

Николай Вълв

**ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА
КОНВЕКТИВНА СУШИЛНЯ ЗА
ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ**

МОНОГРАФИЯ

Бряг Медиа Груп ЕООД
Русе

2021

Заглавие: Интелигентно управление на конвективна сушилня за плодове и зеленчуци - монография

Автор: Николай Петков Вълков

Рецензенти:

проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев

доц. д-р инж. Никола Николаев Николов

© Бряг Медиа Груп ЕООД

ISBN 978-619-90584-7-3



Title: Intelligent control of convective dryer for fruits and vegetables - monograph

Author: Nikolay Petkov Valov

Reviewers: Prof. Ivan Borisov Evstatiev, PhD

Assoc. Prof. Nikola Nikolaev Nikolov, PhD

© Briag Media Group Ltd.

ISBN 978-619-90584-7-3



В монографията са анализирани изследванията и разгледани концептуалните и методически въпроси на управлението на сушилните процеси при конвективно сушене на плодове и зеленчуци. Целта е максимално използване на потенциала на атмосферния въздух, като сушилнен агент, преследване на минимални енергийни разходи и минимална продължителност на процеса, както и получаването на готова продукция с високо качество и запазени хранителни съставки.

Изследвано и доказано е, че параметрите температура и скорост на сушилния агент влияят както на консумираната енергия по време на процеса, така и на качеството на готовата продукция. Сушилните процеси са с относително голяма продължителност и тяхното управление и промяна, през определен период, има положителен ефект за постигането на желаните резултати, а именно намаление на енергийните разходи и производство на продукция с високо качество. Проведените изследвания показват значително намаляване на необходимата енергия за сушенето при периодично управляем процес, спрямо сушене с постоянни стойности на сушилния агент. Дефинирани са пределни стойности на сушилния агент, които запазват хранителните стойности и качеството на изсушените продукти. Определена е зависимостта на енергийните разходи и продължителността на процеса от параметрите на сушилния агент, като най-общо тя е обратно пропорционална - при намаляване на времето за сушене се увеличава използваната енергия. На тази база е описан комплексен критерий за управление на процеса сушене с тегловни коефициенти, които могат да бъдат променяни в зависимост от преследваните цели: най-малко използвана енергия, най-кратък по време процес или най-добро качество на готовата продукция.

Монографията е предназначена за специалистите по управление на топло и масо преносни процеси, характеризиращи процеса сушене. Докторанти, пост докторанти, млади учени могат да я използват, като учебно пособие по компютърно моделиране и управление на процеси, измерване и изчисляване на неелектрични величини, дистанционно управление на компютърна система.

Николай Вълов. Интелигентно управление на конвективна сушилня за плодове и зеленчуци

The monograph analyzes, researches and considers the conceptual and methodical questions for control of drying process using convective drying of fruits and vegetables. The main aim is maximizing the potential of the used atmospheric air as a drying agent as well as minimizing the energy used and duration of the process, while maintaining a high-quality production with preserved nutritional value.

The research shows and proves that the parameters temperature and speed of the drying agent influence the consumed energy during the process as well as the quality of the production. The drying process take relatively long so their control and variation within a specified period have a positive effect on the desired results, i.e. reduction in the energy resources used for a high-quality production. The conducted researches show a significant reduction of the energy required for drying in a periodically controlled process, compared to drying with constant values of the drying agent. Limiting or permissible values of the drying agent are defined, so that the nutritional value and the quality of the dried products is maintained. The relation between the drying agent parameters for energy use and duration of the process is determined. It is generally an inverse relationship – smallest time for drying is need more energy. Based on this a complex criterion for the control of the drying process is set using weight coefficients, which can be adjusted based on the aims: least amount of energy used, fastest duration of the process or best quality of the produce.

The monograph is designed for the control specialist of heat and mass transfer processes, characterizing the drying process. PhDs, postdocs and young scientist may use it as a teaching guide of computer modelling and control of processes, measurements and calculations of nonelectric quantities and remote control of the computer system.

Nikolay Valov. Intelligent control of convective dryer for fruits and vegetables

СЪДЪРЖАНИЕ:

| | |
|---|----|
| У В О Д | 1 |
| Глава 1 АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ | 3 |
| 1.1. Екологичност и ползи от сушените плодове и зеленчуци..... | 3 |
| 1.2. Методи за сушене на плодове и зеленчуци..... | 12 |
| 1.3. Видове конвективно сушене на плодове и зеленчуци | 24 |
| 1.4. Способи за намаляване на енергийните разходи при сушене..... | 34 |
| 1.5. Ръчно и автоматично за управление на сушилните процеси | 40 |
| Глава 2 КОНЦЕПТУАЛНИ И ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ | 47 |
| 2.1. Моделиране на сушилните процеси на плодове и зеленчуци..... | 47 |
| 2.2. Анализ на факторите за въздействие върху процесите на сушене на плодове и зеленчуци..... | 58 |
| 2.3. Критерии за управление на сушилните процеси на плодове и зеленчуци..... | 65 |
| 2.4. Избор на комплексен критерий за управление на сушилните процеси на плодове и зеленчуци..... | 72 |
| Глава 3 МЕТОДИЧЕСКИ ОСНОВИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ | 75 |
| 3.1. Методика за определяне на влагосъдържанието на атмосферния въздух | 75 |
| 3.2. Методика за снемане на кинетичните криви на сушене на плодове и зеленчуци..... | 76 |
| 3.3. Методика за определяне съдържанието на витамин С | 79 |
| 3.4. Методика за определяне съдържанието на β -каротин | 80 |
| 3.5. Методика за определяне на цветовите характеристики на сушените плодове и зеленчуци..... | 80 |
| Глава 4 СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КОНВЕКТИВНА СУШИЛНЯ | 82 |
| 4.1. Определяне на оптимизационните параметри за сушилния процес на кайсии..... | 82 |
| 4.1.1. Оценка на зависимостта на съдържанието на витамин С от параметрите на сушилния агент | 86 |
| 4.1.2. Оценка на зависимостта на съдържанието на β -каротин от параметрите на сушилния агент | 87 |
| 4.1.3. Оценка на зависимостта на цветовите характеристики от параметрите на сушилния агент | 87 |
| 4.2. Експериментална уредба, апарати и прибори за изследване на сушилните процеси на плодове и зеленчуци..... | 88 |
| 4.3. Програмно осигуряване за измерване и управление на процесите | 93 |
| 4.4. Реализация на системата за контрол и управление на режимните параметри | 96 |

| | |
|--|------------|
| 4.5. Експериментални изследвания на системата за контрол и управление на режимните параметри в сушилнята..... | 99 |
| 4.6. Възможност за отдалечен достъп за следене и настройване на системата за сушене на плодове и зеленчуци | 102 |
| 4.7. Развитие на системата за сушене на плодове и зеленчуци, чрез адаптиране на микроконтролер | 105 |
| Глава 5 ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ТЕОРИЯТА И ПРАКТИКАТА..... | 111 |
| ИЗПОЛЗВАНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ..... | 116 |

У В О Д

Сред храните със защитни функции са плодовете и зеленчуците и соковете, извлечени от тях. Според Световната здравна организация употребата в ежедневната храна на 700÷800g плодове и зеленчуци ще намали риска от онкологични, сърдечно-съдови и някои, свързани с възрастта, заболявания с почти 50%. Но подчертаната сезонност на земеделското производство на плодове и зеленчуци, трудността да се поддържат високи биологични свойства на продукцията, без специално оборудване за съхранение, не позволяват тя да се използва през цялата година.

Отстраняването на влагата от плодовете и зеленчуците чрез изсушаване до съдържание на влага от 8÷8.5% ще осигури възможност за нейното дългосрочно съхранение при нормални условия. В сравнение с други методи за консервиране, сушенето дава равномерно свиване, поради което материалът има по-пореста, бързо възстановяваща се структура - в рамките на 5÷15 минути.

Днес сушените плодове и зеленчуци са незаменим хранителен продукт. Те съдържат голямо количество въглехидрати, витамини и минерални соли, които са много полезни за човешкия организъм. Сушените плодове имат до 4-5 пъти по-голяма концентрация на витамини и минерали в единица обем, в сравнение с пресните. Те съдържат всички хранителните вещества на пресните плодове с много по-голяма концентрация. Протеините, етеричните масла и органичните соли, които се съдържат в сушените плодове и зеленчуци, допринасят за доброто храносмилане.

Почти всички плодове и зеленчуци могат да се сушат. Изработват се и специфични сушени продукти или смеси. Изсушените плодове и зеленчуци се използват често при продължителни походи и експедиции в комбинация с белтъчни продукти. Следователно си струва консумацията на достатъчно количество различни видове сушени плодове и зеленчуци.

Всяка година и всеки сезон се отглежда и събира значителна реколта от плодове и зеленчуци в полетата на България и по целия свят. Въпросите за съхранението, преработката, намаляването на загубите, запазването на външният вид и хранителните вещества са и ще бъдат актуални за всеки производител и преработвател на плодове и зеленчуци.

Един от високопроизводителните, екологичен и перспективен метод за съхранение на плодове и зеленчуци е доказано, че е сушенето им. Проблемът с използване на този метод е, че автоматизацията и управлението на процесите за сушене и свойствата на изсушените плодове и зеленчуци са недостатъчно изследвани и изучени. Специалистите не са запознати с автоматизацията за поддържането на оптимални параметри на процеса сушене на плодове и зеленчуци, което ограничава тяхното развитие и приложение.

Автоматизацията на управлението на процесите на сушене на плодове и зеленчуци е едно от главните направления в икономията на енергия, суровини и материали, в оползотворяване на земеделската продукция и опазване на околната среда. В условията на съвременната криза за енергия и изхранване на населението, намаляването на разходите за съхраняване на плодове и зеленчуци чрез сушене е от изключително важно значение за икономиката на всяка страна. Проблемът за съхранението и оползотворяването на плодовете и зеленчуците стои пред всички страни, но той е особено остър за страни, производители на плодовете и зеленчуците, бедни на енергийни ресурси, каквато е и нашата страна.

Целта на монографията е да представи изследванията на автора, въз основа на проведените научни експерименти, получените резултати и оптимизирани параметри на процесите за автоматично управление на сушенето на кайсии, които чрез усъвършенстване и доразвитие могат да се адаптират към различни плодове и зеленчуци. Да запознае специалистите, докторантите и младите учени с процесите, методите и средствата за автоматично управление на сушенето на плодове и зеленчуци, като по този начин допълни информационната ниша в тази област.

Глава 1

АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ

1.1. Екологичност и ползи от сушените плодове и зеленчуци

Сушенето на плодове и зеленчуци е познато на хората от дълбока древност, използвано масово от нашите баби, то е най-ефективният и екологичен начин за запазване и дългосрочно съхранение на всички хранителни и лечебни свойства на плодовете, зеленчуците, пикантните и лечебните растения, доказал се метод в продължение на хиляди години.

Най-древното споменаване на сушените плодове и зеленчуци е в месопотамски плочки с клинопис, които съдържат вероятно най-старите запазени рецепти, открити от археолозите. Във всички древни средиземноморски цивилизации те са част от кулинарните традиции и неизменно присъствие на богатите пиршества. В средновековна Европа също стават важна съставка в менюто, особено на по-заможните и на аристократите, които хапват различни блюда с плънка от телешко със сушени сини сливи и фурми, солена риба, приготвена със сушени смокини и стафида и патица с костилкови плодове.

Много хора днес се питат: защо да консумираме сушени плодове и още повече зеленчуци, когато почти през цялата година търговската мрежа предлага пресни ябълки, круши, цитрусови плодове, банани, повечето зеленчуци, различни плодови и зеленчукови консерви, бързо замразени

плодове, сокове и др.. Със сигурност е хубаво, че хората имат толкова богат избор, който да отговаря на техните нужди и вкусове. Но за населението на страни с умерен и студен климат, осигуряването на балансирана диета, по отношение на витамини, микроелементи, органични киселини и други биологично активни вещества, винаги е била и остава доста остър проблем, особено през зимно-пролетния сезон.

Съществуват различни методи за съхранение на храните и запазване на хранителните им свойства: създаване на контролирана атмосфера в магазините за зеленчуци или вакуумиране, топлинна обработка на храната (високи температури или студ), насищане на храната с консерванти (сол, захар, продукти от изгаряне на органични горива, изкуствени химични съединения и др.), ферментация, дехидратация и др.. Технологии, базирани на тези методи и техните комбинации, позволяват да се запази по-голямата част от отглежданата реколта от плодове и зеленчуци, като се осигури по този начин населението с растителна храна извън сезона.

Повечето от съществуващите технологии обаче решават проблема само количествено, а не качествено. В процеса на съхранение и преработка на растителни продукти се губи естественият им набор от биологично активни вещества и на първо място витамини. Кислородът, светлината, йоните на преходни метали, повишени температури, химичните съединения на консервантите и други разрушителни фактори, задействат и катализират деструктивните процеси, резултатът от които е образуването на по-малко полезни (и често вредни) съединения. Това се доказва от многобройни изследвания на научни работници, както местни, така и чуждестранни, които показват, че при различните начини за консервиране на плодове и зеленчуци, загубата на витамин С е [84]:

- При замразяване: 10÷25%;
- При консервирани плодове и зеленчуци: 35÷50%;
- При пастьоризирани сокове: 45÷55%;
- При консерви и конфитюри: 60÷75%;
- При висококачествени сушени плодове: 5÷7%.

От посочените стойности, може да се заключи, че сушенето е наистина ефективен начин за запазване на естествения набор от витамини в плодовете и зеленчуците. Важно е да се подчертае, че посочените резултати за загубата на витамин С при сушените плодове и зеленчуци се постигат чрез осигуряване на оптимални условия на топлината и влажността при автоматичното управление на процесите на сушене.

Нарастващото глобално търсене на преработени храни и полуфабрикати тласка производителите на храни към по-активно търсене на иновационни решения. Тази тенденция не подминава и толкова специфичната индустрия, като производството на сушени плодове и зеленчуци. Ръстът на пазара на сухи плодове и зеленчуци в света годишно варира от 10 до 20%, тази тенденция продължава още от 2010÷2019г., това е един от най-обещаващите и печеливши бизнеси и пазари в световен мащаб. Ако морковите на едро струват 5÷7 долара за 10 килограма през есента, а за 1kg сухи моркови са необходими 7kg суровина, тогава цената на сухите моркови е 35÷50 долара плюс режийните разходи и производствената им цена ще е около 60÷90 долара за килограм. Продажната цена обаче на такива био или органик продукти достига 110÷130 долара за килограм.

От друга страна, не е тайна, че при прибирането на реколтата, нискокачествените плодове и зеленчуци (дребните, с изкривена форма, счупените и наранени), което в днешните условия достига до 30%, просто се изхвърлят от земеделските производители. Поне още 20% от продукцията се губи при измиването или съхранението на плодовете и зеленчуците. Ако имате собствена сушилня, можете да получите растително брашно от нискокачествените плодове и зеленчуци, като по този начин можете да оползотворите цялата си произведена продукция, да повишите доходите си и постигнете екологичен ефект, чрез оползотворяване на ресурсите.

Сушенето в производствена среда позволява на производителите да доставят здравословни, готови за консумация храни с по-дълъг срок на годност, според скорошен доклад за сушените плодове и зеленчуци от Future Market Insights. В този контекст сушените плодове и зеленчуци от всякакъв вид бързо набират популярност сред потребителите. Това увеличение на

търсенето стимулира растежа на продажбите и за да отговорят на нарастващите нужди на потребителите, компаниите трябва да модернизират дейността си, да въведат нови методи и технологии. В крайна сметка това трябва да осигури не само увеличаване на производителността, но и повишаване на качеството и увеличаване на срока на годност на крайния продукт. Резултатите, получени в хода на проучването, показват, че се очаква световният пазар на сушени плодове и зеленчуци да нарасне с 4.8% през следващото десетилетие. С прогнозна стойност от над 56 млрд. долара през 2019г. се очаква, че приходите от сушени плодове и зеленчуци ще надхвърлят 90 млрд. долара до 2028г..

Нараства търсенето на сушени плодове и зеленчуци в световен мащаб, поради което за този пазар е създадена надеждна верига за доставки с развита транспортна инфраструктура и стандартизирани формати за опаковане. В същото време устойчивостта на производството и активното прилагане на иновациите продължават да стимулират производствените и маркетинговите процеси на ключови играчи на пазара. И на фона на постоянно нарастващото търсене на екологично чисти продукти, които са от полза за организма, сушените плодове и зеленчуци стават все по-търсени. Следователно прогнозите за растежа на пазара на сушени плодове и зеленчуци са повече от оптимистични.

Днес сушените плодове и зеленчуци са незаменим хранителен продукт, те запазват голяма част от витамините и останалите полезни вещества, които се съдържат в пресните. Сушените плодове и зеленчуци съдържат голямо количество въглехидрати, витамини и минерални соли, които са много полезни за човешкия организъм. Полезни са при авитаминоза, депресии, анемии, сърдечни заболявания, освен това са отличен източник на естествени витамини през зимата. Протеините, етеричните масла и органичните соли, които съдържат сушените плодове и зеленчуци, допринасят за доброто храносмилане. Енергийна стойност на сушените плодове и зеленчуци са:

- протеини – 37.5g (150kcal);
- мазнини – 0.7g (6kcal);

- въглехидрати – 23.4g (94kcal).

Многобройните ползи на сушените плодове и зеленчуци за здравето са известни от древни времена. Още тогава хората са се научили да сушат плодовете, за да ги консумират през студените месеци на годината. Днес се практикуват различни начини за приготвяне на сушени плодове - сега плодовете се сушат, обезводняват, изпаряват или пък мариноват в захар. Всички начини на обработване запазват полезните свойства на плодовете, като същевременно им придават различен вкус.

Предимствата на сушените плодове и зеленчуци са:

- сушените плодове и зеленчуци заемат по-малко място от свежите;
- по време на сушене полезните вещества се запазват в много по-голяма степен, спрямо другите методи за съхранение;
- можете да изсушите дори тези продукти, които не са подходящи за мариноване и осоляване;
- сушените плодове и зеленчуци не изискват специални условия за съхранение [18].

Недостатъците на сушените плодове и зеленчуци са:

- ако продуктите трябва да бъдат възстановени при консумация, това отнема време;
- при високи температури на сушене се губи много витамин С.

Основната полза от сухите плодове и зеленчуци е, че те са 100% екологични. Те запазват полезните си свойства за дълъг период от време (до 5 и повече години). Друго важно предимство на сухите плодове и зеленчуци е пълното отсъствие на химическа обработка. За получаването им се използват само механични и термични въздействия.

Благодарение на изсушаването плодовете и зеленчуците значително намаляват обема си (от 2.5 до 5 пъти). Това позволява да се спести значителна сума при транспорт и доставка на стоките. Освен това не се губи огромна площ, за съхраняване на продуктите в склада, като в резултат на това е необходима и по-малко работна ръка.

Пресните плодове и зеленчуци съдържат около 80÷90% вода. Поради тази причина те са бързо развалящи се продукти, които изсъхват и гният

много бързо. Ако намалите количеството на течността в тях до 12÷15%, те ще могат да устоят на въздействието на различните микроби. Сушените плодове и зеленчуци няма да се развалят много дълго, ако се спазват правилните условия за съхранение.

Сушените плодове и зеленчуци са истински природен концентрат от полезни вещества. В тях няма оцветители, стабилизатори, емулгатори, нитрити или пък изкуствени добавки. Навярно смятате, че сушените плодове и зеленчуци са по-бедни на витамини и други ценни хранителни вещества от пресните, но това съвсем не е така. Наистина при изсушаването се губят част от витамините, но ценни микроелементи като калция, желязото, натрия, магнезия, а също така пектинът и фибрите, се запазват напълно.

Калцият в сушените плодове и зеленчуци укрепва костите, косата и ноктите и подобрява състоянието на кожата. Калият подпомага работата на сърцето и укрепва нервната система. Натрият и желязото поддържат баланса на хемоглобина в кръвта, а магнезият нормализира кръвното налягане. Фибрите позволяват на стомаха ни да работи оптимално.

