

**БУХОРО МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖА БЕРУВЧИ  
PhD.03/30.12.2019.Т.101.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ХУЖАКУЛОВ УЛУГБЕК КАРИМКУЛОВИЧ**

**ЯҚОН ИЛДИЗМЕВАСИНИ КОНВЕКТИВ ҚУРИТИШ  
ТЕХНОЛОГИЯСИДА ДИФФУЗИЯ ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК  
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

**02.00.16 – Кимё технологияси ва озиқ-овқат ишлаб чиқариш жараёнлари  
ва аппаратлари (техника фанлари)**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)  
on technical sciences**

**Хужакулов Улугбек Каримкулович**

Якон илдизмевасини конвектив қуритиш технологиясида диффузия жараёнини  
математик моделлаштириш .....3

**Хужакулов Улугбек Каримкулович**

Математическое моделирование процесса диффузии в технологии  
конвективной сушки клубней якона ..... 21

**Khujakulov Ulugbek Karimkulovich**

Mathematical modeling of the diffusion process in the technology of convective  
drying of yacon tubers.....39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works .....42

**БУХОРО МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ  
PhD.03/30.12.2019.Т.101.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ХУЖАКУЛОВ УЛУГБЕК КАРИМКУЛОВИЧ**

**ЯҚОН ИЛДИЗМЕВАСИНИ КОНВЕКТИВ ҚУРИТИШ  
ТЕХНОЛОГИЯСИДА ДИФФУЗИЯ ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК  
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

**02.00.16 – Кимё технологияси ва озиқ-овқат ишлаб чиқариш жараёнлари  
ва аппаратлари (техника фанлари)**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида №В2021.4.PhD/T2434 рақам билан рўйхатга олинган.

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифада ([www.bmti.uz](http://www.bmti.uz)) ҳамда «Ziyoune» ахборот-таълим порталида ([www.ziyoune.net](http://www.ziyoune.net)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:** Сафаров Жасур Эсиргапович  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** Абдурахмонов Олим Рустамович  
техника фанлари доктори, профессор

Машарипова Зулхумар Атабековна,  
техника фанлари номзоди, доцент

**Етакчи ташкилот:** Қарши муҳандислик-иқтисодиёт институти

Диссертация химояси Бухоро муҳандислик-технология институти ҳузуридаги PhD.03/30.12.2019.T.101.01 рақамли Илмий кенгашининг 2022 йил «10» сентябрь соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 200117, Бухоро, Қ.Муртазаев кўчаси, 15-уй. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-78-84; e-mail: [bmti\\_info@edu.uz](mailto:bmti_info@edu.uz)). Бухоро муҳандислик-технология институти 2- биноси, 2-қават, анжуманлар зали).

Диссертация билан Бухоро муҳандислик-технология институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№352 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 200117, Бухоро шаҳар, Қ.Муртазаев кўчаси, 15-уй. Тел.: (+99865) 223-78-84.)

Диссертация автореферати 2021 йил «25» декабрь уни тарқатилди.  
(2021 йил «29» ноябрь даги №12 - рақамли реестр баённомаси)



**Н.Р.Баракаев**

Илмий даража берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

**Р.Р.Ҳайитов**

Илмий даража берувчи илмий кенгаш котиби т.ф.д., кат. ил. ход.

**Ш.М. Ходжиев**

Илмий даража берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси т.ф.н., доцент

## КИРИШ (фалсафа доктори(PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти.** Бугунги кунда дунё микёсида кузатилаётган экологик ўзгаришлар, сифатли ҳамда етарли даражада қишлоқ-хўжалик маҳсулотлари етиштириш жараёнларига салбий таъсир кўрсатмоқда. Айниқса, дунё аҳолисини кўпайиши озиқ-овқат маҳсулотларига бўлган талабни ошишига олиб келмоқда. Шунга кўра, озиқ-овқат маҳсулотларини қуритиш учун техник воситалар ва технологияларни такомиллаштириш орқали юқори сифатли, функционал маҳсулотларни олишга йўналтирилган янги қуритиш усулларини яратиш муҳим аҳамият касб этади.

Жаҳонда озиқ-овқат маҳсулотларини иссиқлик оқими ва ИҚ нурлари ёрдамида қуритиш технологиясини оптималлаштириш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан, қайта ишлаш жараёнида маҳсулот таркибидаги биофаол моддаларни сақлаб қоладиган энергия тежамкор техника ва технологияни ишлаб чиқиш, хомашёни қуритиш усулларини ҳамда юқори сифатли маҳсулот олиш технологияларини такомиллаштириш, маҳсулотни иссиқлик фаоллигини ҳисобга олган ҳолда иссиқлик алмашинув жараёнларини аниқлашга қатъий эътибор қаратилмоқда.

Республикамизда қишлоқ хўжалиги маҳсулотларини етиштириш ва қайта ишлаш саноатини самарали ривожлантириш, қишлоқ ва ўрмон хўжалиги маҳсулотларини юқори сифатли қайта ишлаш, импорт ўрнини босувчи ва экспортга йўналтирилган озиқ-овқат ва фармацевтика маҳсулотлари ишлаб чиқаришга алоҳида эътибор берилиб, муайян илмий натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида “макроиқтисодий барқарорлигини мустаҳкамлаш ва иқтисодий ўсишнинг юқори суръатларини сақлаш, миллий иқтисодийнинг рақобатбардошлигини ошириш... саноатдаги энергия ва ресурслардан фойдаланишни камайтириш, энергиятежамкор технологияларни кенг жорий этиш”<sup>1</sup> бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, конвектив қуритиш технологик жараёнини моделлаштириш, диффузия ва иссиқлик ўтказувчанлик орасидаги боғланишнинг математик моделларини тадқиқ этиш, қуритиш жараёнида иссиқлик ва намлик узатиш, яқуний маҳсулотнинг иссиқликфизик хусусиятлари ва кимёвий таркибини аниқлаш ҳамда қуритилган маҳсулотлар сифатини яхшилаш муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги, 2018 йил 29 мартдаги ПҚ-5388-сон “Ўзбекистон Республикасида мева-сабзавотчиликни жадал ривожлантириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги ва 2019 йил 10 апрелдаги ПҚ-5707-сон “2019-2021 йилларда Республика фармацевтика саноатини ривожлантиришни жадаллаштириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган

<sup>1</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги фармони

вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг V. «Қишлоқ хўжалиги, биотехнология, экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси:** Озиқ-овқат маҳсулотларини қуритиш жараёни ва технологиясини моделлаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар қуйидаги хорижий олимлар томонидан олиб борилган: А.Каяа, А.Налдер, Z.Wang, E.Akpinar, М.М., А.Нуссайн Милет, Шаһари Нор Азні, В.В.Касаткин, А.В.Лыков, А.С.Гинзбург, В.В.Кафаров, Б.С. Сажин, шунингдек, маҳаллий олимлардан: Н.Р.Юсупбеков, О.Ф.Сафаров, А.А.Артиков, Дж.П.Мухиддинов, Х.С.Нурмухамедов, Х.Ф.Джураев, Ж.М.Курбанов, Қ.О.Додаев ва бошқалар. Улар томонидан ғовакли материалларни қуритишнинг илмий асослари ва хомашёни қуритишда замонавий технологияларни жорий этиш бўйича амалий тавсиялар ишлаб чиқилган.

Шу билан биргаликда, жаҳон ҳамжамияти олимлари қуритиш технологияси ва ускуналарини такомиллаштириш, озиқ-овқат маҳсулотларини қуритиш технологияси, маҳсулотларни қуритиш жараёнини математик моделлаштириш, хомашёда мавжуд биологик фаол моддаларни сақлашни ҳисобга олувчи қуритиш усулларини ишлаб чиқиш бўйича устувор йўналишларда фаол изланишлар олиб боришмоқда. Бироқ, яқон илдизмеваларини конвектив қуритиш технологиясида диффузия жараёнини математик моделлаштириш етарли даражада олиб борилмаган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетининг илмий-тадқиқот ишлари режасига мувофиқ №А-4-38 «Доривор ўтларни сифатли қуритишда суюқ иссиқлик ташувчи ёрдамида ИҚ нур ҳосил қилиш орқали энергия тежамкор гелио қуритиш қурилмасини ишлаб чиқиш» (2015-2017 йй.) мавзусидаги амалий илмий лойиҳаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** яқон илдизмеваларини конвектив қуритиш технологиясида диффузия жараёнини математик моделлаштиришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

қуритиш вақтида кимёвий таркиби ва шифобахш хусусиятларини сақлаб қолиш нуктаи назаридан яқон илдизмеваларининг иссиқликфизик ва кимёвий тавсифини шакллантириш;

буғланиш содир бўладиган чегарада муҳим аҳамиятга эга бўлган  $\bar{\lambda}$  яширин иссиқлик агентинининг қийматини аниқлаш;

яқон илдизмеваларини қуритиш жараёнининг икки ўлчамли моделини ишлаб чиқиш;

намлиги юқори бўлган яқонни қуритишда қисқариш самарадорлиги билан бир вақтда иссиқлик ва масса алмашиниш жараёнларини тавсифловчи математик моделни ишлаб чиқиш;

олинган тажриба натижаларини замонавий COMSOL, MATLAB 6.5 компьютер дастурлари ёрдамида қайта ишлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида яқон илдизмеваларни (*Smallanthus*

*sonchifolius*) куритиш жараёни ва жиҳозлари олинган.

**Тадқиқотнинг предметини** якон илдизмеваларини куритиш жараёнининг параметрлари ташкил этган.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация ишини бажаришда кимёвий технологиянинг назарий асосларидан фойдаланилган ҳолда тизимли таҳлил қилиш ҳамда мураккаб техник ва технологик тизимларни синтез қилиш методологияси, технологик жараён ва тизимларни математик моделлаштириш ва оптималлаштириш усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

якон илдизмевасини (*Smallanthus sonchifolius*) куритиш жараёнининг бир фазали ва икки ўлчовли намлик-иссиқлик моделлари ишлаб чиқилган;

$Nu > 1$  бўлганда конвекция иссиқлик ўтказилишга энг кам қаршилик кўрсатиши аниқланган;

куритиш вақти, сирт чегараси параметрларнинг қийматлари  $Sh = 18$ ,  $Nu = 0,2$  ва яширин иссиқлик  $\lambda = 0,4$  ларга боғлиқ эканлиги аниқланган;

якон илдизмеваларининг (*Smallanthus sonchifolius*) қисқариш жараёнида диффузия ва иссиқлик ўтказувчанлик ўртасидаги муносабатнинг математик модели ишлаб чиқилган;

куритишнинг технологик параметрлари ишлаб чиқилган ва намлик диффузиясининг самарали коэффициентлари олинган;

мажбурий равишда конвекция ёрдамида якон илдизмеваларини қуришига иссиқ ҳавонинг тезлиги, бўлақларнинг қалинлиги ҳамда ҳароратнинг таъсир параметрлар технологияси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

куритилган якон илдизмевасининг сифат кўрсаткичлари ва унинг иссиқлик ўтказувчанлик хусусияти аниқланган;

Шервуд сонини  $Sh = 18$  деб қабул қилган ҳолда, суюқликнинг чегара қатлами орқали конвекциясига қаршиликка нисбатан маҳсулот ичида диффузия тарқалишига қаршиликни самарали усули аниқланди;

куритиш вақтида ҳароратнинг ошиши ва намликнинг камайиши сирт чегараси параметрларнинг қийматлари  $Sh = 18$ ,  $Nu = 0,2$  ва яширин иссиқлик  $\lambda = 0,4$  бўлганда намунанинг турли қатламларида ҳарорат ўзгариши қонунияти аниқланган;

намликнинг ўзгариши 65 дан 85 °C гача бўлган ҳарорат оралиғида куритиш вақтига боғлиқ бўлади. 75 °C ҳаво ҳароратида куритиш учун  $D_{эфф}$  нинг қийматлари, ҳаво тезлиги 1,05 м/с ва якон бўлағи қалинлиги 4 мм эканлиги  $5,7091 \times 10^{-10}$  дан  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с гача бўлган диапазонда аниқланган;

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** олинган натижалар замонавий усуллар ва воситалар ёрдамида амалга оширилган назарий ва экспериментал тадқиқот натижаларининг уйғунлиги, ҳамда замонавий COMSOL, MATLAB 6.5, Microsoft Excel компьютер дастурлари ёрдамида амалга оширилганлиги билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, якон илдизмеваларини куритишда иссиқлик ва намлик ўтказилиш жараёни ҳисобланганлиги, ушбу ечимнинг сонли усуллари берилганлиги, намлиги юқори бўлган диффузияни ҳисобга олган ҳолда изотермик куритиш жараёнларини моделлаштирилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти хомашё таркибидаги биологик фаол моддаларни сақлаб қолиш ва материални қайта ишлаш жараёнида

йўқотишларни минималлаштириш билан биргаликда якон илдизмеваларини қуритиш учун ресурс ва энергиятежамкор технологияларни ишлаб чиқишга хизмат қилади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Якон илдизмеваларини конвектив қуритиш технологиясида диффузия жараёнини математик моделлаштириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

якон илдизмеваларини қуритиш учун энергиятежамкор технологияси «WORLD FARM BUSINESS» МЧЖда ишлаб чиқаришга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Қишлоқ хўжалиги вазирлигининг 2021 йил 5 ноябрдаги 02/027-4505-сон маълумотномаси). Натижада, юқори самарали технологиядан фойдаланиш ҳисобига маҳсулот ишлаб чиқариш 1,1 баробар кўпайиши ва хомашё йўқотилишини 6% камайтириш имконини берган;

якон илдизмеваларини қуритиш усули «WORLD FARM BUSINESS» МЧЖда ишлаб чиқаришга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Қишлоқ хўжалиги вазирлигининг 2021 йил 5 ноябрдаги 02/027-4505-сон маълумотномаси). Натижада, юқори самарали усулдан фойдаланиш ҳисобига якуний маҳсулотнинг биологик фаол моддаларини 90-95% сақлаб қолиш имконини берган;

якон илдизмеваларини қуритиш бўйича ишлаб чиқилган техника ва технологияси «WORLD FARM BUSINESS» МЧЖда амалиётга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Қишлоқ хўжалиги вазирлигининг 2021 йил 5 ноябрдаги 02/027-4505-сон маълумотномаси). Натижада, иссиқлик конвекциясидан фойдаланган ҳолда юқори самарали энергиятежамкор қуритиш қурилмасини жорий этиш ҳамда диффузия ҳисобига мавжуд технология ва қурилмаларга нисбатан 1,2 баробар кам энергия сарфлаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 5 та халқаро ва 7 та республика илмий-техник анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 19 та илмий ишлар, шу жумладан, 7 та илмий мақола, булардан 2 та халқаро журналларда, 5 та республика журналларида чоп этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация иши кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг асосий қисми 120 бетни ташкил этиб, унда 41 та расм ва 14 та жадваллар келтирилган.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ ТАРКИБИ

Диссертациянинг кириш қисмида мавзунинг долзарблиги, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, шунингдек, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиясини ривожлантиришнинг устувор йўналиш-ларига тегишлилиги, ишнинг илмий янгилиги ва амалий натижаларининг ишончлилиги, ҳамда ушбу тадқиқот натижалари ишлаб чиқаришга жорий қилинганлиги тўғрисида маълумотлар келтирилган.

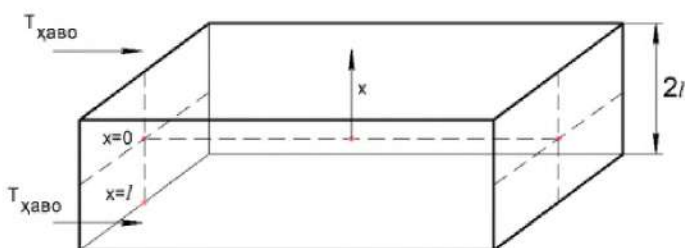
Диссертациянинг биринчи бобида “**Якон илдизмеваларини (*smallanthus sonchifolius*) қуритиш жараёнини моделлаштириш ҳақида замонавий тасаввурлар**” таҳлил қилинган. Мавжуд жараён ва аппаратлар, саноатда озик-овқат маҳсулотларини қайта ишлаш, қуритиш қурилмасида содир бўладиган жараёнларни математик моделлаштириш, қуритиш қурилмаларини ҳисоблаш ва



лойихалаш бўйича илмий адабиётларда таҳлилий шарҳ ўтказилган.

