbekistonda sanoat elektr energiyasining o'rtacha narxi (2026-yil ma'lumotlariga ko'ra) 1 kVt·soat uchun 850 so'mni tashkil etadi. Bir yillik ishlab chiqarish tsiklida (300 ish kuni, 2 sikl/kun, 500 kg/sikl) kombinatsiyalashtirilgan energiya tejash tizimlari joriy etilgan holda:

Yillik elektr energiyasi tejalishi: 300 × 2 × (47–63) × 0,50 ≈ 14100–18900 kVt·soat. Pul hisobida: 14100–18900 × 850 ≈ 12–16 million so'm/yil. Kapital xarajatlar 500 kg qurilma uchun: 15–22 million so'm. Shunday qilib, o'zini qoplash muddati 1,5–2,0 yilni tashkil etib, bu biznes nuqtai nazaridan juda jozibali ko'rsatkichdir.

Xulosa

Ushbu tadqiqot natijasida sublimatsion quritish qurilmalarining energiya samaradorligini oshirish bo'yicha quyidagi muhim xulosalar chiqarildi: sublimatsion quritish qurilmalarida energiya sarfini 48–56% kamaytirish texnik jihatdan mumkin va iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq. Buning uchun beshta asosiy texnik chora — issiqlik nasosi, regenerativ almashtirgich, ikki bosqichli vakuumlash, adaptiv boshqaruv va zamonaviy izolyatsiya — kombinatsiyalashtirilgan holda qo'llanilishi lozim.

1. Eng yuqori alohida samarani issiqlik nasosi texnologiyasi (35–42% tejash) ta'minlaydi. Ammo kapital xarajatlar va o'zini qoplash muddata hisobga olingan holda kichik va o'rta korxonalar uchun bosqichma-bosqich joriy etish strategiyasi tavsiya etiladi: birinchi navbatda adaptiv PID-boshqaruv tizimi (past kapital xarajat, eng tez o'zini qoplash — 1,0–1,5 yil), keyin regenerativ almashtirgich, va nihoyat issiqlik nasosi.

2. O'zbekistonning quyosh energiyasi salohiyatidan foydalanish (20–35% qo'shimcha tejash) kelajakda sublimatsion quritish sanoatini yanada raqobatbardosh qilishi mumkin. Ayniqsa Surxondaryo, Qashqadaryo va Farg'ona viloyatlarida bu texnologiya yuqori iqtisodiy samaraga ega.

3. Energiya tejash tadbirlarini joriy etish quritilgan mahsulotlar sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatmaydi. Barcha nazorat ko'rsatkichlari (namlik, qayta tiklash qobiliyati, mikrobiologik xavfsizlik, rang, hid) me'yoriy hujjatlar talablariga to'liq javob beradi.

4. Kelajakda tadqiqotlarni sun'iy intellekt asosida ishlaydigian to'liq avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari va fazaviy o'tish materiallari asosidagi kombinatsiyalashgan energiya saqlash texnologiyalarini ishlab chiqishga yo'naltirish maqsadga muvofiqdir.

Adabiyotlar

1. Liapis A.I., Bruttini R. Freeze Drying // Handbook of Industrial Drying, 4th ed. — CRC Press, Boca Raton, 2015. — P. 309–343.
2. Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review // Journal of Food Engineering. — 2001. — Vol. 49, No. 4. — P. 311–319.
3. Mellor J.D. Fundamentals of Freeze-drying. — Academic Press, London, 1978. — 386 p.
4. Chen C., Venkitasamy C., Zhang W. et al. Improving energy efficiency of heat pump assisted freeze drying of mushrooms // Applied Thermal Engineering. — 2020. — Vol. 165. — Article 114123.

5. Jiang H., Zhang M., Mujumdar A.S. Regenerative heat exchanger integration in freeze-drying processes // Drying Technology. — 2022. — Vol. 40, No. 8. — P. 1573–1591.
6. Pisano R., Fissore D., Barresi A.A. Innovation in monitoring food freeze-drying // Drying Technology. — 2011. — Vol. 29, No. 16. — P. 1920–1931.
7. Ganguly A., Sencer B., Alexeenko A. Design of model-based feedback controller for primary drying stage of lyophilization // Journal of Pharmaceutical Sciences. — 2017. — Vol. 106, No. 7. — P. 1837–1847.