Повечето хора знаят, че сушените плодове и зеленчуци са много здравословни, но не са много тези, които са наясно какви точно са полезните им качества. Тази липса може да се компенсира, чрез съдържанието на най-често срещаните сушените плодове и зеленчуци, които са достъпни на пазара:

- сушените кайсии съдържат натрий, калий, магнезий, желязо, фосфор, пектин, витамини А и В и различни киселини. Наличието на витамин В5 ги прави идеална храна за хора, които искат да бъдат бодри и да свалят килограми. Освен това редовното консумиране на сушени кайсии намалява значително вероятността от развитие на рак, а растителните влакна в тях стимулират оптималната работа на червата;

- стафидите са богати на калий, манган, желязо, магнезий, витамини от група В. В тях се съдържа голямо количество бор - за него знаем, че възпрепятства развитието на остеопороза, а при недостига му в организма се нарушава усвояването на калция. Проучванията сочат, че стафидите могат да понижават кръвното налягане, подобряват контрола на кръвната захар,

създават усещане за ситост. Тези фактори следва да допринесат за намален риск от развитие на диабет тип 2 и сърдечни заболявания;

- фурмите съдържат калций, магнезий, калий, фосфор, натрий и всички витамини с изключение на Е и Н. Като източник на енергия те превъзхождат всички останали сушени плодове. Ако искате да повишите концентрацията и работоспособността си, яжте фурми - те съдържат много витамин В5. В древността фурмите са били използвани като аспирин при лечение на простуда и главоболие;

- в състава на сушените сини сливи влизат както споменатите ценни хранителни вещества, така и мед, цинк, йод, хром, кобалт и палитра от антиоксиданти. Сливите оптимизират въглехидратния обмен, отстраняват усещането за тревога и повишават устойчивостта на организма на стресови ситуации. Сушените сини сливи са известни със своя естествен слабителен ефект. Това се дължи на високото им съдържание на фибри и захарен алкохол, наречен сорбитол, който се намира естествено в някои плодове;

- сушените ябълки съдържат витамини А, В и С, а също така фибри, фруктоза и много микроелементи. Сушените ябълки регулират дейността на стомашно-чревния тракт, на нервната система и са отлично профилактично средство срещу сърдечносъдови и онкологични заболявания. Помагат и при проблеми с щитовидната жлеза [1];

- папаята има свойството да активизира белтъчния обмен, а също така да засилва имунната система и повишава либидото;

- сушената круша извежда от тялото ни тежките метали и токсините. Тя оказва благотворно въздействие върху червата;

- сушените смокини нормализират работата на щитовидната жлеза и предотвратяват развитието на ракови клетки. Редовната консумация на смокини се отразява положително върху храносмилателната система;

- сушените череши съдържат в тях антоцианини и антоцианиди, които възстановяват съединителната тъкан и неутрализират действието на свободните радикали, като оказват подмладяващ ефект;

- червените боровинки са богати на фибри, калий, натрий, фосфор, магнезий и витамини С, Е, В6 и К. Известни са като мощен антиоксидант,

тъй като съдържат много флавоноиди. Боровинките оказват положително въздействие върху очите и зрението, подобряват кръвообращението и укрепват кръвоносните съдове;

- сушеното годжи-бери беше обявено за супер продукт, защото е много ефективно в битката със стреса, както и с редица заболявания. Препоръчва се и на хора, които искат да отслабнат;

- картофите са богати на витамини В, D, Е и В3 (РР), както и на големи количества микроелементи като калций, калий, желязо, магнезий, фосфор и хром. Сушените картофи са висококалорични, особено в сравнение с други видове зеленчуци. Основните калории идват от въглехидратите, от които в картофите има достатъчно много. Съдържащият се в сухите картофи протеин е в огромно количество. Той е подобен по състав на протеините, които се съдържат в месото с животински произход. Благодарение на балансирания набор от аминокиселини, този зеленчук се усвоява перфектно от човешкото тяло. Полезно е да добавяте картофи към диетата за хора с метаболитен дисбаланс, бъбречни заболявания и подагра. Изсушеният зеленчук премахва натрупаните излишни киселини в човешкото тяло, които се образуват по време на метаболитния процес, и се бори с преждевременното стареене;

- велики лечители, като Авицена, Хипократ и много други, са знаели още от древността за ползите от червеното цвекло като зеленчук, който помага да се справи с анемия, треска, заболявания на храносмилателната система и злокачествени тумори. Всъщност научно е доказано, че червеното цвекло е склад на витамини и микроелементи, които участват в образуването на витаминоподобно вещество, наречено холин. Той е в състояние да увеличи ефективността на чернодробните клетки. Възрастните хора и тези с нарушения на щитовидната жлеза е препоръчително да използват червено цвекло в менюто си, тъй като съдържат йод и магнезий. Живакът и оловото, които също присъстват в цвеклото, са отговорни за премахването на токсините, отровите и радиоактивните вещества от тялото;

- сушеният зелен грах е богат на витамини А, В и С. Освен това съдържа фосфор, калий, калций, желязо, магнезий и цинк. Грахът е полезен за

лечение на различни заболявания като туберкулоза, високо кръвно налягане, съдови заболявания и възпаление на бъбреците. За тези, които се грижат за здравето и външния си вид, витаминният състав на зеления грах ще помогне за поддържане на кожата, косата и ноктите в добро състояние, както и за нормализиране на нивата на холестерола и подобряване на зрението. Освен това сушеният зелен грах е способен да спре дегенерацията на туморите от доброкачествени в злокачествени, благодарение на антиканцерогените. Той помага да се справите с наднорменото тегло;

- сушените моркови съдържат каротин, диетични фибри, калий, желязо, фосфор, фолиева киселина и витамини от групи А, В, С и В3. Този кореноплоден зеленчук е полезен за абсолютно всички. Наличието на витамини и микроелементи в морковите подобрява зрението. Този зеленчук е полезен за хора, които имат късогледство, конюнктивит, блефарит, нощна слепота и умора. Сушените моркови могат да укрепят ретината и да помогнат на хора, страдащи от неврози и нарушения на храносмилателната система. Ако често ядете моркови, можете да повишите жизнеността, да активирате имунните функции на организма и да предотвратите преждевременно стареене;

- сушените тиквички са нискокалорични, но от друга страна, те съдържат огромен брой витамини от група В и С, както и голямо количество макро- и микроелементи като желязо, мед, фосфор, калий, магнезий и натрий. Човешкото тяло много лесно усвоява тиквичките. Не е случайно, че те се препоръчват да бъдат включени в диетата на бебетата, като първите допълващи храни. Тиквичките са хипоалергенни. С честата консумация на този зеленчук можете да подобрите храносмилателната система на тялото. Тиквичките са необходими за хора с анемия, сърдечно-съдови заболявания и хипертония;

- в сушените домати голямо значение има ликопинът. Той е открит не отдавна, но представлява мощен антиоксидант, който може да устои на тумори от различен тип. Лекарите, заедно с учени, представиха доказателства, че този компонент е способен ефективно да унищожава различни вредни клетки и злокачествени тумори. Наличието на хлорогенна

и кумарова киселина в доматиите може значително да намали дозата на канцерогенните в организма;

- сушената тиква съдържа целулоза, много хранителни вещества, като каротеноиди, пектин и фибри. Също така, тиквата съдържа голямо количество макро и микроелементи: калий, магнезий, калций и желязо. Освен това в зеленчука присъстват витамини В, С, Е и Р. Честата консумация на тиква помага за подобряване на паметта, възстановяване на силата и укрепване на имунната система. Кашата от тиква се препоръчва не само за възрастни, но и за бебета, както и за онези, чието тегло не е много голямо. Тиквата може да помогне за подобряване на здравето на стомаха и дванадесетопръстника. Може да се използва от хора, които имат гастрит, ентерит и колит. За пациенти с диабет тиквата ще помогне за премахването на излишната жлъчка и слюз от тялото.

1.2. Методи за сушене на плодове и зеленчуци

Повишеното съдържание на вода в плодовете и зеленчуците усложнява дългосрочното им съхранение. Сушенето на плодове и зеленчуци се извършва с цел отстраняване на влагата от тях в количество, което изключва възможността за микробиологични и биохимични процеси, и осигуряване на дългосрочно съхранение на продуктите без разваляне. То се извършва чрез изпаряване на влагата въз основа на способността на въздуха да абсорбира водни пари до определена граница, в зависимост от температурата. Масата на сушените продукти се намалява с 4÷6 пъти.

С намаляване на влагата се увеличава не само масовата част от сухите вещества в сушените плодове и зеленчуци, но и тяхната енергийна стойност поради въглехидратите, протеините и други ценни хранителни вещества. В същото време витаминната им стойност се запазва с 60%. В процеса на сушене обемът на плодовете и зеленчуците намалява 3÷4 пъти и следователно тяхната транспортабилност се увеличава със същото количество. В допълнение, някои видове сушени плодове (сушени кайсии, стафили, сини сливи) се използват като профилактични средства.

Повечето хранителни продукти се сушат до съдържание на влага $4\div 14\%$, в резултат на което ензимните процеси се намаляват. Плодовете с голямо количество захар се сушат до съдържание на влага $20\div 25\%$. Това се дължи на факта, че по време на дехидратацията осмотичното налягане на околната среда се увеличава и влияе върху жизнената дейност на микроорганизмите [22, 118].

Колкото по-ниско е съдържанието на вода в клетките, толкова по-бързо протича сушенето, тъй като влагата се изпарява по-лесно. Наличието в клетъчния сок на голямо количество разтворими вещества, особено тези с осмотична активност (захар), както и хидрофилни колоиди, които лесно свързват влагата, води до затруднено изпаряване и увеличаване на продължителността на сушенето. Следователно плодовете, съдържащи значително количество захари, както и пектинови вещества, които имат способността да свързват водата, бавно изсъхват.

Интензивността на процеса на сушене се променя при отстраняване на влагата. Първият период на сушене се характеризира с постоянна скорост на изпарение, вторият се характеризира с намаляване на скоростта на изпаряване.

Съответно, с промяна в съдържанието на влага в растителните тъкани по време на сушене, температурата на продукта се променя. По време на първия период на сушене, при интензивно изпаряване на влагата, повърхностната температура на продукта не може да достигне температурата на сушилната камера. Във втория период на сушене на повърхността, а след това и в дълбоките слоеве на продукта, температурата се повишава и до края на сушенето достига температурата на сушилния агент. Процесът на сушене продължава, докато продуктът достигне равновесно съдържание на влага, съответстващо на въздушните параметри в сушилнята.

Тайната на високото качество на сушените плодове и зеленчуци и дългия срок на годност ($1\div 5$ години) се крие в технологиите за сушене. В хранително-вкусовата промишленост се използват различни методи и технологии за сушене на плодове и зеленчуци. Помагайки да предпазват

продуктите от разваляне, тези технологии също поддържат добър вкус, текстура и хранителна стойност, като в крайна сметка подобряват качеството на продукта.

Сушенето може да се извърши по естествен или изкуствен начин, използвайки различни източници на топлина. Обобщена информация за методите на сушене на плодове и зеленчуци е показана в Таблица 1.

Таблица 1

Методи за сушене на плодове и зеленчуци

| № | Критерии | Видове |
|----------|--------------------------------------|--|
| 1 | Процес на сушене | Естествено сушене Изкуствено сушене |
| 2 | Предаване на топлината към продукта | Конвективно сушене, контактно сушене, разпенено сушене, сублимационно сушене, осмотично сушене, инфрачервено сушене, токове с висока честота |
| 3 | Сушилнен агент | Нагрят въздух, прегрята пара, димни газове |
| 4 | Посока на сушилния агент | Вертикален поток, хоризонтален поток |
| 5 | Смесване на сушилния агент | Правопотошно, с рецикулация |
| 6 | Разположение на източника на топлина | Над тавите, под тавите, отстрани на тавите |
| 7 | Управление на процеса сушене | Механично, електронно (с микроконтролер) |
| 8 | Според конструкцията | Камерни, тунелни, шахтови, барабанни, тръбни, лентови, валцови, ролкови, пневмотранспортни, разпръсквателни |
| 9 | Материал на изработка | Стомана, пластмаса |
| 10 | Приложение | Домакинството, полуиндустриални, индустриални |

Естественият метод на сушене е най-лесният и достъпен начин за сушене на плодове и зеленчуци. Той се извършва на открити площи, суровините са разпределени в равномерен тънък слой върху равна повърхност, под сенници, в специални помещения и представлява процес,

при който въздухът, който е погълнал водни пари, се отстранява естествено от зоната на продукта, който се суши. Има различни варианти за естествено сушене - на сянка или на слънце, с предварителна обработка с вряща вода (бланширане) и без нея, но същността остава същата, няма принудително загряване или движение на въздуха [31, 67].

Положителното на естественото сушене е:

- наличност и простота - не се изисква технически сложно оборудване;
- естественост на процеса - без използване на химикали;

Недостатъци на естественото сушене са:

- дълъг процес на сушене. То отнема 1 ÷ 2 седмици и изисква постоянно човешко участие, трябва редовно да обръщате суровината, да я поставяте в сухо помещение за през нощта;
 - зависимост от влажността на въздуха, може да се суши само при сухо слънчево време;
 - суровините забележимо губят външен вид и аромат в сравнение с първоначалното състояние;
 - сушенето зависи от сезона, суши се само през лятото.

Изкуствените методи за сушене включват премахване на влагата от плодовете и зеленчуците с помощта на специално оборудване, наречено сушилни. Сушилнята ни позволява контрол върху нивата на влажност и температурата, което осигурява получаването на по-високо и стабилно качество на сушените плодове и зеленчуци, отколкото при естественото сушене. Методите за изкуствено сушене се различават по метода за предаване на топлина към продукта. Разграничаваме няколко групи методи на сушене: конвективни, контактни, осмотични, сублимационни, инфрачервени и токове с висока честота [44, 86].

Най-разпространен е конвективният метод. При този метод преносът на топлина към продукта, който трябва да се изсуши, се извършва чрез движението на сушилният агент, смесвайки се с изпаряващата се влага на продукта. Сушилният агент предава топлината на продукта, който отстранява влагата от суровината под формата на пара. Като изсушаващо средство (сушилнен агент) се използва загрят въздух, прегрята пара или

димни газове. Инсталациите, базирани на този метод за сушене, са прости по конструкция и дизайн, а също много надеждни в експлоатацията.

Процесът протича правилно, ако скоростта на изпаряване на влагата от повърхността на продукта е равна на скоростта на пренос на влага вътре в него. При по-висока скорост на изпарение на повърхността на продукта се образува кора, която забавя сушенето, при бавно изпаряване суровината се задушавя. Процесът може да се засили чрез увеличаване на повърхността на изпарение, за което плодовете се нарязват на парчета.

Конвективното сушене обаче отнема относително дълго време (3÷10 часа) при температура от 60÷75°C, което е оптимално за активността на много ензими и микроорганизми. Това води до загуби на химични компоненти (окисляване на витамини, танини и оцветители, реакции на образуване на меланоидин), влошаване на вкуса, аромата и цвета на крайния продукт. За да се намалят тези загуби и да се предотврати покафеняване на плодовете и зеленчуците, суровините се обработват предварително със серен диоксид или се бланшират с гореща вода или пара, за да се инактивират ензимите. Освен това, плодовете и зеленчуците, изсушени по този начин, не набъбват добре и се възстановяват в готовото ястие след продължително варене (25÷30 минути).

Ако сравним плодовете, изсушени на слънце, с плодовете, изсушени в конвективна сушилня, тогава с невъоръжено око се забелязват разлики в цвета, както и на вкусовите им характеристики. Специално трябва да се отбележи фактът, че горещата пара „убива“ витамините, съответно се задържа само част от хранителните вещества. Експертите по енергиен мениджмънт също посочват, че конвекцията изисква впечатляващо количество енергия.

Плюсове на конвективния метод са :

- намаляване на производствения цикъл до няколко часа;
- стабилни показатели за влагосъдържание на продукта на изхода;
- висока производителност, спрямо естествения метод на сушене.

Отрицателните страни са:

- изисква специално оборудване;

- при използване на температури, по-високи от тези при естествено сушене, полезните вещества, съдържащи се в суровината, могат да бъдат унищожени;
- температурният градиент е насочен в посока обратна на градиента на съдържанието на влага, което инхибира отстраняването на влагата от продукта;
- относително нисък коефициент на топлопреминаване от сушилният агент към повърхността на продукта поради факта, че последният се суши в неподвижно легло, обдухва се от сушилният агент, като му отдава влагата си.

Контактното сушене се използва за сушене на течни и пюреобразни продукти с високо съдържание на влага: картофено пюре и зеленчуци. Той се основа на предаването на топлина към материала, влизащ в контакт с гореща повърхност. Този метод на сушене се използва в ролкови (едновалови и двувалцови) сушилни. Продуктът тече в непрекъснат поток на тънък слой върху външната стена на барабана с помощта на специални ролки. Повърхността на барабанът (ролката) на сушилната се нагрива отвътре с помощта на наситена пара. След един оборот на барабана за 4÷12 секунди, вече изсъхналият продукт под формата на филм се отстранява с помощта на специален нож, след което се натрошава на прах.

По време на топлопредаването част от наситената пара се кондензира по стените на барабана. Полученият кондензат се изхвърля непрекъснато с помощта на специална тръба, за да се осигури максимално свободната повърхност за кондензация на пара. Барабанната отоплителна система е напълно затворена, за да се предотврати контактът на отоплителната среда с продукта. Краткото време на излагане на високи температури намалява риска от повреда на продукта.

Въздухът служи само за отстраняване на водни пари от сушилната и е изсушител. Коефициентът на топлопреминаване на контактния метод е значително по-висок от този на конвективния, но приложението му е ограничено, въпреки че се отличава с висока интензивност и ефективност. За 1kg изпарена влага се изразходват само 1.3÷1.4kg пара. Недостатъкът на този метод е, че когато компонентите влязат в контакт с нагрятата повърхност,

се получава денатурация на протеини, възможни са процеси на образуване на меланоидин и карамел, загуба на ароматни вещества.

Зеленчукови и плодови пасти, пюрета и сокове се сушат в разпенено състояние. Продуктът от пюре се разбива в стабилна пяна с помощта на стабилизиращи вещества и се изсушава до съдържание на влага 2÷4%. Методите на сушене са различни: лъчево, конвективно и др.. Продължителността на процеса е 3÷20 минути. Изсушената пяна се натрошава, пресява и опакова в херметически затворен съд. По отношение на качеството на произвеждания продукт, този метод се конкурира със сублимационните и вакуум сушилни, но те са много по-евтини.

Развитието на хранителната индустрия изисква системно подобряване на организацията и технологията на производство, създаването и прилагането на прогресивни методи за преработка на суровините, които осигуряват максимално запазване на хранителната стойност.

Това изискване се постига най-добре чрез *вакуумно сублимационно сушене*, което може да се счита за вид на контактното сушене. Методът на сушене чрез замразяване се основава на отстраняване на влагата от замразени продукти чрез сублимация на вода, тоест в резултат на директния преход на леда в пара, заобикаляйки течната фаза. Процесът протича в дълбок вакуум за три периода.

Първата технологическа операция при този метод е замразяването на плодовете и зеленчуците. За целта се използва или бързо замразяване във фризери, или самозамразяване в сублиматор, при създаване на вакуум. В процеса на самозамръзване 10÷15% от цялата влага се изпарява от продукта поради отделянето на топлината на топене на лед при замръзване на водата. Ледените кристали се образуват чрез постепенно задълбочаване на зоната на кристализация. Краят на самозамразяването се определя специално за всеки вид продукт, когато температурата в средата на частиците на продукта (или продуктовия слой) достигне от -5 до -20°C. Продължителността на самозамразяването е 10÷15 минути. С удължаване на този процес е възможно образуването на твърде големи ледени кристали, които могат да унищожат тъканните клетки на продукта и да намалят неговото качество.

Вторият технологически етап – сублимация, се характеризира с постоянна скорост на сушене на материала. Сублимацията на леда става чрез постепенно задълбочаване на зоната на изпаряване, като по това време по-голямата част от влагата се отстранява (до 60% или повече). Колкото повече влага се отстранява през този период, толкова по-добре се запазват естествените свойства на суровините.

Третата технологическа операция, отстраняване на остатъчната влага, се характеризира с падаща скорост на сушене. Към началото на третия етап сублимацията на леда основно е приключила и температурата на материала става положителна. През този период се отстранява свързаната влага, която не се замразява в продукта. Скоростта на сушене зависи от интензивността на подаването на топлина (инфрарчервени лъчи или микровълнови токове) и задълбочаването на зоната на изпаряване, отстраняване на парата от зоната на изпаряване през изсушените слоеве на повърхността на продукта.

Тъй като процесът на сушене се извършва при ниски и минусови температури ($-10\div 15^{\circ}\text{C}$), то химичният състав, органолептичните свойства на сушените плодове и зеленчуци практически не се променят [89]. Препоръчително е да се замразяват ягоди, кайсии, зелен грах, карфиол, гъби, тоест продукти, в които е необходимо да се поддържа структурата и качеството, максималното количество витамини и други ценни хранителни вещества.

Сублимационното сушене комбинира два метода за консервиране: замразяване на суровините и сушенето им в замразено състояние, така че микроструктурата, обемът, свойствата и съставът на продукта са почти напълно запазени. Сушените плодове и зеленчуци имат добра порьозност, когато се потопят във вода, те бързо възстановяват първоначалния си вид и свойства, запазват за дълго време свойствата си при положителни температури, в резултат на което разходите за съхранението им рязко намаляват. Освен това, такива продукти могат да се продават в търговски обекти, които не са снабдени с хладилни агрегати [144].

Предимствата на сублимационният метод са:

- пълно запазване на външния вид на продукта - цвят, форма, текстура;

- високо ниво на запазване на вкуса и аромата;
- високо ниво на запазване на хранителните вещества в продукта;
- минимално съдържание на влага.

Недостатъците на метода са:

- основният недостатък е високата цена на крайния продукт, която се дължи на необходимостта от технически сложно индустриално оборудване и значителна консумация на енергия;

- невъзможност за реализиране в домашни условия;
- изисквания на продукта към условията на съхранение, за възможно най-дълго запазване на вкуса и аромата е необходимо продуктът да се съхранява без достъп до въздух и слънчева светлина. Наложително е да се спазва режимът на влажност, тъй като сублиматите абсорбират влагата много лесно.

Осмотичното сушене се основава на химическия процес осмоза, заместване на влагата в даден продукт с осмотичен агент, в случая за плодове и зеленчуци - захарен сироп. Най-просто казано, осмотичното сушене е захаросване на плодове. По време на сушене чрез осмотична дехидратация, парченцата плодове се държат в концентриран (поне 70%) топъл захарен сироп. В този случай водата от клетките на плодовете преминава в околната среда (явлението осмоза), потокът на захар от сироп в клетката е незначителен. В края на процеса плодовете или зеленчуците се отделят от сироп и се изсушават в пещ до съдържание на влага 10%. Сушените плодове и зеленчуци имат добър аромат, имат светъл цвят, могат да се използват като готово десертно ястие. Продуктите са опаковани в целофанени или полиетиленови торбички, запечатани стъклени съдове.

Предимствата на осмотичното сушене са:

- сладък вкус и ярък външен вид на продукта;
- висок добив на крайния продукт поради факта, че масата на водата се заменя с маса на захарта;
- ниска цена поради предходния параграф.

Недостатъци на осмотичното сушене са:

- това е най-малко полезният начин за сушене на плодове и зеленчуци, например, килограм осмотично сушене на боровинки съдържа 600g захар;
- често освен захар се използват и допълнителни осмотични агенти и оцветители, за да се намалят разходите и да се направи крайният продукт по-привлекателен;
- ароматът на продукта страда най-много при този метод на сушене.