Мамлакат қишлоқ ҳўжалигида кенг тарқалган қуриштиш қурилмаларини баҳолаб, якон илдизмевасини қуриштишнинг саноат усулларини яратишни талаб қиладиган муаммолар мавжуд деган хулосага келинди. Бўлимнинг мавжуд материалларини таҳлил қилиш асосида ишнинг асосий мақсадлари ва вазифалари белгиланди.

Диссертациянинг “**Якон илдизмеваларини қуриштишнинг бир фазали намлик-иссиқлик модели**” номли иккинчи бобида якон илдизмеваларини қуриштишнинг бир фазали намлик-иссиқлик модели натижалари келтирилган. Яконни қуриштиш вақтида иссиқлик ва намлик тақсимотининг оддий моделини ишлаб чиқиш учун иссиқлик ва масса узатишнинг умумий формуласи шакллантирилди. Физик ечим дастлаб бир хил ҳароратда  $T_0$  ва бир турдаги намликда  $W_0$  қалинлиги 3 мм ( $L$ ) бўлган якон бўлагини ўз ичига олади. Қуриштиш фақат  $x=\pm l$  сиртларда самарали ҳисобланади. Қуриштиш корпусининг юзаси намлик миқдори  $W$  ва иссиқ ҳавонинг доимий ҳарорати  $T$  учун конвектив чегара шароитларини таъминлаган ҳолда ҳаво билан контактда бўлади. Кўриб чиқиляётган муаммо 1-расмда кўрсатилганидек намуна бўлагининг ўрта текислигига нисбатан симметрик бўлади.



**1-расм. Якон илдизмевасини қуриштиш жараёнининг бир ўлчамли модели схемаси**

Агар бўлак ноаниқ узунликда бўлса, ундаги намлик  $W(x)$  ва нотурғун ҳарорат  $T(x)$  намлик ва энергияни узатиш хусусий ҳолатдаги қисман дифференциал тенгламалар системаси ёрдамида ифодаланади:

$$p_s \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D p_s \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (1)$$

$$p_s G_z \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (2)$$

бу ерда  $D$  – диффузия коэффициенти;  $p_s$  - қаттиқ жисмнинг зичлиги;  $G_z$  - солиштирма иссиқлик сиғими;  $k$  - иссиқлик ўтказувчанлик.

Симметриклик туфайли ушбу ечим  $x=0$  нуқтада марказ чизиғидан  $x=l$  сиртга жойлашади. Доимий иссиқлик ўтказувчанликни  $\alpha = \frac{k}{p_s G_z}$  ва доимий диффузия коэффициентини  $D=D_0$  деб қабул қилсак, (1) ва (2) тенгламалар бизга қуйидагиларни беради:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_0 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l \quad (4)$$

Юқоридаги умумий ёндашувнинг умумлаштирилиши диффузия коэффициентининг ҳароратга боғлиқлигидир. Диффузия коэффициенти ҳарорат функцияси  $D = \bar{D}(T)$  сифатида олинса, (1) тенглама қуйидагича бўлади

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \bar{D} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \bar{D}}{\partial x}, \quad (5)$$

бу ерда  $\bar{D}' = \frac{d\bar{D}}{dT}$ .

Сув бўғлари оқимининг намланган сиртдан ҳаво томонга

ҳаракатлантирувчи кучи, ҳаво таркибидаги намлик  $G_{\text{ҳаво}}$  ва сиртдаги сууқ сув плёнкаси шаклидаги сув миқдори  $G_{\text{сирт}}$  ўртасидаги фарқ ҳисобланади. Бу ҳолда сиртдаги чегаравий шарт қуйидагича бўлади

$$D_0 p_s \frac{\partial W}{\partial x} = -h_b (G_{\text{сирт}} - G_{\text{ҳаво}}), \quad x = l \quad \text{да} \quad (6)$$

Сувсизлантирилган яконда хомашёнинг ташқи сиртига кучсиз ички буғланиш ва буғ ўтказиш ҳисобга олинмади. Биринчи ҳолда, изотермик диффузия, доимий намлик диффузияси ( $D=D_0$ ), доимий бошланғич намлик даражаси  $W=W_0$  ва  $T=T_0$  бўлган иссиқлик ўтказувчанлиги  $k=k_0$  билан боғлиқ қисқаришсиз ( $x=l$ ) моделларни кўриб чиқамиз. Бундай оддий ҳолларда (3) ва (4) тенгламаларни (6) чегаравий шартлар билан биргаликда ечамиз. Ушбу моделда иссиқ ҳаво ҳарорати  $T_{\text{ҳаво}} > T_0$  ташқи сиртдаги намликнинг буғланишидан намлик градиенти ҳосил қилиш учун маҳсулотнинг сирт ҳароратини  $T_{\text{сирт}}$  берганда, намлик маҳсулотдан чиқариб юборилади. Бошқарув тенгламалари сифатида қуйидагилар олинади

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_0 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_0 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l, \quad (8)$$

Ўлчамсиз ўзгарувчиларни қабул қилган ҳолда

$$\bar{W} = \frac{W}{W_0}, \quad \bar{T} = \frac{T-T_0}{T_{\text{ҳаво}}-T_0}, \quad \tau = \frac{D_0 t}{l^2} \quad \text{ва} \quad \delta = \frac{x}{l}, \quad (9)$$

қуйидаги иссиқлик ва диффузияни бошқарувчи тенгламаларни оламиз

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \delta^2}, \quad \text{и} \quad \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \delta^2}, \quad (10)$$

бу ерда,  $Le$  (Любис сони) – иссиқлик ўтказувчанлик ва диффузия ўртасидаги муносабатни тавсифловчи молекуляр физикадаги ўхшашлик мезони.

$\tau=0$  да бошланғич шартлар  $\bar{W} = 1$  ва  $\bar{T} = 0$  ва чегара шартлари қуйидагича бўлади

$\delta=0$  да:

$$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \delta}\right) = 0, \quad \text{ва} \quad \left(\frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta}\right) = 0, \quad (11)$$

ва  $\delta=1$  да:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta} = -Sh(\bar{G}_{\text{сирт}} - 1), \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \delta} = -Nu(\bar{T}_{\text{сирт}} - 1) + \bar{\lambda} \frac{1}{Le} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta}. \quad (13)$$

бу ерда,  $Nu$  (Нуссельт сони) – конвекция ҳисобига иссиқлик узатиш интенсивлиги ва иссиқлик ўтказувчанлик (стационар муҳитда) ҳисобига иссиқлик алмашилиш интенсивлиги ўртасидаги муносабатни тавсифловчи иссиқлик жараёнларининг ўхшашлик мезони.

Бир нечта ўлчовсиз гуруҳлар қуйидагича аниқланади:

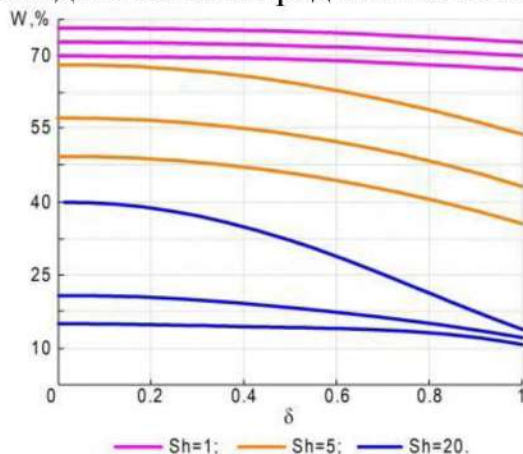
$$Sh = \frac{h_b l G_{\text{ҳаво}}}{D_0 W_0 p_s}, \quad \bar{G}_{\text{сирт}} = \frac{G_{\text{сирт}}}{G_{\text{ҳаво}}}, \quad Nu = \frac{hl}{k}, \quad Le = \frac{\alpha}{D_0}, \quad \text{ва} \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{G_z (T_{\text{ҳаво}} - T_0)}$$

бу ерда  $Sh$  (Шервуд сони) – конвектив узатишнинг диффузияга нисбатига тенг бўлган масса алмашилишнинг ўхшашлик мезони.

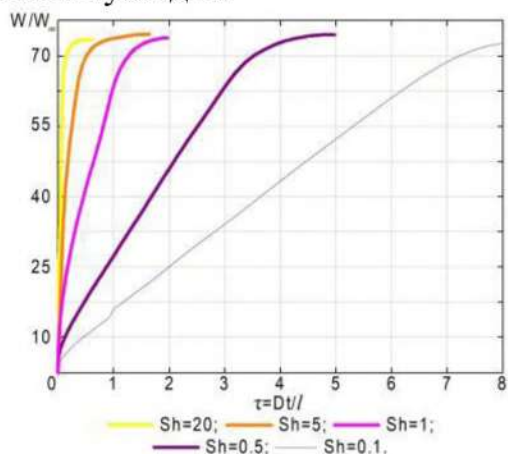
COMSOL дастури қуриштириш жараёни тизими учун ишлатилади, бу эса модель тенгламаларининг сонли ечимига мос келади. Биз моделнинг геометриясини тузамиз, чегара ва панжара параметрларини ўрнатамиз ҳамда якуний ечимни ҳисоблаймиз. Вақтга боғлиқ муаммо ҳар бир вақт қадами учун

чизикли бўлмаган тизим тенгламасига олиб келувчи, вақтни сакраб ўтиш тарзида ўзгаришининг ноаниқ схемаси ёрдамида ечилди. Ньютон усули ҳар бир чизикли бўлмаган тенгламалар тизимини ечиш учун қўлланилди, чизикли тизимларнинг бевосита ечими эса ҳосил бўлган чизикли тенгламалар тизимини ечишда қабул қилинди. Нисбий ва абсолют чегара қийматлари мос равишда 0,001 ва 0,0001 қилиб белгиланди. (10) тенглама COMSOLга умумий шаклда ҳарорат ва намлик учун киритилди.

$Sh$  сони сувнинг диффузия коэффициентига нисбатан сирт конвектив масса узатишни ифодалайди. 2-расмда эса  $Sh$  параметрни ўзгартирувчи  $W$  намлик порфилининг ҳаракати кўрсатилган. 2-расмда  $Sh$  нинг катта таъсир кўрсатишини кўришимиз мумкин.  $Sh=1$  бўлганда натижалар шуни кўрсатадики, кечаётган жараённинг исталган вақтида яқон илдизмевалари орқали намликнинг тенг тақсимланишини башорат қилиш мумкин. Бироқ, бу ҳол яқондаги намлик градиенти аҳамиятли бўлган қуритиш жараёни учун қўлланилмайди. Мисол учун,  $D_0=10^{-10}$  да қалинлиги 3-5 мм бўлган яқон учун масса узатиш коэффициенти  $h_e=10^{-3}$  дан  $10^{-6}$  гача ораликда бўлади, бундай ҳолда  $Sh$  нинг қиймати 8 дан юқорини ташкил қилади. Бунда яқоннинг диффузив қаршилиги,  $Sh>1$  бўлган суюқликнинг чегаравий қатлами орқали конвекция қаршилигидан анча юқори бўлади, шунинг учун ушбу ҳодиса диффузия назорати ҳисобланади. Диффузион назорат орқали қуритишда яқон учун  $Sh$  нинг қиймати 18 дан катта бўлиб, бу шароитда ҳавонинг тезлиги ёки намлиги қуритишга таъсир кўрсатмайди. Тажрибаларда  $Sh$  сони 30 дан катта бўлганда ҳамда иссиқ ҳавонинг тезлиги ўзгартирилганда, намликнинг қуритиш эгри чизиғи амалда устма-уст тушади, бу эса қуритиш диффузион назорат орқали амалга оширилишини кўрсатади. Моделлаштиришда биз  $Sh$  нинг ортиб бориши намликни тез фурсатда камайишига олиб келишини, сирт ва марказ орасидаги намлик градиенти анча катта эканлигини кузатдик.



**2-расм. Қайд этилган қиймат  $\zeta = 2,36$  ва  $Sh$  нинг турли қийматлари учун  $\tau=0,4, 1$  ва  $1,6$  вақт бирлигида намлик профили**

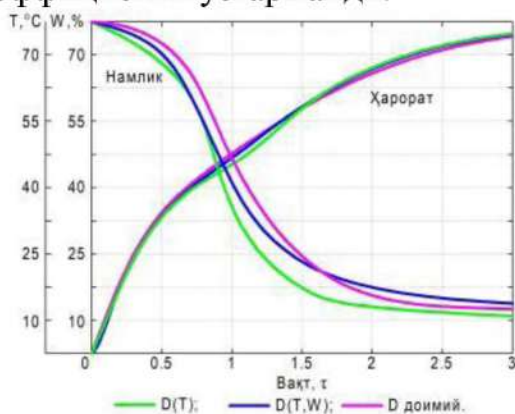


**3-расм. Бўғланиш вақтида турли қийматларга эга бўлган сиртда намликни йўқотилиш миқдори**

3-расмда  $Sh$  нинг турли қийматлари ҳамда бўғланиш вақтида намликни йўқотилиш миқдорининг графиги келтирилган бўлиб, у  $W_t/W_\infty$  ни кўрсатувчи графикка мос келади, яъни вақт ўтиши билан сиртда ҳосил бўлган қолдиқ

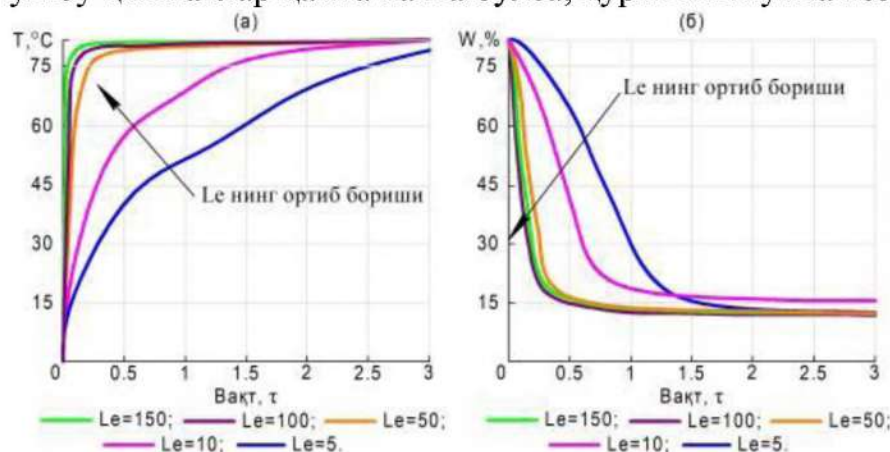
намлик  $Sh$  сони қанча юқори бўлса, қуритиш ҳавоси билан намликнинг мувозанати шунча тез содир бўлишини ифодалайди.

4-расмда диффузия коэффицентининг турли қийматлари билан яқон марказида намликнинг камайиши ва ҳароратнинг ортиши профили келтирилган. Бундан кўринадики,  $D$  ва  $(T, W)$  константаларга нисбатан ҳароратга боғлиқ бўлган диффузия коэффиценти  $\bar{D}(T)$  учун намлик тезроқ камаяди. Бунинг сабаби шундаки, қуритиш вақтида ҳароратнинг ортиши натижасида диффузия коэффиценти ҳам мос равишда ошиб боради. Агарда биз  $D$  ни доимий сифатда қабул қилсак, қуритиш вақтида диффузия коэффиценти ўзгармайди.



