Article

Kombinatsiyalangan don quritgichidagi elektrokontakt qizdirish tizimining elektr-issiqlik parametrlarini tadqiq etish (sholi doni misolida)

N.A. Sapayev [1]*, B.Z. Baltabayev [1], O.Q. Matchonov [1]

[1] Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari” Milliy tadqiqot universiteti, Energetika fakulteti, Elektrotexnologiya va elektr uskunalar ekspluatatsiyasi kafedrasi, Toshkent, 100000, O‘zbekiston
n_sapayev@tiiame.uz (N.S.), b_baltabayev@tiiame.uz (B.B.), o.matchonov@tiiame.uz (O.M.)

* Correspondence: n_sapayev@tiiame.uz; Tel.: ++998 97 3585999 (N.S.)

Annotatsiya: Tadqiqotning maqsadi kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimining elektr-issiqlik parametrlarini sholi doni misolida aniqlash hamda qizdirish yuzasi haroratini sikllі boshqarish xususiyatlarini baholashdan iborat. Materiallar va usullar. Tajribalar “Alanga” sholi navida, qizdirish yuzasining 70, 80 va 90 °C belgilangan harorat rejimlarida, har bir rejim uchun uchta mustaqil takrorda bajarildi. Quyosh havo kollektori tajribalarda ishga tushirilmadi. Transformatorning birlamchi va ikkilamchi elektr kattaliklari, qizdirish yuzasining belgilangan harorat rejimiga chiqish davomiyligi, qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti, sholi donining namligi va harorati aniqlandi. Natijalar. Transformator ikkilamchi zanjiridagi aktiv quvvat 538,97–540,48 W, qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati esa 1531,2–1535,5 W/m² oralig‘ida bo‘ldi. Belgilangan harorat 70°C dan 90 °C gacha oshirilganda qizdirish yuzasining rejimga chiqish davomiyligi 86,67±0,58 s dan 92,33±0,58 s gacha, qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti esa 0,563 dan 0,594 gacha oshdi. Qizdirish yuzasi haroratining tebranish diapazoni 3,0–3,4 °C ni tashkil etdi. Sholi donining quritishdan keyingi namligi 14,90±0,10% dan 11,63±0,15% gacha kamaydi, quritgichdan chiqishdagi don harorati esa 34,03–40,50 °C oralig‘ida bo‘ldi. Xulosa. Elektrokontakt qizdirish tizimi past kuchlanish va katta tok sharoitida qizdirish yuzasini qisqa vaqt ichida belgilangan harorat rejimiga chiqarish hamda termoregulyator yordamida uning haroratini barqaror sikllі boshqarish imkonini berdi. Sholi donida olingan tajriba natijalari mazkur tizimning kombinatsiyalangan don quritgichlarida qo‘llanish imkoniyatlarini keyingi tadqiqotlarda boshqa don mahsulotlari uchun ham baholashga asos yaratadi.

Kalit so’zlar: kombinatsiyalangan don quritgichi, sholi doni, elektrokontakt qizdirish, past kuchlanish, katta tok kuchi, solishtirma sirt quvvati, haroratni sikllі boshqarish.

Iqtibos: N.A. Sapayev, B.Z. Baltabayev, O.Q. Matchonov. Irrigatsiya va melioratsiya. **2026**, 12,3, 4. https://doi.org/10.35938/IM-2026-12-00011

Olingan: 5.06.2026
Tuzatilgan: 23.07.2026
Qabul qilingan: 30.08.2026
Nashr qilingan: 10.09.2026

Copyright:

OPEN ACCESS

Check for updates

CC BY

Investigation of the electrothermal parameters of the electrocontact heating system in a combined grain dryer (using paddy rice as a case study).

N.A. Sapaev [1]*, B.Z. Baltabaev [1], O.Q. Matchonov [1]

[1] Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University, Faculty of Energy, Department of Electrical Technologies and Operation of Electrical Equipment, Tashkent 100000, Uzbekistan

n_sapayev@tiiame.uz (N.S.,), b_baltabayev@tiiame.uz (B.B.,), o.matchonov@tiiame.uz (O.M.,)

Abstract:

The study aimed to determine the electrothermal parameters of the electrocontact heating system incorporated into a combined grain dryer using paddy rice as a case study and to evaluate the cyclic temperature-control characteristics of the heating surface; Materials and methods. Experiments were conducted using the “Alanga” paddy rice variety at heating-surface set temperatures of 70, 80, and 90 °C, with three independent replicates for each temperature regime. The solar air collector was switched off during the experiments. Primary and secondary electrical parameters of the transformer, heating time required to reach the set temperature, heating-system duty factor, and paddy rice moisture

content and temperature were determined; Results. The active power in the transformer secondary circuit ranged from 538.97 to 540.48 W, while the surface-specific power of the heating surface ranged from 1531.2 to 1535.5 W/m². As the set temperature increased from 70 to 90 °C, the heating time increased from 86.67±0.58 to 92.33±0.58 s, while the heating-system duty factor increased from 0.563 to 0.594. The heating-surface temperature fluctuation range was 3.0–3.4 °C. For rice grain with an initial moisture content of 20%, the moisture content after drying decreased from 14.90±0.10% to 11.63±0.15%, while the outlet grain temperature ranged from 34.03 to 40.5 °C; Conclusion. The electrocontact heating system enabled the heating surface to reach the required temperature rapidly under low-voltage and high-current conditions and provided stable cyclic temperature control using an automatic temperature controller. The results obtained for paddy rice provide a basis for further evaluation of the applicability of the proposed heating system to combined dryers for other grain crops.

Keywords: combined grain dryer, paddy rice, electrocontact heating, low voltage, high current, surface-specific power, cyclic temperature control.

Kirish

Don mahsulotlarini hosildan keyingi qayta ishlashda quritish ularning sifatini saqlash, saqlashga yaroqliligini oshirish va keyingi texnologik jarayonlarga tayyorlashning muhim bosqichlaridan biridir. Turli don ekinlari orasida sholi (Oryza sativa L.) jahon oziq-ovqat xavfsizligi tizimida strategik ahamiyatga ega bo‘lgan asosiy ekinlardan biri hisoblanadi. Ilmiy manbalarda sholining kimyoviy tarkibi, kraxmal tuzilishi, oqsil va boshqa bioaktiv komponentlari uning qayta ishlash texnologiyasi bilan bevosita bog‘liq ekani qayd etilgan [1]. Jahon sholi iste’moli bo‘yicha statistik ma’lumotlar ham ushbu mahsulotga bo‘lgan talabning yuqoriligini ko‘rsatadi: 2008/2009 marketing yilida global iste’mol 437,179 ming tonnani tashkil etgan bo‘lsa, 2024/2025 yilga kelib bu ko‘rsatkich 530,239 ming tonnagacha oshgan [2]. Shu sababli don mahsulotlarini, xususan, sholini quritish va saqlash texnologiyalarini takomillashtirish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. O‘zbekiston sharoitida ham sholi yetishtirish qishloq xo‘jaligi mahsulotlari tarkibida muhim o‘rin egallaydi. Rasmiy statistik ma’lumotlarga ko‘ra, mamlakatda barcha toifadagi xo‘jaliklarda yetishtirilgan sholi hajmi 2010 yilda 249,8 ming tonna bo‘lgan bo‘lsa, 2024 yilda 383,6 ming tonnaga yetgan [3]. Ayrim yillarda hududlar bo‘yicha hosildorlikda sezilarli farqlar kuzatilsa-da, umumiy tendensiya sholining ichki oziq-ovqat ta’minotidagi ahamiyatini ko‘rsatadi. Bunday sharoitda yetishtirilgan mahsulotni sifatli saqlash, qayta ishlashga tayyorlash va energiya sarfini kamaytirish masalalari mahalliy sholichilikning raqobatbardoshligini oshirishda bevosita rol o‘ynaydi.

O‘zbekiston sharoitida sholi va undan olinadigan guruch nafaqat oziq-ovqat xavfsizligini ta’minlashda, balki milliy taomlar madaniyatida ham alohida ahamiyatga ega. Xususan, guruch o‘zbek milliy oshxonasining eng mashhur taomlaridan biri – palov tayyorlashda asosiy xomashyo sifatida keng qo‘llanadi. UNESCOning “Palov culture and tradition” nomli nomoddiy madaniy meros tavsifida palov O‘zbekistonning qishloq va shahar jamoalarida tayyorlanadigan, guruch, go‘sht, ziravorlar va sabzavotlardan iborat an’anaviy taom sifatida qayd etilgan [4]. Shu bilan birga, Samaddar va hammualliflari sholi hosildan keyingi boshqaruv tizimi yig‘im-terim, yanchish, quritish, tozalash, saqlash, qayta ishlash va qadoqlash kabi ketma-ket operatsiyalarni o‘z ichiga olishini hamda an’anaviy quritish va noto‘g‘ri saqlash usullari sezilarli yo‘qotishlarga olib kelishi mumkinligini ta’kidlagan [5].