Инфрачервените сушилни се появяват по-късно, но почти веднага се превръщат в най-обещаващата опция за работа с плодове, зеленчуци, билки и гъби. Принципът на действие е подобен на работата на слънцето. Въздействието се извършва изключително върху водния компонент на продуктите. Инфрачервената радиация третира растенията в щадящ режим, обикновено температурата не надвишава 60°C, което е несравнимо с гореща пара [84, 103].

Инфрачервените лъчи са невидими топлинни лъчи с дължина на вълната 0.77÷340µm. За сушене се използва ICL с дължина на вълната 1.6÷2.2µm. При сушене на PCL към материала се подава топлинен поток 30÷70 пъти по-мощен, отколкото при конвективно сушене, във връзка с което процесът на сушене се ускорява.

За хранителните продукти дълбочината на проникване на инфрачервените лъчи достига 6÷12mm. Малка част от радиационната енергия прониква до тази дълбочина, но температурата на слоя, лежащ на разстояние 6÷7mm от повърхността на материала, расте много по-интензивно, отколкото при нагряване по конвективния метод. Средно-вълновото и късовълновото инфрачервено лъчение има по-силно въздействие върху храната поради по-голямата дълбочина на проникване, както и положителен ефект върху молекулярната структура на храната [137].

Инфрачервеното сушене на плодове и зеленчуци се основава на факта, че инфрачервеното лъчение се абсорбира активно от водата, съдържаща се в продукта, но не се абсорбира от тъканта на продукта, който се суши, поради което е възможно отстраняване на влагата при ниска температура (40÷60°C). Това прави възможно почти напълното запазване на витамините, биологично активните вещества, естествения цвят, вкус и аромат на

сушените продукти, което от своя страна е една от най-важните задачи в областта на преработката на храни. Сушенето на плодове и зеленчуци с тази технология позволява запазване на съдържанието на витамини и други биологично активни вещества в сухия продукт на ниво 80÷90% от суровината.

С кратко накисване във вода за (10÷20 минути), изсушените по инфрачервеният метод продукти възстановяват всичките си естествени органолептични, физични и химични свойства и може да се консумират в прясно състояние или да бъде подложен на всякакъв вид кулинарна обработка. Сушене на зеленчуци и плодове, зърнени култури и др. по този начин дава възможност да се произвеждат разнообразни концентрати за незабавни храни, които се използват в хлебопекарната и сладкарската промишленост, като компонент на сухо адаптирано мляко. В сравнение с традиционното сушене, зеленчуците, преработени чрез инфрачервено сушене след разтваряне, имат максимално близък до пресните суровини вкус.

Сушене с токове с висока и свръхвисока честота. Методът на сушене с токове с висока (HF) и свръхвисока (микровълнова) честота (UHF) се основава на факта, че диелектричните свойства на водата и сухите вещества на продуктите се различават рязко, следователно мокрият материал се загрява много по-бързо от сухия материал. В процеса на сушене с използване на HF и UHF температурата на вътрешните слоеве на продукта е по-висока от тази на външните, по-сухи слоеве. Топлинният поток е насочен към периферията на продукта, а преносът на влага е в същата посока, което помага за ускоряване на сушенето.

Предимствата на HF и UHF сушенето, в сравнение с конвективното и контактното сушене, са способността за регулиране и поддържане на определена температура на продукта и по-интензивен процес на сушене, което подобрява качеството на сушените продукти.

В зависимост от посоката на сушилният агент има два основни типа сушилни за плодове и зеленчуци. Единият тип е с вертикален въздушен поток, другият е с хоризонтален. Сред вертикалните има опции с вентилатор

отгоре или отдолу. Доброто разпределение на топлината се осигурява от вертикалния тип с вентилатор отдолу. Недостатъкът му обаче е, че тогава вентилаторът трудно може да се почисти от всичко, което е капало върху него. Някои храни, особено плодовете, могат да произвеждат и отделят сок по време на сушенето. Вертикалната сушилня с горен вентилатор премахва този проблем, но сушенето е неравномерно, горната тава изсъхва по-бързо.

Хоризонталните въздушни сушилни за плодове и зеленчуци предотвратяват предимно смесването на миризми между различни леси/тави. Освен това, те осигуряват доста равномерно нагряване между тавите и такава сушилня е по-удобна за измиване. Друго предимство на този тип е, че те са правоъгълни, а не кръгли и съответно по-ефективно използват пространството на сушилната камера. Въпреки това, сушилнята с хоризонтален въздушен поток обикновено е по-скъпа.

Размерът на хоризонталния вентилатор също е важен, в зависимост от това колко е необходимия му дебит наведнъж. Някои видове сушилни имат външни стени с тави, които могат да се свалят и поставят. Тези видове са идеални, ако целта е да се изсуши целия обем в едно действие.

Потоъкът на сушилния агент може да бъде правопоточен, при които нагретият въздух, отнемайки влагата от плодовете и зеленчуците, се извежда навън от сушилнята. Възможно е потоъкът на сушилния агент, след отнемане на влагата от продукта, вместо да се отвежда навън да се върне отново за загряване. Друга схема е смесването в различно съотношение на свеж и отработен въздух.

По разположението на източника на топлина, нагревателният елемент може да бъде разположен над, отдолу или отстрани на поддържащите тави. Въз основа на това сушилните могат да бъдат разделени на:

- вертикални - отопление отдолу или отгоре;
- хоризонтални - отопление отстрани.

Първият вариант е по-компактен. Ефектът се засилва от кръглата форма на тавите, които осигуряват равномерно нагряване на суровината. Устройствата със странично монтиран нагревател са по-големи от аналозите, но те често са оборудвани с по-просторни квадратни тави.

В зависимост от начина на управлението на процеса сушене имаме сушилни с механично и с електронно управление. Механичното управление е типично за прости и надеждни сушилни. Бутоните и въртящите се лостове са лесни за използване. Единственият недостатък е ограниченият брой режими на работа и невъзможността за прецизен контрол на температурата.

Електрониката печели в това отношение. Независимо дали става въпрос за сензорен екран или електромеханичен контролен панел, той ви позволява да управлявате по-точно сушилната. Това дава възможност за избор на температурен режим в зависимост от натоварването на сушилната и вида на суровината.

В зависимост от конструкцията, сушилните инсталации се подразделят на камерни, тунелни, шахтови, барабанни, тръбни, лентови, валцови, ролкови, пневмотранспортни, разпръсквателни. За сушене на плодове и зеленчуци се използват главно конвейерни сушилни, където сушилният агент е нагрят въздух. Тунелните сушилни се използват за сушене на плодове, отделящи плодов сок (череша, грозде, кайсии). Най-ефективният метод е загряване на продукта с поток от изсушаващия агент, така нареченото окачено сушене.

Материалите, които се използват за изработка на сушилните са разнообразни. Пластмасовите модели са леки, предлагат се опции както с прозрачни тави, позволяващи да се контролира степента на готовност, без да се отваря сушилната. Тези, които търсят трайно устройство с нечупливи компоненти, могат да изберат стоманени конструкции. Стоманените сушилни са предназначени за сериозно натоварване.

1.3. Видове конвективно сушене на плодове и зеленчуци

В конвенционалните конвективни сушилни дехидратацията се случва в плътен слой, при което не цялата повърхност на продукта участва в топлообмена. Процесът протича бавно, възможно е прегряване на отделни участъци от слоя. Сушенето се ускорява значително, ако суровината се

размеси интензивно. Вибрационното сушене, чрез пулверизиране и в кипящ слой са три разновидности на конвективния метод, решаващи този проблем и целящи ускоряване процеса на сушене на плодовете и зеленчуците.

Вибрационното сушене се основава на комбинирания ефект на загретия въздух и механичните вибрации на решетката. При него отрязаните парчета от продукта се смесват интензивно, поради едновременното действие на вертикални вибрации на лесата (тавата) и въздушния поток нагоре. В сравнение със сушенето в плътен слой, продължителността на процеса се намалява с 2÷3 пъти, а качеството на готовия продукт се повишава.

Сушенето на плодовете и зеленчуците в кипящ слой се извършва в специални апарати [118]. Материалът за сушене се намира под формата на суспензия (натрошен или гранулиран продукт), като въздухът с повишена скорост ($4\div 6\text{m/s}$) се продухва през него. Суспензията е разстлана на тънък слой върху решетката (тавата). От преминаващият през него въздух, слой набъбва, след това частиците от материала, увлечени от въздуха, преминават в състояние на левитация, процесът напомня на вряща течност. Въздухът издухва парченцата продукт от решетката и ги държи висящи по време на процеса сушене.

Сушенето в кипящ слой се характеризира с непрекъснато хаотично движение на частиците материал в определен обем по височината, силно увеличена контактна повърхност на продукта със сушилния агент, температурата в обема на слоя се изравнява много бързо и времето за сушене се намалява няколкократно. Тъй като при този метод на сушене всяка частица от материала се обдухва от потока на агента равномерно от всички страни, това осигурява равномерно нагриване на продукта и отстраняване на граничния слой от изпаряваща се влага, което от своя страна позволява използването на повишени температури на сушилния агент в зависимост от вида на продукта. Едновременно с това, поради намаляване времето на топлинния ефект върху продукта, се намаляват значително окисляването на витамините и хранителните вещества.

Сушенето чрез пулверизиране е разновидност на конвективното сушене. То се използва за сушене на течни или фино натрошени продукти, като се използва широко в хранително-вкусовата промишленост за производството на сокове, пюреа и прахове. Суровината се подава към спрей устройство, където се трансформира в малки капчици с помощта на дюзи и дискове. В голяма сушилна камера частиците на продукта се срещат с поток въздух, нагрят до температура $140\div 200^{\circ}\text{C}$ и се дехидратират. Сухият остатък под формата на прах се отлага в долната част на камерата. Най-често срещани са конвейерните (лентови) и тунелните спрей сушилни.

Сушенето в състояние на впръскване продължава няколко секунди, поради което термолабилните вещества, като протеини и витамини са почти напълно запазени в крайния продукт. Недостатъкът на този тип сушене е опасността от окисляване с кислород на въздуха на съставните части на продукта, който е в силно дисперсно състояние. За да се предотвратят окислителните процеси, продуктите се сушат и съхраняват в атмосфера на инертен газ, азот или въглероден двуокис.

Конвективните сушилни могат да бъдат грубо разделени на две големи групи: сушилни с неподвижен или движещ се материал; сушилни със размесване на материала.

Първата група сушилни включва устройства с периодично и непрекъснато действие, при които материалът се зарежда върху лента, палети или в кошници и се подава в сушилната камера. Това са камерни, лентови, тунелни и някои други видове сушилни. Тези сушилни изсушават цял или формован продукт, парчета, пасти и др..

Втората група включва сушилни с активен газодинамичен режим - сушенето се извършва във въздушна струя, а материалът в сушилната камера се излива или е в суспендирано състояние. Тези сушилни се използват за сушене на гранули, бучки, суспензии и прахове.

Сушилни с неподвижен или движещ се материал

Камерни сушилни. Тези сушилни са с периодично действие, работещи при атмосферно налягане. Те се използват в дребносерийното производство

за материали, които позволяват температури на сушене до $250\div 300^{\circ}\text{C}$. Например, плодове и зеленчуци, хранителни продукти, гъби, билки и билкови лекарства. Материалът в тези сушилни се суши на тапи, монтирани на стелажи или колички, разположени в сушилната камера.

На рамката на камерата, между количките, са монтирани козирки, които сякаш разделят пространството на камерата на три зони, разположени една над друга, по които сушилният агент се движи последователно. Свежият въздух, нагрят от външен нагревател, се засмуква от вентилатор и се подава към дъното на камерата на сушилнята. Тук той се движи, като два пъти променя посоката и се загрява два пъти от междинните нагреватели.

Част от отработения въздух, с помощта на порта/шлюз, се насочва за смесване с чист въздух. По този начин сушилнята работи с междинно нагряване и частична рециркулация на въздуха, т.е. според опцията, осигуряваща по-ниска температура и по-меки условия на сушене.

Въпреки това, поради сушенето във фиксиран дебел слой, сушилните от този тип имат ниска производителност и времето за сушене в тях е дълго. Освен това изсъхването в тях е неравномерно поради неравномерните температури в камерата, което се получава поради частичното преминаване на въздуха в горните зони по най-краткия път (през пролуките).

За да се създаде по-равномерна циркулация на въздуха в някои съвременни конструкции на камерни сушилни, външният вентилатор се заменя с вътрешни обратими осеви вентилатори или се използват ежектори. В ежекторните камерни сушилни изхвърлянето извън камерата на рециркулираният отработен въздух се извършва чрез засмукване от чист въздух, което намалява консумацията на енергия за циркулация. Поддържането на камерните сушилни изисква много ръчен труд, което също е съществен недостатък.

Лентови сушилни. В тези сушилни материалите се сушат непрекъснато при атмосферно налягане. В камерата на сушилнята, слой от материала, който трябва да се изсуши, се движи по безкрайна, опъната между водещия и задвижваните барабани лента. Към единия край на лентата се подава мокър материал, а изсушеният материал се получава в другия край. Сушенето се

извършва с горещ въздух или димни газове, които придвижват противотока или напречния поток към посоката на движение на материала.

В еднолентовите сушилни обикновено се наблюдава неравномерно изсъхване на материала - във вътрешната част на слоя, обърнат към лентата, влагата е по-висока, отколкото във външната му част, която се обдухва от сушилният агент. По-ефективно е да се използват много лентови сушилни с мрежести метални ленти. При тях сушилният агент се движи перпендикулярно на равнината на лентата през слоя материал върху него (напречен поток). Когато материалът се изсипва от лента на лента, повърхността на контакта му със сушилният агент се увеличава, което допринася за увеличаване на скоростта и еднородността на сушенето. Лентовите сушилни могат да работят с различни скорости в процеса на сушене.

Лентовите сушилни са обемисти (като тунелните сушилни) и са трудни за поддържане, главно поради изкривяване и разтягане на лентите. Тяхната специфична производителност (на 1m^2 повърхност на лентата) е ниска, а специфичната консумация на топлина (на 1kg изпарена влага) е доста висока. Освен това те не са подходящи за сушене на пастообразни материали, поради което се използват за тази цел в комбинация с ролкови сушилни.

В някои съвременни конструкции на лентови сушилни, прегрялата пара се използва като сушилен агент, понякога в смес с горещи инертни газове. Изсушаването с прегрята пара (при липса или много ниско съдържание на кислород) представлява интерес за материали, които се окисляват или възпламеняват при повишени температури в присъствието на атмосферен кислород. В структурно отношение тези сушилни са сложни, тъй като за да се избегне навлизането на въздух в тях, е необходимо да се осигури тяхната плътност.

Тунелни сушилни. Тези сушилни се различават от камерните сушилни по това, че количките, свързани помежду си, се движат бавно по релси по много дълга правоъгълна камера (коридор). На входа и изхода коридорът има запечатани врати, които едновременно се отварят периодично за

товарене и разтоварване на материал. Количка със сух материал се изважда от камерата, а нова количка с мокър материал влиза в него от противоположния край. Количките се придвижват с помощта на въже и механична лебедка. Сушилният агент се движи едновременно или в противоположен поток към материала, който трябва да се изсуши.

Тунелните сушилни обикновено работят с частична рецикулация на сушилният агент и се използват за сушене на големи количества насипни материали, като керамика. По отношение на интензивността на сушене тунелните сушилни се различават малко от камерните сушилни - те имат основните недостатъци на последните (продължително и неравномерно сушене, ръчно поддържане).

Сушилни с размесване на материала

Барабанни сушилни. Тези сушилни се използват широко за непрекъснато сушене при атмосферно налягане на бучки, гранули и насипни материали (минерали, соли, фосфорити и др.). Барабанната сушилна има цилиндричен барабан, монтиран с лек наклон към хоризонта ($1/15 \div 1/50$) и опиращ се на ролки. Барабанът се задвижва от електромотор през редуктор. Броят на оборотите на барабана обикновено не надвишава $5 \div 8$ оборота в минута.

Газовете и материалът се движат в съпътстващ поток, което помага да се избегне прегряване на материала, тъй като в този случай най-горещите газове влизат в контакт с материала с най-висока влажност. За да се избегне увеличеното улавяне на прах с газовете, последните се засмукват през барабана от вентилатор със средна скорост не по-голяма от 2m/s . Структурата на вътрешната дюза на барабана зависи от размера на парчетата и свойствата на материала, който трябва да се изсуши.

Предимството на хоризонталните барабанни сушилни е, че няма аксиално натоварване на аксиалните ролки, в резултат на което износването им се намалява. В допълнение, хоризонталното разположение на барабана позволява да се комбинират редица допълнителни операции, като охлаждане, смачкване, отстраняване на прах и др.. В този случай материалът

се транспортира чрез винтов дозатор, който е инсталиран заедно с трансферните лопатки.

Съвременните сушилни са оборудвани с устройство за плавен старт на двигателя - софтстартер, което елиминира претоварването в електрическата мрежа при развъртане на натоварения с материал барабан. Горелките са снабдени с автоматична система, която осигурява оптимално изгаряне на гориво и прекъсване подаването му в случай на внезапно спиране на сушилния или прекъсване на електрозахранването.

Сушилни с кипящ слой. Изсушаването на материалите се случва в така наречения „кипящ слой“ от гранулиран материал, когато под действието на възходящ газов поток (сушилнен агент) частиците от слоя преминават в левитирано състояние. Процесът в кипящ слой позволява значително да се увеличи контактната повърхност между частиците на материала и сушилния агент, да се засили изпарението на влагата от материала и да се съкрати (до няколко минути) времето за сушене. Понастоящем сушилните с кипящ слой се използват успешно не само за сушене на гранулирани материали (например минерални и органични соли), но също така и на материали, склонни към натрупване, както и пастообразни материали, разтвори, стопилки и суспензии.

Конструкцията на сушилните от този клас е много разнообразна и зависи главно от характеристиките на материала, който се суши. Най-често срещаните са еднокамерни непрекъснати сушилни. При сушилни от този тип с цилиндрично тяло се наблюдава значителна неравномерност на сушенето, поради факта, че при интензивно смесване в слоя, времето на престой на отделните частици значително се различава от средната му стойност. Следователно трябва да се използват сушилни с разширяващ се нагоре участък, например коничен.

Промишлеността използва също многокамерни сушилни, състоящи се от две или повече камери, през които последователно се движи материалът, който трябва да се суши. Камерите са разположени една до друга или една над друга. Многокамерните сушилни са по-сложни по конструкция, изискват големи специфични разходи за сушилния агент и електричество.

Освен това процесът в тях е по-труден за автоматизиране. Използването на многокамерни сушилни е препоръчително само за материали със значителна устойчивост на вътрешна дифузия на влага, изискващи продължително сушене, както и за материали, изискващи регулиране на температурата на сушене в широки диапазони.

Недостатъците на сушилните с кипящ слой включват трудността при контролиране на процеса - прекомерното увеличаване на разхода на мокър материал или понижаването на температурата на сушилния агент води до адхезия на материала, образуване на застояли зони в апарата, които възпрепятстват преминаването на газ и увеличаване на хидравличното съпротивление на сушилния блок.

Вибрационни сушилни. Прилагането на вибрации върху слой материал увеличава интензивността на пренос на топлообмен в сушилните от този тип. Вибриращата решетка може да бъде създадена в устройства с най-различна конструкция, чрез излагане на насипния материал на вибрациите, стени или допълнителни прегради, както и използване на специални вибрационни възбудители, въведени директно в сушилната камера. Използването на вибриращо-кипящ слой в сушилните позволява да се подобри смесването на материала и по този начин да се увеличи стойността на коефициентите на топло- и масообмен няколко пъти.

Вибрационното действие в комбинация с подаване на сушилнен агент през порестото дъно на лесата под слоя насипен материал позволява скоростта на газа да бъде намалена до стойност под критичната. Тогава ролята на сушилния агент като флуидизиращ агент престава да бъде решаваща. Сушилните с вибрационно действие, при които движението на материални частици се случва главно поради механични въздействия, имат по-добри характеристики от сушилните с кипящ слой. Предимството на вибрационно действие се състои в значително намаляване на количеството сушилнен агент, преминаващо през апарата, и следователно в опростяването и намаляването на разходите за загряване и пречистване на този газ от прах.

Вибриращите сушилници се използват за сушене на различни течни и гранулирани материали. В сушилници с тази конструкция е възможно да се комбинират процесите на сушене и охлаждане на изсушения материал.

Спрей сушилници. Спрей сушилниците работят на принципа на противотоков или смесен поток. Обаче, съвместният поток е за предпочитане, тъй като той позволява сушене при високи температури без прегряване на материала, а скоростта на утаяване на частиците в този случай е сумата от скоростта на тяхното извисяване и скоростта на сушилния агент. При противотоков поток скоростта на отлагане е по-малка и съответно времето на престой на частиците в камерата е по-дълго. Това позволява изсушеният материал да се получи с по-висока плътност.

По време на сушенето чрез пулверизиране специфичната повърхност на изпаряване става толкова голяма, че процесът на сушене завършва изключително бързо (за около $15 \div 30$ s). При условия на почти моментално изсъхване, повърхностната температура на материалните частици, въпреки високата температура на сушилния агент, е само малко по-висока от температурата на адиабатно изпаряване на чистата течност.

По този начин се постига бързо изсъхване при меки температурни условия, което позволява получаването на висококачествен прахообразен продукт, който не изисква допълнително смилане. Изсушаването със студен топлоносител е възможно и при предварително нагриване на напръскания материал. Пръскането се извършва чрез механични и пневматични дюзи, както и посредством центробежни дискове, чиято скорост на въртене е $4000 \div 20000 \text{ min}^{-1}$.

Пръскането с центробежни дискове (без налягане) е подходящо за разпръскване на суспензии и вискозни течности, но изисква значително повече енергия от механичното пулверизиране. Пръскането чрез механични дюзи, при което течността се подава от помпа под налягане $3 \div 20 \text{ MPa}$, е по-икономично, но се използва само за течности, които не съдържат суспендирани твърди частици, поради чувствителността на тези дюзи към запушване. Пръскането с пневматични дюзи, с помощта на сгъстен въздух, при налягане от около 0.6 MPa , макар и подходящо за замърсени течности, е

най-скъпо поради високата консумация на енергия, освен това има недостатък, че пулверизацията не е еднородна.