**4-расм. Диффузия коэффицентининг турли қийматлари учун марказдаги ҳарорат ва намлик профили. Параметрларнинг қийматлари  $Sh=8, Nu=0,2$  ва  $\bar{\lambda}=0,4$**

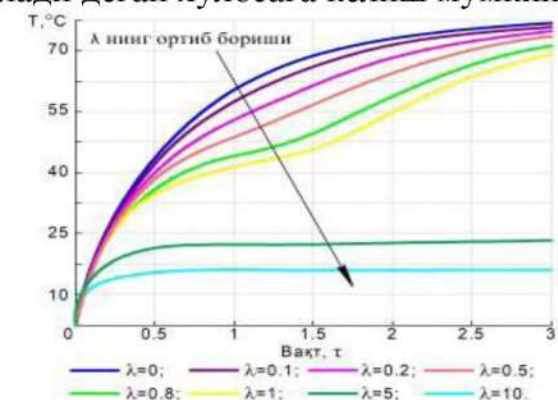
5-расмда (а) ҳароратнинг ўзгаришлари кўрсатилган.  $Le$  нинг қиймати ошган сари ҳарорат мос равишда ортиб боради. 5-расмда (б) эса  $Sh$  нинг ўзгармас қиймати ҳамда  $Le$  нинг ўзгарувчан қийматларида сиртдаги намлик келтирилган.  $Le$  қийматининг ошиши намликни камайишга ўз таъсирини кўрсатади. Сиртдаги намлик  $Le$  нинг юқори қийматларида тезроқ камайдди. 5-расмдан биз  $Le$  ва  $Sh$  қуритишга ўз таъсирини кўрсатади деган хулосага келдик: ушбу қийматлар қанча катта бўлса, қуритиш шунча тезроқ амалга ошади.



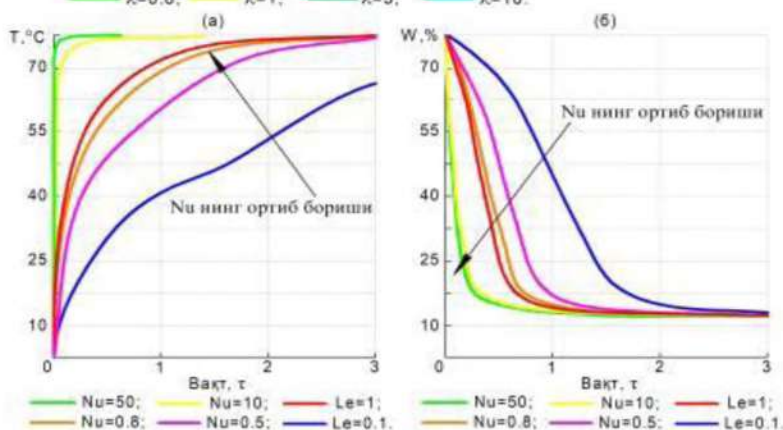
**5-расм.  $Le$  нинг турли қийматлари учун вақт  $\delta=1$  да ҳарорат ва намлик. Параметрларнинг қийматлари  $Sh=18, Nu=0,2, \lambda=0,4$**

$\bar{\lambda}$  ва  $Nu$  қийматларининг таъсирини кўриш учун биз қийматларни  $Le=4$  ва  $Sh=18$  деб белгиладик, сўнгра моделидаги бошқа иккита параметр  $\bar{\lambda}$  ва  $Nu$  ни ўзгартириш орқали параметрик тадқиқот олиб бордик. Бошқа ҳолатлар учун параметр қийматлари (яъни 1-2-ҳолат) бошқа қийматларни доимий сифатида сақлаган ҳолда, ҳар бир параметрни ўзгартириш орқали олинган. Ҳар бир параметрнинг қиймати ҳар хил бўлиб, биринчи вариация кўриб чиқиладиган параметрнинг пастки чегарасини, иккинчи вариация эса юқори чегарасини ифодалайди.

6-расмда  $\bar{\lambda}$  нинг ўзгарувчан қийматлари ва  $Nu=0,2$  нинг ўзгармас қийматида сиртдаги ҳароратни баҳолаш кўрсатилган. Расмдан маълум бўладики,  $\bar{\lambda}$  нинг қиймати 5-10 гача ошганда, ҳарорат жуда секин кўтарилди ҳамда  $\tau=0,3$  ва  $\tau=0,4$  оний вақтларига нисбатан текис эди. Бу эса ҳарорат деярли иссиқ ҳаво ҳароратигача ортиб борадиган қуритиш учун қўлланилмайди. Шундай қилиб,  $Nu=0,2$  учун  $\bar{\lambda}$  қийматининг яқинлашиши 0,1-1 оралиғида бўлади деган хулосага келиш мумкин.



6-расм.  $\bar{\lambda}$  ( $Nu=0,2$ ) нинг турли қийматлари учун  $\delta=1$  да вақтига нисбатан ҳарорат



7-расм.  $Nu$  ( $\bar{\lambda}=0,4$ ) нинг турли қийматлари учун  $\delta=1$  да вақтига нисбатан намлик

Параметрик тадқиқотлар асосида  $Sh$ ,  $Nu$ ,  $Le$  ва  $\lambda$  параметрларини танлаш хомашёнинг турига ва қуритиш ҳароратига боғлиқдир. Турли хомашёлар ушбу рақамларнинг турли қийматларини беради.

Диссертациянинг “Якон илдимевасини қуриш жараёнида диффузия ва иссиқлик ўтказувчанлик жараёнининг математик модели” номли учинчи бобида якон илдимевасини қуриш жараёнида диффузия ва иссиқлик ўтказувчанлик жараёнининг математик модели натижалари келтирилган.

Якон бўлагининг чегаравий қалинлиги  $l$ , кўндаланг кесим бўйича намлик миқдори  $W(x)$  ва ҳарорати  $T(x)$  бўлган шароитда намлик ва энергия узатилишини ақс эттириш учун хусусий ҳосилалар дифференциал тенгламаларнинг маълум тизими ёрдамида қуйидагича ифодаланади (2-бобда):

$$p_s = \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D p_s \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (14)$$

$$p_s G_z = \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (15)$$

$\delta=x/l$  ни ўзгаришидан фойдаланган ҳолда, интерфейс ақс эттирган  $\delta=1$  қийматга, (14) ва (15) тенгламаларнинг мураккаб ҳолат ўзгарувчилари кўринишидаги ( $\delta$ ) ўрнига ўзгартирилган ( $x$ ) формуласи мос келади:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{D_0}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{\delta}{l} \frac{dl}{d\tau} \frac{\partial W}{\partial \delta}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{l^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \delta^2} + \frac{\delta}{l} \frac{dl}{d\tau} \frac{\partial T}{\partial \delta}, \quad (17)$$

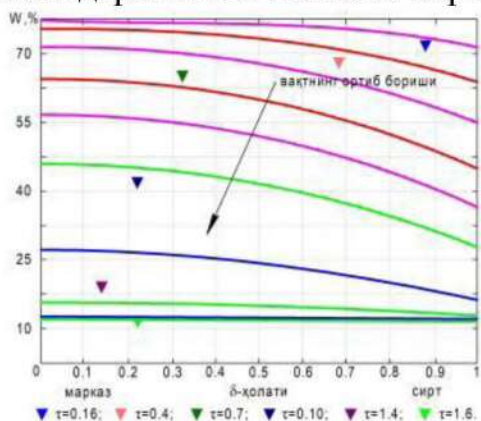
Диффузия коэффициентининг  $\bar{D}(T)$  хароратининг функцияси сифатида қабул қилинса, унда (14) тенглама қуйидагича бўлади:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\delta}{l} \frac{dl}{d\tau} \frac{\partial W}{\partial \delta} + \frac{\bar{D}}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial W}{\partial \delta} \frac{\partial T}{\partial \delta} \bar{D}'(T). \quad (18)$$

Агарда, диффузия коэффициентининг намлик ва харорат функцияси  $\tilde{D}(T, W)$  сифатида қабул қилинса, унда (14) тенглама қуйидаги кўринишда бўлади.

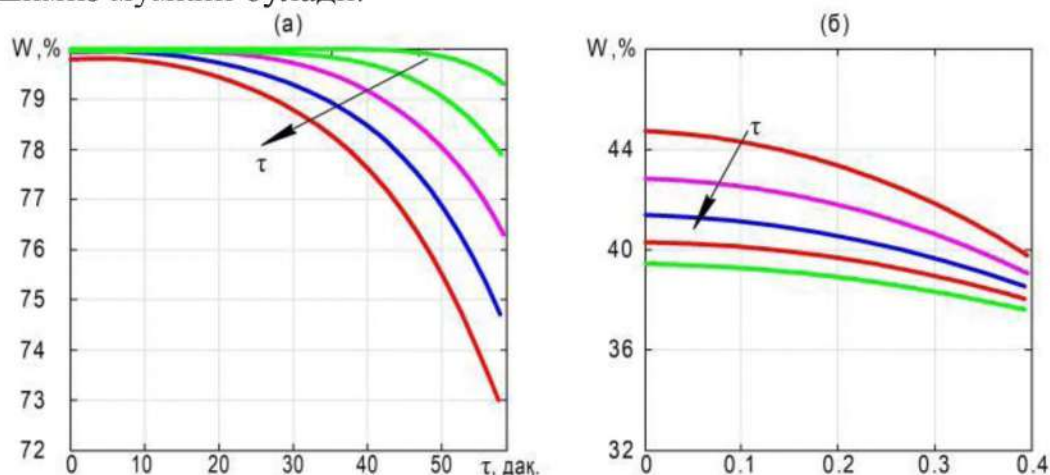
$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\delta}{l} \frac{dl}{d\tau} \frac{\partial W}{\partial \delta} + \frac{\tilde{D}}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial W}{\partial \delta} \frac{\partial T}{\partial \delta} \tilde{D}_T \quad (19)$$

8-расмда намлик тақсимотининг ҳолат  $\delta$  га ва қуритиш вақти  $\tau$  га боғлиқ равишда ўзгариши кўрсатилган. Қуритиш учун иссиқ ҳаво харорати ўлчамсиз моделда  $G_{\text{хаво}}$  орқали ифодаланган ва иссиқ хавонинг харорат ҳамда парциал босимга боғлиқ бўлади. Моделлаштириш натижалари намлик маҳсулот марказидаги энг юқори эканлигини ҳамда маҳсулот сиртида монотон равишда энг паст даражага камайиб боришини кўрсатди.



8-расм.  $\tau$  ортиб бориши билан яқон бўлаги ичидаги намликнинг ўлчамсиз профили. Параметр қийматлари  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$  сифатида ўрнатилади.

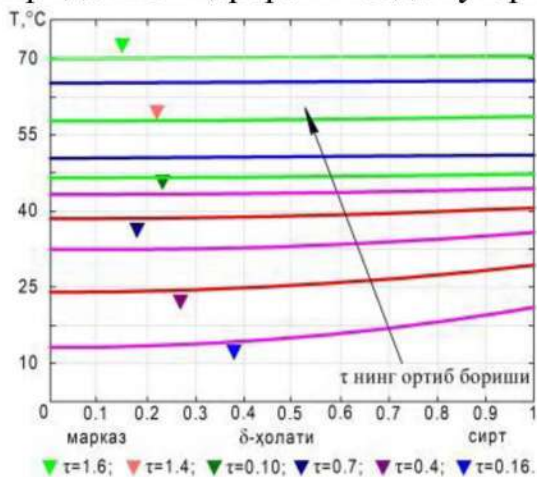
Намликнинг дастлабки ва узок даврлардаги динамикаси 9-расмда кўрсатилган. Дастлабки даврларда намликнинг камайишига юзадаги намлик ва жисмнинг ўлчами (узунлиги) бироз камайиши таъсир кўрсатади. Кейинги даврларда, яъни намлик даражаси жуда паст бўлганида, намликка қуритувчи ҳаво таъсир қилади, ушбу вақтда эса ўлчамининг жуда оз камайишини кузатишимиз мумкин бўлади.



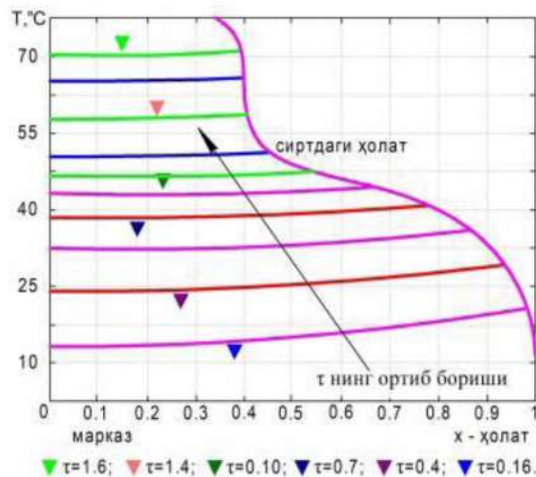
9-расм. Дастлабки давр (а) учун физик декарт масофаси  $x$  га кўра  $\tau$  ортиб бориши билан яқон бўлаги ичидаги намликнинг ўлчамсиз профили эволюцияси:  $\tau=0-0,125$  кичик қисқариш билан ва (б) узокрок вақт учун: деярли тўлиқ қисқариш билан  $\tau=1,28-1,6$  ( $\tau=0,02$  қадамда). Параметр қийматлари  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$  сифатида ўрнатилади.

10-расмда яконнинг ҳарорат профили қуриштиш вақтида ҳолат ва вақтнинг функцияси сифатида ифодаланган. Ҳар бир жойдаги ҳарорат қуриштиш вақти билан биргаликда ортиб боради, бу эса қуриштиш учун иссиқ ҳавонинг юқори ҳарорати билан боғлиқдир.

11-расмда қисқаришни ҳисобга олган ҳолда декарт масофаси  $x$  да намуна ичидаги ҳарорат режимлари ҳамда қўшимча равишда дастлабки қиздириш даврида ( $\tau < 0,4$ ) ҳароратнинг тез кўтарилиши кўрсатилган. Қиздириш давомий бўлиб, қисқариш эса сирт ва марказ орасидаги масофани камайтирганда, ҳароратнинг кўтарилиши нисбатан секин ва деярли бир маромда содир бўлади. Буғланиш учун кам миқдорда иссиқлик талаб қилингани сабабли қуриштиш охирида якон ҳарорати тезда кўтарилади.

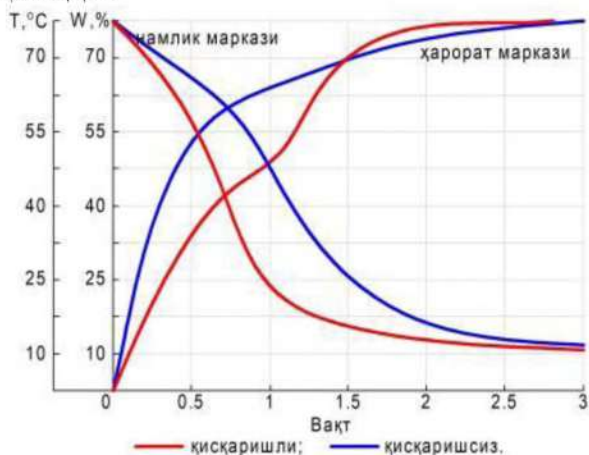


**10-расм.  $\tau$  ортиб бориши билан якон бўлаги ичидаги намликнинг ўлчамсиз профили. Параметр қийматлари  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\lambda=0,4$  сифатида ўрнатилади.**



**11-расм. Ўлчамсиз вақт  $\tau$  учун температура контурининг профили ва сирт  $x$  нинг ҳолати. Параметр қийматлари  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\lambda=0,4$  сифатида ўрнатилади.**

12-расмда якон марказидаги намлик ва ҳарорат градиентларини қисқариш самарали ҳамда самарасиз ҳолда таққослаш натижалари келтирилган. Бундан кўринадикки, қисқаришсиз ҳарорат қисқариш ҳарорати билан таққосланганда, айниқса қуриштиш бошида маълум бир вақт давомида юқори ҳароратни башорат қилади.