Sholi pishib yetilganidan keyin hosildan keyingi ishlov berish bosqichlari boshlanadi va ular orasida quritish eng muhim texnologik jarayonlardan biri hisoblanadi. Chunki yangi yig‘ib olingan sholi donining namligi ko‘pincha xavfsiz saqlash darajasidan yuqori bo‘ladi. Shu sababli quritish jarayoni mahsulotni saqlashga tayyorlash, uning sifatini saqlash va keyingi qayta ishlash jarayonlarining samaradorligini ta’minlashda muhim ahamiyatga ega. Sholi donini uzoq muddatli saqlash uchun uning namligini odatda 12–14% oralig‘idagi xavfsiz darajaga tushirish talab etiladi. Zhang va hammualliflari sholi quritish jarayonini baholashda faqat yakuniy namlikni emas, balki don tarkibidagi namlikning ichki qatlamlardan tashqi yuzaga ko‘chishi, molekulyar harakatchanlik va namlik gradientini ham hisobga olish zarurligini ko‘rsatgan [6]. Sholi tarkibidagi ortiqcha namlik don massasida nafas olish jarayonini kuchaytiradi, mikroorganizmlar va mog‘or zamburug‘lari rivojlanishi uchun qulay sharoit yaratadi hamda o‘z-o‘zidan qizish va sifatning pasayish xavfini oshiradi. Shu

sababli quritish jarayonini faqat don tarkibidagi namlik miqdorini kamaytirish bilan cheklash yetarli emas. Termik ishlov berish jarayoni oziq-ovqat va qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini qayta ishlashdagi eng ko‘p energiya talab qiladigan jarayonlardan biri hisoblanadi. Chojnacka va hammualliflarining tahliliy maqolasida quritish mahsulotni uzoq muddat saqlash imkonini berishi bilan birga, oziq-ovqat ishlab chiqarish zanjiridagi eng energiya talabchan bosqichlardan biri ekanligi qayd etilgan; gibrid quritish usullari, issiqlikni qayta tiklash, nam havodan foydalanish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini qo‘llash energiya sarfini kamaytirishning muhim yo‘nalishlari sifatida ko‘rsatilgan [7]. Shuning uchun sholi quritishda energiya samaradorligini oshirish nafaqat iqtisodiy, balki ekologik va texnologik jihatdan ham muhim masala hisoblanadi. Sholi doni issiqlikka sezgir biologik material bo‘lib, quritish jarayonida sifat ko‘rsatkichlarini saqlash alohida ahamiyatga ega. Huang va hammualliflarining tadqiqotida mexanik quritish jarayonida dastlabki namlik va quritish harorati urug‘lik sholining unuvchanlik energiyasi, unish foizi, unish indeksi va vigor indeksiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlangan; dastlabki namlik 20, 25 va 30% bo‘lgan urug‘lik sholi uchun mos ravishda 45, 42 va 38 °C yuqori harorat chegaralari tavsiya qilingan [8]. Bu natija sholi doni maqsadiga qarab quritish rejimini alohida asoslash zarurligini ko‘rsatadi: oziq-ovqat uchun mo‘ljallangan don va urug‘lik don uchun bir xil yuqori harorat rejimlarini qo‘llash noto‘g‘ri hisoblanadi.

Quritish rejimi don sifatiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi boshqa tadqiqotlarda ham tasdiqlangan. Xu va hammualliflari ikki bosqichli o‘zgaruvchan haroratli quritish usulini 50 °C doimiy haroratli quritish bilan solishtirib, bunday yondashuv quritish vaqtini qisqartirishi, chatnash miqdorini kamaytirishi va butun don chiqishini oshirishi mumkinligini ko‘rsatgan [9]. Demak, zamonaviy quritish tizimlari namlikni kamaytirish bilan cheklanmasdan, don ichki tuzilmasida keskin zo‘riqishlar hosil qilmaydigan, boshqariladigan issiqlik va massa almashinuvini ta’minlashi zarur.

Sholi quritish qurilmalari bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar mavjud texnologik yechimlarning afzalliklari va kamchiliklarini ko‘rsatadi. Utari va hammualliflari vertikal shnekli quritgichda 40–70 °C harorat oralig‘i hamda turli havo tezliklarida quritish jarayonini tahlil qilib, havo harorati oshishi quritish vaqtini qisqartirishini va issiqlik samaradorligini oshirishini, biroq fizik sifatning pasayishi, xususan, siniq don ulushining ortishi bilan bog‘liq muammo yuzaga kelishini aniqlagan [10]. Ularning optimallashtirish natijalari 65 °C atrofidagi havo harorati va yuqori havo tezligi issiqlik samaradorligi hamda butun don ulushi o‘rtasida muayyan muvozanat berishini ko‘rsatadi. Bu holat shnekli quritgichlarda ham energiya samaradorligi va don sifati o‘rtasida eng maqbul holatni topish muhimligini tasdiqlaydi.

Past haroratli silo-quritgichlarda o‘tkazilgan tadqiqotlar sholi sifati nuqtayi nazaridan boshqa muhim xulosalarni beradi. Moraes va hammualliflari qalin qatlamda past haroratli quritish donning fizik-kimyoviy va morfologik xususiyatlarini ma’lum darajada saqlashga yordam berishini ko‘rsatgan, biroq don massasi bo‘ylab yuqori va pastki qatlamlarda namlikning notekis kamayishi va uzoq vaqt saqlanishi sifatga salbiy ta’sir qilishi mumkinligini aniqlashgan [11]. Demak, past haroratda ishlov berish don sifatini saqlashda samarali bo‘lsa-da, faqat past haroratga tayanish quritish davomiyligi, namlikning bir tekis taqsimlanishi va ishlab chiqarish unumdorligi bilan bog‘liq muammolarni to‘liq bartaraf eta olmaydi.

Mobil va gibrid quritgichlar bo‘yicha tajribalar esa kichik va o‘rta ishlab chiqaruvchilar uchun muqobil texnologiyalar zarurligini ko‘rsatadi. Alam va hammualliflari ikki manbali qizdirish tizimi bilan jihozlangan HSTU mobil don va urug‘ quritgichida sholi doni va urug‘ining sifat ko‘rsatkichlarini baholab, bunday quritgich namligi yuqori bo‘lgan donni noqulay iqlim sharoitida tez va nisbatan samarali quritish imkonini berishini ko‘rsatgan [12]. Jyoti va hammualliflari quyosh pufakli quritgichda quritish samaradorligini tahlil qilib, quyosh energiyasidan foydalanish quritish xarajatini kamaytirishi va kichik fermer xo‘jaliklari uchun nisbatan qulay yechim bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatgan [13]. Biroq quyosh quritgichlari ish samaradorligi quyosh radiatsiyasi, kun davomidagi havo harorati va meteorologik sharoitlarga kuchli bog‘liq bo‘lib qoladi.

Mahalliy ilmiy ishlarda ham sholi quritish qurilmalari, xususan, mobil quritgichlar, quritish barabanida don miqdorini aniqlash, shnekli uzatish organlarida don harakati va mexanik shikastlanish masalalari o‘rganilgan. Bekkulov va hammualliflarining ishlarida sholi quritish uchun mobil qurilma konstruksiyasi, quritish barabanidagi donning joylashuvi, texnik parametrlar va shnekli tashish jarayonidagi mexanik shikastlanishlar muhim omillar sifatida tahlil qilingan [14,15]. Bu tadqiqotlar sholi donini quritishda nafaqat issiqlik rejimi, balki don harakati, aralashtirish, shnek aylanish tezligi

va mexanik ta’sir ham sifatga bevosita ta’sir qilishini ko‘rsatadi. Yuqorida tahlil qilingan tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, konvektiv, quyoshli, shnekli, silosli aeratsion va mobil quritgichlarning har biri muayyan afzalliklar bilan bir qatorda ayrim cheklovlarga ham ega. Konvektiv quritgichlar odatda yuqori energiya sarfi bilan tavsiflanadi; past haroratli quritgichlar don sifatini yaxshi saqlashi mumkin, biroq quritish davomiyligi ortadi; quyosh quritgichlarining samaradorligi meteorologik sharoitlarga bog‘liq; shnekli quritgichlarda esa uzluksiz harakat va aralashtirish ta’minlansa-da, yuqori harorat va mexanik ta’sir donning shikastlanish xavfini oshirishi mumkin. Shu sababli bir nechta issiqlik uzatish mexanizmlarini yagona boshqariladigan tizimda uyg‘unlashtirish istiqbolli ilmiy yo‘nalish hisoblanadi.

Elektrotexnologiyalar qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini qayta ishlashda energiyani bevosita yoki bilvosita issiqlikka aylantirish orqali jarayonlarni boshqarish imkonini beradi. Kurzin va hammualliflarining o‘quv-uslubiy qo‘llanmasida elektrotexnologiya elektr energiyasidan ishlab chiqarish jarayonlarida to‘g‘ridan-to‘g‘ri yoki boshqa energiya turlariga aylantirib foydalanishga asoslangan fan-texnika sohasi sifatida izohlanadi; elektr qizdirish esa elektr energiyasini issiqlikka aylantirish jarayoni sifatida berilgan [16]. Logachev va hammualliflari elektr qizdirish qurilmalarining afzalliklari sifatida quvvat va haroratni oson rostlash, avtomatlashtirish imkoniyati, energiyani kichik hajmda konsentratsiyalash, yuqori qizdirish tezligi va texnologik oqimga integratsiyalash qulayligini qayd etgan [17]. Elektrokontakt qizdirishning nazariy asoslari Aliferov va Lupi monografiyasida keng yoritilgan. Mazkur manbaga ko‘ra, elektrokontakt qizdirishda elektr energiyasi elektr zanjiriga ulangan qizdiriluvchi elementning aktiv elektr qarshiligi hisobiga issiqlikka aylanadi, jarayon Joule–Lenz qonuniyatlari bilan tavsiflanadi va qizdirish tezligi hamda quvvatini boshqarish imkoniyati yuqori bo‘ladi [18]. Sholi quritgichida bu tamoyil donning o‘zidan tok o‘tkazish ma’nosida emas, balki maxsus metall silindrsimon elektrokontakt qizdirish yuzasini past kuchlanishli va yuqori tokli transformator orqali qizdirish hamda issiqlikni don qatlamiga kontakt-konduktiv yo‘l bilan uzatish ma’nosida qo‘llanadi. Bunday yondashuv issiqlik oqimini tez va boshqariladigan tarzda quritish zonasiga kiritish imkonini beradi.