Предимствата на тези сушилни включват високото качество на крайния продукт - изсушеният материал се получава под формата на фин гранулиран сипещ се прах, който лесно се транспортира, пакетира и има атрактивно представяне. Тези сушилни се използват главно за получаване на керамични прахове, минерални добавки в сухи строителни смеси и др.. В тези сушилни се постига висока скорост на изпаряване на влагата благодарение на финото пулверизиране на материала, който трябва да се изсуши в сушилната камера, през която се движи сушилният агент (нагрят въздух или димни газове).

Недостатъкът са големите размери на цялата инсталация и включеното в нея оборудване за почистване на газа.

Пневматични сушилни. Те се използват главно за отстраняване на повърхностната влага от насипни материали като пясък, натрошени минерали, прахове. Сушенето се извършва във вертикална тръба с дължина до 20m. Частиците от материала се движат в поток от нагрят въздух (или димни газове), чиято скорост надвишава скоростта на витаене на частиците и възлиза на $10\div 30\text{m/s}$. В такива сушилни тръби процесът на сушене продължава секунди и за толкова кратко време само част от свободната влага може да се изпари от материала.

Потреблението на енергия в пневматичните сушилни е значително и намалява с намаляване на размера на частиците на материала, който не трябва да надвишава $8\div 10\text{mm}$. За сушене на материали с големи форми, както и за отстраняване на свързана влага от материала, пневматичните сушилни се комбинират с други видове сушилни. По този начин, въпреки компактността и простотата на устройството, обхватът на приложение на пневматичните сушилни е ограничен от посочените по-горе условия.

Независимо от това, пневматичните тръби за сушене често се използват поради простотата на тяхната конструкция, а освен това изсушаването на продукта може да се комбинира с пневматично транспортиране в тях. Също така се използват многотръбни сушилни, класификационни тръби за сушене и едновременно разделяне на материала на две фракции.

1.4. Способи за намаляване на енергийните разходи при сушене

Себестойността на изсушените плодове и зеленчуци, основно зависи от енергийните разходи за процеса сушене, което означава значителни разходи на топлинна енергия. Ефективен от към енергийните разходи се счита сушилнен процес, при който разходите за изпаряване на 1kg влага от плодовете и зеленчуците не надвишават 1.2kWh, което се получава от изгарянето на 55g фосилни горива. Това количество е прекият разход на гориво за извличане на влагата от вътрешността на плодовете и зеленчуците, ако се добавят и разходите, свързани с несъвършенството на методите и конструкциите, средно за 1t изпарена влага се изразходват повече от 100kg въглеводородни горива [9, 48]. В тази връзка е напълно обяснима тенденцията да се търсят пътища за намаляване на енергийните разходи в сушилните.

Показани са някои от характерните начини за намаляване на енергийните разходи в процеса на сушене. Тези методи и средства могат да се обединят в няколко групи:

- 1) Подобряване и модернизация на съществуващи сушилни, без промени в режима на сушене.

Повечето сушилни съоръжения са свързани със значителни инвестиционни разходи и е перспективно подобряване на топлинната им изолация, използване на топлината на изходящия топлинен агент (рециркулация) и други способи за усъвършенстване на конструкцията им.

Най-ефективна и бърза се оказва промяната в топлинната изолация на сушилнята, защото тя старее и оказва съществено влияние на топлинни разходи на процеса сушене на плодове и зеленчуци. Дебелината, но и топлоизолационните качества на материалите, използвани в конструкцията на дадена сушилня, са съществени разходи при изграждането, но могат да окажат значителен положителен ефект за топлинните загуби и намаляване на експлоатационните разходи за дълъг период от време. Намаляването на енергийните разходи не е свързано пряко с работата на сушилнята, но се

отразява на ефективността на инсталацията и себестойността на готовата продукция. При камерните и тунелните сушилни външните повърхнини на съоръженията са значителни и правилният избор на топлинната изолация е от особено значение. Критерий за избор на изолация е коефициентът на топлопроводност и реципрочната му стойност - термично съпротивление. В много случаи при избор на топлоизолационни материали се имат предвид и други свойства, като предназначението на сушилнята – за дървесина, за строителни материали, за хранителни продукти и др.. Не съществуват стандартни методи за определяне на тези свойства и сравнението на отделните материали трябва да се извършва много предпазливо при проектирането или реконструкцията на сушилнята.

Универсален критерий за определяне на дебелината на топлинната изолация е стойността на приведените годишни разходи. Факторите, които се използват при традиционния анализ на качествата на изолацията, се делят на два типа – намаляване и повишаване на годишните разходи. Увеличаването на дебелината или термичното съпротивление на изолацията ще намали: енергийните разходи, капиталните вложения за топлоизточника, експлоатационните разходи за сушилнята и топлоизточника. Но също така увеличението на дебелината на изолацията ще повиши приведените годишни разходи, чрез капиталните вложения за изолацията и експлоатационните разходи за поддръжка на изолацията. Оптималната дебелина на изолацията от икономическа гледна точка се определя или по метода на минималните приведени годишни разходи, или по метода на допустимите оценки.

Използването на топлината от изходящия сушилен агент е възможност за намаляване на енергийните разходи. Отделената влага от сушения материал, при конвективните сушилни, е под формата на изходящи газове. Тези газове са със значителна температура и именно тя може да се използва за подобряване на топлинния баланс на сушилнята. Проведени са експерименти за работа на сушилни с максимален к.п.д., като делът на топлината от изходящите газове е значителен и достига до 27% от общия разход. Ето защо е напълно оправдано част от топлина на изходящите газове

да се използва или за самия сушилен процес, чрез предварително подгряване на сушилния агент, или за други технологични процеси в предприятието. Топлообменните апарати, които се използват за предварително подгряване на сушилния агент, са следните:

- рекуперативни топлообменни апарати „въздух-въздух“;
- регенеративни топлообменни апарати;
- топлообменни апарати с топлинни тръби;
- топлообменни апарати с междинен топлоносител;
- контактни топлообменни апарати.

2) Внедряване на нови режими на сушене, без това да е свързано с модернизация на сушилната камера.

Друг подход за ограничаване на енергийните разходи, ако конструкцията на сушилната е добре изолирана, е прилагането на различен тип сушилен процес, като изотермично сушене, импулсно сушене, сушене с инфрачервена радиация и др..

Методът на изотермичното сушене се основава на възможностите за повишаване на коефициента на дифузия, чрез предварително нагряване на материала. Температурата на материала значително влияе върху коефициента на дифузия на влагата и предварително загряване на продукта (преди сушенето) би съкратила времето за сушене. Предварителното загряване дава възможност да се използват по-твърди режими на сушене и по такъв начин да се интензифицира сушенето, но този метод е неприложим за голяма част от плодовете.

При сушенето на термочувствителни материали използването на високата плътност на топлинните потоци създава значителни градиенти на влагата и температурата на материала. Продължителното въздействие на високата температура довежда до влошаване на качеството на материала, поява на недопустими вътрешни напрежения и др.. Тези недостатъци на непрекъснатото високотемпературно сушене се отстраняват с импулсно сушене и осцилиране на топлинния поток. При импулсното сушене нагряването на материала периодично се прекъсва, т.е. налице е импулсно подаване на топлина, при което се редуват периоди на „нагряване“ с периоди

на „почивка“. Този метод позволява при достатъчно високи плътности на топлинния поток да не се допуска прегряване на материала, а времето за „почивка“ да се използва за отвеждане на влага от вътрешността към повърхността на материала. От голямо значение за постигане на необходимата ефективност на процеса е изборът на т.нар. импулсно отношение, което представлява отношението на времето за „почивка“ към общата продължителност на периода „нагриване и почивка“ [9]. За различните материали в хода на процеса сушене, импулсното отношение се изменя в широки граници от 0.05 до 0.8.

Измервани са топлинните разходи при непрекъснати режими на сушене на плодове и зеленчуци за получаване на базови данни за сравнение и опитно са определяни топлинните разходи при различни импулсни режими на сушене на плодове и зеленчуци, и съпоставяне с базовите данни [9]. Установено е, че специфичният разход на топлина при импулсни режими на сушене на плодове и зеленчуци е по-малък от този при непрекъснатите режими и съществува определен интервал на периода на симетричните импулси, предполагащ минимални стойности на специфичния разход на топлина. При тези изследвания е посочено, че намаление на топлинните разходи ще се получи и чрез рециркулация на част от сушилния агент.

Използването на инфрачервени излъчватели като енергийни източници осигурява висока управляемост на процеса на сушене, както в пространството - контрол на разпределението на енергийните потоци в рамките на обема, така и по време - динамичен контрол на енергийния товар по време на процеса на сушене.

3) Хибридно сушене.

Свързано е с комбиниране на различни методи на сушене през начална и крайна фази или на сушене с прилагане на няколко метода - вибрационно и конвективно, ротационно и конвективно и др.. Всеки метод на сушене се характеризира със своите предимства и недостатъци. Чрез комбиниране на различните методи, недостатъците на един метод могат да се компенсират с предимствата на друг метод и по този начин се създават по-високоэффективни сушилни. Комбинираните сушилни са такива инсталации, при които може

да се извършва сушене на материала при различни аеродинамични условия или да се съчетава сушилният процес с друг технологичен процес - смилане, гранулиране, термообработка, химичен синтез и др. [16], което довежда до общо подобряване качествата на инсталацията.

4) Комбиниране на възобновяеми и традиционни енергийни източници в сушилните.

Стремежът за засилване на дела на възобновяемите енергоизточници при технологичните процеси е постоянен и може да се използва слънчева и/или геотермална енергия, енергия от отпадъчни горими продукти, димни газове и др. налични в и около стопанството със сушилнята [122].

Наред с класическите енергийни източници все по-често в сушилните се използват нетрадиционни източници, каквито са слънчевата енергия, енергията от геотермалните води и др.. Използването на слънчевата енергия е особено перспективно при сушене на селскостопански продукти, тъй като периодът на най-интензивно слънцегреене съвпада с периода на съзряване на продуктите за сушене. Възможно е комбинирането на традиционните енергийни източници със слънчеви колектори [49]. Допълнителна възможност е при наличието на акумулаторна система, да се използва значителното количество енергия през дневното слънцегреене за намаляване на енергийните разходи в сушилнята през нощта.

Нерегенерируемите енергийни източници са горещи газове или горими материали, които се отделят при някои технологични процеси, без да е възможно да се използват отново в същите процеси. Такива са например димните газове от керамичните пещи. Те се прилагат, като основен или допълнителен сушилен агент в сушилните на същото производство. Органичните отпадъци от селскостопанската продукция, например слама, кочани, дървесни пилки и др., могат да се използват като гориво за топлогенераторите на сушилните.

Друг метод, който не е много популярен поради отделяните миризми, но може да се приложи в отдалечени селскостопански райони, е производството на биогаз чрез анаеробно разграждане (анаеробна ферментация) на течен и твърд оборски тор, растителни отпадъци, и други

селскостопански отпадъци и субпродукти. Произведения биогаз може да се използва и за топлогенератора на сушилнята и във фермерството. Плодовете могат да се сушат на мястото на добиване и вече с намален обем да се транспортират към централите за съхранение и дистрибуция.

5) Усъвършенстване на изпарително-кондензационния цикъл в сушилните.

За сушилни, използвани цялостно, изграждането на термо помпени инсталации, значително би ограничило енергийните разходи. Термодинамичен цикъл се реализира при повечето сушилни. Основен топлинен разход в този процес е разходът за изпарение на влагата, който представлява необратима загуба за процеса. Дори и при идеализирани условия термичният к.п.д. на сушилнята не е висок и се изменя в тесни граници за широк интервал на изменение на режимните параметри. Ето защо по-явно се очертава тенденцията да се създават сушилни, в чийто цикъл топлината на изпарение да се връща като топлина на кондензация. Известни са два подхода: при единия подход изпарително-кондензационният цикъл се извършва в независима термопомпена система, а при другия - този цикъл се извършва с помощта на десикатор (изсушител). Освен газ, като сушилен агент за отделяне на влагата, може да се използват и течни или твърди изсушители и др..

б) Интелигентно управление на сушилните процеси за плодове и зеленчуци.

Подмяната на ръчното управление и използването на интелигентно автоматизирано управление на процеса на сушене с помощта на микроконтролери или индустриални персонални компютри ще намали консумацията на топлина и електричество с 10÷20% [136].

Интелигентното управление на сушилните процеси позволява едновременно да наблюдаваме и управляваме сушенето на плодове и зеленчуци в няколко сушилни в реално време от разстояние. То представлява прилагане на идеологията на Индустрия 4.0 за сушенето на плодове и зеленчуци.

1.5. Ръчно и автоматично управление на сушилните процеси

Съвременното развитие на технологията за сушене на плодове и зеленчуци до голяма степен се свързва с използването на високи температури и ниско съдържанието на влага в сушилния агент или мощни лъчисти потоци по време на радиационно сушене, тъй като това дава възможност да се интензифицира процесът на сушене. Ефективното управление на бързите процеси на сушене обаче, е невъзможно без използването на автоматично регулиране и управление. При ръчно управление в тези случаи е невъзможно точно да се поддържат високите температури на изсушаващия агент или излъчващата повърхност в определените граници. Следователно, поне краткосрочното превишаване на зададената температура е неизбежно, а това води до влошаване на качествата на сушимия материал. Използването на автоматично управление с необходимите блокировки и ограничителни условия в сушилните инсталации също е необходимост, съгласно изискванията за безопасност при сушене с високочестотни токове, при сушене на експлозивни и токсични вещества и др..

Управлението на сушилните процеси за плодове и зеленчуци се осъществява основно чрез два метода: ръчно и автоматично управление. Като разширение на функционалните възможности на сушенето, с употребата на съвременни компютърни средства за контрол, се явява и отдалеченото управление на процеса. То е неминуемо обвързано с възможностите, които предоставя Индустрия 4.0 и Интернет свързаност на нещата.

Ръчното управление е най-разпространеният начин да се настроят управляемите фактори за процеса: операторът регулира настройваемите променливи (например: дебит, топлинна енергия и др.). Това управление е много опростено от технологична гледна точка, но и е много нестабилно, поради обичайните сложни и многомерни промени, настъпили по време на сушенето. Освен това, въздействието на смущения (например: промяна в

хранителните характеристики) обикновено са с пренебрежима стойност за оператора по време на сушене. Тъй като и честотата на настройките е неизвестна, то и новите необходими промени за нови неконтролирани условия на сушене не могат да се приложат, когато е необходимо. Това, следователно, води до намаляване на ефективността на сушенето. Друг недостатък е обвързаността на управлението с оператора, а обучението му изисква време и опит.

Автоматичното управление има за цел да се настройват автоматично контролируемите променливи. Предполага се автоматично коригиране на променливите по всяко време или през определен интервал на вземане на проби от сушимия материал. Изграждането на автоматично управление обикновено е по-трудно, отколкото прилагането на ръчен контрол, което е свързано с провеждане на редица експерименти и изследвания преди неговото въвеждане. Общото функциониране на процеса значително ще се подобри, чрез бързи изчисления и адекватни въздействия над контролираните променливи само при приложението на автоматично управление.

Основната задача по време на сушенето е да се настройат управляемите фактори на сушенето, за да се постигне желаният краен резултат, отнасящ се до:

- Повишаване на производителността, чрез достигане на зададените крайни резултати и желаното качество на сушените продукти, нужни за комерсиалното им използване. Това включва: размер, цвят, външен вид, шупливост, стабилност, текстура и др. показатели на сушените плодове. Също така, трябва да се минимизира количеството на развалени продукти, предизвикано от промени в някои от условията за сушене: избрани контролни точки, продължителност, хранителни характеристики или атмосферни условия.

- Понижаване на себестойността на продукцията, чрез намаляване на консумацията на енергия. Сушенето е процес с високи енергийни разходи и представлява от 10% до 25% от националната промишлена енергия в развития свят [34]. Също така, по-голямата част от промишлените сушилни

работят с много ниска енергийна ефективност, от разочароващи 10% до респектираци 60% (това отношение е теоретичната енергия, нужна за изсушаването, върху реално използваната енергия). Поради ескалиращите цени на енергията е необходимо управление на процеса, с цел намаляване на консумираната енергия, ако се разчита на доставка на енергия от външни източници или употреба на възобновяеми или собствени източници на енергия. Намаление на енергията може да се постигне само използвайки интелигентни управляващи устройства за процеса сушене.

Поставените цели за управление на сушилният процес са в конфликт, защото, подобрени характеристики и високо качество изискват увеличение на цената на продукцията, докато намаляване на времето за сушене може да доведе до по-ниско качество, но и по-ниска себестойност. Затова настройването на параметрите на сушилният процес не е толкова лесно и целите често са занижавани, като се стига до ръчен контрол на сушенето. Ръчният контрол е най-лесен за реализиране, но минусът е, че крайните резултати не са най-добрите и често се разминават с очакваните. Не е изненада, че развитието на „smart“ управлението на сушилните нашумя и се разширява неговото приложение в технологиите на сушене [48]. В „smart“ сушилните, управлението автоматично настройва параметрите за сушене, така че да се достигне очакваният краен резултат [47, 54, 85, 99, 107].

Изследванията [9, 16, 25, 32, 97, 120, 141, 143] показват плюсовете за сушилната индустрия с използване на интелигентно автоматично управление на процеса:

- Намаление на консумацията на енергия
 - настройване на мощността на нагревателя;
 - настройване на скоростта на въздушните маси;
 - оптимизиране ефективността на сушилния;
- Намаление на времето за сушене
 - използването на модел за предсказващо управление;
- Намаление на себестойността на готовата продукция
 - повишаване на производителността;
 - намаление на негодната продукция;

- подобрява качеството на сушените плодове и зеленчуци;
- повишава надеждността на работата на сушилнята;
- Подобрява условията на работа
 - повишава културата на труда;
 - улеснява работата със сушилнята;
 - намалява броя на персонала, обслужващ сушилнята;

Следователно, може да се заключи, че използването на интелигентни управляващи устройства позволява намаление на консумацията на енергия и ограничаване на негодната продукция. Също така, дори и началното контролно обучение за управлението на процеса да не е просто (например създаването на модел и софтуерна реализация), възвръщането на тази инвестиция е относително кратко, като не превишава 1.5 години.

Процесът сушене зависи от дизайна/конструкцията на сушилнята, метода на сушене и управляемите фактори при сушенето.

- Различен дизайн/конструкция, като например - тип сушилня, сензори, размери, оборудване и др., които се дефинират, когато сушилнята не съществува [101]. Изборът и цената им са първите неща, които се обсъждат когато се изгражда сушилнята. При проектирането на сушилнята трябва да се предвиди и възможността за комбиниране на методите за сушене в нея.

- Управляеми фактори, като например: температура и влажност на сушилния агент, количество въздушни маси и др.. Те се определят след изграждането на сушилнята. Част от тези променливи трябва да са настроени преди сушенето и не се променят по време на процеса, а други се променят по време на сушенето, ръчно или автоматично.

Инженерният контрол включва управлението на променливите параметри за сушенето, след вземане на решенията относно конструкцията, въпреки че тези различия имат огромно значение за самия процес. Например, типът, броят и разположението на сензорите, които са много важни по време на сушенето, обикновено не се вземат под внимание по време на избирането на дизайн на сушилнята. В тази връзка се занимаваме само с настройването на управляемите променливи, които са основна цел за управлението.

Нуждата от периодично настройване на управляемите променливи на сушилният процес е следствие на два проблема:

- **Регулиране** - зададен е константен вектор за управление, който трябва да се следва (например: желана крайна стойност на влагосъдържанието). Проблемът е да се избере и построи управление, което настройва управляемите променливи, така че да следват възможно най-добре заданието с минимални разлики по време на сушенето [106].

- **Оптимизация** - идеята е първоначално да се зададе критерий, който да отчита контролираните променливи и/или управляемите променливи и/или възможните променливи, които съдържат всички динамични характеристики на сушенето. След това оптимизиращата процедура настройва управляемите променливи, за да минимизира този критерий [21, 57].

Управляемите променливи могат да се настройват по два начина:

- **Off-line управление:** При този начин се предполага, че са известни и не се променят по време на процеса - поведението на сушилнята, желаните характеристики на продукта, неуправляваните условия на работа. Управляемите променливи се настройват преди началото на сушенето (чрез изчисление с компютър или ръчно) и тези дефинирани стойности се използват след това по време на сушенето.

- **On-line управление:** реално желаните характеристики обикновено се знаят предварително, но атмосферните условия и хранителните характеристики може да се променят с времето. Тези промени може и да не настъпят, но силно влияят на сушенето. Ефикасен начин за управление на сушилнята е да се настройват (автоматично или ръчно) управляемите променливи по време на сушенето, за постигане на най-добри резултати, използвайки променящите се с времето състояния на материала и околната среда.

Въпреки, че и двата подхода са разработвани, перспективата е за on-line управлението. Измерванията на материала и околната среда, направени по време на сушенето, се използват за настройване на управляемите променливи. Това в значителна степен подобрява процеса на сушене. За

съжаление, засега off-line управлението е по-често използвано при инженерните подходи за сушене от on-line управлението. Това се дължи отчасти на малкото знания при хората, занимаващи се със сушене, за управляващите устройства и особено за ползите, които могат да се получат от тях. Нужни са време, знания и средства за развитието на експертите. Съвременните точни и надеждни сензори позволяват on-line измервания за широк набор от продукти, така нужни за управлението. Това първоначално е правило управляващите устройства трудни за използване. В последните години все повече се разработват сензори с добро качество и приемлива цена.

Наличието на on-line свързаност, се използва по време на сушенето, за да се настройват ръчно или автоматично управляемите фактори.