**12-расм. Якон марказида қисқариш самарали ҳамда самарасиз ҳарорат ва намлик профили. Қисқаришсиз модель (10) - (13) тегламаларга тегишли. Параметр қийматлари 8-расмдаги каби**

Диффузия коэффициентининг намлик ва ҳароратга боғлиқлиги

$$D = \bar{D}(T) \text{ ва } D = \tilde{D}(T, W)$$

$$\tilde{D}(T, W) = 1,32 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2143}{T}\right) \exp\left(\frac{-0,0735}{W}\right). \quad (20)$$

Ўлчамсиз шаклда

$$\tilde{D}(T, W) = \frac{\bar{D}(T, W)}{\bar{D}(T_0, W_0)} = \left(\frac{0,090714}{\bar{W}}\right) \exp\left(\frac{-2143}{30\bar{T}+311}\right) \quad (21)$$

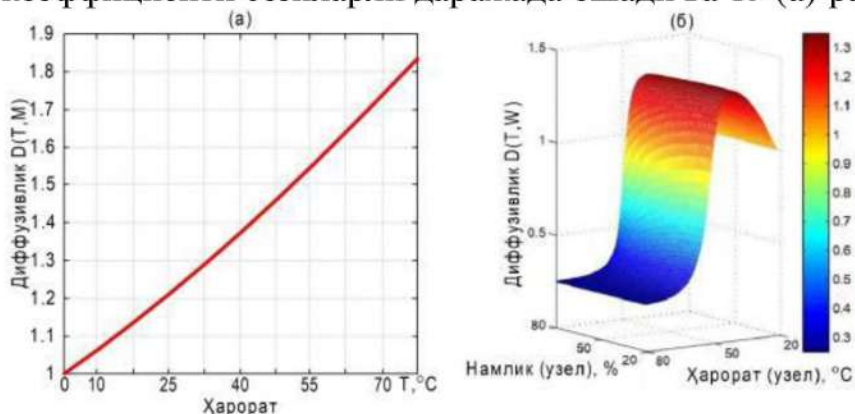
Фақатгина ҳароратнинг диффузия коэффициентига таъсирини ифодалаш учун намликни доимий деб ҳисоблаймиз ва  $W=W_0=0,85$  (намликнинг бошланғич миқдори) деб тахмин қиламиз; диффузия коэффициенти фақат ҳарорат қийматига боғлиқ бўлади  $D=\bar{D}(T)$  ва қуйидагича аниқланади

$$\bar{D}(T) = 1,204 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2143}{T}\right). \quad (22)$$

Ўлчамсиз шаклда

$$\bar{D}(T) = \frac{\bar{D}(T)}{\bar{D}(T_0)} = \exp\left(\frac{208,41\bar{T}}{30\bar{T}+311}\right) \quad (23)$$

Турли маҳаллий намлик ва ҳароратга эга бўлган диффузия профили 13-расмда келтирилган бўлиб, унда (а) ҳароратнинг юқорилиги диффузион хусусиятни  $\bar{D}(\bar{T})$  оширишини кўрсатади. Экспериментал тадқиқотлар, 65 °C дан паст ҳароратда қуритилган намуналар эластиксимон ҳолатда бўлишини, ҳамда 85 °C дан юқори ҳароратда қуритилган намуналар эса қуруқ (қаттиқ) ҳолатда бўлишини кўрсатди. Маҳсулотни сувсизланиш ҳолатида диффузия коэффициенти сезиларли даражада ошади ва 13 (а)-расмга мос келади.

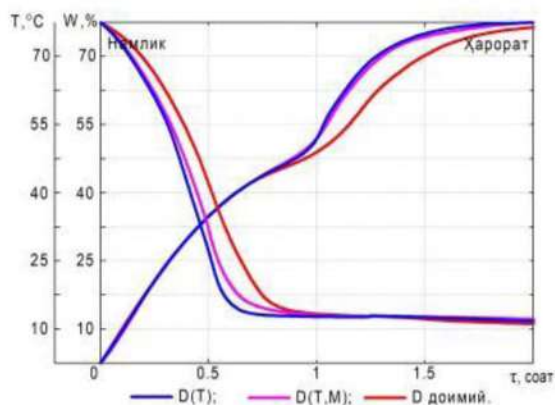


13-расм.  $\bar{D}(\bar{T})$  ва  $\tilde{D}(\bar{T}, \bar{W})$  ларнинг боғлиқлик графиги

13 (б) - расмда намлик ва ҳароратнинг диффузия коэффициентига таъсири кўрсатилган. Бошида намлик  $\bar{W}=1$  ва ҳарорат  $\bar{T}=1$  бўлганда диффузия коэффициенти  $\tilde{D}(\bar{T}, \bar{W})$  гача катталаштирилади. Вақт ўтиши билан ҳарорат кўтарилади ва намлик камаяди, бу эса маълум бир вақтга қадар диффузия коэффициентининг ошишига олиб келади. Бундан ташқари, намлик камайишда давом этгани сари, диффузия коэффициенти мос равишда камая бошлайди ва кейинчалик қуритиш охирида доимий бўлади. Шундай қилиб, диффузия коэффициенти қуритиш бошланишида сезиларли даражада ортади ва унинг охирида доимий бўлади деган хулосага келамиз.

Якон марказидаги намлик ва ҳароратнинг профили 14-расмда кўрсатилган. 14-расмда қуритиш жараёнининг бошида ( $0 < \tau < 1$ ), яконнинг ҳарорати аста-секин ортиб боради, бу вақтда иссиқликнинг катта қисми сиртдаги сувни буғланишига сарфланади ва сувнинг 72% га яқини буғланиб кетади. Қанд миқдори юқори бўлган якон хомашё учун сувсизланиш ҳарорати  $T_c$  жараён бошида жуда паст бўлади, ҳарорат  $T_c$  га етганда маҳсулот қуриш ҳолатига ўтади ҳамда диффузия коэффициенти  $T_c$  сезиларли даражада ортади.

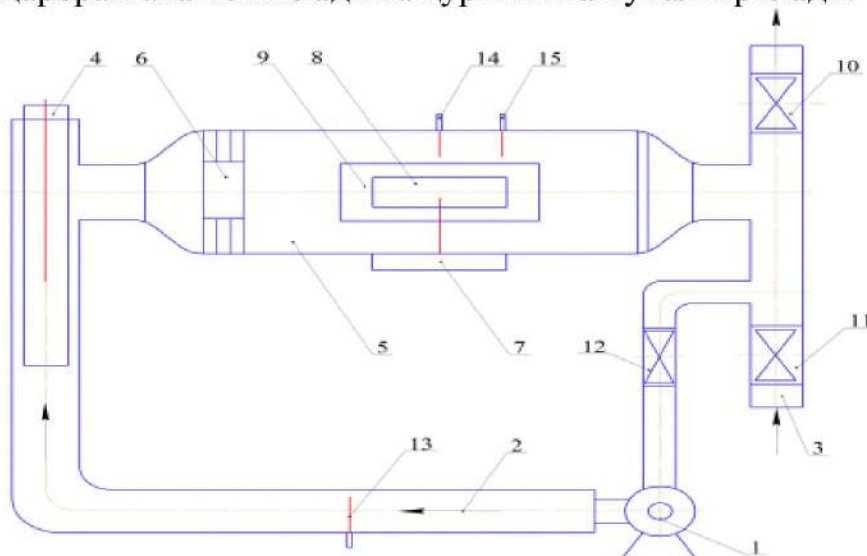




**14-расм. Турли хил диффузивликка эга бўлган якон марказидаги намлик ва ҳарорат. Ўлчовсиз параметрларнинг қийматлари  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$  сифатида ўрнатилади.**

Диссертациянинг “Якон илдизмеваларини қуриштиш жараёнининг тадқиқотлари” деб номланган тўртинчи бобида якон илдизмеваларини қуриштиш жараёнининг тадқиқот натижалари келтирилган.

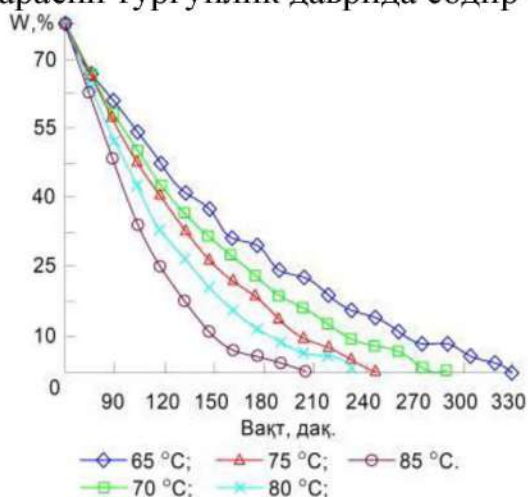
Якон бўлақларини қуриштиш учун тажрибавий қуриштиш қурилмаси иссиқ ҳавонинг ҳарорати ва тезлигини назорат қилади ҳамда қуриштилаётган материалнинг массасини кўрсатади. Қуриштиш қурилмаси асосан ҳаво оқимини узатиш учун марказдан қочма вентилятор, электр иситгич, иссиқ ҳавонинг ҳарорати ва тезлигини тартибга солувчи ва қуриштилаётган материалнинг массасини акс эттирувчи электрон пропорционал назорат қилгичдан иборат. Ҳавонинг тезлиги клапан орқали ростланади. Иситиш элементида ўтган ҳаво белгиланган ҳароратгача иситилади ва қуриштишга йўналтирилади.



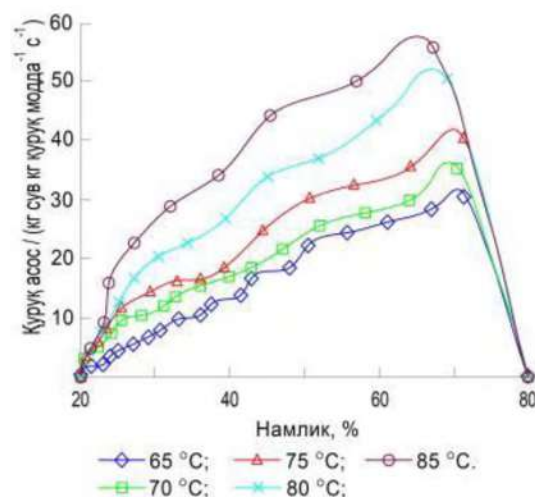
**15-расм. Қурилманинг принципиал схемаси**  
 1-сўрувчи вентилятор; 2-қувур; 3-ҳаво тўсгич; 4-қиздиргич; 5- қуригич; 6-бир маъромда шамоллатиш мосламаси; 7-вазн датчиги; 8- материал учун поддон; 9- кузатиш ойнаси; 10,11,12-дросселли клапан; 13-босим датчиги; 14-қурук термометрли ҳарорат датчиги; 15- нам термометрли ҳарорат датчиги

Ҳаво ҳарорати пропорционал ростлагич ёрдамида назорат қилинди. Қурилмадаги оқимнинг кўндаланг кесими  $20 \times 20$  см ни ташкил қилади, иссиқ ҳаво эса горизонтал равишда туйнуклар ҳамда  $12 \times 12$  см сирт майдонига эга бўлган лоток орқали ўтади. Чикинди газ ушбу тажрибада қувурлар бўйлаб айланмайди. Ҳароратни назорат қилиш тизимининг аниқлиги  $0,1$  °C, массани назорат қилиш тизимининг аниқлиги эса  $0,1$  г ни ташкил қилади. Қурилманинг принципиал схемаси 15-расмда келтирилган.

Бўлақлар 4 мм гача қалинликда кесилганда ҳамда ҳавонинг тезлиги 1,05 м/с бўлганда, иссиқ ҳавонинг турли (65, 70, 75, 80 ва 85 °С) ҳароратларида яконни қуритиш вақтига боғлиқ равишда намлик нисбатининг ўзгариши 16-расмда келтирилган. Қуритиш ҳавоси ҳароратининг ошиши қуритиш вақтининг қисқаришига олиб келди. Намлик билан қуритиш тезлигининг ўзгаришларини 17-расмда кўриш мумкин. Ушбу эгри чизиклар орқали қуритиш ҳароратининг ҳавода қуритиш тезлигига таъсирини кузатиш мумкин. Бундан келиб чиқадики, қуритиш тезлиги вақт ортиши билан узлуксиз камайиб боради. Эгри чизикларда доимий қуритиш тезлиги деярли мавжуд эмас ва бутун қуритиш жараёни турғунлик даврида содир бўлди.



**16-расм. Ҳавонинг тезлиги 1,05 м/с ва қалинлик 4 мм бўлганда турли ҳароратлар учун яконнинг қуритиш эгри чизиклари**



**17-расм. Ҳавонинг тезлиги 1,05 м/с ва қалинлик 4 мм бўлганда турли ҳароратлар учун яконнинг қуритиш эгри чизиклари**

18-расмда якон илдизмеваларини қуритиш ва қайта ишлаш жараёнининг асосий босқичлари ҳамда олинган кукун намуналари кўрсатилган. Қуритилган материал тегирмон ёрдамида кукун ҳолатига келтирилди. Сўнгра, намуналар пластик қопларга солинди ва хона ҳароратида куруқ жойда сақланди.

Қуритиш усули ҳамда маҳсулот шаклини аниқлаш мақсадида фруктоза ва фруктанин таркиби яконнинг кукун намуналарида таҳлил қилинди (1-жадвал). Фруктозаниннг энг юқори концентрацияси якон бўлақларидан олинди.



**18-расм. Якон илдизмеваларини қайта ишлаш жараёни**

Якон илдизмевасини қуритиш бўйича олиб борилган тажриба синов ишлари натижасида олинган маълумотлар қўйидаги 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвал

**Қуритилган якон илдизмевасининг лаборатория таҳлил натижалари**

№	Намуналар	Қуритиш шарти	Қурук моддадаги нулин микдорининг улуши, мг%
1	Қуритилган якон илдизмеваси	– қуритиш усули – конвектик; – қуритиш ҳарорати – 75 °С; – қуриш вақти– 300 мин.	46,3
2	Қуритилган топинамбур илдизмеваси	– қуритиш усули – ИҚ; – қуритиш ҳарорати – 75 °С; – қуриш вақти– 300 мин.	42,7

Натижалар шуни кўрсатдики, намликнинг ўзгариши 65 дан 85 °С гача бўлган ҳарорат оралиғида қуритиш вақтига боғлиқ бўлади. 75 °С ҳаво ҳароратида қуритиш учун  $D_{эфф.}$  нинг қийматлари, ҳаво тезлиги 1,05 м/с ва якон бўлаги қалинлиги 4 мм эканлиги  $5,7091 \times 10^{-10}$  дан  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с гача бўлган диапазонда топилди. Намлик диффузиясининг активланиш энергияси 43,36 Кж/мол ни ташкил этди.

**ХУЛОСА**

1. Диссертация ишида биргина диффузия жараёнидан фойдаланилганда намликнинг ҳаракати қуритиш жараёнини тавсифлаши мумкинлиги аниқланди. Қуритиш вақтида диффузияни баҳолаш учун қуритиш жараёнининг соддалаштирувчи чегарасидан фойдаланилди.  $Sh$  сонини 18 деб қабул қилинганда, маҳсулотларда диффузия қаршилиги суюқликнинг чегаравий қатлами орқали конвекция қаршилигидан икки баробар юқори эканлигини кўришимиз мумкин.

2. Хомашё ҳароратнинг ўзгариши  $Nu$  ва  $\bar{\lambda}$  сонлари орасидаги нисбатга боғлиқ бўлиши тавсия этилади. Агар  $Nu$  сони  $\bar{\lambda}$  га яқин ёки унга тенг бўлса, жараён борган сари маҳсулотнинг ҳарорати мос равишда секин ортиб боради. Агарда  $Nu \gg \bar{\lambda}$  бўлса, сирт ҳарорати иссиқ ҳавонинг ҳароратига дарҳол етиб бормайди. Хомашё учун иссиқлик узатиш коэффиценти қийматларида ҳам сезиларли тарқоқлик кузатилди, шу сабабли хомашё учун  $Nu$  қийматлари 0,1-1,2 оралиғида олинади.

3. Қисқариш эффектига эга бўлган моделдаги намлик қисқаришсиз моделга нисбатан тезроқ камайганлиги исботланган, яъни бу қисқа қуритиш вақтини талаб қилади ва тажриба натижаларига мос келади. Тажриба натижалари бошланғич намлик  $W_0=0,85$  учун сиқилиш қийматлари 1,0 дан 0,28 гача оралиқда бўлишини кўрсатади. Маҳсулотдаги барча суюқлик чиқариб юборилгач, қисқариш дастлабки ҳажмнинг 74% ни ташкил қилади. Бу эса шуни кўрсатадики, қисқариш эффектига эга бўлган модель қуритиш вақтида якондаги намлик ва ҳароратнинг ҳаракатларини тавсифлай олади.