Quyosh kollektori bilan kombinatsiyalash elektrokontakt qizdirish tizimining energiya yuklamasini kamaytirish uchun muhimdir. Quyosh havo kollektorida qizdirilgan havo don qatlamiga yuborilganda namlikni olib chiqish jarayoni kuchayadi, quritish zonasida nam havo to‘planib qolishi kamayadi va elektrokontakt qizdirish yuzasining faqat kontaktli issiqlik berish bilan cheklanib qolmasdan, konvektiv massa almashinuv bilan uyg‘un ishlashi ta’minlanadi. Gibrid quritish texnologiyalari bo‘yicha yuqorida tahlil qilingan tadqiqotlar qayta tiklanuvchi energiya manbalarini qo‘llash va issiqlik almashinuvini yaxshilash energiya sarfini kamaytirishning istiqbolli yo‘nalishi ekanini ko‘rsatadi.

Shu bilan birga, sholi quritish jarayonida xavfsizlik omillari ham nazardan chetda qolmasligi kerak. Xie va hammualliflari don quritish jarayonida havo oqimi, yuqori harorat va don massasining yonuvchanligi bilan bog‘liq yong‘in xavfi mavjudligini ko‘rsatgan [19]. Bu natija quritgichlarda haroratni avtomatik nazorat qilish, qizdirish elementining ishlash vaqtini cheklash, don chiqish haroratini kuzatish va sovitish zonasini joriy etish zarurligini anglatadi. Elektrokontaktli shnekli quritgichda termoregulyator, havo oqimi, donni aralashtirish va chiqishdagi sovitish tizimi birgalikda qo‘llanganida, quritish samaradorligi bilan birga xavfsizlik darajasini ham oshirish mumkin. Sholi namligini aniq baholash quritish jarayonining ilmiy asoslangan natijalarini olish uchun zarur. APLMF tomonidan tayyorlangan “Rice Moisture Measurement” qo‘llanmasida qishloq xo‘jaligi mahsulotlari namligini o‘lchashda metrologik yondashuv, kalibrlash va o‘lchash natijalarining ishonchliligi alohida ahamiyatga ega ekani ko‘rsatilgan [20]. Shu sababli quritish tajribalarida boshlang‘ich va yakuniy namlikni bir xil uslubda, takroriy o‘lchashlar asosida aniqlash, energiya ko‘rsatkichlarini esa quritish davomiyligi va haqiqiy elektr iste’moliga bog‘lab hisoblash talab etiladi.

Yuqoridagi adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, mavjud tadqiqotlarda sholi donini quritish jarayoni asosan quritish havosining harorati va tezligi, donning namlik holati, quritish davomiyligi hamda qurilmalarning texnologik samaradorligi nuqtayi nazaridan baholangan. Biroq past kuchlanishli va yuqori tokli elektr ta’minoti asosida ishlaydigan silindrsimon elektrokontakt qizdirish yuzasining elektr va issiqlik parametrlarini sholi donini quritish sharoitida o‘zaro bog‘liq holda asoslash masalasi yetarlicha yoritilmagan. Xususan, transformatorning ikkilamchi kuchlanishi va toki, elektrokontakt tizimining aktiv quvvati, qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati, yuzaning

qizish va haroratni barqaror saqlash davomiyligi hamda termoregulyatorning ish sikli o‘rtasidagi bog‘lanishlar kompleks ravishda tadqiq etilmagan.

Mazkur tadqiqotda quyosh kollektori bilan kombinatsiyalangan shnekli quritgich tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimi alohida tadqiqot obyekti sifatida qaraladi. Ushbu tizimda transformatorning ikkilamchi chulg‘amidan olinadigan past kuchlanish va yuqori tok silindrsimon metall qizdirish yuzasining aktiv elektr qarshiligida issiqlik hosil qiladi. Hosil bo‘lgan issiqlik don qatlamiga kontakt va issiqlik o‘tkazuvchanlik orqali uzatiladi. Qurilmaning umumiy konstruksiyasida quyosh havo kollektori mavjud bo‘lsa-da, mazkur tadqiqotda uning issiqlik ta’siri istisno qilinib, elektrokontakt qizdirish tizimi alohida baholandi. Shnekning aylanishi donning qizdirish yuzasi bilan davriy kontaktini, aralashishini va quritish zonasida siljishini ta’minlaydi. Shu sababli ushbu tadqiqotda quritish rejimlarini qayta optimallashtirish emas, balki elektrokontakt qizdirish tizimining elektr ta’minoti, issiqlik hosil qilishi, haroratni boshqarishi va texnologik xavfsizligini asoslashga asosiy e’tibor qaratiladi.

Tadqiqotning maqsadi kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimining elektr-issiqlik parametrlarini sholi doni misolida aniqlash hamda qizdirish yuzasi haroratini siklli boshqarish xususiyatlarini baholashdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun transformatorning birlamchi va ikkilamchi elektr kattaliklari aniqlandi; qizdirish yuzasining ekvivalent aktiv qarshiligi va solishtirma sirt quvvati hisoblandi; qizdirish yuzasining belgilangan haroratga chiqish davomiyligi va o‘rtacha qizish tezligi baholandi; termoregulyatorning siklli ishlashi va qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti aniqlandi; shuningdek, donning quritish va sovitishdan keyingi namlik hamda harorat ko‘rsatkichlari baholandi.

Materiallar va usullar

Tadqiqot obyekti sifatida quyosh havo kollektori bilan kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimi qabul qilindi. Mazkur tadqiqotda ushbu tizimning mustaqil elektr-issiqlik xususiyatlari sholi doni misolida baholandi. Shu sababli tajribalar soyali sharoitda, quyosh havo kollektori ishga tushirilmagan va silindrsimon qizdirish yuzasiga bevosita quyosh nurlanishi tushmagan holatda bajarildi.

Tajribalarda “Alanga” sholi navidan foydalanildi. Har bir sinov uchun boshlang‘ich don massasi m_0 = 1.000 kg, boshlang‘ich namlik esa nam asosda W_0 = 20% qilib olindi. Tajriba oldidan namuna begona aralashmalar, singan va yetilmagan donlardan tozalandi hamda bir xil sharoitda saqlandi.

Tajriba vaqtida atrof-muhit havo harorati 22–30°C, nisbiy namligi 25–43% oralig‘ida bo‘ldi. Quritish zonasiga uzatilgan havo tezligi 1.5 m/s, chiqish qismidagi sovitish havo tezligi 2.5 m/s darajada ushlab turildi. Elektr-issiqlik ko‘rsatkichlariga boshqa texnologik omillarning ta’sirini cheklash uchun shnek aylanish tezligi 10 ayl/daq qiymatda doimiy saqlandi. Quritish bosqichida quritish havo ventilyatori orqali atrof-muhit havosi ichki teshikchali silindrga uzatildi. Mazkur tajribalarda havo quyosh kollektorida oldindan qizdirilmadi.

Sholi donining namligi Smart Sensor AR991 rusumli don namlik o‘lchagichi orqali aniqlandi. Har bir namuna namligi uch marta o‘lchanib, hisoblashlarda o‘lchashlarning o‘rtacha qiymati qabul qilindi. Namlikni o‘lchash va natijalarni talqin qilishda APLMFning yuqorida bayon qilingan metrologik tavsiyalari hisobga olindi. Har bir harorat rejimi uchta mustaqil takrorda bajarildi.

Tajriba qurilmasi va elektrokontakt qizdirish tizimi Quritish qurilmasining ishchi qismi tashqi silindrsimon elektrokontakt qizdirish yuzasi, teshikchali (perforatsiyali) ichki silindr va ular orasida donni uzluksiz siljituvchi shnekdan tashkil topgan. Elektrokontakt silindrining tashqi diametri 126 mm, uzunligi 900 mm, metall list qalinligi 0,8 mm; ichki teshikchali silindr diametri 88 mm. Elektrokontakt qizdirish yuzasi qalinligi 0,8 mm bo‘lgan zanglamaydigan po‘lat listdan tayyorlangan. Silindrning tashqi yuzasi qurilmaning quyosh energiyasidan foydalaniladigan kombinatsiyalangan ish rejimlari uchun qora mat bo‘yoq bilan qoplangan. Biroq mazkur tadqiqotdagi tajribalar soyali sharoitda bajarilganligi sababli silindr tashqi yuzasiga bevosita quyosh nurlanishi tushmadi. Shuning uchun tajribalarda qizdirish yuzasida ajralgan issiqlik faqat elektrokontakt qizdirish tizimining elektr energiyasi hisobiga hosil bo‘ldi. Tadqiqotda foydalanilgan quyosh havo kollektori bilan kombinatsiyalangan elektrokontaktli shnekli don quritgichining umumiy konstruktiv tuzilishi, asosiy ishchi elementlari va ularning o‘zaro joylashuvi (rasm 1) keltirilgan.