Направеният анализ показва, че сушенето на плодове и зеленчуци има голям екологичен и икономически ефект, като те са незаменим хранителен продукт. Запазването на голяма част от витамините и останалите полезни вещества, които се съдържат в пресните, е основна цел [126]. Предимствата, които сушенето предоставя и в частност конвективното сушене, натрупаният опит по управлението на процеса и възникналите проблеми в тази област, изискват да се обърне сериозно внимание върху изследването на този процес, с цел разширяване на неговото приложение за получаването на висококачествени сушени плодове и зеленчуци с приложението на on-line управление.

Глава 2

КОНЦЕПТУАЛНИ И ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ

2.1. Моделиране на сушилните процеси на плодове и зеленчуци

Математичните модели на кинетиката на процеса в сушилните, независимо от своето многообразие, могат да се обединят в три групи - емпирични, полуемпирични и приблизителни аналитични модели [79, 104, 114, 134]. Многообразието на факторите, влияещи върху кинетиката на сушилния процес и тяхната взаимна връзка, затруднява получаването на строги аналитични зависимости.

Изборът на модел на кривите на сушене зависи от много фактори - тип на суровината (ябълки, моркови, лук, кайсии, и др.), дебелина на сушимия материал, тип на сушилнята (тунелна, камерна и др.), метод на дехидратация (загряване, изсмукване/вакуумно, замръзване и др.), с предварителна обработка или без предварителна обработка на суровината и др. [1, 10]. Няма дефинирана зависимост между сушимия материал и сушилнята, т.е. в една сушилня могат да бъдат сушени различни плодове или зеленчуци. За всеки плод или зеленчук са необходими измервания в хода на сушилния процес. Обикновено се снима изменението на масата на материала при постоянни

параметри на сушилния агент. Използвайки тези стойности за масата, се изчислява влагоотделянето MR за конкретния материал в хода на процеса.

Построяването на кинетичните криви на сушилния процес е първата фаза, след което е необходимо да се изследват и съпоставят различните модели, описващи сушенето. Има значителен брой публикации с анализ на моделите, описващи сушилния процес [11, 29, 39, 45, 51, 56, 62, 69, 74, 81, 115].

Ето защо, при описанието на сушилния процес обикновено се използват емпирични или приблизителни зависимости, обобщаващи многобройните опити. Прието е означението MR за изменението на влагоотделянето на сушения материал във функция от изминалото време t от началото на процеса сушене.

Емпирични кинетични модели. Получаването на тези модели се свежда до обобщаване на опитните данни по сушене на определен материал по даден метод във функция от вида (1) и (2) [9, 140]. (1) представлява изменението на влагоотделянето във функция от времето (t), температурата на сушилния агент (θ), влажност (φ), температура на околния въздух (θ_a), размер на суровината (l_b) и др..

$$\underline{MR} = f_1(t, \theta, \varphi, \theta_a, l_b \dots), \quad (1)$$

$$t = f_1(\underline{MR}, \theta, \varphi, \theta_a, l_b \dots) \quad (2)$$

Емпиричните модели обикновено се получават от опитни криви на сушене, които са апроксимирани чрез експоненциални или дробни функции, като е отчетено влиянието на най-важните фактори. Тези модели са точни, когато са спазени строго условията, при които са получени, и обикновено тяхното приложение е ограничено от вида на материала, метода и режима на сушене.

Полуемпирични кинетични модели. Те се свеждат до задаване на следната зависимост (3):

$$\frac{dMR}{dt} = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (3)$$

която след интегриране има вида (4) и (5):

$$t = f_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

$$\underline{MR} = f_3(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (5)$$

където X_1, X_2, \dots, X_n са параметрите, които оказват най-голямо влияние върху процеса.

В зависимост от вида на (3) интегрирането може да се извърши точно или приблизително. При тези модели, със сравнително прости функции могат да се получат изрази за кривата на сушене с широка област на приложение.

В основата на полуемпиричните модели обикновено е зависимостта, предложена от Фишер, за II период на сушене (6).

$$\frac{dMR}{dt_{II}} = -K\Delta MR, \quad (6)$$

където K е константа на процеса, а $\Delta MR = MR - MR_p$.

По-късно Ликов предлага връзката (7):

$$\frac{dMR}{dt_{II}} = -\omega N \Delta MR, \quad (7)$$

където ω е относителният коефициент на сушене; N – скоростта на сушене през I период (конкретни стойности за ω на различни материали са приведени в литературата [18, 104]).

Известни в литературата [38, 41, 53, 58, 75, 105] са двадесет и три модела, описващи изменението на отношението на влагосъдържанието на различни плодове и зеленчуци, които са показани в Таблица 2.

По експериментално получените данни за влагосъдържанието на материала се пресмята отношението MR за влагоотделянето, като:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}, \quad (8)$$

където M_t е влагосъдържанието на материала в момента t , kg/kg;

M_o - началното влагосъдържание, kg/kg;

M_e - равновесното влагосъдържание, kg/kg.

Работено е върху кинетиката на сушене на различни видове сливи. В [91] са получени параметрите на кинетичните модели на Пейдж, логаритмичния, двучленния експоненциален и приблизително дифузия при сушене на сливи без предварителна обработка и сушене на сливи, предварително бланширани. Най-точно описва експерименталните данни двучленният експоненциален модел.

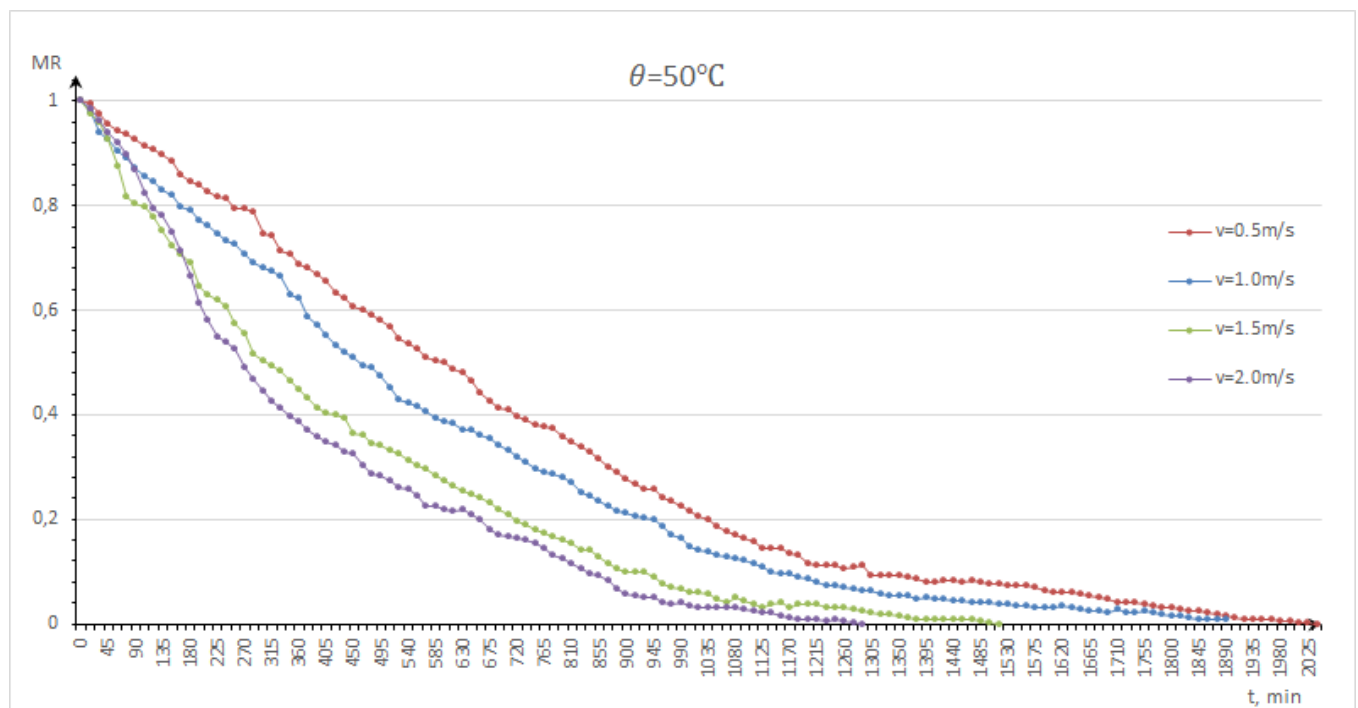
Таблица 2

Известни модели за описване на влагоотделянето с кинетични криви при сушене

| № | Модел | Име |
|----|--|--|
| 1 | $MR = \exp(-kt)$ | Нютон |
| 2 | $MR = \exp(-kt) - akt$ | Люис |
| 3 | $MR = \exp(-kt^n)$ | Пейдж |
| 4 | $MR = \exp(-kt)^n$ | Модифициран I Пейдж |
| 5 | $MR = \exp((-kt)^n)$ | Модифициран II Пейдж |
| 6 | $MR = \exp(-k(t/l^2)^n)$ | Модифициран Пейдж |
| 7 | $MR = a \exp(-kt)$ | Хендерсън и Пейбис |
| 8 | $MR = a \exp(-kt) + c$ | Логаритмичен |
| 9 | $MR = a \exp((-kt)^n) + b$ | Демир |
| 10 | $MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$ | Хендерсън-двучленен |
| 11 | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | Модифициран на Хендерсън и Пейбис |
| 12 | $MR = 1 + at + bt^2$ | Ванг и Синг |
| 13 | $t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$ | Томсън |
| 14 | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$ | Приблизителен дифузен |
| 15 | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$ | Верма |
| 16 | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$ | Двучленен експоненциален |
| 17 | $MR = a \exp(-c(\frac{t}{l^2}))$ | Опростен дифузионен на Фик |
| 18 | $MR = \exp(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t})$ | Модел на Aghabashlo |
| 19 | $MR = \exp(-(t/a)^b)$ | Разпределение на Вейбул, (Weibull distribution) |
| 20 | $MR = a \exp(-kt) + b^* t$ | Midilli |
| 21 | $MR = \exp(-kt) + b^* t$ | Модифициран Midilli |
| 22 | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ | Midilli-Kucuk |
| 23 | $MR = \exp(-cT) + bt^{(pT+n)}$ | Kalleemullah, (зависим от времето и температурата) |

Кинетичните криви на сушене на парченца сливи са получени и в [56, 117]. Намерени са параметрите на шест модела - на Нютон, Пейдж, модифицирания на Пейдж, на Хендерсън и Пейбис, на логаритмичния и на Ванг и Синг, описващи сушенето на необработени предварително, бланширани и бланширани в 1% KMS разтвор сливи. Най-добре експерименталните данни се описват с логаритмичния модел.

В заключение може да се обобщи, че емпиричните и полуемпиричните модели, намерили най-широко приложение, описващи изменението на влагоотделянето в материала, съдържат величини, които се определят въз основа на опитни резултати за всеки плод или зеленчук. Примери за определяне на качествата на избран модел, описващ влагоотделянето са описани в [4, 11, 12, 13, 75, 76, 77], а на фиг.1 е показан процес по експериментално снемане на кинетични криви. Бездименсионната величина MR , определяща влагоотделянето, е изчислена на база измерените маси на сушения материал по време на сушенето. След събирането на достатъчно преходни характеристики при константни стойности на сушилния агент се преминава към моделиране на тези характеристики и оценка на качествата им.



фиг. 1. Експериментални кинетични криви с изменение на влагоотделянето

Аналитични кинетични модели. Те се основават на използването на системи диференциални уравнения, описващи топло и масопреносните процеси в изсушавания материал. Тези модели описват връзките при изменение на температурата, влагата и налягането ($\frac{dT}{dt}$, $\frac{dM}{dt}$ и $\frac{dP}{dt}$) на материала. Такова моделиране е най-общо и универсално и за разлика от разгледаните емпирични и полуемпирични модели дава възможност да се намерят и локалните стойности на температурата и влагосъдържанието на материала [54].

$$\begin{aligned}\frac{dM}{dt} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P, \\ \frac{dT}{dt} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P, \\ \frac{dP}{dt} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P.\end{aligned}\quad (9)$$

където M е влагосъдържанието, T - температурата и P – налягането. Коефициентите K_{11} , K_{22} и K_{33} са феноменологични коефициенти, а K_{12} , K_{13} , K_{21} , K_{23} , K_{31} и K_{32} - коефициенти на свързване.

За сушилните процеси изменението на налягането може да бъде пренебрегнато, а понеже от съществено значение са изменението на влагосъдържанието, вследствие изменението на температурата то горните изрази могат да бъдат опростени.

$$\begin{aligned}\frac{dM}{dt} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T, \\ \frac{dT}{dt} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T.\end{aligned}\quad (10)$$

Прието е, когато сушените плодове или зеленчуци са на тънки слоеве, да не се следи температурният градиент в продукта, като се предполага равномерно разпределение на температурата в материала, която съвпада с температурата на изсушаващия въздух (сушилният агент) и съответно се опростяват (10) и се получават зависимости (11).

$$\begin{aligned}\frac{dM}{dt} &= \nabla^2 K_{11}M, \\ \frac{dT}{dt} &= \nabla^2 K_{22}T.\end{aligned}\quad (11)$$

Феноменологичният коефициент K_{11} е известен, като коефициент на дифузия на влагата - D_{eff} , а K_{22} е известен като термична дифузия - α .

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= D_{eff} \left(\frac{d^2M}{dx^2} + \frac{a_1}{x} \frac{dM}{dx} \right) \\ \frac{dT}{dt} &= \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{a_1}{x} \frac{dT}{dx} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

където параметърът $a_1 = 0$ за равнинни геометрии, $a_1 = 1$ за цилиндрични форми и $a_1 = 2$ за сферични форми.

Посочените аналитични изрази са изследвани за широк кръг от продукти и се наблюдават допустими грешки в началото на процеса [60], като тяхната стойност може да бъде намалена, чрез намаляване дебелината (размера) на сушимия продукт.

Аналитичните модели, които се използват в практиката, са развити въз основа на различни теоретични предпоставки, обединени в шест теории - на течната дифузия, на парната дифузия, капилярната теория, теорията на Фишер, на Филип де Ври и на Ликов.

Теорията на течната дифузия е най-старата теория, създадена през 30-те години на ХХ век [67]. Според нея, през време на сушилния процес движението на влагата в материала се извършва в резултат на дифузионно пренасяне и може да се опише със закона на Фик (13):

$$\frac{dMR}{dt} = \nabla(D\nabla MR) + \nabla(D\delta_T\nabla T) + \varepsilon \frac{dMR}{dt}. \quad (13)$$

Коефициентът на дифузия D при различни решения се приема за константа или като зависим (най-често линейно) от температурата и/или влагосъдържанието или само от температурата по формулата на Арениус (14).

$$D = D_0 \exp \exp \left(\frac{-E}{R_n T} \right), \quad (14)$$

където E е енергията на свързване (активираща енергия на реакцията), kJ/kg;

T – температурата, К;

R_n – универсалната газова константа, kJ/kgK;

D_0 – константа (с експоненциален характер, която е постоянна за дадена химична реакция, отнасяща се за честотата на сблъскване на частици).

При нискотемпературно конвективно сушене ($T < 100^\circ\text{C}$) вторият и третият член на сумата в уравнение (13) са пренебрежимо малки, т.е.

$$\frac{dMR}{dt} = \nabla(D\nabla MR). \quad (15)$$

Уравнението (15), при постоянна стойност на коефициента на дифузия, има вида:

$$\frac{dMR}{dt} = D\nabla^2 MR. \quad (16)$$

При едномерните тела може да се запише:

-за пластина

$$\frac{dMR}{dt} = D \frac{d^2 MR}{dx^2}; \quad (17)$$

-за цилиндър

$$\frac{dMR}{dt} = D \left(\frac{d^2 MR}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dMR}{dr} \right); \quad (18)$$

-за сфера

$$\frac{dMR}{dt} = D \left(\frac{d^2 MR}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dMR}{dr} \right), \quad (19)$$

където x е линейният размер, а r - радиусът на тялото.

За решаването на горните диференциални уравнения, от които се получават кривите на сушене, е необходимо да се знаят условията на еднозначност (начални и гранични).

Използват се следните родове (видове) гранични условия:

Първи род – задава се влагоотделянето на повърхността на материала, например:

$$MR_{\text{пов}} = f(t) \text{ или } MR_{\text{пов}} = \text{const};$$

Втори род – задава се големината на масовия поток на повърхността

$$q_{\text{д.пов}} = D \left(\frac{dMR}{dn} \right)_{\text{пов}} = D(\nabla MR)_{\text{пов}};$$

Трети род – това са най-често срещаните гранични условия, когато влагообменът между влажното тяло и сушилния агент се задава чрез

уравнението на конвективно масопренасяне. Масовият поток се довежда до повърхността чрез влагопроводност. В този случай се задава връзката:

$$\beta(p_{\text{пов}} - p_{\text{п}}) = D \left(\frac{dMR}{dn} \right)_{\text{пов}} = D(\nabla MR)_{\text{пов}};$$

Четвърти род – това са най-коректните гранични условия, при които се задават взаимнообвързано концентрационните полета от двете страни на повърхността [18]. Когато коефициентът на дифузия зависи най-много (или единствено) от влагосъдържанието на материала, Чен и Джонсън препоръчват следните уравнения за сушене на тънки материали:

За сушене през първи период

$$\frac{dMR}{dt} = D\nabla^2 MR, \quad D = \text{const.}$$

За сушене през първата фаза на втори период

$$\frac{dMR}{dt} = D\nabla^2 MR + \frac{dD}{dMR} (\nabla MR)^2.$$

За сушене в края на втори период

$$\frac{dMR}{dt} = -k(MR - MR_p)^n.$$

Използването на аналитичните кинетични модели за пресмятане на сушилни процеси изисква познаване на числените стойности на коефициента на дифузия на всеки конкретен влажен материал. Както повечето топлофизични характеристики на влажните материали, така и коефициентът на дифузия се определя опитно. Известни са различни методи, но най-перспективни са тези, при които коефициентът на дифузия се определя от кривите на сушене при действителни условия.

Проведени са многобройни изследвания за коефициента на дифузия и енергията за загряване и консумираната енергия при сушене на различни плодове и зеленчуци в тънък слой: парченца картофи [28], смокиня [37], парченца тиква [45], сливи [57, 83, 116], грозде [85, 110] и др..

Аналитичното решение на уравнението на Фик за дифузия на сферично тяло описва сушилния процес през периода с намаляваща скорост, при допускане, че коефициентът на дифузия на влагата е постоянен [82]

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \frac{-n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r_o^2}, \quad (20)$$

където M_t е влагосъдържанието на материала в момента t , kg/kg;

M_o - началното влагосъдържание, kg/kg;

M_e - равновесното влагосъдържание, kg/kg;

t - времето;

D_{eff} - коефициентът на дифузия на влагата;

r_o - радиусът на сферата.

След пренебрегване на членовете от по-висок ред, уравнението има вида:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \frac{-\pi^2 D_{eff} t}{r_o^2}. \quad (21)$$

Законът на Фик е използван често [56, 81], за описване на сушилния процес на кайсии. Аналитичното решение на уравнението за дифузия на Фик за безкраен ред, след пренебрегване на членовете от по-висок порядък, е:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} e \frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}, \quad (22)$$

където L е дебелината на слоя материал, m.

Проектирана и разработена е конвективна сушилня, с помощта на която са направени експерименти за сушене на почистени и нарязани кайсии. Проучени са експериментални данни за сушене на кайсии при скорост на сушилния агент 0.5; 1; 1.5 и 2m/s и температура 40; 50; 60; 70 и 80°C. Експерименталните резултати на фиг.1 показват, че е налице само период с намаляваща скорост на сушене [11]. Най-голям коефициент на дифузия $1.15 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ се получава при температура 80°C и скорост 1m/s на сушилния агент, а най-малък $1.7 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ – при температура 40°C и скорост 2m/s.

В [104] е получен математичен модел, описващ изменението на влагосъдържанието на кайсии във вътрешността на материала и във времето. Предпоставките, при които е изведен моделът, са:

- половината кайсия е с полусферична форма и хомогенна структура;
- влагоотделянето се определя от дифузионните процеси;

- промяната на формата на материала в процеса на сушене е пренебрежимо малка;
- изпарението е само от повърхността на материала.

Уравнението, описващо влагоотделянето от материал с полусферична форма е:

$$\frac{\partial W_1(r, \alpha, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r^2 \frac{\partial W_1(r, \alpha, t)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(D_{eff} r^2 \frac{\partial W_1(r, \alpha, t)}{\partial \alpha} \right) \quad (23)$$

при следните начални и гранични условия:

- началното влагосъдържание е едно и също в целия материал

$$t = 0 \rightarrow W_1(r, \alpha, 0) = W_0;$$

- влагоотделянето е само откъм плоската част на материала

$$t > 0 \rightarrow \frac{\partial W_1(r, \alpha, t)}{\partial r} = 0;$$

- симетрично разпределение на влагата в материала

$$t > 0 \rightarrow \frac{\partial W_1(r, 0, t)}{\partial \alpha} = 0.$$

Ако се пренебрегне външното съпротивление при масопренасянето, то повърхността на материала е в равновесие със сушилния агент и граничните условия са:

$$t > 0 \rightarrow W_1(0, \alpha, t) = W_e$$

$$t > 0 \rightarrow W_1\left(r, \frac{\pi}{2}, t\right) = W_e.$$

Ако се отчита външното съпротивление при масопренасянето, то граничните условия имат вида (24) и (25).

$$t > 0 \rightarrow D_{eff} \rho_m \frac{\partial W_1(0, \alpha, t)}{\partial r} = k_c (\varphi_s - \varphi_\infty) \quad (24)$$

$$t > 0 \rightarrow \frac{D_{eff} \rho_m}{r} \frac{\partial W_1(r, \pi/2, t)}{\partial \alpha} = k_c (\varphi_s - \varphi_\infty). \quad (25)$$

При използване на граничните условия (24) и (25) е необходимо да бъде определен конвективният коефициент на масопренасяне k_c , (kg water/m²s).