4. Қуритиш вақтида намликнинг ўзгариши 65 дан 85 °С гача бўлган ҳарорат оралиғида амалга ошириш исботланган. 65-85 °С ҳаво ҳароратида қуритиш учун  $D_{эфф}$  нинг қийматлари, ҳаво тезлиги 1,05 м/с ва яқон бўлаги қалинлиги 4 мм эканлиги  $5,7091 \times 10^{-10}$  дан  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с гача бўлган оралиқда аниқланган. Намлик диффузиясининг активланиш энергияси 43,36 КЖ/мол ни ташкил этди. Қуритиш ҳарорати, иссиқ ҳаво тезлиги ва яқон бўлагининг қалинлиги ҳамда уларнинг қуритиш хусусиятларига таъсири мажбурий конвекция ёрдамида қуритгичда тадқиқ қилинди. Қуритиш жараёни тезлик пасайган даврда амалга ошди ва бунда доимий тезлик кузатилмади.

5. Қуритилган яқон илдизмевасидан олинган кукун таркибидаги инулин миқдорининг қиёсий таҳлили ўтказилди. Унга кўра яқон илдизмевасида инулин миқдори топинамбур илдизмевасига нисбатан 3,6% фоизга ортиқ эканлиги, яъни қуритилган яқон илдизмевасида 46,3 % ҳамда қуритилган топинамбур илдизмевасида эса 42,7 % ни ташкил этади. Қуритишнинг бошқа усулларидадан фойдаланган ҳолда қуритилган топинамбур илдизмевасининг таркибида инулин миқдори яқон илдизмевасига нисбатан 1...5% гача кам эканлиги аниқланди.

6. Диссертация ишига мувофиқ яқон илдизмеваларини қуритиш бўйича тавсиялар «WORLD FARM BUSINESS» МЧЖ да ишлаб чиқаришга жорий қилинган (Ўзбекистон Республикаси Қишлоқ хўжалиги вазирлигининг 05.11.2021 йилдаги №02/027-4505 маълумотномаси). Конвектив қуритиш жараёнини қўллаш натижасида унумдорлик 1,22 маротаба ошган; ўртача умумий иқтисодий самарадорлик йилига 227 878 500 сўмни ташкил этди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ РнD.03/30.12.2019.Т.101.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ БУХАРСКОМ ИНЖЕНЕРНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ХУЖАКУЛОВ УЛУГБЕК КАРИМКУЛОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В  
ТЕХНОЛОГИИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КЛУБНЕЙ ЯКОНА**

**02.00.16 – Процессы и аппараты химических технологий и пищевых производств  
(технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА  
ФИЛОСОФИИ (РнD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**



## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** На сегодняшний день экологические изменения, которые наблюдаются в мировом масштабе, оказывают негативное влияние на процессы производства качественной сельскохозяйственной продукции в достаточном объеме. Особенно, увеличение численности мирового населения приводит к росту спроса к продовольственным продуктам. В связи с этим, разработка новых способов сушки, направленных на получение высококачественных, функциональных продуктов путем совершенствования технических средств и технологий для сушки продовольственных продуктов приобретает важное значение.

В мире ведутся научные искания по оптимизации технологии сушки с помощью теплового потока и ИК лучей. В этом отношении, в частности, большое внимание уделяется на разработку энергосберегающей техники и технологии, сохраняющей в процессе переработки биоактивные вещества, содержащиеся в продукте, совершенствование способов сушки сырья, а также технологии получения высококачественной продукции, установление теплообменных процессов с учетом тепловой активности продукции.

В Республике уделяется особое внимание на выращивание сельскохозяйственных продуктов и эффективное развитие перерабатывающей промышленности, высококачественную переработку сельскохозяйственных и лесохозяйственных продуктов, производство импортозамещающих направленных на экспорт продовольственных и фармацевтических продукций, в результате чего имеются определенные научные достижения. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан намечены важные задачи по «укреплению устойчивости макроэкономики и сохранению высоких темпов экономического роста... снижению использования энергии и ресурсов в промышленности, широкому внедрению энергосберегающих технологий». При осуществлении данных задач важное значение приобретают моделирование технологического процесса конвективной сушки, исследование математических моделей связи между диффузией и теплопроводностью, передача тепла и влаги в процессе сушки, определение теплофизических свойств и химического состава конечного продукта, а также улучшение качества сушеных продуктов.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служит осуществлению задач, намеченных в постановлениях Президента Республики Узбекистан «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года, ПП-5388 «О дополнительных мерах по ускоренному развитию плодоовощеводства в Республике Узбекистан» от 29 марта 2018 года, ПП-5707 «О дополнительных мерах по ускорению развития фармацевтической промышленности Республики на 2019-2021 годы», а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной деятельности.

**Связь диссертации с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики V. «Сельское хозяйство, биотехнология, экология и охрана окружающей среды».

**Степень изученности проблемы:** научные исследования, направленные

на моделирование процессов и технологий сушки продовольственных продуктов, проводились следующими зарубежными учеными, как: A.Kaya, A.Halder, Z.Wang, E.Akpinar, M.M., A.Hussain Mulet, Shahari Nor Azni, B.B.Касаткин, A.B.Лыков, A.C.Гинзбург, B.B.Кафаров, Б.С. Сажин, а также такими отечественными учеными, как Н.Р.Юсупбеков, О.Ф.Сафаров, A.A.Артиков, Дж.П.Мухиддинов, X.C.Нурмухамедов, X.Ф.Джураев, Ж.М.Курбанов, К.О.Додаев и др. Ими были разработаны научные основы сушки пористых материалов и практические рекомендации по внедрению современных технологий при сушке сырья.

Наряду с этим, ученые мирового сообщества ведут активные искания в приоритетных направлениях по совершенствованию технологий и оборудований сушки, математическому моделированию технологий сушки, процессов сушки продуктов, разработке методов сушки, учитывающих сохранение биологически активных веществ, содержащихся в сырье. Однако, математическое моделирование процесса диффузии в технологии конвективной сушки клубней якона не проводилось в достаточной степени.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Ташкентского технического университета имени Исмола Каримова в рамках научно-прикладного проекта №А-4-38 «Разработка энергосберегающей гелиосушительной установки сушки путем образования ИК лучей с помощью теплопроводника при качественной сушке лекарственных растений» (2015-2017 гг.).

**Цель исследования** заключается в математическом моделировании процесса диффузии в конвективной технологии сушки клубней якона.

**Задачи исследования:**

сформулировать теплофизические и химические характеристики клубней якона с точки зрения сохранения химического состава и лечебных свойств;

определить значение скрытого теплоагента  $\bar{\lambda}$ , имеющего важное значение в границах совершения испарения;

разработать двухмерную модель процесса сушки клубней якона;

разработать математическую модель, описывающую одновременно с эффективностью сокращения при сушке якона теплообменные и массообменные процессы;

переработать полученные результаты опытов с помощью современных компьютерных программ COMSOL, MATLAB 6.5.

В качестве **объекта исследования** взяты процесс и установки сушки клубней якона (*Smallanthus sonchifolius*).

**Предмет исследования** составили параметры процесса сушки корнеплодов якона.

**Методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использованы: методология системного анализа с использованием теоретических основ химической технологии, а также методология синтеза сложных технических и технологических систем, методы математического моделирования и оптимизации технологических процессов и систем.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработаны однофазные и двухмерные влаготепловые модели процесса сушки клубней якона (*Smallanthus sonchifolius*);



установлено, что при  $Nu > 1$  конвекция оказывает меньшее сопротивление теплопроводности;

установлено, что время сушки зависит от значений параметров пограничной поверхности  $Sh=18$ ,  $Nu=0,2$  и скрытой теплоты  $\lambda=0,4$ ;

разработана математическая модель взаимоотношений между диффузией и теплопроводностью в процессе сокращения клубней якона (*Smallanthus sonchifolius*);

разработаны технологические параметры сушки и получены эффективные коэффициенты диффузии влажности;

разработаны технологии параметров влияния скорости горячего воздуха, толщины кусков, а также температуры на принудительную сушку клубней якона с помощью конвекции.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

установлены качественные показатели сушеных клубней якона и его свойство теплопроводности;

принимая шервудское число как  $Sh=18$ , установлен эффективный метод сопротивления распространению диффузии внутри продукта по отношению к сопротивлению конвекции через пограничный слой жидкости;

установлено повышение температуры и снижение влажности во время сушки при значениях параметров пограничной поверхности  $Sh=18$ ,  $Nu=0,2$  и скрытой теплоты  $\lambda=0,4$ ; закономерность изменения температуры в различных слоях образца;

изменение влажности в пределах от 65 до 85 °С температуры зависит от времени сушки. Для сушки при 75 °С температуры воздуха значения  $D_{эфф}$ , скорость воздуха 1,05 м/с и толщина кусков якона 4 мм установлены в диапазоне от  $5,7091 \times 10^{-10}$  до  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с.

**Достоверность результатов исследования** обосновываются соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, осуществленных с помощью современных методов и средств, а также осуществлением с помощью современных компьютерных программ COMSOL, MATLAB 6.5, Microsoft Excel.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования объясняется расчетом процесса теплопроводности и влагопроводности при сушке клубней якона, предоставлением числовых методов данного решения, моделированием изотермических процессов сушки с учетом диффузии высокой влажности.

Практическая значимость результатов исследования, минимизируя потери в процессе сохранения биологически активных веществ, содержащихся в сырье, и переработки материала, служит разработке ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий для сушки корнеплодов якона.

**Внедрение результатов исследования.** На основе научных результатов, полученных по математическому моделированию процесса диффузии в технологии конвективной сушки корнеплодов якона:

энергосберегающая технология для сушки корнеплодов якона внедрена в производство в ООО «WORLD FARM BUSINESS» (справка №02/027-45055 Министерства сельского хозяйства Республики Узбекистан от 5 ноября 2021 года). В результате, за счет использования высокоэффективной технологии производство продукции увеличилось в 1,1 раза и потеря сырья снизилась на 6%;

метод сушки клубней якона внедрен в производство в ООО «WORLD

FARM BUSINESS» (справка №02/027-45055 Министерства сельского хозяйства Республики Узбекистан от 5 ноября 2021 года). В результате это дало возможность сохранить 90-95% биологически активных веществ конечного продукта за счет использования высокоэффективного метода;

разработанная техника и технология по сушке клубней якона внедрены в практику в ООО «WORLD FARM BUSINESS» (справка №02/027-45055 Министерства сельского хозяйства Республики Узбекистан от 5 ноября 2021 года). В результате, внедрение высокоэффективной энергосберегающей сушильной установки с использованием тепловой конвекции и за счет диффузии получена возможность расходовать меньше энергии в 1,2 раза по сравнению с существующими технологиями и установками.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования обсуждались на 5 международных и 7 республиканских научно-технических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации всего опубликовано 19 научных работ, в том числе, 7 научных статей, из них 2 в международных журналах, 5 в республиканских журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключений, списка использованной литературы и приложений. Основная часть диссертации составляет 120 страниц, включает 41 рисунок и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

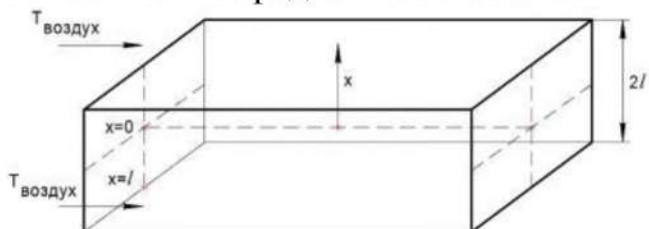
**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель, объект и задачи исследования, а также показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии Республики Узбекистан, изложены научная новизна, практические результаты работы, обоснована надежность полученных результатов, раскрыта научная и практическая ценность, приведены сведения о внедрении результатов исследования в производство.

В первой главе диссертации анализируется **«Современные взгляды на моделирование процесса сушки клубней якона (*Smallanthus sonchifolius*)»**. В научной литературе был проведен аналитический обзор существующих установок и процессов, переработки пищевых продуктов в промышленности, математического моделирования процессов, происходящих в сушильной установке, расчета и проектирования сушильных установок.

Оценивая широкое использование сушильных установок в сельском хозяйстве страны, был сделан вывод о наличии проблем, требующих разработки промышленных методов сушки клубней якона. На основании анализа имеющихся материалов отдела определены основные цели и задачи работы.

Во второй главе диссертации **«Однофазная влаготепловая модель сушки клубней якона»** представлены результаты модели однофазной влаготепловой сушки для клубней якона. Была сформулирована общая формулировка тепломассопереноса для разработки простой модели

распределения влаги и тепла при сушке якона. Физическое решение включает в себя один ломтик клубня якона толщиной 3 мм ( $L$ ), первоначально при одинаковой температуре  $T_0$  и однородном содержании влаги  $W_0$ . Сушка считается эффективной только на поверхностях  $x=\pm l$ . Поверхность сушильного корпуса находится в контакте с воздухом, обеспечивая конвективные граничные условия для содержания влаги  $W$  и постоянной температуры теплового воздуха  $T$ . Рассматриваемая проблема симметрична относительно средней плоскости ломтика образца, как показано на рис. 1



**Рис. 1. Схема одномерной модели процесса сушки клубней якона**

Если ломтик неопределенной длины, то содержание влаги  $W(x)$  в нём и нестационарная температура  $T(x)$  выражаются хорошо известной системой дифференциальных уравнений в частных производных для переноса влаги и энергии:

$$p_s \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D p_s \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (1)$$

$$p_s G_z \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (2)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии;  $p_s$  - плотность твердого тела;  $G_z$  - удельная теплоемкость;  $k$  - теплопроводность.

Из-за симметрии решение находится от центральной линии в точке  $x=0$  к поверхности  $x=l$ . Принимая постоянную теплопроводность  $\alpha = \frac{k}{p_s G_z}$  и постоянный коэффициент диффузии  $D=D_0$ , уравнения (1) и (2) дают:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_0 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l \quad (4)$$

Обобщением приведенного выше общего подхода является зависимость коэффициента диффузии от температуры. Принимая коэффициент диффузии в зависимости от температуры  $D = \bar{D}(T)$ , уравнение (2) становится

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \bar{D} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \bar{D}}{\partial x}, \quad (5)$$

где  $\bar{D}' = \frac{d\bar{D}}{dT}$ .

Движущей силой потока водяного пара от смачиваемой поверхности к воздуху является разница между содержанием влаги в воздухе  $G_{возд.}$  и содержанием воды в виде жидкой водной пленки на поверхности  $G_{поверх.}$ . В этом случае граничное условие на поверхности становится

$$-D_0 p_s \frac{\partial W}{\partial x} = -h_B (G_{поверх.} - G_{возд.}), \quad \text{в } x = l \quad (6)$$

Слабое внутреннее испарение и перенос паров в обезвоженном якона к внешней поверхности сырья не учитывались. В первом случае мы рассмотрим модели без усадки ( $x=l$ ), связанные с изотермической диффузией, постоянной

диффузией влаги ( $D=D_0$ ) и теплопроводностью  $k=k_0$  с постоянным начальным уровнем влажности  $W=W_0$  и  $T=T_0$ . В этом простейшем случае мы решаем уравнения (3) и (4) вместе с граничными условиями (6). В этой модели влага удаляется из продукции, когда температура теплового воздуха  $T_{возд.} > T_0$  дает температуру поверхности продукта  $T_{поверх.}$ , чтобы создать градиент влажности от испарения влаги на внешней поверхности. Управляющие уравнения становятся

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_0 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_0 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < l, \quad (8)$$

Принимая безразмерные переменные:

$$\bar{W} = \frac{W}{W_0}, \quad \bar{T} = \frac{T-T_0}{T_{возд.}-T_0}, \quad \tau = \frac{D_0 t}{l^2} \quad \text{и} \quad \delta = \frac{x}{l}, \quad (9)$$

мы получаем управляющие уравнения диффузии и тепла как

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \delta^2}, \quad \text{и} \quad \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \delta^2}. \quad (10)$$

где,  $Le$  (число Льюиса) – критерий подобия в молекулярной физике, определяющий соотношение между теплопроводностью и диффузией.