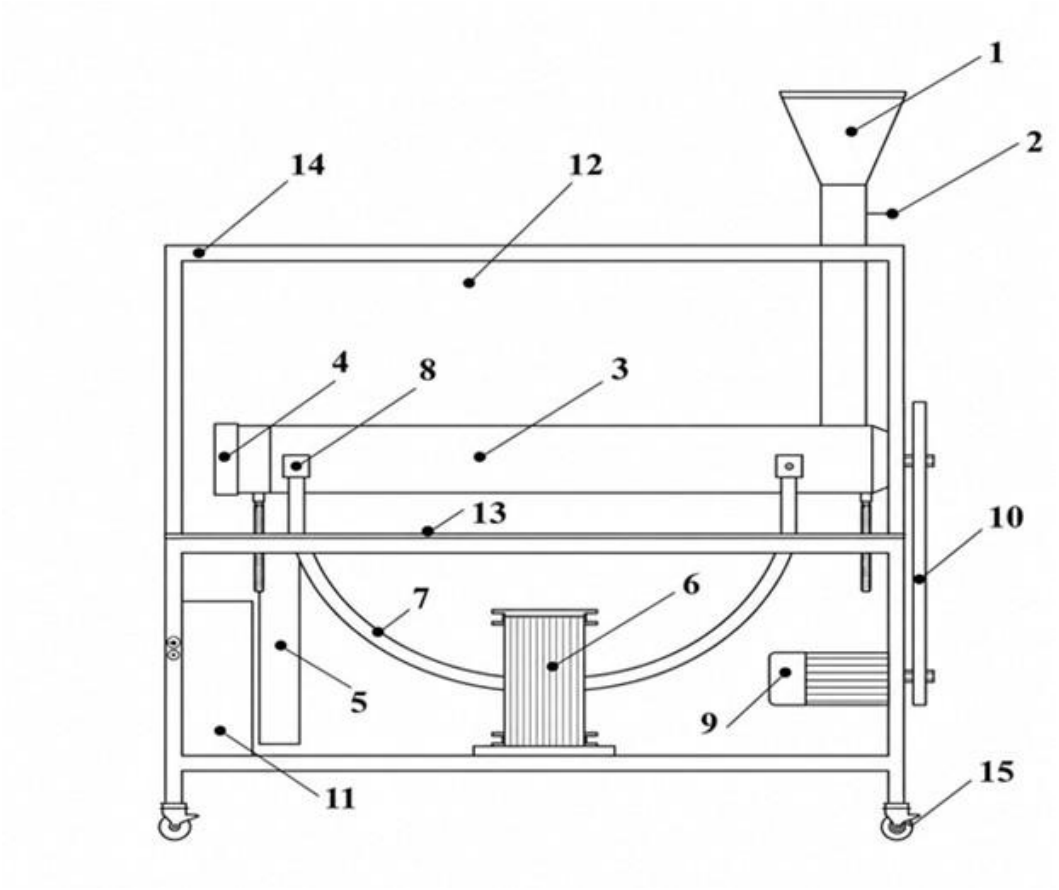

Figure 1. Structural and technological scheme of the electrocontact screw-type grain dryer combined with a solar air collector.
1 – loading hopper; 2 – grain flow control valve; 3 – electrocontact heating surface; 4 – hot-air supply fan; 5 – discharge hopper; 6 – special transformer; 7 – electrical cable; 8 – electrocontact; 9 – electric motor; 10 – drive belt; 11 – control cabinet; 12 – transparent cover; 13 – absorber; 14 – metal profile; 15 – wheel.

Rasm 1. Quyosh havo kollektori bilan kombinatsiyalangan elektrokontaktli shnekli don quritgichining konstruktiv-texnologik sxemasi.
1-yuklash bunkeri, 2-don sarfini rostlovchi klapan, 3-elektrokontaktli qizitish yuzasi, 4-issiq havo haydash ventilyatori, 5-to‘kish bunkeri, 6-maxsus transformator, 7-o‘tkazgich kabel, 8-elektrokontakt, 9-elektr motor, 10-uzatma tasmasi, 11-boshqaruv shkafi, 12-shaffof oyna, 13-absorber, 14-metall profil, 15-g‘ildirak.

Elektrokontaktli qizdirish tizimi laboratoriya avtotransformatori (LATR), maxsus pasaytiruvchi transformator, tok o‘tkazuvchi shinalar, silindrsimon qizdirish yuzasi va XMTG-608 raqamli termoregulyatordan iborat. Birlamchi zanjir kuchlanishi LATR yordamida rostlandi. Pasaytiruvchi transformator ikkilamchi zanjirda past kuchlanish va yuqori tok hosil qilib, metall qizdirish yuzasining aktiv elektr qarshiligida Joule–Lenz qonuniga muvofiq issiqlik ajralishini ta’minladi.

Termoregulyator qizdirish yuzasi haroratini belgilangan diapazonda avtomatik ravishda saqladi. Qizdirish yuzasi harorati belgilangan quyi chegaradan pasayganda transformator elektr tarmog‘iga ulandi, harorat belgilangan yuqori qiymatga yetganda esa tarmoqdan uzildi. Har bir tajribada qizdirish yuzasining donsiz holatda belgilangan harorat rejimiga chiqish davomiyligi t_{rej}, har bir boshqarish siklida transformatorning faol ishlash davomiyligi $t_{f\,aol,i}$, uzilgan holatda turish davomiyligi $t_{uz,i}$ hamda tajribaning umumiy davomiyligi t_{taj} qayd etildi. Bundan tashqari, barcha ulanish va uzilish sikllari bo‘yicha quritish bosqichida transformatorning jami faol ishlash davomiyligi $t_{f\,aol,\Sigma}$ va jami uzilgan holat davomiyligi $t_{uz,\Sigma}$ aniqlandi. Ushbu ko‘rsatkichlar qizdirish tizimining siklli ishlashi, o‘rtacha quvvati va qizdirish yuzasi haroratini barqaror saqlash xususiyatini baholashda qo‘llanildi.

Qizdirish yuzasining belgilangan harorat rejimiga chiqish xarakteristikasi don yuklanmagan holatda aniqlandi. Bunda qurilma ishga tushirilgan paytdan qizdirish yuzasi harorati termoregulyatorda belgilangan qiymatga yetguniga qadar bo‘lgan davomiylik t_{rej} sifatida qayd etildi. Sholini quritish tajribalari esa qizdirish yuzasi belgilangan haroratga yetib, ish rejimi barqarorlashganidan keyin boshlandi. Shu sababli t_{rej} quritish tajribasining umumiy davomiyligi t_{taj} tarkibiga kiritilmadi.

Tajriba dasturi

Elektrokontakt qizdirish tizimining elektr va issiqlik xususiyatlari qizdirish yuzasining 70, 80 va 90°C belgilangan harorat rejimlarida baholandi. Tajribalar soyali sharoitda, quyosh havo kollektori ishga tushirilmagan va qizdirish silindriga bevosita quyosh nurlanishi tushmagan holatda bajarildi.

Donsiz sinovlarda qizdirish yuzasining boshlang‘ich harorati T_0, belgilangan haroratga chiqish davomiyligi t_{rej}, birlamchi va ikkilamchi elektr kattaliklar hamda vaqt bo‘yicha qizdirish yuzasi harorati qayd etildi.

Don bilan bajarilgan tajribalarda transformatorning ulanish va uzilish sikllari, birlamchi kuchlanish U_1, birlamchi tok I_1, birlamchi aktiv quvvat P_1, ikkilamchi kuchlanish U_2, ikkilamchi tok I_2, qizdirish yuzasi harorati, quritish tajribasining davomiyligi, quritishdan keyingi don namligi W_{qur}, sovitishdan keyingi don namligi W_{sov} hamda donning chiqish va sovitishdan keyingi haroratlari qayd etildi. Har bir belgilangan harorat rejimida tajriba uchta mustaqil takrorda o‘tkazildi. Tajribalarda qizdirish yuzasining belgilangan harorati asosiy o‘zgaruvchan omil sifatida qabul qilinib, don massasi, boshlang‘ich namlik, shnekning aylanish tezligi va takrorlar soni barcha rejimlarda o‘zgarmas saqlandi. Elektrokontakt qizdirish tizimini baholash uchun qabul qilingan tajriba rejimlari va ularning asosiy parametrlarining umumlashtirilgan qiymatlari (Jadval 1) keltirilgan.

Table 1. Operating modes for evaluating the electrocontact heating system

Jadval 1. Elektrokontaktli qizdirish tizimini baholash rejimlari

Rejim	T_{bel}, °C	**Don massasi, kg**	W_0, %	**Shnek tezligi, ayl/daq**	n, **takrorlar soni**
1	70	1,000	20	10	3
2	80	1,000	20	10	3
3	90	1,000	20	10	3

Har bir rejimda elektr kattaliklari transformator ulangan davrda qayd etildi. Harorat vaqt bo‘yicha kuzatilib, qizdirish yuzasining belgilangan qiymatga chiqishi va keyingi sikllarda o‘zgarish oralig‘i aniqlandi. Donning chiqish harorati quritish jarayonida biologik materialga tushgan termik yuklamani, sovitishdan keyingi harorat esa sovitish bosqichining samaradorligini baholash uchun qo‘llanildi.

O‘lchash vositalari

Transformatorning birlamchi va ikkilamchi zanjirlaridagi kuchlanish va tok kuchlari – U_1, I_1, U_2 va I_2 – HABOTEST HT208A True RMS tok qisqichi yordamida o‘lchandi. Asbobning o‘zgaruvchan kuchlanishni o‘lchash aniqligi $\pm(0.8\% + 3$ razryad$)$, o‘zgaruvchan tokni o‘lchash aniqligi esa $\pm(2.5\% + 5$ razryad$)$ ni tashkil etdi. Transformatorning birlamchi zanjiridagi aktiv quvvat P_1 D5004/1 rusumli elektrodinamik laboratoriya vattmetri yordamida bevosita o‘lchandi. Tajribalarda vattmetrning 300 V kuchlanish va 10 A tok kuchini o‘lchash chegaralaridan foydalanildi; ushbu ulanishda aktiv quvvatni o‘lchash chegarasi 3000 W ni tashkil etdi. Asbobning aniqlik sinfi 0.5.

Qizdirish yuzasi harorati XMTG-608 raqamli termoregulyatoriga ulangan kontaktli harorat datchigi yordamida nazorat qilindi; don yuzasi harorati UNI-T UT300A+ kontaktsiz infraqizil termometrda, don massasi esa 1 g diskretlikka ega SF-400 elektron tarozida o‘lchandi. Havo tezligi 816-seriyali raqamli anemometr yordamida o‘lchandi; asbobning o‘lchash diapazoni 0–30 m/s, diskretligi 0.1 m/s va o‘lchash aniqligi ±5% ni tashkil etdi. Atrof-muhit harorati va nisbiy namligi raqamli termo-gigrometr bilan qayd etildi (Jadval 2).