Експерименталните резултати показват, че влиянието на външното съпротивление върху масопренасянето е от съществено значение и адекватното определяне на коефициента на масопренасяне повишава

точността на модела от 87.7% (при пренебрегване на външното съпротивление) на 99.7% (при отчитане на външното съпротивление).

Направеният обзор на различни кинетични модели на сушилни процеси показва, че някои плодове и зеленчуци имат период на постоянна скорост на сушене и период с намаляваща скорост на сушене [85, 104], а други нямат период на постоянна скорост на сушене [72, 96]. Освен това, отчитайки, че плодовете и зеленчуците се сушат в тънък слой [59, 98, 102], не е необходимо за управление на процеса да се търсят и локалните стойности на температурата и влагата в материала. Достатъчно е да се следи и управлява процесът по изменението на влагоотделянето.

2.2. Анализ на факторите за въздействие върху процесите на сушене на плодове и зеленчуци

Сушилните инсталации са твърде сложни обекти по отношение възможността за измерване и оценка на състоянието и по отношение на идентификация и управление [17]. Тази сложност се определя от специфичните особености на структурата на материала за сушене и свързаните с нея масо- и топлопреносни процеси при взаимодействие със сушилния агент. За продължително съхранение на сушени плодове е прието да се отнеме около 80% от съдържащата се в тях вода, а за зеленчуци този процент е до 95%. Разбира се, тези стойности са препоръчителни и при търговската реализация на продуктите, процентът на отнетата влага е по-нисък [144].

Оптималният режим на сушене е режим, който осигурява: получаване на изсушен продукт, който най-пълно възстановява първоначалните си свойства и химичен състав; постигане на най-доброто запазване на крайния продукт; отстраняване на влагата от плодовете и зеленчуците с най-ниски разходи за гориво, електричество и труд; пълно използване на сушилната повърхност, за да се осигури максимален капацитет на сушене.

Режимът на сушене чрез конвекция се характеризира със следните параметри на сушилния агент и материала: температура на сушене, скорост

на въздуха, относителна влажност, атмосферно налягане, едрина на материала и дебелина на слоя. Обобщена информация за проведени изследвания [34, 53, 111], на различни плодове и зеленчуци с регулиране параметрите на сушилния агент е показана в Таблица 3.

Използването на много високи температури на въздуха по време на сушене е неприемливо, тъй като това може да наруши вкуса, миризмата, цвета и химичния състав на сушените плодове и зеленчуци. Следователно за всеки вид суровина е разработен оптимален режим на сушене, който осигурява най-висока производителност на инсталацията с добро качество на изсушения продукт.

Таблица 3

Начална, крайна влажност и допустими температури и скорост на агента за сушене на плодове и зеленчуци

| Продукт | Влажност , % | | Температурен диапазон , °C | Скорост на сушилния агент, m/s |
|-------------|--------------|--------|----------------------------|--------------------------------|
| | начална | крайна | | |
| грах | 78 | 5 | 55÷80 | 0.3÷1.5 |
| грозде | 81 | 15÷20 | 55÷70 | 0.2÷1.0 |
| домати | 94 | 12÷17 | 50÷70 | 0.3÷2.0 |
| зелен фасул | 90 | 5 | 50÷80 | 0.3÷1.0 |
| кайсии | 85 | 16÷18 | 50÷85 | 0.7÷2.3 |
| картофи | 80 | 13 | 60÷80 | 1.0÷1.5 |
| круши | 83 | 25 | 55÷70 | 1.0÷2.1 |
| лук | 89 | 5 | 50÷80 | 0.3÷1.0 |
| моркови | 88 | 7 | 60÷90 | 0.5÷1.5 |
| праскови | 89 | 18 | 60÷80 | 0.5÷1.3 |
| сини сливи | 79 | 20 | 60÷80 | 1.0÷3.0 |
| чушки | 93 | 6 | 55÷70 | 0.3÷1.0 |
| тиква | 90 | 8 | 60÷80 | 1.0÷1.5 |
| ябълки | 84 | 24 | 60÷80 | 1.0÷1.5 |
| ягоди | 90 | 18 | 50÷65 | 1.0÷1.5 |

В началото на сушенето повишаването на температурата на сушилния агент води до ускоряване на процеса на сушене. Но в същото време се увеличават топлинните загуби, които са най-значими в края на сушенето, когато материалът има ниска влажност. Максимално допустимите

температури зависят от вида на материала и метода на сушене. При сушене на материала в неподвижен слой, долният слой на материала, който трябва да се изсуши, влиза в контакт със сушилния агент, който се загрява до максималната температура и със сушилната решетка, това води до локално прегряване (максималната температура не е повече от $70\div 75^{\circ}\text{C}$).

При сушене в кипящ слой има непрекъснато движение и смесване на материала, не настъпва локално прегряване и могат да се увеличат максимално допустимите температури на сушилния агент и материала (максималната температура може да достигне $140\div 180^{\circ}\text{C}$).

Температурата на сушене чрез разпръскване се определя от посоката на движение на сушилния агент и материала. В началния период сушенето протича по-интензивно с директен поток (движението на изсушения материал и изсушаващия агент са насочени в една посока). В края на сушенето - настъпва по-интензивно сушене с обратен поток (движението на изсушения материал и сушилния агент са насочени в различни посоки). Температурата на материала, който трябва да се изсуши, в края на процеса на сушене се доближава до температурата на изходящия въздух при директния поток, а при обратния поток - температурата на входящия въздух. Следователно крайната температура на материала е значително по-висока в обратния поток и може да бъде по-висока от допустимата. За да не се допусне това, е необходимо да се използва директен поток на въздуха при сушене на термолабилни материали. При движението на въздуха с директен поток се използва въздух с температура $180\div 200^{\circ}\text{C}$, а при движението на въздуха с обратен поток тази температура не трябва да надвишава 140°C . По-икономичен е директният поток на въздуха и изсушения материал.

За да се оцени влиянието на параметрите на работния флуид върху продължителността на процеса, кривите на кинетиката на сушене се систематизират по параметрите, характеризиращи режима. Колкото по-висока е температурата на въздуха в сушилнята, толкова по-висока е скоростта на изпаряване. Установено е, че повишаването на температурата на сушилния агент намалява продължителността на сушене, при постоянна влажност и скорост на въздуха [19, 47, 71].

При сушене на суровите плодове и зеленчуци в началния период, високата температура на въздуха не създава опасност от прегряване на продукта, тъй като влагата се изпарява интензивно и го охлажда. След това, сушенето трябва да продължи при по-ниски температури, като в края на сушенето на плодове и зеленчуци тя трябва да бъде между $55\div 65^{\circ}\text{C}$.

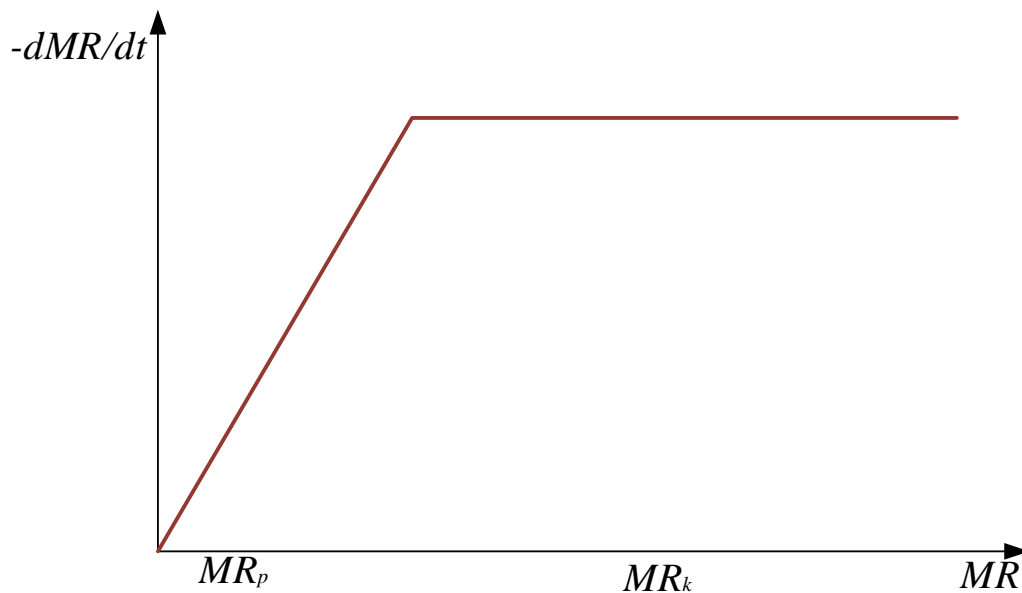
Температурата на въздуха, при изсушаването на кайсии варира между 40 и 80°C (40°C , ако се използва естествени източници на топлина). При съхраняване на сушени кайсии и преработването им до финалното състояние, съдържанието на влага трябва да бъде $16\div 18\%$ (от теглото).

Въздушният поток, движещ се в сушилнята, подобрява смесването с изпарената влага и отстраняването на овлажнения въздух от сушилнята. Сушенето не е възможно без движение на въздуха. Колкото по-висока е скоростта на движение на въздуха в сушилнята, толкова по-скоро то отвежда изпарената влага, предотвратявайки увеличаване на парциалното налягане на водната пара върху продукта. Този ефект е забележим до скорост на въздушния поток от 5m/s . По-нататъшното увеличаване на скоростта на въздушния поток е ограничено от факта, че въздушната струя „откъсва“ малки парченца изсъхнал материал от сушилната повърхност. Това свойство на въздушния поток се използва при сушене в кипящ слой, когато скоростта на въздушния поток е $5\div 15\text{m/s}$. В края на сушенето скоростта на въздушния поток не влияе значително върху скоростта на сушене. На този участък скоростта е не повече от 1m/s .

Процесът на сушене се извършва правилно, ако скоростта на изпаряване на влагата от повърхността на продукта е равна на скоростта на нейното движение от дълбоките слоеве. При бързо изпаряване на повърхността се появява кора, която предотвратява отделянето на влага, което намалява скоростта на сушене, а при бавно изпаряване продуктът се задушава.

Сушилният процес за различни плодове и зеленчуци се характеризира с периоди с различна скорост на сушене [30, 65]. Първият период, илюстриран на фиг.2, е с постоянна скорост на сушене (MR – влагоотделяне на материала), като изпарението се извършва от повърхността на суровината

и интензивността му се определя единствено от температурата, влажността и скоростта на сушилният агент. През втория период (MR_k) фронтът на изпарение навлиза във вътрешността на тялото и влагата се отделя с постоянно намаляваща интензивност. Увеличаването на скоростта на сушилният агент намалява продължителността на сушене, като значително интензифицира процеса през периода на постоянна скорост на сушене. През втория период на сушене скоростта на работния флуид влияе слабо върху интензивността на процеса. Когато влагосъдържанието на тялото достигне стойността на равновесното влагоотделяне MR_p , сушилният процес спира.



фиг. 2. Крива на скоростта на сушене

Скоростта на обдуване на кайсиите се изменя в границите $0.1 \div 3 \text{ m/s}$. Регулирането на скоростта на сушилният агент има определящо значение за икономия на употребената енергия. Най-често регулирането на скоростта на сушилният агент се реализира с употребата на честотен преобразувател за управление на оборотите на електродвигателя задвижващ вентилатора, който предизвиква движението на въздуха в сушилната камера. Високата скорост на агента е нежелателна в заключителната фаза на сушене, поради вече малката маса на сушения материал и възможността при по-силно движение да бъдат изместени подредените върху лесите парчета плод.

При постоянна температура и скорост на въздушния поток, намаляването на скоростта на сушене на първия етап е право

пропорционално на увеличението на относителната влажност. Тогава тази зависимост намалява и отново се увеличава на последния етап на сушене. В този момент зависимостта на процеса на сушене от относителната влажност на въздуха се определя от стойността на равновесното съдържание на влага, която съответства на остатъчната влажност на изсушения материал [84].

Колкото по-ниска е относителната влажност на сушилния агент, толкова повече той абсорбира влагата от продукта и спомага за по-бързото изсушаване. Въпреки това, сушенето при твърде ниска относителна влажност на въздуха е свързано с прекомерна консумация на топлина, следователно, увеличаване на цената на процеса на сушене. От друга страна с увеличаване на относителната влажност на сушилния агент, съответно нараства продължителността на сушене и рязко се понижава неговата интензивност, като това влияние е съществено в периода на постоянна скорост на сушене. По време на конвективното сушене на плодове и зеленчуци относителната влажност на отработения въздух не трябва да надвишава 40-45% или да бъде по-ниска от тези стойности.

Намаляването на атмосферното налягане ускорява процеса на сушене, но само на първия етап, когато имаме линейно нарастване на интензивността на влагоотделяне.

Натрошаването (намаляване на едрината) на материала, значително намалява времето за сушене. Този фактор се използва в спрей сушилни, където добре смлян материал (размерите на частиците не надвишават няколко микрона) се изсушават за няколко секунди.

Дебелината на слоя или единично натоварване на лесите. Този фактор влияе върху скоростта на сушене, както следва. Увеличаването на дебелината на слоя намалява скоростта на сушене, главно на първия етап. С изсъхването дебелината на слоя намалява и скоростта на сушене се увеличава. Това позволява на долните решетки да се движат с по-ниска скорост (12cm/min) от горните (20cm/min). За равномерно изсушаване натоварването на материала върху решетката трябва да бъде равномерно. В лентовите сушилни това се осигурява от наличието на специално оборудване (бъркалки). Специфичното натоварване също влияе върху работата на

сушилната. С увеличаване на дебелината на слоя производителността ще се увеличи, но до определена граница на специфичното натоварване на материала, след това се наблюдава намаляване на производителността на сушилната. В допълнение, увеличаването на дебелината на слоя е свързано с увеличаване на потреблението на електроенергия на вентилатора, който доставя въздух за сушене. Следователно, височината на слоя се настройва индивидуално за всеки материал, който ще се суши, в зависимост от метода на сушене. Например за плодове и зеленчуци, в сушилни с фиксиран слой, оптималното специфично натоварване е $6.5 \div 18.5 \text{kg/m}^2$, в кипящия слой - $80 \div 120 \text{kg/m}^2$.

Освен разгледаните по-горе фактори върху кинетиката на сушене оказват влияние началното влагосъдържание на плодовете и зеленчуците, направлението на потока сушилен агент, плътността на подреждане и др.. Препоръчва се [114] плътността на подреждане на материала да се определя така, че скоростта на сушилния агент за първия период на сушене да не бъде по-висока от 5m/s , а за втория период - от 2m/s . По-високите скорости не водят до съществена интензификация на процеса, а значително увеличават разходите на енергия за създаването им.

От анализирани литературни източници е установено, че разработките са насочени към описване на процеса за отстраняване на влагата от плодове и зеленчуци с модели, описващи сушене на материал в тънък слой [88]. Това опростява математическите пресмятания за влагоотделянето, като се предполага, че сушилната камера не е претоварена и се гарантира свободно движение на въздушния поток, а размерът на продуктите може да бъде намален при необходимост.

2.3. Критерии за управление на сушилните процеси на плодове и зеленчуци

Предлаганите разработки за управление на процеса сушене са насочени главно към намаляване на енергийните разходи при реализацията му, които са определящ фактор в крайната цена на продукта. Основна съставка на сушилният агент, при повечето конвективни сушилни, е атмосферният въздух. Той се характеризира с динамично променящи се температура, влагосъдържание и атмосферно налягане и това поражда необходимостта от периодичното им измерване. Според месечния хидрометеорологичен бюлетин на Националния институт по метеорология и хидрология [148], през периода юни-юли на годината, температурата на въздуха θ_a се изменя в границите $15\div 45^\circ\text{C}$ - това е сезонът на зреенето на кайсиите. Изменението на относителната влажност на въздуха е в диапазона $30\div 80\%$ и съответно влагосъдържанието Y_a е в границите $0.006\div 0.021\text{kg/kg}$.

При конвективните сушилни се управляват променливите – температура, скорост и влагосъдържание на сушилният агент. Като сушилен агент се използва атмосферният въздух. Предлаганото управление на процеса сушене управлява температурата и скоростта на сушилният агент, като отчита моментните температура и влагосъдържание на атмосферния въздух. Граничните стойности, в които се променят указаните управляеми променливи, са: температура θ от 20°C до 90°C и скорост v от 0.2m/s до 3m/s .

В предлаганото управление, като показател за ефективността му е избран комплексен критерий, отчитащ енергопотребление, продължителност на процеса и зададено качество на готовата продукция при променливи величини на атмосферния въздух (температура и влагосъдържание).

Определяне разхода на енергия при максимално оползотворяване потенциала на атмосферния въздух. Основно при управление на сушилни процеси се следи кинетиката на процеса и много рядко енергийните разходи за сушене. Събраните данни за процеса в реални конвективни сушилни

показват, че специфичният разход на топлина зависи от много фактори, като дори за един и същ продукт варира в широки граници - от 1600 до 14000kJ/kg за kg изпарена вода [9]. Необходимо е в критерия за управление да се отчитат енергийните разходи, определени основно от топлинните разходи за реализиране на процеса [99, 100].

Енергийната ефективност на процеса на отделяне на влагата от продукта се оценява основно от вложената енергия за неговото осъществяване. Необходимата енергия, за реализиране на процеса, се определя чрез уравнение [100, 103]:

$$J_E = \int_0^{t_d} \alpha \dot{m}_a (c_{p,a} + c_{p,v} \cdot Y_a) \cdot (\theta - \theta_a) dt, \text{ kWh} \quad (26)$$

където α е тегловен коефициент;

\dot{m}_a - масовият разход на въздуха, kg/s;

$c_{p,a}$ - специфичният топлинен капацитет на сухия въздух, 1.005kJ/kg°C;

$c_{p,v}$ - специфичният топлинен капацитет на водните пари, 1.863kJ/kg°C;

Y_a - влагосъдържанието на атмосферния въздух, kg/kg;

θ_a - температурата на атмосферния въздух, °C;

θ - температурата на сушилния агент, °C;

t_d - продължителността на сушене, h.

Масовият разход на въздуха \dot{m}_a се определя като [102]:

$$\dot{m}_a = S \cdot v \cdot \rho, \quad (27)$$

където S е площта на лесите, m²

v - скоростта на сушилния агент, m/s;

ρ - плътността на влажния/отвеждания въздух, kg/m³.

$$J_E = \int_0^{t_d} S \cdot v \cdot \rho (c_{p,a} + c_{p,v} \cdot Y_a) \cdot (\theta - \theta_a) dt. \quad (28)$$

Показаните стойности в Таблица 4 характеризират изменението на параметрите на въздуха в температурния диапазон $\theta=0\div 100^\circ\text{C}$. Сушилни процеси се реализират с температури $40\div 90^\circ\text{C}$. При тези стойности от Таблица 4 е видно, че плътността на изходящият сушилнен агент ρ намалява при увеличаване на температурата.

Таблица 4

Температурни изменение на параметрите на въздуха

| Температура θ , °C | Плътност ρ , kg/m ³ | Специфична топлемност /топлинен капацитет $c_{p,a}$, kJ/kg°C | Топлопроводимост λ , W/m °C | Кинематичен вискозитет ν_a , m ² /s x 10 ⁻⁶ | Коефициент на разширение b , 1/°C x 10 ⁻³ |
|---------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|--|
| 0 | 1.293 | 1.005 | 0.0243 | 13.30 | 3.67 |
| 20 | 1.205 | 1.005 | 0.0257 | 15.11 | 3.43 |
| 40 | 1.127 | 1.005 | 0.0271 | 16.97 | 3.20 |
| 60 | 1.067 | 1.009 | 0.0285 | 18.90 | 3.00 |
| 80 | 1.000 | 1.009 | 0.0299 | 20.94 | 2.83 |
| 100 | 0.946 | 1.009 | 0.0314 | 23.06 | 2.68 |

След заместване във формула (28) с площта на лесите на експерименталната сушилня и плътността на влажния въздух при 80°C за масовия разход се получава:

$$J_E = \int_0^{t_d} 0.81\nu(1.005 + 1.863Y_a).(\theta - \theta_a)dt , \quad (29)$$

където оптимизацията е по променливите θ и ν при съответните параметри на атмосферния въздух θ_a и Y_a .

От анализа на (29) се вижда зависимостта на разхода на енергия от режимните параметри на сушилния процес – температура и скорост на сушилния агент. Изследвайки зависимостта (29) при постоянни стойности на характеристиките на атмосферния въздух – температура, влагосъдържание, относителна влажност и атмосферно налягане се наблюдава по-значима зависимост на необходимата енергия от скоростта на сушилния агент - ν , респективно количеството въздух, спрямо измението на температурата - θ . Или казано по-просто, поддържането на по-висока температура на агента при по-голямо негово количество (заради високата скорост на движението му), предполага по-голям разход на енергия. В Таблица 5 са показани аналитично изчислените стойности за необходимата енергия за час при следните предпоставки: през края на месец юни и

началото на месец юли, когато зреят кайсиите, средната температурата на околния въздух е $\theta_a \approx 25^\circ\text{C}$ и влагосъдържанието е $Y_a \approx 0.0088\text{kg/kg}$. Площта на лесите е 1m^2 и натоварването им е допустимото 15kg/m^2 .