Начальные условия становятся  $\bar{W} = 1$  и  $\bar{T} = 0$ , при  $\tau=0$  и граничных условиях

в  $\delta=0$ :

$$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \delta}\right) = 0, \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta}\right) = 0, \quad (11)$$

и в  $\delta=1$ :

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta} = -Sh(\bar{G}_{поверх.} - 1), \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \delta} = -Nu(\bar{T}_{поверх.} - 1) + \bar{\lambda} \frac{1}{Le} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \delta}. \quad (13)$$

где,  $Nu$  (число Нуссельта) – критерий подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности (в условиях неподвижной среды).

Несколько безразмерных групп определяется как:

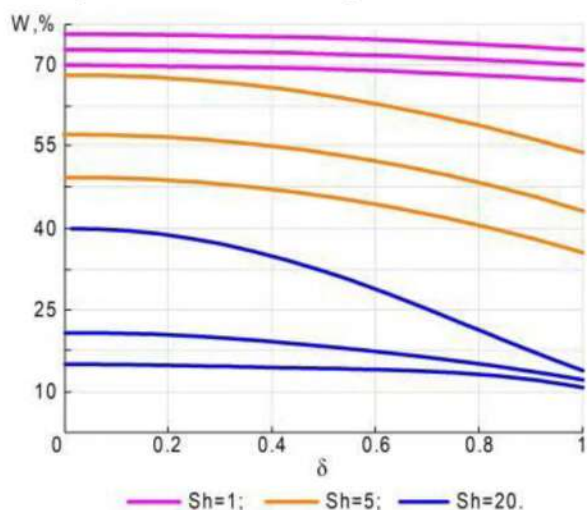
$$Sh = \frac{h_b l G_{возд.}}{D_0 W_0 p_s}, \quad \bar{G}_{поверх.} = \frac{G_{поверх.}}{G_{возд.}}, \quad Nu = \frac{hl}{k}, \quad Le = \frac{\alpha}{D_0}, \quad \text{и} \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{G_z (T_{возд.} - T_0)}$$

где  $Sh$  (число Шервуда) – критерий подобия для массообмена, равный отношению конвективного переноса к диффузии:

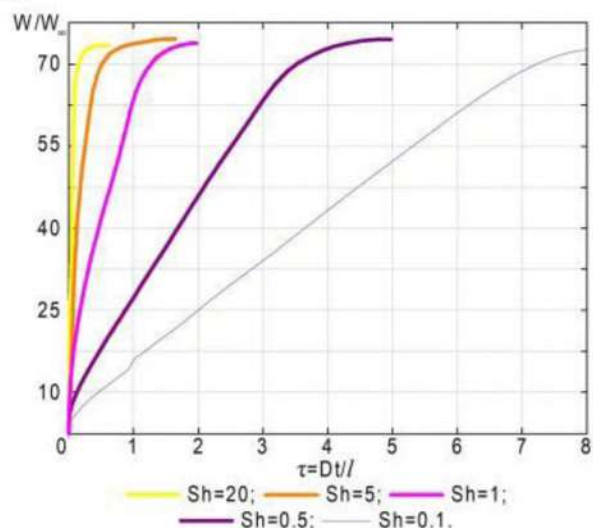
Программа COMSOL используется для системы процесса сушки, что соответствует численному решению этих модельных уравнений. Мы фиксируем геометрию модели, устанавливаем границу, параметры сетки и вычисляем окончательное решение. Зависящая от времени проблема была решена с помощью неявной схемы скачкообразного изменения времени, приводящей к нелинейному системному уравнению для каждого временного шага. Метод Ньютона использовался для решения каждой нелинейной системы уравнений, в то время как прямое решение линейных систем было

принято для решения результирующих систем линейных уравнений. Относительный и абсолютный допуски были установлены на 0,001 и 0,0001, соответственно. Уравнения (10) были введены в COMSOL с общей формой для содержания влаги и температуры.

Число  $Sh$  представляет собой поверхностный конвективный массоперенос по отношению к коэффициенту диффузии воды. На рис. 2 показано поведение влаги  $W$  профиля, варьирующего параметр  $Sh$ . Из рис. 2 мы видим, что  $Sh$  оказывает большое влияние. Если  $Sh=1$ , то результаты показывают, что в любое время в течение переходного процесса разумно предположить равномерное распределение влаги по клубням якон. Это не относится к сушке, где градиент влажности в якон является значительным. Например, коэффициент массопередачи  $h_e$  для якона составляет от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ , толщиной 3-5 мм при  $D_0=10^{-10}$ , что дает значение  $Sh$  более 8. Это составляет сопротивление диффузии якона намного больше, чем сопротивление конвекции через пограничный слой жидкости, где  $Sh>1$ , и следовательно, это явление является контролем диффузии. Для сушки с контролем диффузии значение  $Sh$  составляет более 18 для якона, и в этих условиях скорость или влажность воздуха не влияют на сушку. В экспериментах, когда число  $Sh$  больше 30 и было сделано изменение скорости теплового воздуха, кривая сушки влаги практически перекрывается, что показывает, что сушка осуществляется путем диффузионного контроля. При моделировании мы также наблюдали, что увеличение  $Sh$  вызывает намного более быстрое уменьшение влажности, а градиент влажности между поверхностью и центром намного больше.



**Рис. 2. Профиль влажности в момент времени  $\tau=0,4, 1$  и  $1,6$  для разных значений  $Sh$  и фиксированного значения  $\zeta = 2,36$**

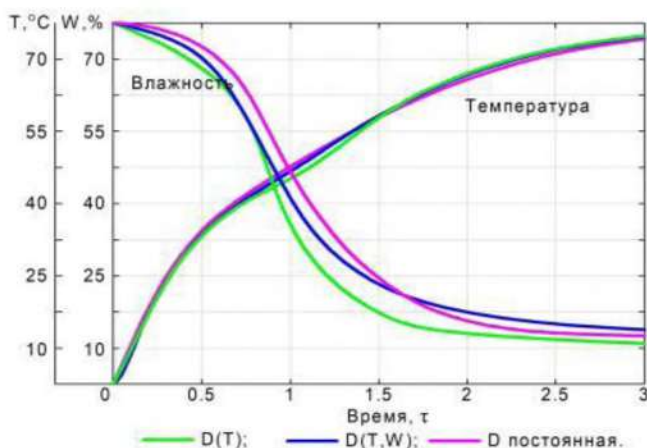


**Рис. 3. Количество потери влаги при испарении на поверхности с различными значениями**

На рис. 3 дается график количества потерь влаги при испарении с различными значениями  $Sh$  и согласуется с графиком, показывающим  $W_t/W_{\infty}$ ,

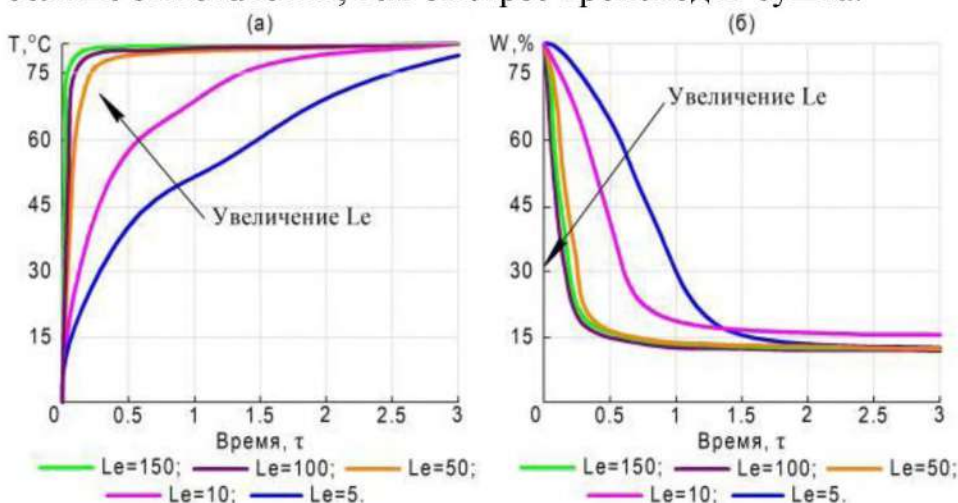
т.е. остаточную влагу, образовавшуюся на поверхности во времени, чем больше число  $Sh$ , тем быстрее происходит равновесие влаги с осушающим воздухом.

На рис. 4 показан профиль снижения влажности и повышения температуры в центре якона с различными значениями коэффициента диффузии. Можно видеть, что влажность снижалась быстрее для коэффициента диффузии, зависящего от температуры  $\bar{D}(T)$ , по сравнению с константами  $D$  и  $\bar{D}(T, W)$ . Это связано с тем, что повышение температуры дает увеличение коэффициента диффузии во время сушки. Когда мы принимаем  $D$  за постоянную, коэффициент диффузии остается одним во время сушки.



**Рис. 4. Профиль влажности и температуры в центре для различных значений коэффициента диффузии. Значения параметров  $Sh=8$ ,  $Nu=0,2$  и  $\lambda=0,4$ .**

На рис. 5 (а) показывается изменение температуры. С увеличением значения  $Le$  температуры увеличивается. Рис. 5 (б) свидетельствует о влажности на поверхности с фиксированным значением  $Sh$  и переменными значениями  $Le$ . Увеличение значения  $Le$  оказывает его влияние на снижение влажности. Эволюция влаги на поверхности уменьшалась быстрее при большем значении  $Le$ . Из рис. 5 мы пришли к выводу, что  $Le$  и  $Sh$  влияют на сушку: чем больше эти значения, тем быстрее происходит сушка.



**Рис. 5. Температура и влажность при  $\delta=1$  во времени для различных значений  $Le$ . Значения параметров  $Sh=18$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\lambda=0,4$ .**

Чтобы увидеть влияние значений  $\bar{\lambda}$  и  $Nu$ , мы зафиксировали значения  $Le=4$  и  $Sh=18$ , тогда проведено параметрическое исследование путем изменения двух других параметров в модели  $\bar{\lambda}$  и  $Nu$ . Значения свойств для случаев (то есть случай 1-2) были получены путем изменения каждого параметра при сохранении других постоянных значений. Каждое значение параметра было

различным, первая вариация обозначала нижнюю границу, а вторая верхнюю границу рассматриваемого параметра.

На рис. 6 показана оценка температуры на поверхности с фиксированным значением  $Nu=0,2$  и переменным значением  $\bar{\lambda}$ . Из рисунка, когда значение  $\bar{\lambda}$  увеличилось до 5-10, температура росла очень медленно и была относительно плоской в момент времени  $\tau=0,3$  и  $\tau=0,4$ . Это не относится к сушке, где температура увеличивается почти до температуры теплового воздуха. Таким образом, можно сделать вывод, что при  $Nu=0,2$  аппроксимация значения  $\bar{\lambda}$  будет в диапазоне 0,1-1.

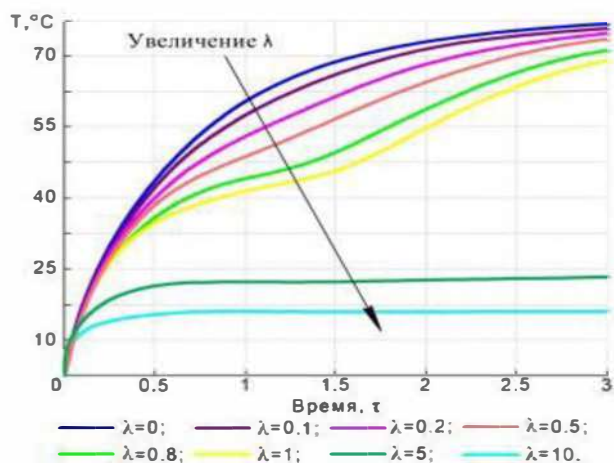


Рис. 6. Температура при  $\delta=1$  против времени для различных значений  $\bar{\lambda}$  ( $Nu=0,2$ )

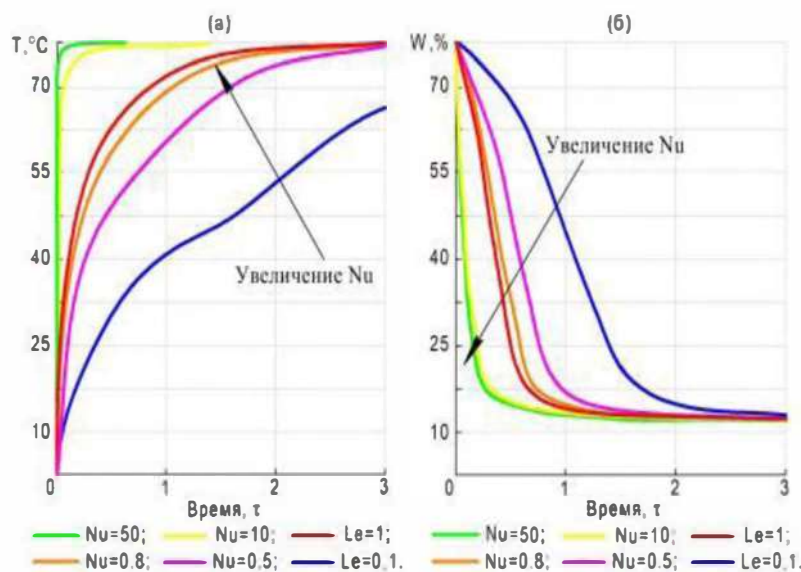


Рис. 7. Влажность при  $\delta=1$  против времени для различных значений  $Nu$  ( $\bar{\lambda}=0,4$ )

Основываясь на параметрических исследованиях, выбор параметров  $Sh$ ,  $Nu$ ,  $Le$  и  $\lambda$  зависит от типа сырья и температуры сушки. Разные виды сырья дают разные значения этих чисел.

В третьей главе диссертации «Математическая модель процесса диффузии и теплопроводности в процессе усадки клубней якона» представлены результаты математической модели процесса диффузии и теплопроводности в процессе сушки клубней якона.

В случае конечной толщины ломтика  $l$  содержание влаги  $W(x)$  поперек ломтика и температура  $T(x)$  выражаются хорошо известной системой уравнений в частных производных для переноса влаги и энергии (в главе 2) как:

$$p_s = \frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D p_s \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (14)$$

$$p_s G_z = \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad 0 < x < l \quad (15)$$

Используя преобразование  $\delta=x/l$ , поверхность раздела соответствует фиксированному значению  $\delta=1$ , пересмотренной формулировке уравнений (14) и (15) в виде независимых переменных состояния ( $\delta$ ) при замене ( $x$ ):

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{D_0}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{\delta}{l} \frac{dl}{dt} \frac{\partial W}{\partial \delta}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{l^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \delta^2} + \frac{\delta}{l} \frac{dl}{dt} \frac{\partial T}{\partial \delta} \quad (17)$$

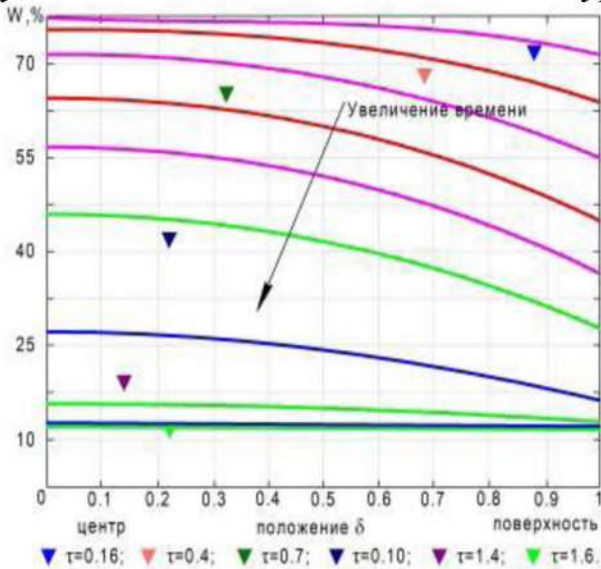
Принимая коэффициент диффузии в зависимости от температуры  $\bar{D}(T)$ , уравнение (14) будет:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\delta}{l} \frac{dl}{dt} \frac{\partial W}{\partial \delta} + \frac{\bar{D}}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial W}{\partial \delta} \frac{\partial T}{\partial \delta} \bar{D}'(T). \quad (18)$$

Если принять коэффициент диффузии, зависящий от влажности и температуры  $\tilde{D}(T, W)$ , что уравнение (14) становится

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\delta}{l} \frac{dl}{dt} \frac{\partial W}{\partial \delta} + \frac{\tilde{D}}{l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \delta^2} + \frac{1}{l^2} \frac{\partial W}{\partial \delta} \frac{\partial T}{\partial \delta} \tilde{D}_T \quad (19)$$

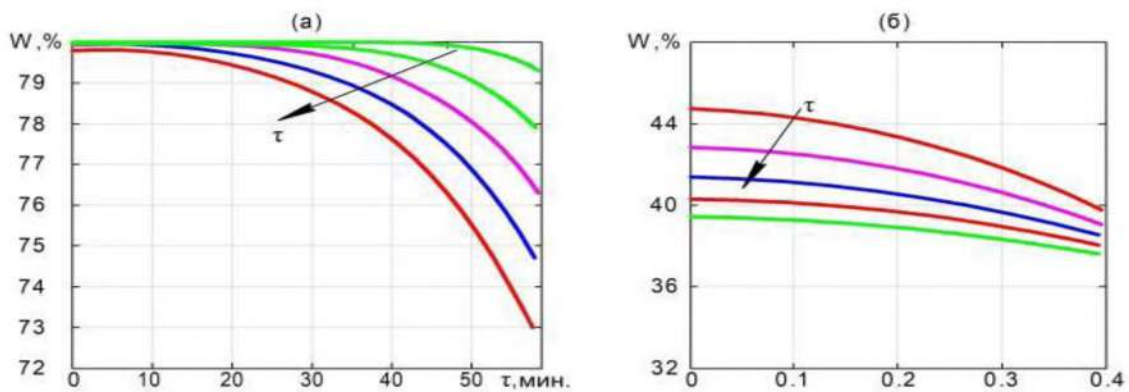
На рис. 8 показано распределение влаги в зависимости от положения  $\delta$  и времени сушки  $\tau$  во время сушки. Температура теплового воздуха для сушки используется в безразмерной модели через  $G_{возд.}$  и зависит от температуры теплового воздуха и парциального давления. Результаты моделирования говорят о самом высоком содержании влаги в центре продукта, монотонно уменьшающемся до самого низкого уровня на поверхности продукта.