Table 2. Main measuring instruments used in the experiment

Jadval 2. Tajribada foydalanilgan asosiy o‘lchash vositalari

O‘lchanadigan kattalik	Asbob	Asosiy tavsif
Don namligi	Smart Sensor AR991	Diapazon 7.5–50%; diskretlik 0.1%
Don massasi	SF-400 elektron tarozi	Eng katta yuk 10 kg; diskretlik 1 g
Don yuzasi harorati	UNI-T UT300A+	Aniqlik ±2.0°C yoki ±2%; diskretlik 0.1°C
Birlamchi va ikkilamchi elektr kattaliklar	HABOTEST HT208A True RMS	U_1, I_1, U_2 va I_2 ni o‘lchash
Qizdirish yuzasi harorati	XMTG-608 termoregulyator, kontaktli harorat datchigi	Avtomatik ulash-uzish boshqaruvi
Havo tezligi	Raqamli anemometr	Diapazon 0–30 m/s; diskretlik 0.1 m/s; aniqlik ±5%
Havo harorati va nisbiy namligi	Raqamli termo-gigrometr	T_{muh} va φ_{muh}
Birlamchi aktiv quvvat P_1	D5004/1 elektrodinamik laboratoriya vattmetri	300 V; 10 A; 3000 W; aniqlik sinfi 0.5

Elektr va issiqlik ko‘rsatkichlarini hisoblash

Don qatlami silindrning ichki yuzasi bilan kontaktda bo‘lganligi sababli qizdirish yuzasining geometrik ishchi maydonini hisoblashda silindrning ichki diametri qabul qilindi:

$$D_{qiz} = D_{tash} - 2\delta \quad (1)$$

$$D_{qiz} = 0.126 - 2 \cdot 0.0008 = 0.1244 \text{ m}$$

bu yerda D_{tash} – elektrokontakt silindrining tashqi diametri, m; δ – silindr devorining qalinligi, m; D_{qiz} – don bilan kontaktda bo‘lgan ichki ishchi diametr, m.

Silindrsimon qizdirish yuzasining geometrik ishchi maydoni quyidagicha aniqlandi:

$$A_{qiz} = \pi D_{qiz} L_{qiz} \quad (2)$$

bu yerda A_{qiz} – qizdirish yuzasining geometrik ishchi maydoni, m^2; L_{qiz} – qizdirish silindrining uzunligi, m. Berilgan o‘lchamlar uchun $A_{qiz} = \pi \cdot 0.1244 \cdot 0.900 \approx 0.352$ m^2.

Transformatorning birlamchi zanjiridagi aktiv quvvat P_1 bir fazali vattmetr yordamida bevosita o‘lchandi. Birlamchi zanjirning to‘la quvvati quyidagicha aniqlandi:

$$S_1 = U_1 I_1 \quad (3)$$

bu yerda S_1 – to‘la quvvat, VA.

Quvvat koeffitsiyenti aktiv quvvatning to‘la quvvatga nisbati asosida hisoblandi:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (4)$$

bu yerda P_1 – birlamchi aktiv quvvat, W; U_1 – birlamchi kuchlanish, V; I_1 – birlamchi tok kuchi, A.

Elektrokontakt qizdirish yuzasi ikkilamchi zanjirda asosan aktiv qarshilikli yuklama sifatida ishlaganligi sababli $\cos\varphi_2 \approx 1$ deb qabul qilindi. Ikkilamchi kuchlanish U_2 va tok kuchi I_2 bevosita o‘lchandi hamda ikkilamchi aktiv quvvat quyidagicha aniqlandi:

$$P_2 = U_2 I_2 \quad (5)$$

bu yerda P_2 – transformator ikkilamchi zanjirining aktiv quvvati, W; U_2 – ikkilamchi kuchlanish, V; I_2 – ikkilamchi tok kuchi, A.

Transformatorning foydali ish koeffitsiyenti birlamchi va ikkilamchi aktiv quvvatlarning nisbati orqali aniqlandi:

$$\eta_{tr} = \frac{P_2}{P_1} \tag{6}$$

bu yerda η_{tr} – transformatorning tajribaviy foydali ish koeffitsiyenti, o‘lchovsiz. P_1 va P_2 qiymatlari bir xil ish rejimida va bir vaqtda qayd etildi.

Qizdirish yuzasining ekvivalent aktiv qarshiligi:

$$R_{\text{qiz}} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_2^2}{P_2} \tag{7}$$

bu yerda R_{qiz} – qizdirish yuzasining ekvivalent aktiv qarshiligi, Ω.

Qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati quyidagicha aniqlandi:

$$p_{\text{qiz}} = \frac{P_2}{A_{\text{qiz}}} \tag{8}$$

bu yerda p_{qiz} – qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati, W/m^2; P_2 – qizdirish yuzasida ajraladigan aktiv quvvat, W; A_{qiz} – qizdirish yuzasining geometrik ishchi maydoni, m^2.

Qizdirish tizimining tajriba davomida faol ishlagan vaqt ulushi faol ishlash koeffitsiyenti orqali aniqlandi:

$$k_{\text{faol}} = \frac{t_{\text{faol},\Sigma}}{t_{\text{taj}}} \tag{9}$$

bu yerda k_{faol} – qizdirish tizimining donni quritish bosqichidagi faol ishlash koeffitsiyenti; $t_{\text{faol},\Sigma}$ – don bilan quritish davomida transformatorning jami faol ishlash davomiyligi, s; t_{taj} – don yuklangandan quritish yakunigacha bo‘lgan tajriba davomiyligi, s.

Qizdirish yuzasining don yuklanmagan holatda belgilangan harorat rejimiga chiqish davridagi o‘rtacha qizish tezligi quyidagicha aniqlandi:

$$\bar{v_T} = \frac{T_{\text{bel}} - T_0}{t_{\text{rej}}} \tag{10}$$

bu yerda $\bar{v}_T$ – qizdirish yuzasining donsiz holatdagi o‘rtacha qizish tezligi, ˚C/s; T_{bel} – termoregulyatorda belgilangan harorat, ˚C; T_0 – qizdirish yuzasining boshlang‘ich harorati, ˚C.

Qizdirish yuzasi haroratining to‘liq tebranish diapazoni:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \tag{11}$$

bu yerda T_{max} va T_{min} – termoregulyatorning barqaror ish siklida qayd etilgan eng yuqori va eng past qizdirish yuzasi haroratlari, ˚C.

Ma’lumotlarga ishlov berish

O‘lchash natijalari elektron jadvalda tartiblandi. Har bir harorat rejimi bo‘yicha uchta mustaqil tajriba natijalari arifmetik o‘rtacha qiymat va standart og‘ish ko‘rinishida ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$) ifodalandi. Qizdirish yuzasining 70, 80 va 90˚C belgilangan harorat rejimlari birlamchi va ikkilamchi elektr ko‘rsatkichlari, qizdirish yuzasining ekvivalent aktiv qarshiligi va solishtirma sirt quvvati, belgilangan haroratga chiqish davomiyligi, o‘rtacha qizish tezligi, faol ishlash koeffitsiyenti, haroratning tebranish diapazoni hamda donning quritish va sovitishdan keyingi namlik va harorat ko‘rsatkichlari bo‘yicha taqqoslandi. Asosiy baholash mezonlari sifatida elektr yuklama, sikllli boshqaruv barqarorligi va donning termik holati qabul qilindi.

Natijalar

Elektrokontakt qizdirish tizimining tajribaviy xususiyatlari qizdirish yuzasining 70, 80 va 90˚C belgilangan harorat rejimlarida o‘rganildi. Har bir rejim uchta mustaqil takrorda bajarildi. Tajriba natijalari arifmetik o‘rtacha qiymat va standart og‘ish ko‘rinishida ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$) ifodalandi.

Tajribalar soyali sharoitda, quyosh havo kollektori ishga tushirilmagan va qizdirish silindriga bevosita quyosh nurlanishi tushmagan holatda bajarilganligi sababli olingan natijalar elektrokontakt qizdirish tizimining mustaqil elektr-issiqlik xususiyatlarini tavsiflaydi.

Elektrokontakt qizdirish tizimining elektr ko‘rsatkichlar

Tajribalarda transformatorning birlamchi kuchlanishi barcha rejimlarda 220 V darajada saqlandi. Birlamchi tok kuchi 6.10–6.20 A, ikkilamchi kuchlanish 0.90–0.91 V, ikkilamchi tok kuchi esa 590–600 A oralig‘ida qayd etildi. Transformatorning birlamchi aktiv quvvati barcha tajribalarda 1.15 kW ni tashkil etdi. O‘lchangan birlamchi va ikkilamchi elektr kattaliklar asosida transformatorning to‘la quvvati, quvvat koeffitsiyenti, ikkilamchi aktiv quvvat, tajribaviy foydali ish koeffitsiyenti, qizdirish yuzasining ekvivalent aktiv qarshiligi va solishtirma sirt quvvati hisoblandi. Elektrokontakt qizdirish tizimining 70, 80 va 90°C harorat rejimlarida aniqlangan asosiy elektr ko‘rsatkichlari (Jadval 3) keltirilgan.