Таблица 5

Необходима енергия в kWh за сушене при зададени параметри на сушилния агент и фиксирани температура и влагосъдържание на атмосферния въздух

| $\theta \setminus v$ | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2.0 | ρ , kg/m ³ | Y_a , kg/kg | θ_a , °C |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| 50 | 0.806 | 1.209 | 1.612 | 2.016 | 2.419 | 2.822 | 3.225 | 1.095 | 0.0088 | 25 |
| 55 | 0.953 | 1.430 | 1.907 | 2.383 | 2.860 | 3.337 | 3.813 | 1.079 | 0.0088 | 25 |
| 60 | 1.100 | 1.650 | 2.200 | 2.750 | 3.300 | 3.850 | 4.399 | 1.067 | 0.0088 | 25 |
| 65 | 1.238 | 1.857 | 2.476 | 3.095 | 3.714 | 4.333 | 4.953 | 1.051 | 0.0088 | 25 |
| 70 | 1.369 | 2.054 | 2.738 | 3.423 | 4.107 | 4.792 | 5.476 | 1.033 | 0.0088 | 25 |
| 75 | 1.498 | 2.246 | 2.995 | 3.744 | 4.493 | 5.242 | 5.990 | 1.017 | 0.0088 | 25 |
| 80 | 1.620 | 2.430 | 3.240 | 4.050 | 4.859 | 5.669 | 6.479 | 1.000 | 0.0088 | 25 |

Експерименталните резултати също показаха силната зависимост на разхода на енергия от режимните параметри. Следователно, необходимо е в хода на сушилния процес, в зависимост от температурата θ_a и влагосъдържанието Y_a на атмосферния въздух, така да се определят температурата θ и скоростта v на сушилния агент, че да се получава минимум J_E .

Прекомерното загряване на използвания атмосферен въздух като сушилен агент, при високо моментно влагосъдържание ще доведе до излишни енергийни загуби. При наличието на висока относителна влажност на въздуха е целесъобразно употребата на по-голямо количество сушилен агент, респективно по-висока скорост на обдухване, отколкото загряването му. Също така е уместно да има по-високи скорости на агента в началото на сушилния цикъл, а към края по-високи температури и по-ниска скорост, за да способстват за извличане на влагата от вътрешността на суровината.

Всички тези предпоставки са заложиени като ограничителни условия в използвания алгоритъм за управление.

Определяне на влагоотделянето. Интензивността на сушилния процес се определя от скоростта на сушене, която е количеството изпарена влага за единица време от общата маса на тялото. Скоростта на сушене зависи от режимните параметри, от размерите и топлофизичните характеристики на материала и други показатели:

$$-\frac{dMR}{dt} = f(M_t, \theta, \varphi, v, \tau_{\text{фх}}, l_1, l_2, l_3, \dots) \quad (30)$$

$$t = \int_{M_{t1}}^{M_{t2}} \frac{dMR}{f(M_t, \theta, \varphi, v, \tau_{\text{фх}}, l_1, l_2, l_3, \dots)} \quad (31)$$

или разполагайки с обобщените кинетични криви на сушене лесно може да се определи влагосъдържанието на материала във всеки момент на процеса. С цел постигане на висока скорост на сушене е необходимо в хода на сушене да се търсят режимни параметри, при които има минимална стойност на влагоотделянето, спрямо средното влагосъдържание на материала - \bar{M} . Освен това е необходимо, за да има високо качество на готовата продукция, да не се надвишава максимално допустимата температура на сушилния агент (за кайсии $\theta_{\text{доп}}=80^\circ\text{C}$). Това определя целевата функция при управление на процеса:

$$J_U = \bar{M} - M_e, \text{ при } \theta \leq \theta_{\text{доп}}, \quad (32)$$

където \bar{M} е средното влагосъдържание на материала, kg/kg;

M_e - равновесното влагосъдържание, kg/kg.

За определяне на средното влагосъдържание на материала в хода на сушилния процес се използват разгледаните в т.2.1, Таблица 3 модели, описващи кинетичните криви на сушене за различни плодове или зеленчуци. В проведените експерименти е използван модифицираният модел на Пейдж [4], чието получаване е описано в т.3.2. Средното влагосъдържание на материала \bar{M} в хода на сушилния процес, при начално влагосъдържание $M_o=5.25\text{kg/kg}$ и равновесно влагосъдържание $M_e=0.22\text{kg/kg}$, се определя като:

$$\bar{M} = (5.25 - 0.22) \exp(-(kt)^n) + 0.22, \quad (33)$$

където параметрите k и n на модифицирания модел на Пейдж, в зависимост от стойностите на сушилния агент, са [4, 12, 13]:

$$k = 1.5919 \times 10^{-5} + 6.9358 \times 10^{-5} \theta - \frac{0.0019}{v} + \frac{4.0082 \times 10^{-4}}{v^2}, \quad (34)$$

$$n = 1.6543 \cdot v^{0.6681} e^{\frac{-24.6037}{\theta}} + \frac{4.1787}{e^v} + \frac{0.5008}{v} - 0.7915. \quad (35)$$

Ако целта е постигане на висока скорост на сушене, то е необходимо в хода на сушилния процес, така да се определят температурата θ и скоростта v на сушилния агент, че да се получава минимум на J_U при ограничително условие $\theta \leq \theta_{\text{доп}}$.

При избрани адекватни модели, описващи кинетичните криви на сушене, може да се определи максималната продължителност на процеса. По този начин потребителят може да си планира момента от време за стартиране/начало на процеса сушене. Примери за изчисляване на продължителността са показани в Таблица 6. Крайната стойност на влагоотделянето MR е равна на 0, но за да са коректни изчисленията трябва да се приемат минимални стойности за $MR \approx 0.001$.

Таблица 6

Изчисляване на продължителността на сушилния процес

| № | Модел | Име | Продължителност, t_d |
|---|------------------------|---------------------|--|
| 1 | $MR = \exp(-kt)$ | Нютон | $t = -\frac{1}{k} \ln MR$ |
| 2 | $MR = \exp(-kt^n)$ | Пейдж | $t = \sqrt[n]{-\frac{1}{k} \ln MR}$ |
| 3 | $MR = \exp(-kt)^n$ | Модифициран I Пейдж | $t = -\frac{1}{k} \sqrt[n]{\ln MR}$ |
| 4 | $MR = a \exp(-kt)$ | Хендерсън и Пейбис | $t = -\frac{1}{k} \ln \frac{MR}{a}$ |
| 5 | $MR = a \exp(-kt) + c$ | Логаритмичен | $t = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{MR - c}{a} \right)$ |

Оценяване на качеството на готовата продукция. Факторът качество е най-съществената мярка за стойността и реализацията на готовата

продукция. Сензорният анализ включва разнообразие от мощни и чувствителни инструменти за измерване на човешкото възприятие за храни и други продукти [46, 80, 111, 113]. Изборът на подходящо тестване, условия на изпитване, както и анализът на данните, в резултат на възпроизводим експеримент, са мощен инструмент за повишаване качеството на готовата продукция [107].

Някои от характеристиките, определящи качеството на сушените плодове и зеленчуци, могат да се групират, както е показано в Таблица 7 [114, 123, 124].

Очевидно е, че не всички от тези характеристики могат да бъдат описани с аналитични изрази и съответно не може да се състави модел, по който да се управлява самия процес. Тези характеристики могат да се ползват за оптимизиране на сушилния процес, но задължително трябва да има математическа зависимост на характеристиката от управляемите променливи. Също така могат да се комбинират два или няколко от факторите при дефинирането на общ критерий за управление.

Таблица 7

Характеристики, определящи качеството на сушени плодове и зеленчуци

| Химични | Физични | Хранителни |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Покафеняване | Рехидратация | Загуба на витамини |
| Окислително-редукционен потенциал | Разтворими твърди вещества | Загуба на протеини |
| Промени в проводимостта и солите | Специфично тегло и плътност | Загуба на аромат |
| Определяне на рН и обща киселинност | Загуба на цвят | Вкусови |
| | Структура | Микробиологични |

Важен момент е дефинирането на желаното качество на готовия продукт. Целевата функция за оценка на качеството на сушените плодове е показана в (36) [73, 111, 131].

$$J_Q = Q_d - Q, \tag{36}$$

където Q определя качеството на изследвания продукт;

Q_d – желаното качество (100%).

J_Q може да включва количество на витамин С и/или количество на β -каротин, и/или оценка на загубата на цвят и др. показатели [36, 43, 64, 92, 93, 105, 108].

Като в целевата функция за постигане на зададено качество на готовата продукция, може да е избран един или повече от описаните качествени показателя - витамин С, β -каротин, цветови характеристики:

$$J_Q = \frac{1}{f(C, \beta, \Delta E)} \quad (37)$$

Към качествените показатели на сушилния процес, могат да се добавят толкова елемента, определящи качеството, за колкото са проведени изследвания и изведени аналитични зависимости, зависещи от изменето на температурата и скоростта на сушилния агент.

2.4. Избор на комплексен критерий за управление на сушилните процеси на плодове и зеленчуци

Критерият за определяне на параметрите на сушилния агент, постоянни за целия сушилнен процес, може да се дефинират като [4, 12, 75]:

$$J = \alpha J_E + \beta t_d + \gamma J_Q, \quad (38)$$

където α , β и γ са тегловни коефициенти;

t_d - продължителност на времето на сушене.

Параметрите на атмосферния въздух и интензивността на влагоотделяне от материала се изменят в хода на процеса. Затова е необходимо оптимизацията на процеса да е по критерия (38). При преследване на висока интензивност/скорост на сушене, ниски енергийни разходи и желано качество на готовия продукт, е необходимо в хода на сушилния процес, така да се променят температурата θ и скоростта v на сушилния агент, че да се получава минимум на критерия J , при спазване на ограничителните условия [44, 68, 89] и отчитайки моментните стойности на температурата θ_a и влагосъдържанието Y_a на атмосферния въздух.

Проведеното теоретично изследване на комплексния критерий, отчитащ енергийните разходи, времетраенето и зададеното качество на готовата продукция на сушилния процес показва, че получените оптимални стойности на температурата и скоростта на сушилния агент, в различните моменти на процеса и при променящи се параметри на атмосферния въздух, са различни. Това определя необходимостта от променливи настройки на работния флуид – сушилния агент, в хода на сушилния процес, отчитайки времето от началото на процеса, периодично променяните параметри – температура и скорост на агента и настъпилите изменения в атмосферния въздух – температура и влагосъдържание.

Глава 3

МЕТОДИЧЕСКИ ОСНОВИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА СУШИЛНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ

3.1. Методика за определяне на влагосъдържанието на атмосферния въздух

За управлението на параметрите на процеса сушене е нужно да се определят моментното влагосъдържание Y_a и температурата θ_a на атмосферния въздух, ползван като сушилен агент. Широко използваните сензори за измерване на параметри на околната среда са подходящи и могат да бъдат използвани, но те измерват директно само температурата на околния въздух θ_a , а за определянето на моментното влагосъдържание на въздуха Y_a , трябва да се използват аналитични зависимости.

Трансмитерът T7511 [5, 145], използван за определяне на параметрите на околния въздух, измерва температурата θ_a и относителната влажност RH на въздуха, както и атмосферно налягане - P_{at} . Изчисленията за влагосъдържанието Y_a се извършват в LabVIEW или друга програмна среда, използвайки аналитичните зависимости [127, 135, 142] и формулата на Август – Рош – Магнус:

$$P_{ws} = 611 \exp \left[\frac{L_v}{R_n} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{273.15 + \theta_a} \right) \right] \quad (39)$$

където P_{ws} е парциалното налягане на наситените водни пари, Pa

R_v – газова константа на водните пари, $R_v = 461, \text{ J/kgK}$

L_v - латентната топлина на изпаряване, $L_v = 2.5 \times 10^6$, J/kg

С достатъчно добри приближения може да се използва и зависимостта:

$$P_{ws} = 610.94 \exp\left(\frac{17.625\theta_a}{243.04 + \theta_a}\right), \text{ Pa} \quad (40)$$

След като е изчислено парциалното налягане на наситените водни пари е необходимо да се определи и парциалното налягане на водните пари във въздуха - P_w , за текущата температура θ_a и измерената относителна влажност на въздуха RH , по следната зависимост:

$$P_w = \frac{RH \cdot P_{ws}}{100}, \text{ Pa} \quad (41)$$

С така получената стойност за парциалното налягане на водните пари във въздуха и измерената стойност на атмосферното налягане - P_{at} , вече може да се изчисли текущото влагосъдържание на атмосферния въздух:

$$Y_a = \frac{0.62198 P_w}{P_{at} - P_w}, \text{ kg/kg} \quad (42)$$

Може да се изчисли и максималното влагосъдържание - Y_{as} , което може да поеме (абсорбира) този атмосферен въздух, като се замести в израз (42) с парциалното налягане на наситените водни пари:

$$Y_{as} = \frac{0.62198 P_{ws}}{P_{at} - P_{ws}}, \quad (43)$$

По изчислената стойност от (43) се определя потенциалът на атмосферният въздух, използван като сушилен агент, за извличане на влагата от сушените суровини. Колкото по-голяма е разликата между Y_{as} - Y_a , толкова по-голям е потенциалът на атмосферният въздух.

3.2. Методика за снемане на кинетичните криви на сушене на плодове и зеленчуци

Интервалът между две последователни наблюдения Δt се определя съгласно методика, описана в [2, 20]. Използва се автокорелационната функция на измерваните параметри. Измерват се температурата и влагосъдържанието на сушилният агент в работната камера през интервал $\Delta t = 15 \text{ min}$. С получените данни се изчисляват автокорелационните функции

на температурата и влагосъдържанието на сушилния агент. Автокорелационните функции се апроксимират с функции от вида:

$$R_x = D_x \exp^{A \cdot x} \cos(B \cdot x), \quad (44)$$

където D_x е дисперсията на съответния случаен процес;

A и B – параметрите на апроксимиращата функция.

При зададена максимална грешка E_{max} , уравнението, което свързва зададената грешка и интервала между две последователни измервания е:

$$E_{max} = 1.414 \sqrt{D_x - R_x(\Delta t)}. \quad (45)$$

От получените автокорелационни функции, като се заместят в (45), при зададена максимална грешка E_{max} , може да се изчисли интервалът Δt между две съседни измервания.

Продължителността на интервала на наблюденията се определя по формула (46) [11].

$$T_n \geq 20 \left(\frac{1}{A} + \frac{A}{A^2 + B^2} \right). \quad (46)$$

За описване на кинетичните криви на сушене на плодове и зеленчуци се използва изменението на отношението за влагоотделянето MR на сушения материал. При изчислението на MR е необходимо да се знае началното влагосъдържание. За целта трябва да се избере проба от материала за сушене, на която да се измери началната маса, след което да се изсуши до абсолютно сухо вещество и отново да се измери масата на сухия материал. Обикновено се избира масата на суровия материал m_M да е 1kg, за да се опростят последващите пресмятания. Изсушават се плодовете или зеленчуците и се измерва масата на сухото вещество - m_C [5, 40, 53]. Изменящата се маса на материала по време на сушенето е - m_t . За определяне на влагосъдържанията се използват изразите:

- начално влагосъдържание

$$M_o = \frac{m_M - m_C}{m_C} ; \quad (47)$$

- моментно влагосъдържание

$$M_t = \frac{m_t - m_C}{m_C} ; \quad (48)$$

- равновесно влагосъдържание

$$M_e = \frac{m_{t_{end}} - m_c}{m_c} . \quad (49)$$

Ако се използва начална маса, различна от 1kg, то е нужно да се заложат и коефициенти, пропорционални на теглото на суровия материал.

Лесите в сушилната камера позволяват да се натоварят със суров материал до допустимата плътност за съответният материал/суровина. За плодове тази плътност е $15 \div 17 \text{kg/m}^2$, а за зеленчуци - $10 \div 13 \text{kg/m}^2$.

За провеждане на експериментите е задължително измерването на началната маса на пресните плодове или зеленчуци, като е препоръчително тя да е 1kg, и се следи масата на изсушените да достигне до около допустимия процент влага посочен в Таблица 3. Измерването на началната и крайната маса на плодовете или зеленчуците, подложени на сушилнен експеримент, се контролира от електронна везна, която трябва да бъде с подходящи измерителен диапазон ($0 \div 3 \text{kg}$) и точност 1g. Пример за анализ изменението на масата на материала е показан в Таблица 8 [146]. Загубата на водно съдържание при различните плодове ориентировъчно е 80%, докато при зеленчуците този процент нараства до 95%. Предлаганите в търговска мрежа сушени продукти имат различно от равновесното си влагосъдържание, по обясними причини.

Таблица 8

Съотношения на свежи и сушени плодове и зеленчуци

| суровина | ягоди | лук |
|---|--------------|------------|
| Маса в свежо състояние, g | 1000 | 1000 |
| Влагосъдържание в свежо състояние, % | 90 | 89 |
| Маса на водата свежо състояние, g | 900 | 890 |
| Процент на отстранената влага при плодове - 80% и зеленчуци – 95% | 80 | 95 |
| Маса на отстранената влага, g | 720 | 845.5 |
| Маса на готовия продукт, g | 280 | 154.5 |

3.3. Методика за определяне съдържанието на витамин С

Количественото определяне на витамин С в сушени плодове при различни режимни параметри може да се направи въз основа на редукцията на 2.6-дихлорфенолиндофенола с аскорбинова киселина [52, 66, 138]. Извършва се чрез титруване на изследвания подкиселинен разтвор (в условия, предпазващи витамин С от разрушаване) с 0.001% разтвор на 2.6 дихлорфенолиндофенол. Докато в титрувания разтвор се съдържа витамин С, прибавеният алкален разтвор на багрилото се обезцветява за сметка на образуването на редуцираната форма. Щом като количеството на витамин С, намиращо се в изследвания разтвор, се окисли, титруемият разтвор придобива розов цвят. Въз основа на промяната на цвета, по количеството на изразходвания 2.6 дихлорфенолиндофенол се определя количеството на витамин С в изследвания материал. Ако за титруването са изразходвани A ml на 0.001% разтвор на 2.6 дихлорфенолиндофенол, то в изследвания разтвор се съдържа същото количество в ml L-аскорбинова киселина (витамин С) със същата нормалност. Молекулната маса на L-аскорбинова киселина е равна на 176. Грамеквивалентът на L-аскорбинова киселина е равен на $176:2=88$ или в 1ml на 0.001% разтвор се съдържат 0.088mg. Количественото изчисление на витамин С се извършва по формулата:

$$x(\text{mg}\% \text{ витамин С}) = \frac{0.088K \cdot F \cdot b_{\text{п}} \cdot s_{\text{п}}}{w_1 \cdot b_2}, \quad (50)$$

където K е количеството в ml от 0.001% разтвор на 2.6 дихлорфенолиндофенол, употребен при титруването;

F – факторът на разтвора от 2.6 дихлорфенолиндофенол;

$b_{\text{п}}$ – общото количество извлек, приготвен от растителната суровина, в ml;

$s_{\text{п}}$ – количеството растителната суровина, взето за изчисление на % съдържание в g;

w_1 – количеството вещество, взето за анализ в g;

b_2 – количеството извлек, взет за титруване в ml.

3.4. Методика за определяне съдържанието на β -каротин

Съдържанието на β -каротин се определя чрез метода на Парк [35, 70]. Сушени плодове с маса 0.5g, са екстрахирани посредством смесване на Хексан и Ацетон (7:3, 25ml). Екстрактите са филтрирани през фуния на Бюхнер с филтърна хартия Whatman N1. Остатъкът се екстрахира отново, докато стане безцветен [138]. Филтратите се комбинират в разделителна фуния и се промиват с 50ml дестилирана вода. Водната фаза се изхвърля и като изсушител се добавя щипка Na_2SO_4 . Хексановата фаза се прехвърля в обемна колба. Концентрацията на β -каротин в разтвора е определена по абсорбцията при 450nm. По стандартна крива за β -каротин е получена оценката на съдържанието на β -каротин. Анализът се прави с трикратно измерване на проба сушени плодове, при съответните параметри на сушилния агент.

3.5. Методика за определяне на цветовете характеристики на сушените плодове и зеленчуци

Цветовите характеристики на сушените плодове и зеленчуци се оценяват, чрез загубата на цвят по време на сушилния процес. За описание на цветовете характеристики на обектите могат да се използват различни цветови модели - RGB, HSV, YIQ, YUV, Lab, CMYK и др. [62, 94, 95]. За нуждите на изследването са търсени модели, които да са платформено независими и съответно да позволяват използване на уреди за измерване с директно конвертиране на изображението в желанния цветови модел. Lab моделът е нелинейна трансформация на системата за възприемане на цветовото пространство, която се използва за определяне на количествената близост на цветовете - колориметрия, при оценяването на скъпоценни камъни, напасването на бои и др.. Именно този модел е предпочетен при изследванията, като е използвана камерата Imaging source DFK 31AU03, която измерва параметрите на цвета в Lab модел. Камерата трябва да се калибрира преди всяко измерване с бял шаблон и стойности на $L^*=98.06$,

$a^*=-0.23$ и $b^*=1.87$. Анализът се прави чрез трикратно измерване на цветовете компоненти и определяне на средните стойности на компонентите L^* , a^* и b^* при различните стойности на температурата и скоростта на сушилния агент. Загубата на цвят се изчислява като:

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L_f^*)^2 + (a_i^* - a_f^*)^2 + (b_i^* - b_f^*)^2} \quad (51)$$

където L_i^* , a_i^* и b_i^* са началните стойности на цветовете компоненти на свежите плодове или зеленчуци, а L_f^* , a_f^* и b_f^* са крайните стойности на цветовете компоненти на сушените продукти.

Глава 4

СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КОНВЕКТИВНА СУШИЛНЯ

Изследвания за управлението на сушилните процеси в конвективна сушилня са проведени в лабораторни условия, като за суровина са използвани кайсии.

4.1. Определяне на оптимизационните параметри за сушилния процес на кайсии

Процесът на сушене с горещ въздух е един от най-често използваните методи в хранително-вкусовата промишленост за производство на сушени плодове. Основните недостатъците на метода за сушене с горещ въздух са нежелани физически, структурни, химични, органолептични и хранителни промени по време на сушенето, което влошава качеството на крайните продукти и намалява търсенето от страна на крайните потребители [33, 42]. Външният вид на изсушените храни като форма, цвят и текстура са сериозен показател за тези неблагоприятни промени и могат да бъдат използвани като индикатори за оценка на качеството на храните. Освен това цветът на хранителните продукти се оценява от крайните потребители като първокачествен параметър за качество [23].