**Рис. 8. Безразмерный профиль содержания влаги внутри ломтика якона с увеличением  $\tau$ . Значения параметров задаются как  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$ .**

Динамика содержания влаги в ранние и более длительные периоды представлена на рис. 9. В ранние периоды на снижение влажности влияет влажность на поверхности и небольшое уменьшение размера (длины) тела. В более поздние времена, когда содержание влаги очень низкое, на влажность влияет воздух для сушки, и тогда можно наблюдать очень небольшое уменьшение размера.

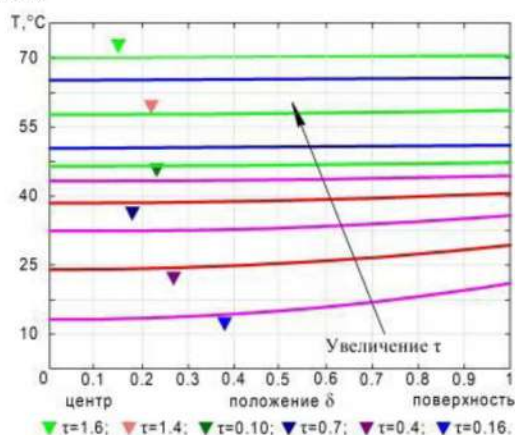




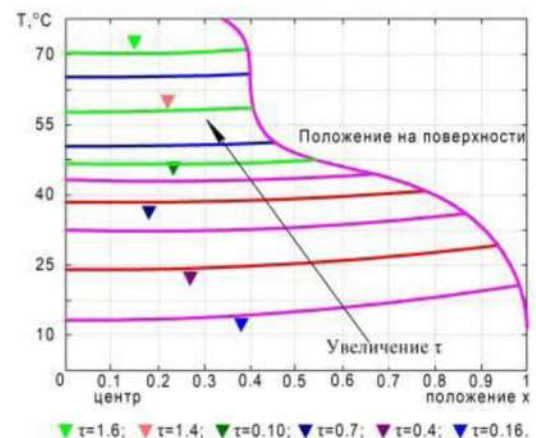
**Рис. 9.** Эволюция безразмерного профиля содержания влаги внутри ломтика якона с увеличением  $\tau$  в терминах физического декартового расстояния  $x$  для (а) ранних времен:  $\tau=0-0,125$  с небольшой усадкой и (б) для более длительных времен:  $\tau=1,28-1,6$  (на шаге  $\tau=0,02$ ) с почти полной усадкой. Значения безразмерных параметров задаются как  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$ .

На рис. 10 показан температурный профиль в якона как функция положения и времени во время сушки. Температура в каждом месте увеличивается со временем сушки, что связано с более высокой температурой теплового воздуха для сушки.

Температурные профили в образце на декартовом расстоянии  $x$ , включая усадку, представлены на рис. 11 и дополнительно показывают, что температура быстро повышается в ранний период нагревания ( $\tau < 0,4$ ). По мере того как нагревание прогрессирует, а усадка уменьшает расстояние между поверхностью и центром, повышение температуры происходит относительно медленно и почти равномерно. В конце сушки температура якона быстро повышается, так как для испарения требуется только небольшое количество тепла.

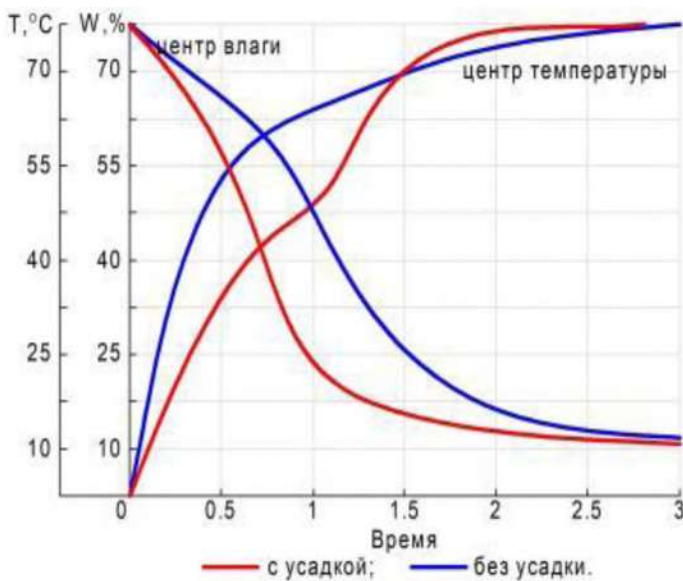


**Рис. 10.** Безразмерный температурный профиль внутри ломтика якона с увеличением  $\tau$ . Значения безразмерных параметров задаются как  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$ .



**Рис. 11.** Профиль контура температуры для безразмерного времени  $\tau$  и положения поверхности  $x$ . Значения безразмерных параметров задаются как  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$ .

На рис. 12 представлено сравнение градиентов влажности и температуры в центре якона с эффектом усадки и без него. Можно видеть, что температура без усадки предсказывает более высокую температуру в определенное время по сравнению с температурой усадки, особенно в начале сушки.



**Рис. 12. Профиль температуры и влажности в центре якона, с эффектом усадки и без него. Модель без усадки относится к уравнениям (11) - (13). Значения параметров такие же, как на рис. 8.**

Коэффициент диффузии зависит от влажности и температуры

$$D = \bar{D}(T) \text{ ва } D = \tilde{D}(T, W)$$

$$\tilde{D}(T, W) = 1,32 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2143}{T}\right) \exp\left(\frac{-0,0735}{W}\right). \quad (20)$$

В безразмерной форме

$$\tilde{D}(T, W) = \frac{\tilde{D}(T, W)}{\tilde{D}(T_0, W_0)} = \left(\frac{0,090714}{\bar{W}}\right) \exp\left(\frac{-2143}{30\bar{T}+311}\right) \quad (21)$$

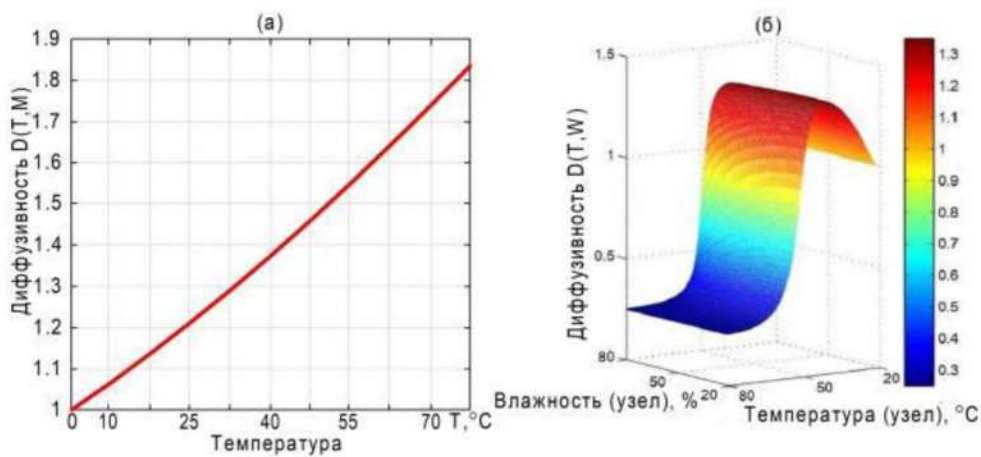
Чтобы выразить только влияние температуры на коэффициент диффузии, мы предполагаем, что влажность рассматривается как постоянная  $W=W_0=0,85$  (начальное содержание влаги); коэффициент диффузии зависит только от значения температуры  $D=\bar{D}(T)$ , определяемого как

$$\bar{D}(T) = 1,204 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2143}{T}\right). \quad (22)$$

В безразмерной форме

$$\bar{D}(T) = \frac{\bar{D}(T)}{\bar{D}(T_0)} = \exp\left(\frac{208,41\bar{T}}{30\bar{T}+311}\right) \quad (23)$$

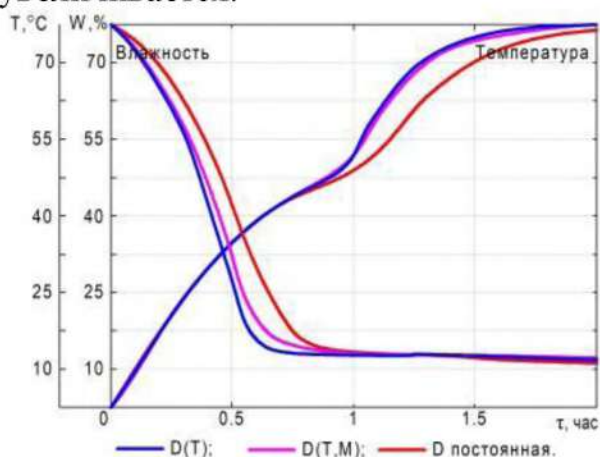
Профиль диффузии с различной локальной влажностью и температурой показан на рис. 13. который показывает (а), что повышенная температура увеличивает диффузионную способность  $\bar{D}(\bar{T})$ . Экспериментальное исследование также предполагает, что образцы, высушивающиеся при температуре ниже  $65^\circ\text{C}$ , находятся в стеклообразном состоянии, а высушенные при температуре выше  $85^\circ\text{C}$  - в резиноподобном состоянии. В стеклообразном состоянии коэффициент диффузии значительно возрастает и согласуется с рисунком 13 (а).



**Рис. 13. График зависимости  $\bar{D}(\bar{T})$  и  $\bar{D}(\bar{T}, \bar{W})$**

Рис. 13 (б) показывает влияние влаги и температуры на коэффициент диффузии. В начале, когда влажность  $\bar{W}=1$  и температура  $\bar{T}=1$ , коэффициент диффузии масштабируется до  $\bar{D}(\bar{T}, \bar{W})$ . С увеличением времени температура увеличивается, а влажность уменьшается, что приводит к увеличению коэффициента диффузии до определенного времени. Кроме того, поскольку влажность продолжает уменьшаться, коэффициент диффузии начинает уменьшаться и затем становится постоянным в конце сушки. Таким образом мы приходим к выводу, что коэффициент диффузии значительно увеличивается в начале сушки и является постоянным в её конце.

Из рис. 14, в начале процесса сушки ( $0 < \tau < 1$ ) температура якона увеличивается медленно, в это время большая часть тепла используется для испарения воды на поверхности. Около 72% воды испарилось. Для сырья, такого как якон, с высоким содержанием сахара, температура стеклования  $T_c$  очень низкая вначале, когда температура составляет  $T_c$ , продукт находится в стеклообразном состоянии. При этом  $T_c$  коэффициента диффузии значительно увеличивается.

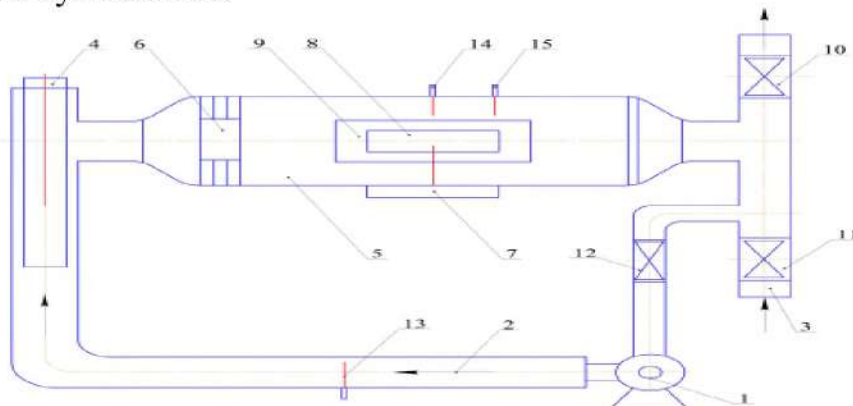


**Рис. 14. Влажность и температура в центре якона с различной диффузностью. Значения безразмерных параметров задаются как  $Sh=18$ ,  $Le=4$ ,  $Nu=0,2$ ,  $\bar{\lambda}=0,4$ .**

В четвертой главе диссертации «Исследование процесса сушки клубней якона» представлены результаты исследования процесса сушки клубней якона.

Экспериментальная сушильная установка для сушки ломтиков якона, контролирует температуру и скорость теплового воздуха и показывает массу сушеного материала. Сушилка в основном состоит из центробежного вентилятора для подачи воздушного потока, электрического нагревателя и электронного пропорционального контроллера, который регулирует

температуру и скорость теплового воздуха и показывает массу сушильного материала. Скорость воздуха регулировалась клапаном. Воздух, прошедший через нагревательный элемент, нагревается до заданной температуры и направляется в сушильный.

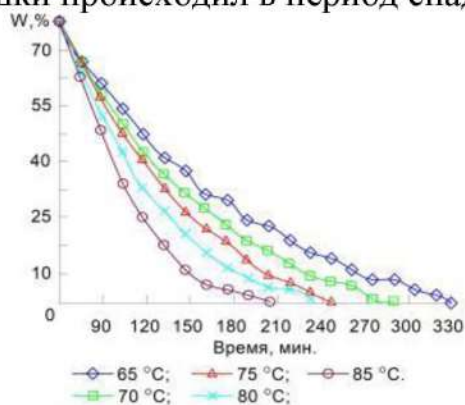


- 1-вытяжной вентилятор; 2-трубопровод; 3-воздухозаборник; 4-нагреватель; 5- осушитель; 6-устройство для равномерного обдува; 7-датчик веса; 8-лоток для материала; 9-смотровое окно; 10,11,12-дрессельный клапан; 13-датчик давления; 14-датчик температуры по сухому термометру; 15-датчик температуры по влажному термометру

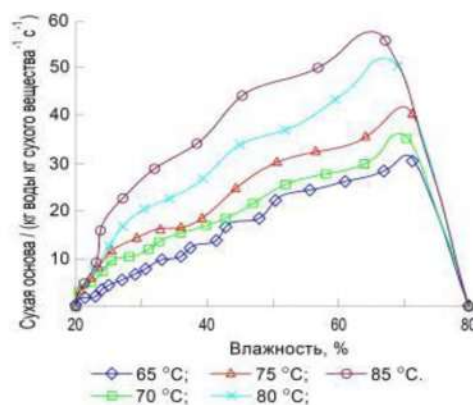
**Рис. 15. Принципиальная схема установки**

Температура воздуха контролировалась пропорциональным регулятором. Площадь поперечного сечения потока в составляет  $20 \times 20$  см, тепловой воздух проходил горизонтально через лоток с отверстиями и поверхностной площадью  $12 \times 12$  см. Выхлопной газ в этом эксперименте не циркулировал. Точность системы контроля температуры составляла  $0,1$  °С, системы контроля массы  $0,1$  г. Принципиальная схема установки показана на рис. 15.