Table 3. Electrical parameters of the electrocontact heating system ($x^{-} \pm s$, $n = 3$)
Jadval 3. Elektrokontakt qizdirish tizimining elektr ko‘rsatkichlari ($x^{-} \pm s$, $n = 3$)

T_{bel}, °C	I_1, A	P_1, kW	U_2, V	I_2, A	P_2, W	cos φ	η_{tr}	R_{qiz}, mΩ	p_{qiz}, W/m^2
70	6.117 ± 0.029	1.15	0.903 ± 0.006	597.3 ± 4.6	539.57 ± 0.74	0.855 ± 0.004	0.469 ± 0.001	1.512 ± 0.021	1532.9 ± 2.1
80	6.150 ± 0.050	1.15	0.903 ± 0.006	596.7 ± 5.8	538.97 ± 1.79	0.850 ± 0.007	0.469 ± 0.002	1.514 ± 0.024	1531.2 ± 5.1
90	6.103 ± 0.006	1.15	0.903 ± 0.006	598.3 ± 2.9	540.48 ± 0.84	0.856 ± 0.001	0.470 ± 0.001	1.510 ± 0.017	1535.5 ± 2.4

Natijalardan ko‘rinadiki, belgilangan harorat 70 dan 90 °C gacha oshirilganida transformator ikkilamchi zanjiridagi aktiv quvvat deyarli o‘zgarmadi. Uning o‘rtacha qiymati 538,97–540,48 W oralig‘ida bo‘lib, rejimlar orasidagi maksimal farq 0,3% dan ham kamni tashkil etdi. Qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati ham 1531,2–1535,5 W/m² kabi tor diapazonda saqlandi. Mazkur holat 70, 80 va 90 °C harorat rejimlarining qizdirish yuzasiga uzatilayotgan oniy elektr quvvatni sezilarli o‘zgartirish hisobiga emas, balki termoregulyator tomonidan transformatorning faol ishlash davomiyligini boshqarish orqali shakllantirilganini ko‘rsatadi. Ya’ni belgilangan harorat oshirilganda qizdirish quvvatining qiymati deyarli o‘zgarmagan, ammo qizdirish tizimining faol holatda turish ulushi ortgan. Birlamchi zanjirning quvvat koeffitsiyenti 0,850–0,856 oralig‘ida bo‘ldi. Transformatorning tajribaviy foydali ish koeffitsiyenti esa 0,469–0,470 ni tashkil etdi. Ushbu qiymat ikkilamchi zanjirga uzatilgan aktiv quvvatning transformator birlamchi tomonidan iste’mol qilingan aktiv quvvatga nisbatini ifodalaydi. Mazkur tajribalarda transformator va tok o‘tkazuvchi elementlardagi alohida elektr yo‘qotishlar mustaqil o‘lchanmaganligi sababli ularning umumiy yo‘qotishdagi ulushi alohida baholanmadi.

Qizdirish yuzasining donsiz holatdagi qizish xususiyatlari

Qizdirish yuzasining belgilangan harorat rejimiga chiqish xarakteristikasi don yuklanmagan holatda aniqlandi. Barcha tajribalarda boshlang‘ich harorat 20 °C ni tashkil etdi. Qizdirish yuzasining 70, 80 va 90 °C belgilangan harorat rejimlariga chiqish davomiyligi, o‘rtacha qizish tezligi, quritish bosqichining davomiyligi, transformatorning jami faol ishlash vaqti, qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti hamda haroratning siklli o‘zgarish ko‘rsatkichlari (Jadval 4) keltirilgan.

Qizdirish yuzasi 70 °C rejimga o‘rtacha 86,67 s, 80 °C rejimga 90,33 s va 90 °C rejimga 92,33 s da chiqdi. Shunday qilib, belgilangan harorat 20 °C ga oshirilganda rejimga chiqish davomiyligi atigi 5,66 s ga, ya’ni taxminan 6,5% ga uzaydi. Shu bilan birga, o‘rtacha qizish tezligi 70 °C rejimdagi 0,577 °C/s dan 90 °C rejimda 0,758 °C/s gacha oshdi. Bu qizdirish tizimining yuqori harorat rejimlariga ham qisqa vaqt ichida chiqish imkoniyatiga ega ekanligini ko‘rsatadi. Qizdirish yuzasining belgilangan harorati oshishi bilan rejimga chiqish davomiyligining o‘zgarish tendensiyasi (rasm 2) grafik ko‘rinishda tasvirlangan.

Table 4. Heating and cyclic control parameters of the heating surface ($x^- \pm s$, $n = 3$)

Jadval 4. Qizdirish yuzasining qizish va siklli boshqaruv ko‘rsatkichlari ($x^- \pm s$, $n = 3$)

T_{bel}, °C	t_{rej}, s	$\bar{v}_T$, °C/s	t_{taj}, s	$t_{faol,\Sigma}$, s	k_{faol}	T_{min}, °C	T_{max}, °C	ΔT, °C
70	86.67 ± 0.58	0.577 ± 0.004	313.00 ± 1.00	176.33 ± 1.15	0.563 ± 0.005	68.30 ± 0.26	71.33 ± 0.15	3.03 ± 0.40
80	90.33 ± 0.58	0.664 ± 0.004	313.33 ± 0.58	180.33 ± 0.58	0.576 ± 0.003	78.17 ± 0.15	81.17 ± 0.12	3.00 ± 0.10
90	92.33 ± 0.58	0.758 ± 0.005	312.33 ± 1.53	185.67 ± 0.58	0.594 ± 0.003	88.33 ± 0.15	91.73 ± 0.25	3.40 ± 0.40

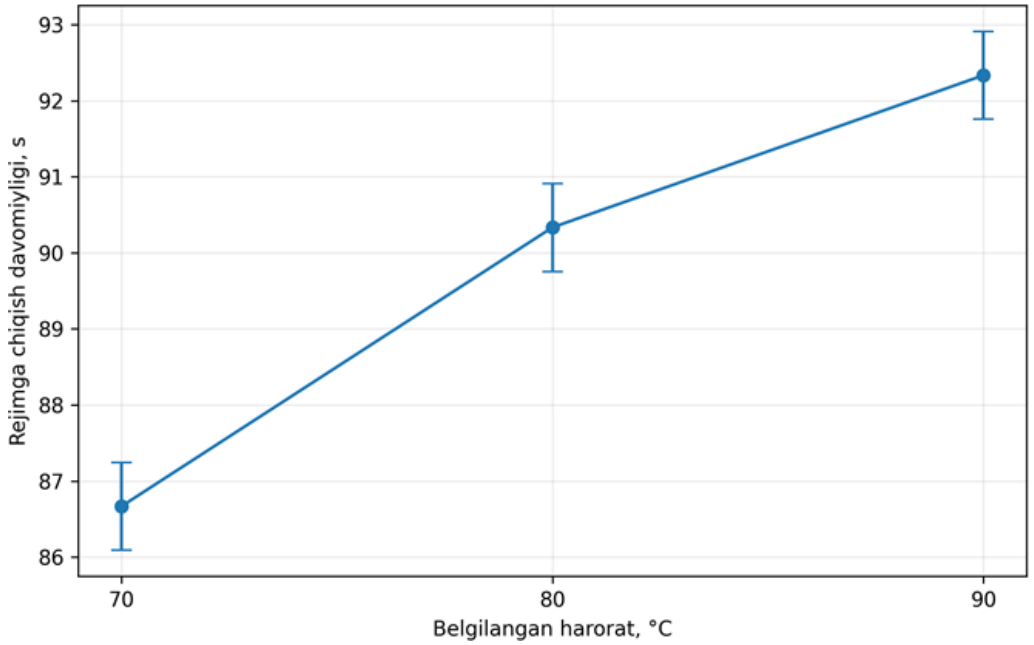

Figure 2. Relationship between the set temperature of the heating surface and the time required to reach the operating regime.

Rasm 2. Qizdirish yuzasining belgilangan harorati bilan rejimga chiqish davomiyligi o‘rtasidagi bog‘lanish.

Quritish bosqichining umumiy davomiyligi barcha rejimlarda deyarli bir xil bo‘lib, 312–314 s oralig‘ida saqlandi. Biroq transformatorning jami faol ishlash davomiyligi belgilangan harorat oshishi bilan ko‘paydi. 70 °C rejimda tfaol,=176,33 s bo‘lgan bo‘lsa, 80 °C da 180,33 s va 90 °C da 185,67 s ni tashkil etdi. Natijada qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti 0,563 dan 0,594 gacha oshdi. Belgilangan haroratning oshishi bilan qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti o‘zgarishi (rasm 3) grafik ko‘rinishda keltirilgan.

Mazkur natija elektr qizdirish quvvati amalda o‘zgarmagan sharoitda yuqoriroq haroratni saqlash uchun termoregulyator transformatorni uzoqroq vaqt faol holatda ushlab turganini ko‘rsatadi. Shu sababli qurilmaning harorat rejimini boshqarishda asosiy rostlovchi parametr oniy quvvat emas, balki qizdirish tizimining ulanish davomiyligi bo‘lgan. Termoregulyatorning barqaror ishlash bosqichida qizdirish yuzasi haroratining to‘liq tebranish diapazoni 70 °C rejimda 3,03±0,4 °C, 80 °C rejimda 3,00±0,1 °C va 90 °C rejimda 3,40±0,4 °C ni tashkil etdi. Barcha rejimlarda harorat tebranishining 3–3,4 °C oralig‘ida saqlanishi qizdirish tizimining belgilangan haroratni takrorlanuvchan siklli boshqarish imkoniyatini ko‘rsatdi.

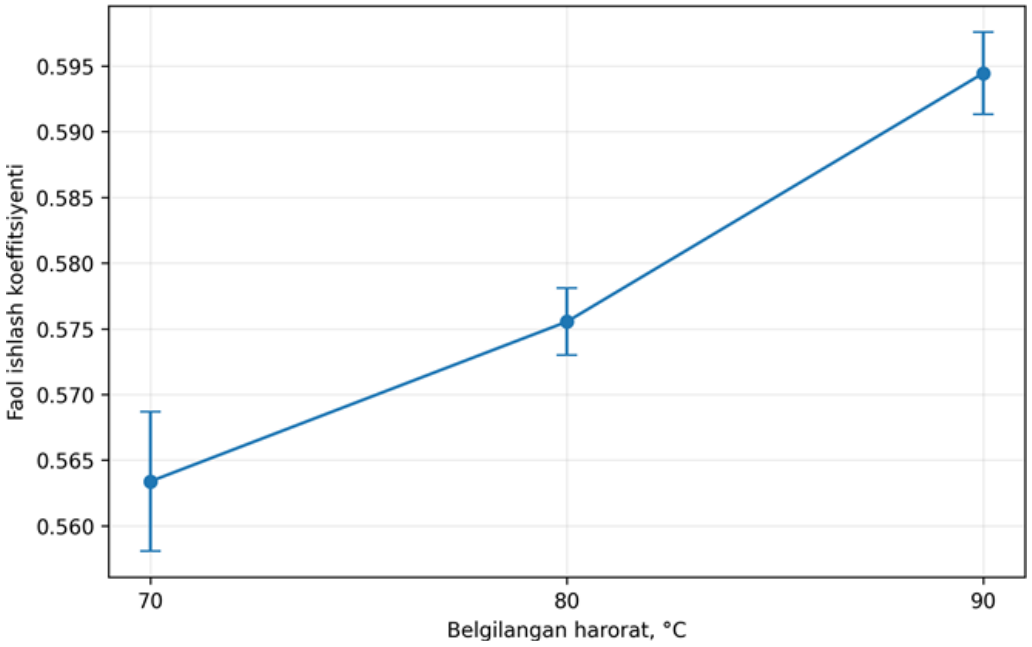

Figure 3. Duty cycle of the heating system as a function of the set temperature of the heating surface.

Rasm 3. Qizdirish yuzasining belgilangan haroratiga bog‘liq holda qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti.

Donning quritish va sovitishdan keyingi holati Elektrokontakt qizdirish tizimining sholi doni bilan ishlash sharoitidagi texnologik natijalarini baholash uchun boshlang‘ich namlik, quritish va sovitishdan keyingi namlik hamda donning quritgichdan chiqish va sovitishdan keyingi haroratlari tahlil qilindi. Ushbu ko‘rsatkichlarning 70, 80 va 90 °C harorat rejimlari bo‘yicha tajribaviy qiymatlari (Jadval 5) keltirilgan.

Table 5. Parameters of rice grain after drying and cooling ($x^{-} \pm s$, $n = 3$).

Jadval 5. Sholi donining quritish va sovitishdan keyingi ko‘rsatkichlari ($x^{-} \pm s$, $n = 3$)

T_{bel}, °C	W_0, %	W_{qur}, %	W_{sov}, %	$T_{don,qur}$, °C	$T_{don,sov}$, °C
70	20.0	14.90 ± 0.10	14.53 ± 0.06	34.03 ± 0.06	32.10 ± 0.10
80	20.0	13.73 ± 0.12	12.83 ± 0.06	36.90 ± 0.10	35.07 ± 0.12
90	20.0	11.63 ± 0.15	10.13 ± 0.15	40.50 ± 0.50	37.97 ± 0.06

Qizdirish yuzasining belgilangan harorati oshishi bilan donning quritishdan keyingi namligi izchil kamaydi. Boshlang‘ich namlik 20% bo‘lganda Wqur 70 °C rejimda 14,90±0,10%, 80 °C da 13,73±0,12% va 90 °C da 11,63±0,15% ni tashkil etdi. Shunday qilib, bir xil tajriba davomiyligida qizdirish yuzasi haroratining oshirilishi don tarkibidan namlik ajralishini jadallashtirdi.

Sovitish bosqichidan keyin namlikning qo‘shimcha kamayishi kuzatildi. Wsov mos ravishda 14,53±0,06; 12,83±0,06 va 10,13±0,15% ni tashkil etdi. Quritishdan keyingi va sovitishdan keyingi namliklar orasidagi farq 70 °C rejimda o‘rtacha 0,37 foiz, 80 °C da 0,90 foiz va 90 °C da 1,50 foizni tashkil etdi. Bu sovitish zonasidan o‘tish jarayonida don massasida issiqlik va namlik almashinuvi ma’lum vaqt davomida davom etganini ko‘rsatadi.

Qizdirish yuzasining harorati oshishi donning chiqish haroratining ortishiga ham olib keldi. Quritishdan keyingi don harorati 70 °C rejimda 34,03±0,06 °C, 80 °C rejimda 36,90±0,10 °C va 90 °C rejimda 40,5±0,5 °C ni tashkil etdi. Demak, qizdirish yuzasi 90 °C gacha qizdirilgan taqdirda ham donning o‘rtacha chiqish harorati qizdirish yuzasi haroratidan ancha past bo‘lib qoldi. Bu

holat donning qizdirish yuzasi bilan cheklangan vaqt davomida kontaktda bo‘lishi, shnek yordamida uzluksiz siljitilishi va don qatlamidan havo oqimining o‘tishi bilan izohlanadi.

Sovitishdan keyin don harorati 70, 80 va 90 °C rejimlarida mos ravishda 32,10±0,10; 35,07±0,12 va 37,97±0,06 °C gacha pasaydi. Shunday qilib, sovitish bosqichi donning nafaqat termik holatini pasaytirgan, balki uning namlik ko‘rsatkichiga ham qo‘shimcha ta’sir ko‘rsatgan.

Munozara

Tajriba natijalarini umumlashtirish kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimida belgilangan 70–90 °C harorat rejimlarining asosan termoregulyatorning ulanish–uzilish davomiyligini o‘zgartirish hisobiga shakllanganini ko‘rsatdi. Transformator ikkilamchi zanjiridagi aktiv quvvat va qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati uchala harorat rejimida ham deyarli bir xil saqlangan bo‘lsa-da, qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti 0,563 dan 0,594 gacha oshdi. Bu belgilangan haroratning ortishi oniy elektr quvvatni oshirish orqali emas, balki qizdirish tizimining faol holatda turish davomiyligini uzaytirish orqali ta’minlanganini ko‘rsatadi.

Qizdirish yuzasi haroratining tebranish diapazoni 3,0–3,4 °C oralig‘ida saqlanishi elektrokontakt qizdirish tizimining siklli boshqaruv sharoitida barqaror ishlaganini ko‘rsatdi. Har bir belgilangan harorat rejimida uchta mustaqil tajribada olingan natijalarning o‘zaro yaqinligi ham tanlangan elektr-issiqlik rejimlarining takrorlanuvchanligini tasdiqlaydi. Shu jihatdan past kuchlanish va katta tok asosida ishlaydigan elektrokontakt qizdirish usuli qizdirish yuzasining haroratini boshqariladigan rejimda shakllantirish imkonini berdi.

Qizdirish yuzasi haroratining 70 dan 90 °C gacha oshirilishi bir xil, taxminan 5,2 daqiqalik quritish davomiyligida sholi doni namligining jadalroq kamayishiga olib keldi. Shu bilan birga, qizdirish yuzasi harorati 90 °C bo‘lgan rejimda ham sholi donining quritgichdan chiqishdagi o‘rtacha harorati 40,5 °C dan oshmadi. Bunga donning qizdirish yuzasi bilan cheklangan vaqt davomida kontaktda bo‘lishi, shnek yordamida uzluksiz siljitilishi va don qatlamidan havo oqimining o‘tishi ta’sir ko‘rsatgan deb baholash mumkin. Tajribada aniqlangan mazkur natijalar aynan sholi doniga tegishli bo‘lib, ularni boshqa don mahsulotlariga bevosita tatbiq etish uchun qo‘shimcha tajribalar talab etiladi.

Mazkur tadqiqotda 70, 80 va 90 °C rejimlardan birini texnologik jihatdan eng maqbul rejim sifatida tanlash maqsad qilinmadi. Asosiy e’tibor kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimining elektr yuklanishi, qizish tezligi, solishtirma sirt quvvati, siklli boshqaruv xususiyatlari va sholi doni bilan ishlashdagi termik holatini aniqlashga qaratildi. Olingan natijalar elektrokontakt qizdirish tizimini quritgichning mustaqil funksional qismi sifatida tavsiflash imkonini beradi hamda keyingi tadqiqotlarda uning quyosh havo kollektori bilan birgalikdagi ish rejimlarini va boshqa don mahsulotlarini quritishdagi samaradorligini alohida baholash uchun tajribaviy asos yaratadi.

Xulosa

Kombinatsiyalangan don quritgichi tarkibidagi elektrokontakt qizdirish tizimining elektr-issiqlik xususiyatlari sholi doni misolida qizdirish yuzasining 70, 80 va 90 °C belgilangan harorat rejimlarida tajribaviy tadqiq etildi. Tajribalar soyali sharoitda, quyosh havo kollektori ishga tushirilmagan va qizdirish yuzasiga bevosita quyosh nurlanishi tushmagan holda bajarildi. Shu sababli olingan natijalar elektrokontakt qizdirish tizimining mustaqil elektr-issiqlik xususiyatlarini tavsiflaydi. Transformator ikkilamchi zanjiridagi aktiv quvvat 538,97–540,48 W, qizdirish yuzasining solishtirma sirt quvvati esa 1531,2–1535,5 W/m² oralig‘ida bo‘ldi. Birlamchi zanjirning quvvat koeffitsiyenti 0,850–0,856, transformatorning tajribaviy foydali ish koeffitsiyenti esa 0,469–0,470 oralig‘ida aniqlandi. Belgilangan haroratning 70 dan 90 °C gacha oshirilishi ikkilamchi zanjirdagi oniy aktiv quvvatni sezilarli darajada o‘zgartirmadi. Bu qizdirish yuzasining turli harorat rejimlari asosan elektr quvvatini o‘zgartirish orqali emas, balki transformatorning faol ishlash davomiyligini boshqarish orqali shakllantirilganini ko‘rsatdi.