Изменение соотношения влажности в зависимости от времени сушки якона при температурах теплового воздуха ( $65, 70, 75, 80$  и  $85$  °С), нарезанного до толщины  $4$  мм, и скорости воздуха  $1,05$  м/с показаны на рис. 16. Повышение температуры воздуха для сушки привело к сокращению времени сушки. Изменения скорости сушка с влажностью видна на рис. 17. На кривых можно наблюдать влияние температуры сушки на воздухе на скорость сушки. Из этого следует, что скорость сушки непрерывно снижается с увеличением времени. На кривых практически отсутствует постоянная скорость сушки, и весь процесс сушки происходил в период спада.



**Рис. 16. Кривые сушки якона для различных температур при скорости  $1,05$  м/с и толщине  $4$  мм**



**Рис. 17. Кривые скорости якона сушки для различных температур при скорости  $1,05$  м/с и толщине  $5$  мм**

На рис. 18 показаны основные этапы переработки клубней якона в соответствующий порошок при их сушке. Высушенный материал измельчали в порошок с помощью мельницы. Затем образцы упаковывались в пластиковые пакеты и хранились в сухом месте при комнатной температуре.

Содержание фруктозы и фруктана анализировали в порошковых образцах якона для определения способа сушки и формы продукции (табл. 1). Самая высокая концентрация фруктозы была получена в ломтиках якона.



**Рис. 18. Процесс переработки клубней якона**

Данные, полученные в результате экспериментальных испытаний по сушке клубней якона, представлены в таблице 1 ниже.

**Таблица 1**

**Результаты лабораторных исследований высушенных клубней якона**

№	Образцы	Условия сушки	Процентное содержание нулина в сухом веществе, мг%
1	Сушеные клубни якона	– способ сушки - конвективный; – температура сушки – 75 °С; – время сушки – 300 мин.	46,3
2	Высушенный корень топинамбура	– способ сушки - ИК; – температура сушки – 75 °С; – время сушки – 300 мин.	42,7

Результаты показали, что изменение влажности зависит от времени сушки в диапазоне температур от 65 до 85 °С. Значения  $D_{эфф}$  для сушки при температуре воздуха 65-85 °С, скорости воздуха 1,05 м/с и толщине ломтика якона 4 мм находились в диапазоне от  $5,7091 \times 10^{-10}$  до  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Энергия активации диффузии влаги составила 43,36 кДж/моль.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе установлено, что при использовании только процесса диффузии движение влаги может охарактеризовать процесс сушки. Во время сушки для оценки сушки была использована упрощающая граница процесса сушки. Если число  $Sh$  принимаем как 18, то сможем увидеть, что диффузионное сопротивление в продукте через пограничный слой жидкости в два раза выше конвекционного сопротивления.

2. Изменение температуры сырья зависит от соотношения между числами  $Nu$  и  $\bar{\lambda}$ . Если число  $Nu$  близко к числу  $\bar{\lambda}$  или равно ему, то с развитием процесса соответственно медленно увеличивается и температура продукта. Если  $Nu \gg \bar{\lambda}$ , то температура поверхности не сразу достигнет до температуры воздуха. Для сырья и в значениях коэффициента подачи тепла наблюдается существенная разрозненность, в связи с тем для сырья значения  $Nu$  берутся в промежутке 0,1-1,2.

3. Доказано, что влажность в модели с эффектом сокращения снижается быстрее по сравнению с моделью без сокращения, то есть это требует короткого времени сушки и соответствует результатам исследования. Результаты исследования показывают, что значения сжатия для начальной влажности  $W_0=0,85$  бывают в пределах от 1,0 до 0,28. После удаления всей влаги из продукта сокращение составляет 74% первичного объема. Это указывает на то, что модель с эффектом сокращения во время сушки может охарактеризовать действия влаги и температуры в яконе.

4. Доказано, что во время сушки изменение влаги происходит в пределах температуры от 65 до 85 °С. Для сушки при температуре воздуха 65-85 °С значения  $D_{эфф}$ , скорость воздуха 1,05 м/с и толщина куска якона 4 мм были установлены в пределах от  $5,7091 \times 10^{-10}$  до  $1,3484 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Энергия активизации диффузии влажности составила 43,36 КЖ/мол. Температура сушки, скорость горячего воздуха и толщина кусков якона, а также их влияние на сушильные свойства были исследованы на сушилке с помощью принудительной конвекции. Процесс сушки проходил в период снижения скорости и при этом не наблюдалась постоянная скорость.

5. Проводился сравнительный анализ содержания инулина в порошке, полученном из сушеных клубней якона. В результате было установлено, что содержание инулина в клубне якона по сравнению с клубнем топинамбура выше на 3,6%, то есть в сушеном клубне якона составляет 46,3 %, а в сушеном клубне топинамбура – 42,7 %. Установлено, что содержание инулина в сушеном клубне топинамбура, который сушили с использованием других методов сушки, по сравнению с клубнем якона меньше до 1...5%.

6. Рекомендации по сушке клубней якона в соответствии с диссертационной работой внедрены в производство в ООО «WORLD FARM BUSINESS» (справка №02/027-45055 Министерства сельского хозяйства Республики Узбекистан от 5 ноября 2021 года). В результате применения процесса конвективной сушки продуктивность увеличилась в 1,22 раза; средняя общая экономическая эффективность составила 227 878 500 сум в год.

**SCIENTIFIC COUNCIL TO AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREE  
PhD.03/30.12.2019.T.101.01 AT THE BUKHARA ENGINEERING  
TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**KHUJAKULOV ULUGBEK KARIMKULOVICH**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE DIFFUSION PROCESS IN THE  
TECHNOLOGY OF CONVECTIVE DRYING OF YACON TUBERS**

**02.00.16 – Processes and apparatus of chemical technologies and food production  
(technical sciences)**

**ABSTRACT OF A DISSERTATION OF THE DOCTOR PHILOSOPHY (PhD)  
IN TECHNICAL SCIENCES**

**Bukhara – 2021**

The theme of dissertation doctor of philosophy (PhD) was registered in the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2021.4.PhD/T2434.

The dissertation has been carried out at the Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council (www.bmti.uz) and Information and Educational portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz.)

**Scientific consultant:** Safarov Jasur Esirgapovich  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:** Abduraxmonov Olim Rustamovich  
doctor of technical sciences, professor

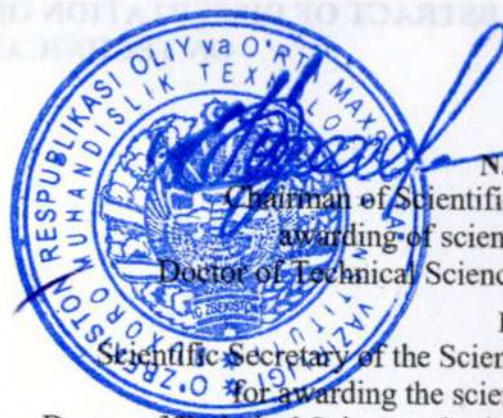
Masharipova Zulxumar Atabekovna  
PhD on technical sciences, associate dosent

**Leading organization:** Karshi Engineering Economic Institut

The defense of dissertation will be held at «10<sup>00</sup>» on 10.01 2022 year at the scientific council PhD.03/30.12.2019.T.101.01 at Bukhara engineering technological institute. (Address: 200117, Bukhara, Q.Murtazaev street, 15. Tel.: (+99895) 604-44-70; Fax: (+99865) 223-78-84; e-mail: bmti\_info@edu.uz).

The dissertation is available at the Information Resource of the Bukhara engineering technological institute (registration number №352 Address: 200117, Bukhara, Q.Murtazaev street, 15. Tel.: (+99895) 604-44-70; Fax: (+99865) 223-78-84; e-mail: bmti\_info@edu.uz.

The abstract of the dissertation has been distributed on «25» december 2021 year.  
Protocol at the register № 18 dated «29» november 2021 year.



**N.R.Barakayev**  
Chairman of Scientific Council for  
awarding of scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, professor

**R.R.Khayitov**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
for awarding the scientific degree,  
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

**Sh.M.Khodjiev**  
Chairman of the Scientific Seminar under  
Scientific Council for awarding the scientific  
degree, Candidate of technical sciences,  
associate professor



## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of research** is mathematical modeling of the diffusion process in the technology of convective drying of yacon tubers.

**The subject of research** is the technological parameters of drying yacon tubers, obtained on the basis of modern theoretical calculations.

**The scientific novelty of the research is:**

developed one-phase and two-dimensional moisture-thermal models of the drying process of yacon tubers (*Smallanthus sonchifolius*);

it was found that at  $Nu > 1$ , convection has little resistance to heat transfer, which leads to the fact that the surface temperature instantly reaches the temperature of the thermal air;

an increase in temperature and a decrease in humidity during drying depend on the values of the parameters at the surface boundary  $Sh=18$ ,  $Nu=0.2$  and latent heat  $\lambda=0.4$ ;

a mathematical model of the relationship between diffusion and thermal conductivity in the process of shrinkage of yacon tubers (*Smallanthus sonchifolius*) has been developed;

technological parameters of drying have been developed and effective coefficients of moisture diffusion have been obtained;

a technology has been developed for the influence of temperature on the drying of yacon tubers, the speed of thermal air and the thickness of the slices, which were investigated in a dryer with forced convection.

**Implementation of research results.** Based on the results obtained on mathematical modeling of the diffusion process in the technology of convective drying of yacon tubers, the following amount of work was done:

energy-saving technology was introduced for drying yacon tubers in the production of WORLD FARM BUSINESS LLC (certificate of the Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan dated 05.11.2021 No. 02/027-4505). As a result of the application of highly efficient technology, the output increased by 1.1 times, and the loss of raw materials decreased by 6%;

the technology of the process of drying yacon tubers was introduced in the production of WORLD FARM BUSINESS LLC (certificate of the Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan dated 05.11.2021 No. 02/027-4505). As a result of the application of highly efficient technologies, 90-95% of the biologically active substances of the final product are retained.

the developed technique and technology for drying yacon tubers in the production of WORLD FARM BUSINESS LLC (certificate of the Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan dated 05.11.2021 No. 02/027-4505) were introduced. As a result of the introduction of highly efficient, energy-saving drying plants using thermal convection, energy savings due to diffusion have been achieved, 1.2 times less than with existing technologies and installations.

**The structure and volume of the dissertation.** The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the thesis is 120 pages, includes 41 figures and 14 tables.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Акрамов У.И., Мирсултонов М., Хужакулов У.К. Якон – новое овощное и лекарственное растение для Узбекистана. // *Agro ILM*. –Ташкент, 2017. – № 2 (46). –С.72-73. (05.00.00; №3).
2. Акрамов У.И., Хужакулов У.К. Якон (*Polymnia sonchifoliya* роер.етенд L) – перспективная нетрадиционная культура для Узбекистана. // *Вестник аграрной науки Узбекистана*. – Ташкент, 2017-№3 (69). –С.33-38. (05.00.00; №18).
3. Safarov J.E., Khujakulov U.K. Research yacon tubers (*polymniasonchifolia*) as the subject of study. // *International journal of advanced research in science, engineering and technology*. -India, 2019. –С.12114-12118. (05.00.00; №8).
4. Сафаров Ж.Э., Хужакулов У.К., Султанова Ш.А. Математическая формулировка одномерной модели усадки. // *Universum: технические науки*. – Москва, 2020. №8(77). –С.46-50. (02.00.00; №1).
5. Хужакулов У.К., Гурбуз Гунеш, Айт-Каддоур А., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э. Математическая формулировка одномерных моделей влаги растительного сырья и тепла. // *Развитие науки и технологий*. – Бухара, 2020. №4. -С.160-165. (02.00.00; №14).
6. Хужакулов У.К., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э. Результаты моделирования сушки клубней якона. // *Развитие науки и технологий*. – Бухара, 2021. №4. -С.190-199. (02.00.00; №14).
7. Khujakulov U.K., Sultanova Sh.A., Safarov J.E. Experimental study of drying yacon tubers. // *Technical science and innovation*. –Tashkent, 2021. №2. P.258-263. ([www.uzjournals.edu.uz](http://www.uzjournals.edu.uz)).

**II бўлим (II часть; II part)**

8. Khujakulov U.K., Safarov J.E., Ait-Kaddour A., Saydullayev A.B. Analysis of drying equipment for drying raw materials. *International Journal of Advanced Science and Technology*. Vol.29, №9s. 2020. pp.5813-5818.
9. Khujakulov U.K. Kinetic dependences of the drying process. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*. ISTC-2K20. 2020. - P.15-21. (16. Directory indexing of international research journals-CiteFactor, IF-3.5).
10. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Khujakulov U.K., Samandarov D.I. Studies drying process products. *International Journal of Advanced Science and Technology*. Vol.29, №9s. 2020. pp.5823-5828.
11. Сафаров Ж.Э., Хужакулов У.К. Исследование диффузионный модель для клубней якона. *Международная научно-практическая конференция “Современные проблемы инновационного развития науки, образования и производства”*. Андижан, 2020. -С.388-391.
12. Сафаров Ж.Э., Хужакулов У.К. Исследование изотерма клубней якона. *IX Международная научно-практическая конференция «Наукові здобутки у*

вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства». Київ, 2020. –С.220-221.

13. Сафаров Ж.Э., Султанова Ш.А., Хужакулов У.К. Основные подходы к количественной оценке процесса сушки. IX Международная научно-практическая конференция «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства». Київ, 2020. –С.222-225.

14. Хужакулов У.К. Прогнозирование распределения влаги внутри твердого тела. Международная научно-практическая конференция на тему «Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в сфере охраны окружающей среды». 18-19 сентября, 2020, Ташкент. 3-том. –С.68-72.

15. Хужакулов У.К., Жумаев Б.М., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э. Изотермическое решение плодов якона. Международная научно-практическая конференция на тему «Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в сфере охраны окружающей среды». 18-19 сентября, 2020, Ташкент. 3-том. –С.56-58.

16. Хужакулов У.К. Исследование процесса сушки клубней якона. Международная конференция «Инновационные пути решения актуальных проблем развития пищевой и нефтегазохимической промышленности». Бухара, 2020. Том №1. –С.214-216.

17. Khujakulov U.K. Obtaining biologically active substances in order to use them as antioxidant preparations from yacon. International scientific and practical conference "Problems and prospects of innovative machinery and technologies in the agri-food sector". Tashkent, 2020. –p.486-487.

18. Khujakulov U.K., Sunil Verma, Dadayev G.T., Safarov J.E. Studying the kinetics of drying. International conference «Innovative ways of solving urgent problems of development of the food and petrochemical industry». Bukhara, 2020. Vol.1. –С.99-102.

19. Safarov J.E., Dadayev G.T., Khujakulov U.K., Sunil Verma, Abhijit Tarawade. Traditional and advanced technology of food drying. Republican scientific-practical conference "Actual problems of industrial engineering". Bukhara, 2021. P.73-74.

Авореферат “Дурдона” нашриётида тахрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек,  
рус ва англиз тилларидаги матнларнинг мослиги текширилди.



Босишга рухсат этилди: 25.12.2021 йил. Бичими 60x84 1/16 ,  
«Times New Roman» гарнитурлада рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 3. Адади: 100 нусха. Буюртма № 426.

Гувоҳнома АИ №178. 08.12.2010.  
“Садриддин Салим Бухорий” МЧЖ босмахонасида чоп этилди.  
Бухоро шаҳри, М.Икбол кўчаси, 11-уй. Тел.: 65 221-26-45