Qizdirish yuzasining donsiz holatda belgilangan haroratga chiqish davomiyligi 70 °C da 86,67±0,58 s, 80 °C da 90,33±0,58 s va 90 °C da 92,33±0,58 s ni tashkil etdi. O‘rtacha qizish tezligi 0,577–0,758 °C/s oralig‘ida bo‘ldi. Quritish bosqichida qizdirish tizimining faol ishlash koeffitsiyenti 0,563 dan 0,594 gacha oshdi.

Termoregulyatorning barqaror ishlash bosqichida qizdirish yuzasi haroratining tebranish diapazoni 3,0–3,4 °C ni tashkil etdi. Bu natijalar elektrokontakt qizdirish tizimining tanlangan rejimlarda barqaror va takrorlanuvchan siklli boshqarilishini ko‘rsatdi. Boshlang‘ich namligi 20% bo‘lgan sholi donining quritishdan keyingi namligi 70, 80 va 90 °C rejimlarda mos ravishda 14,90±0,10%, 13,73±0,12% va 11,63±0,15% gacha kamaydi. Quritgichdan chiqishdagi don harorati 34,03–40,50 °C, sovitishdan keyingi harorati esa 32,10–37,97 °C oralig‘ida bo‘ldi.

Olingan natijalar past kuchlanish va katta tok asosida ishlaydigan elektrokontakt qizdirish tizimining qizdirish yuzasini qisqa vaqt ichida belgilangan harorat rejimiga chiqarish va uni termoregulyator yordamida siklli boshqarish imkoniyatini tasdiqladi. Mazkur natijalar sholi donida o‘tkazilgan tajribalarga tegishli bo‘lib, tizimning boshqa don mahsulotlarini quritishdagi elektr-issiqlik va texnologik samaradorligini baholash uchun alohida tajribalar o‘tkazish talab etiladi. Keyingi tadqiqotlarda elektrokontakt qizdirish tizimining quyosh havo kollektori bilan birgalikdagi ish rejimlarini kompleks baholash maqsadga muvofiq.

Mualliflarning hissalari

Konseptualizatsiya va tajriba metodikasi, N.S., B.B. va O.M.; ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash, N.S., B.B. va O.M.; hisoblash va rasmiy tahlil, N.S., B.B. va O.M.; natijalarni tahlil qilish va muhokama etish, N.S., B.B. va O.M.; qo‘lyozmani tayyorlash va tahrirlash, N.S., B.B. va O.M. Barcha mualliflar qo‘lyozmaning yakuniy variantini ko‘rib chiqdilar, ma’qulladilar va nashrga taqdim etishga rozilik bildirdilar."

Authors’ contribution

Conceptualization and experimental methodology, N.S., B.B. and O.M.; data collection and processing, N.S., B.B. and O.M.; computational and formal analysis, N.S., B.B. and O.M.; analysis and discussion of results, N.S., B.B. and O.M.; preparation and editing of the manuscript, N.S., B.B. and O.M. All authors reviewed, approved and agreed to submit the final version of the manuscript for publication."

Moliyalashtirish

Ushbu tadqiqot tashqi moliyalashtirishsiz amalga oshirildi.

Funding source

This research was conducted without external funding.

Etika tamoyillariga muvofiqlik

Ushbu tadqiqotda insonlar yoki hayvonlar ishtirok etmaganligi sababli maxsus etik ruxsat talab etilmadi. Tadqiqot umumiy ilmiy-etika tamoyillariga muvofiq amalga oshirildi.

Ethics approval

This study did not involve human participants or animals; therefore, specific ethical approval was not required. The research was conducted in accordance with generally accepted principles of scientific ethics.

Nashrga xabardor qilingan rozilik

"Barcha tadqiqot ishtirokchilaridan xabardor qilingan rozilik olindi."

Consent for publication

"Informed consent was obtained from all study participants."

Ma’lumotlar mavjudligi to’g’risidagi bayonot

Ushbu tadqiqot natijalarini tasdiqlovchi ma’lumotlar asosli so‘rov asosida tegishli muallifdan olinishi mumkin.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Rahmatnomalar

Mualliflar ushbu tadqiqot doirasidagi tajriba-sinov ishlarini o‘tkazish uchun zarur laboratoriya sharoitlari va moddiy-texnik imkoniyatlarni yaratib bergan “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini

mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universiteti rahbariyatiga samimiy minnatdorchilik bildiradilar.

Acknowledgments

The authors sincerely acknowledge the National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers” for providing the laboratory facilities, technical resources, and favorable conditions required to conduct the experimental studies.

Manfaatlar to’qnashuvi

Mualliflar manfaatlar to‘qnashuvi mavjud emasligini ma’lum qiladilar.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Qisqartmalar

LATR	Laboratoriya avtotransformatori
RMS	O‘rta kvadratik qiymat (Root Mean Square)
APLMF	Asia-Pacific Legal Metrology Forum

Adabiyot

[1] Tian, J.; Ogawa, Y.; Singh, J.; Kaur, L. (Eds.). Science of Rice Chemistry and Nutrition. Springer Nature Singapore, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3224-5.
[2] [2]. Statista. Total rice consumption worldwide from 2008/2009 to 2024/2025. Statistical report, 2025.
[3] O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti huzuridagi Statistika agentligi. Barcha toifadagi xo‘jaliklarda yetishtirilgan sholi, 2010–2024 yillar statistik ma’lumotlari.
[4] UNESCO Intangible Cultural Heritage. Palov culture and tradition. Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity, Uzbekistan, 2016, Nomination file No. 01166.
[5] Samaddar, A.; Azam, M.M.; Singaravadivel, K.; Venkatachalapathy, N.; Swain, B.B.; Mishra, P. Postharvest Management and Value Addition of Rice and Its By-Products. In: The Future Rice Strategy for India. Elsevier, 2017; pp. 301–334.
[6] Zhang, X.; He, X.; Yang, F.; Chen, T.; Wen, X.; Sun, S.; Luo, F.; Lin, Q. A Novel Evaluation Method for Rice Drying Based on Water Migration and Molecular Motion Law Analysis. Food Analytical Methods, 2024, 17, 166–177.
[7] Chojnacka, K.; Mikula, K.; Izydorczyk, G.; Skrzypczak, D.; Witek-Krowiak, A.; Moustakas, K.; Ludwig, W.; Kułażyński, M. Improvements in drying technologies: Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. Journal of Cleaner Production, 2021, 320, 128706.
[8] Huang, Y.-T.; Wu, W.; Zou, W.-X.; Wu, H.-P.; Cao, D.-D. Drying temperature affects rice seed vigor via gibberellin, abscisic acid, and antioxidant enzyme metabolism. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2020, 21(10), 796–810.
[9] Xu, X.; Zhao, T.; Ma, J.; Song, Q.; Wei, Q.; Sun, W. Application of Two-Stage Variable Temperature Drying in Hot Air-Drying of Paddy Rice. Foods, 2022, 11, 888.
[10] Utari, F.D.; Yasintasia, C.; Ratridewi, M.; A’yuni, D.Q.; Kumoro, A.C.; Djaeni, M.; Asiah, N. Evaluation of Paddy Drying with Vertical Screw Conveyor Dryer (VSCD) at Different Air Velocities and Temperatures. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2022, 174, 108881.
[11] Moraes, R.S.; Coradi, P.C.; Nunes, M.T.; Leal, M.M.; Müller, E.I.; Teodoro, P.E.; Flores, E.M.M. Thick layer drying and storage of rice grain cultivars in silo-dryer-aerator: Quality evaluation at low drying temperature. Heliyon, 2023, 9, e17962.
[12] Alam, M.S.; Wazed, M.A.; Hasan, S.M.K.; Ahmed, M.; Alam, M.S.; Sarker, M.S.H. Quality aspects of paddy grain and seed dried in HSTU mobile grain and seed dryer integrated with a dual heating system. Heliyon, 2024, 10, e40835.
[13] Jyoti, Y.K.; Dash, S.K.; Rayaguru, K.; Pal, U.S.; Mishra, N.; Ananth, P.N.; Khandai, S. Enhancement of thermal and techno-economic performance and prediction of drying kinetics of paddy dried in solar bubble dryer. Energy Nexus, 2023, 11, 100224.
[14] Bekkulov, B.; Aliyev, R.; Rahmonkulov, T. Mobile device for drying paddy and justification of its parameters. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2021, 10(1), 133–138.
[15] Bekkulov, B.; Aliyev, R.; Rakhmonkulov, T.; Atabayev, K.; Yusupova, R.; Khadjieva, S. Study of mechanical damage of paddy (rice) during drying in the device. E3S Web of Conferences, 2024, 510, 02003.

[16] Kurzin, N.N.; Normov, D.A.; Lebedev, D.V.; Rozhkov, E.A. Elektrotekhnologii v selskom khozyaystve. Krasnodar: KubGAU, 2020.
[17] Logachev, M.V.; Ivanitskiy, N.I.; Davidovich, L.M. Raschety nagrevatelnykh ustroystv. Chast 2. Raschety elektricheskikh pechey i ustanovok. Minsk: BNTU, 2010.
[18] Aliferov, A.; Lupi, S. Induction and Direct Resistance Heating of Metals. Novosibirsk: NSTU Publisher, 2011.
[19] Xie, Q.; Gao, M.; Huang, X. Fire risk and behavior of rice during the convective drying process. Fire Safety Journal, 2020, 115, 103013.
[20] Asia-Pacific Legal Metrology Forum. APLMF Guide Document on Rice Moisture Measurement. May 2017 edition.

Nashriyot javobgar emas/ eslatmasi: Barcha nashrlarda keltirilgan bayonotlar, fikrlar va ma'lumotlar faqat mualliflar va ishtirokchilarga tegishlidir, na Jurnal va na muharrirlar. Jurnal va muharrirlar, mazkur kontentda keltirilgan har qanday g'oyalar, usullar, ko'rsatmalar yoki mahsulotlar natijasida insonlar yoki mulkka yetkazilgan har qanday zarar uchun javobgar emas.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals.The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.