За оценката на качеството на сушените продукти, цветът и свиването са най-важните аспекти, тъй като те играят важна роля при възприемането на продукта. Потребителите са склонни да свързват цвета и другите визуални свойства на сушените плодове с вкус, безопасност, време на

съхранение, хранителни свойства и ниво на удовлетворение [112]. Крайното качество на изсушените плодове значително зависи и от температурата на сушене. Във формирането на качеството на изсушените плодове са включени много фактори като среда и уред за сушене, процеси на предварителна обработка, но измежду тях температурата на сушене е определящ. Много е важно да се контролира скоростта на отстраняване на влагата, за да се постигне добро качество на изсушените плодове. В процеса на сушене на храни, ефектът от температурата на сушене върху качествените параметри е описан от много изследователи [26, 43, 63, 109].

Всички фактори на въздействие са взаимно свързани и поради това изучаването на тяхното влияние върху качеството на сушените плодове представлява значителна трудност. За преодоляването на тази трудност спомагат методите на многофакторното изследване, приложени при процеса на конвективно сушене на плодове.

Провеждането на многофакторния експеримент е свързано най-вече с планиране на експеримента, броя на опитите и реда на провеждането им. За разработването на такъв план е необходимо първо да се избере локалната област на факторното пространство (Таблица 9) и матрицата на планиране на експеримента (Таблица 10). Избирането на локалната област за провеждане на експеримента се състои в определянето на основното ниво и интервалите на вариране на изучаваните фактори. Построяването на плана на експеримента се свежда до избора на експерименталните точки, симетрично разположени спрямо основното ниво, като те да отговарят на основните изисквания за оптималност на плана на експеримента.

За основни фактори на въздействие в локалната област на многофакторния експеримент са приети температурата на сушене и скоростта на сушилния агент, които оказват съществено влияние върху качествените характеристики на сушените плодове и зеленчуци (фиг. 3):

- Температура на сушене (θ);
- Скорост на сушилния агент (v).

Като критерий за оценка на качеството на сушените плодове са приети:

- съдържанието на витамин С в крайния продукт (**vit. C**);

- съдържанието на β -каротин в крайния продукт (β);
- промяна (загуба) на цвят в крайния продукт (Lab^* , ΔE)

Общото съдържание на β -каротин се определя, като се използва методът на Park [24]. Съдържанието на витамин С се определя съгласно метода на Klein & Perry [24]. Промяната на цветовете характеристики се регистрира с колориметър DFK 31AU03. Анализът се провежда с тройно измерване на проба от сушени кайсии.



фиг. 3. Кибернетичен модел на многофакторния експеримент преставащ процеса на сушене на плодове

За осъществяване на оптимизационния експеримент, бяха закупени пресни кайсии (*Prunus armeniaca* L.), избрани без дефекти и със сходен размер и цвят. Преди да бъдат изсушени, един килограм кайсии са измити, подсушени и разделени на две половини. Предварително кайсиите са третираны чрез накисване за 10 минути в 0.2% разтвор на аскорбинова киселина.

Определянето на основното ниво и интервалите на вариране изисква внимателно анализиране на априорната информация за изменението на параметрите на оптимизация, за кривите на повърхността на отклика и за границите на изменение на факторите.

В [90] проучват влиянието на условията на въздуха за сушене върху поведението на сушенето на картофи, моркови, черен пипер и чесън. Те откриват, че температурата на сушене е най-важният фактор, влияещ върху скоростта на сушене. При изследването също установяват, че температурата на въздуха за сушене значително влияе върху кинетиката на сушенето по време на сушенето на тънък слой смокини. Следователно, може да се

заклучи, че температурата на сушилния агент е основен фактор на въздействие при формиране качеството на сушените плодове [36, 50].

Другият фактор, скоростта на въздушния поток не влияе в значителна степен на качеството на готовия продукт. Тя е основен фактор при определянето на енергийните разходи за процеса сушене.

След анализа на литературните данни и проведените предварителни експерименти [4] е избрана локална област на факторното пространство, която да отговаря на всички изисквания за екстремален пълен факторен експеримент. В Таблица 9 са приведени основните характеристики на избраната локална област за провеждане на многофакторния експеримент.

Таблица 9

Характеристика на локалната област на факторното пространство

| № | Характеристики | Фактори | | |
|---|----------------------|------------------|---------------|-----------|
| | Наименование | Кодово означение | θ , °C | v , m/s |
| 1 | Основно ниво | 0 | 65 | 1.25 |
| 2 | Интервал на вариране | I | 15 | 0.75 |
| 3 | Горно ниво | + | 80 | 2 |
| 4 | Долно ниво | - | 50 | 0.5 |
| 5 | Кодово означение | X_i | X_1 | X_2 |

Експерименталната уредба за сушенето се състои от камера с рафтове, вентилатор, нагреватели, компютър, съгласуващ контролер за преобразуване на сигналите в цифров формат, сензори за относителната влажност, температура, атмосферното налягане и анемометър. По време на експериментите температурата и влажността на атмосферния въздух и барометрично налягане са записвани, както и температурата и скоростта на сушилния агент, които са и контролирани. Експериментите се провеждат по плана на експеримента посочен в Таблица 9 с кайсии, разположени на рафтовете и се изсушават при температури от 50 до 80°C и скорости от 0.5 до 2m/s на сушилния агент. По време на сушенето, масата на кайсии се записва на всеки 15 минути, по показанията на електронна везна с клас на

точност III. Първоначалното съдържание на влага в кайсиите е 86%, като те се сушат, докато не се достигне състояние, при което няма промяна в масата, а съдържанието на влага е около 16-18%.

Сушилните процеси са реализирани по план В2- симетричен композиционен план с централна точка. Нивата на факторите температура и скорост на сушилния агент са показани в Таблица 10 [15]. Регресионните уравнения са получени в резултат на статистически анализ с пакета STATISTIKA на американската фирма StatSoft.

Таблица 10

Оценка на качеството на кайсии

| | θ | ν | $\theta, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{m/s}$ | $\beta, \text{mg/100g}$ | vit. C, mg/100g | L^* | a^* | b^* | ΔE |
|------|----------|-------|--------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-------|-------|-------|------------|
| свеж | | | | | 5.1 | 17 | 69.0 | 6.2 | 51.8 | 85.50 |
| 1 | -1 | -1 | 50 | 0.5 | 2.4 | 5.28 | 30.2 | 6 | 9 | 57.77 |
| 2 | -1 | 0 | 50 | 1.25 | 2.6 | 7.2 | 34.4 | 9.7 | 9.6 | 54.68 |
| 3 | -1 | 1 | 50 | 2 | 2.6 | 8.54 | 37.8 | 10.3 | 10.2 | 52.16 |
| 4 | 0 | -1 | 65 | 0.5 | 2.9 | 5.06 | 41.2 | 12.2 | 25.1 | 39.01 |
| 5 | 0 | 0 | 65 | 1.25 | 3.0 | 6.05 | 43.8 | 12.8 | 24.8 | 37.52 |
| 6 | 0 | 1 | 65 | 2 | 3.1 | 6.78 | 43.4 | 12.6 | 24.6 | 37.9 |
| 7 | 1 | -1 | 80 | 0.5 | 3.5 | 4.75 | 35.2 | 11.9 | 21 | 46.08 |
| 8 | 1 | 0 | 80 | 1.25 | 3.5 | 4.4 | 36.5 | 12.2 | 22.2 | 44.37 |
| 9 | 1 | 1 | 80 | 2 | 3.7 | 4.4 | 36.4 | 12.4 | 21.8 | 44.73 |

4.1.1. Оценка на зависимостта на съдържанието на витамин С от параметрите на сушилния агент

Съдържанието на витамин С в свежи кайсии е в границите 12÷17mg/100g и е по-високо отколкото в сушените. Стойностите на витамин С в сушени кайсии при различни температури и скорост на сушилния агент са в границите от 4.4mg/100g до 8.54mg/100g, Таблица 10. Тези стойности са малко по-ниски от публикуваните в литературата [102, 121]. При по-високо температурни процеси съдържанието на витамин С в сушените кайсии намалява. При $\theta=50^\circ\text{C}$ влиянието на скоростта на сушилния агент е

съществено, като при намаляване на скоростта намалява и съдържанието на витамин С в готовата продукция. При $\theta=80^{\circ}\text{C}$ на сушилния агент, влиянието на скоростта е много слабо.

Моделът на съдържанието на витамин С в сушени кайсии в зависимост от температурата и скоростта на сушилния агент е:

$$C = 3.6085 + 0.0173\theta + 6.2433\nu - 0.0802\theta\nu \quad (52)$$

4.1.2. Оценка на зависимостта на съдържанието на β -каротин от параметрите на сушилния агент

Съдържанието на β -каротин в свежи плодове е $5.1\text{mg}/100\text{g}$, по-голямо от стойностите за различните сортове, публикувани в литературата [87]. Стойността на β -каротин при температура $\theta=50^{\circ}\text{C}$ и скорост $\nu=0.5\text{m/s}$ на сушилния агент е $2.4\text{mg}/100\text{g}$, а при $\theta=80^{\circ}\text{C}$ и $\nu=0.5\text{m/s}$ е $3.5\text{mg}/100\text{g}$, т.е. с увеличаване на температурата на сушилния агент нараства и съдържанието на β -каротин. В публикации [55, 73] също е показано, че съдържанието на β -каротин в сушените кайсии нараства с увеличаване на температурата на сушилния агент. И при тях резултатите показват, че кайсии, сушени по-дълго време, имат по-ниско съдържание на β -каротин. Това се потвърждава и от проведените изследвания, където макар и в малки граници, с увеличаване на скоростта на сушилния агент при една и съща температура на сушене съдържанието на β -каротин нараства.

Моделът, описващ зависимостта на съдържанието на β -каротин в сушени кайсии от температурата и скоростта на сушилния агент е:

$$\beta = 15.3332 + 0.0555\theta + 1.3333\nu + 0.0022\theta^2 \quad (53)$$

4.1.3. Оценка на зависимостта на цветовите характеристики от параметрите на сушилния агент

Съществено е влиянието на температурата на сушилния агент върху параметъра L^* . За свежи кайсии $L^*=69.0$ и при сушенето намалява от 43.8 при $\theta=65^{\circ}\text{C}$ до 30.2 при $\theta=50^{\circ}\text{C}$. Влиянието на скоростта на сушилния агент е значително при ниските температури на сушене. Стойността на параметъра

a^* нараства повече от два пъти при нарастване на температурата на сушилния агент. В разгледаните литературни източници има противоречива информация за параметъра a^* . Например в [50] се твърди, че параметърът a^* намалява с увеличаване на температурата, докато публикуваното в [78, 79] показва, че a^* нараства с увеличаване на температурата на сушилния агент, което се потвърждава с потъмняването на сушените кайсии и се потвърждава и от направените експериментални измервания. Параметърът b^* се изменя в граници от 9 при $\theta=50^\circ\text{C}$ и $\nu=0.5\text{m/s}$ до 25.1 при $\theta=65^\circ\text{C}$ и $\nu=0.5\text{m/s}$.

Проведени са изследвания за промяната на цветовете характеристики по време на сушенето на кайсии и за тях е изведен модел, описващ изменението на цвета им при различни параметри на сушилния агент [15].

$$\Delta E = 283.3708 - 7.1650\theta - 1.7929\nu + 0.0526\theta^2 \quad (54)$$

Изследвана е достоверността на представените модели за зависимостта на качествените показатели на сушени кайсии от параметрите на сушилния агент и е доказана тяхната адекватност [4, 12, 15], чрез критерият на Фишер $F(5,3)$. Следователно, тези зависимости могат да се използват за реализиране на управление на сушилните процеси за постигане на гарантирано качество на готовата продукция.

4.2. Експериментална уредба, апарати и прибори за изследване на сушилните процеси на плодове и зеленчуци

За реализация на сушилните процеси е конструирана експериментална сушилна, чиято функционална схема е описана в [3, 5]. Използвана е налична температурна пещ, фиг. 4, която допълнително е пригодена за управление на сушилните процеси. От температурната пещ са запазени камерите с температурна изолация, но има съществени изменения във въздушните потоци, за да се реализира процесът сушене.



фиг. 4. Общ вид на сушилната камера

Подложените на сушене плодове или зеленчуци са предварително нарязани и обработени и се разполагат на лещите. Движението на въздушния поток в камерата се реализира от осев вентилатор, задвижван от трифазен асинхронен двигател. Загриването на въздуха в камерата се реализира от горен и долен нагреватели. Лещите, върху които се разполага материалът за сушене са с размери 450x450mm, изработени от алуминиеви сплави, за да са леки и позволяващи многократна употреба в температурното поле. Допълнително е изведена централна ос от корпуса на камерата, на която висят лещите, за измерване на масата на материала по време на сушене. Това измерване се осъществява чрез електронна везна.

Изменението на температурата (θ) в сушилната камера е в границите 20÷90°C. За нейното измерване се използват миниатюрни датчици с малки времеконстанти, което позволява по-бързо измерване и е предпоставка за генериране на динамични управляващи въздействия. Техническите спецификации на сензора LM35CZ удовлетворяват горните изисквания: гранични стойности на измервателния диапазон -40÷110°C, статична грешка 1°C, напреженов изход 10mV/°C, захранващо напрежение +5V DC [22].

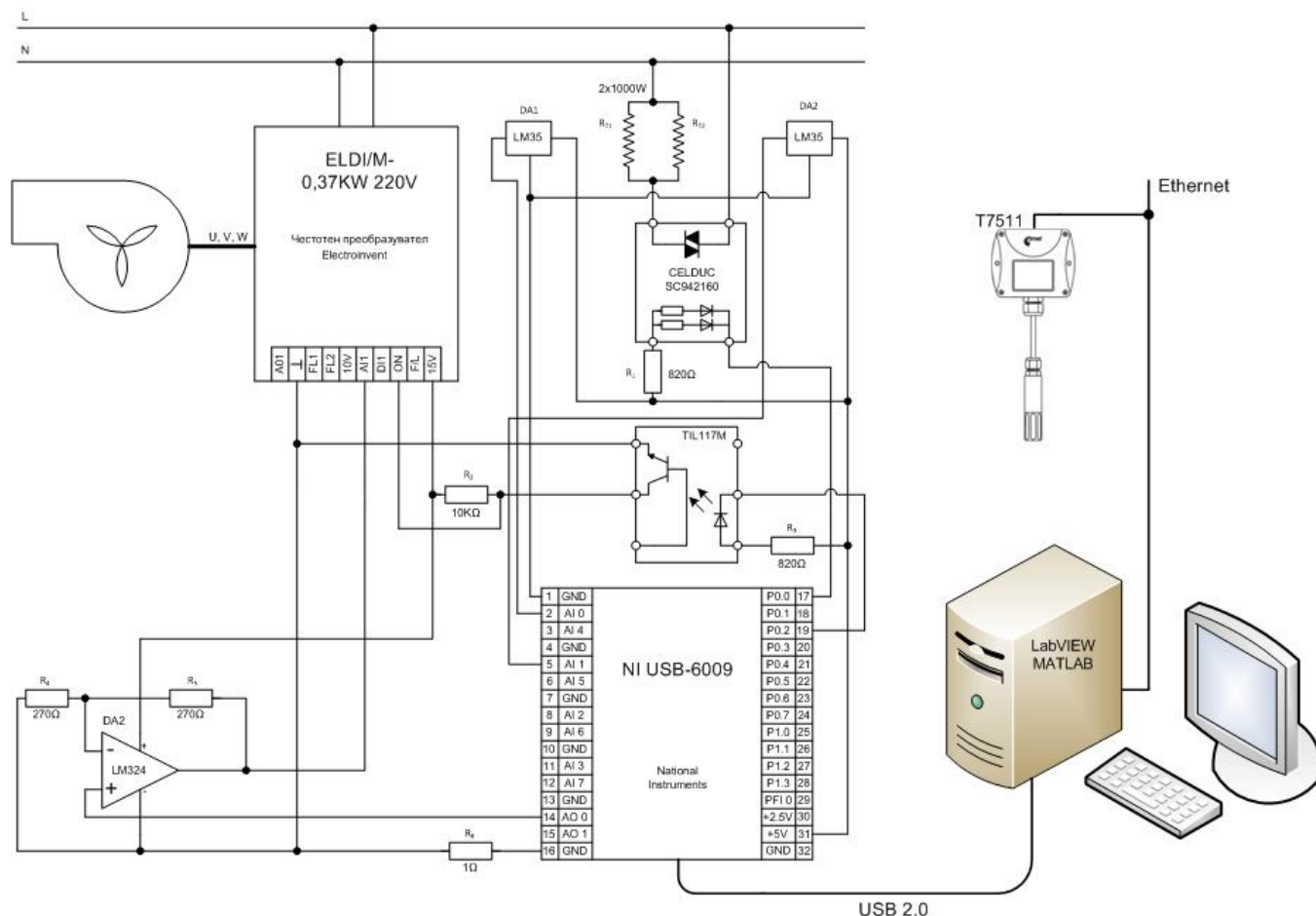
Изменението на скоростта на въздуха в сушилнята зависи от оборотите на електродвигателя, задвижващ вентилатора. Честотен преобразувател ELDI/M – 0.37kW 220V, се използва за регулиране на оборотите на

двигателя. Проведени са предварителни измервания за скоростта на въздушния поток в сушилната камера, измерена с преносим анемометър VT100S, [139] и е установено, че в диапазона $0.1 \div 3 \text{ m/s}$ има линейна зависимост между оборотите на вентилатора и скоростта на въздушния поток.

За развойна среда, в която да се реализира измерването и управлението на сушилнята, е избрана LabVIEW. Тя позволява едновременно измерване, анализиране, изчисляване, архивиране и генериране на управляващи сигнали. Също така от значение е и фактът, че може отдалечено, при наличие на Internet свързаност, да се следят и коригират, ако е необходимо, параметрите на процеса сушене.

За събиране и обработка на данните се използва интерфейсен модул NI USB-6009 [147], в който има достатъчно аналогови и цифрови изводи за връзка към външни устройства, които да управлява или да получава информация от тях. Модулът притежава 8 аналогови входа (14-bit, 48 kS/s , 0.0003 V/bit), 2 аналогови изхода (12-bit, 150 S/s , $V_{\text{out}} - 0 \div 5 \text{ V}$), 12 цифрови входно/изходни канала и 32-bit брояч. Предимство е неговата компактност, няма нужда от външно захранване и има единствено USB кабел за връзка към персонален компютър или друг микроконтролер. През аналоговите входове на модула се събира информация за текущите стойности на следените параметри, която постоянно се архивира, а наличието на изходи в модула е предпоставка за реализирането и на управление за сушилния процес. Управлението на температурата и скоростта на сушилния агент в камерата се осъществява единствено през портовете на NI USB-6009, което е предпоставка и за реализиране на дистанционно (отдалечено) управление на процеса [129].

Обобщена структурна схема на реализираната система за контрол и управление на променливите температура и скорост на агента в сушилната камера е показана на фиг.5 [4, 6, 7].



фиг. 5. Структурна схема на системата за контрол и управление параметрите на сушилния агент в експерименталната сушилня с отчитане стойностите на атмосферния въздух

Захранването на температурните сензори е от клемните изводи на USB-6009. Това е предимство, защото сензорите и USB модула използват общо захранване.

При разделителна способност 14bit на аналоговите входове на USB-6009 имаме чувствителност 0.3mV/bit , което гарантира прецизно измерване на сигнала от температурния сензор.

Загряването на сушилния агент в камерата се осъществява посредством два нагревателя (горен и долен) с мощност 1000W всеки. Комутацията им към електрическата мрежа е реализирана през синхроннотоков ключ (SSR-реле) - CELDUC SC942160. Възможността за нисковолтово управление с галванична изолация е съществено предимство и позволява да използваме захранващото напрежение от USB 2.0 порта на компютър, лаптоп или едноплатков контролер. Стандартните параметри на USB 2.0 порт са +5V DC при допустим товар от 0.5A. Синхроннотоковият ключ служи като

изпълнителен механизъм в системата. Свързан е към цифров изход на USB-6009. За плавно изменение на температурата е разработен софтуерен модул за широчинно-импулсна модулация (ШИМ) на цифровия изход.

За определяне на текущото състояние на материала, в хода на сушилният процес, се използва електронна везна EVL15. Тази търговска везна, с клас на точност III, позволява измерването на масата на материала в реално време и предаването на данните по RS-232. Използвайки специализиран софтуер, теглото се предава на персоналния компютър, където заедно с момента от време на самото предаване, се записват и съхраняват. Предварително се измерва масата на лесите, заедно с механичната им връзка към електронната везна и се задава като тара.

Тегловният критерий е най-достоверен за определяне на текущото влагосъдържание на суровината, подложена на сушене, и чрез него най-добре може да се определи фазата на сушилният процес. Той се използва за снемане на кинетичните криви на сушене за различните продукти, но не и при реализацията на автоматизиран процес. Проблем представлява постоянното използване на везната в хода на процеса, защото се наблюдават нежелани флуктуации за стойностите на масата, дължащи се на прецизността на везната, скоростта на движение на сушилният агент и продължителността на сушенето.

За измерване на стойностите на атмосферния въздух е избран комбиниран преобразувател за температура, относителна влажност и атмосферно налягане, с корекция по отношение на производната на влажността и Ethernet връзка – T7511. Той има следните технически характеристики: температура θ_a $-30\div 105^\circ\text{C}$; относителна влажност на въздуха RH $0\div 100\%$ и атмосферно налягане P_{at} $800\div 1100\text{hPa}$, които покриват изискванията за измерване по време на сушилният процес.

Трансмитерът има вграден WEB клиент, който позволява предаването на информация в цифров вид и реално време за измерваните величини. Този трансмитер може да бъде използван и за мултиплексиране на неговите данни от сензорите в система от няколко сушилни камери, всяка от които работи

самостоятелно, но се намират физически на едно място и ползват един и същ сушилен агент – атмосферният въздух.

Предвидено е регистриране на консумираната енергия от електрозахранващата мрежа с електронен електромер ES-32L. Тъй като всички устройства в проектираната система използват захранване 220V AC, електромерът е монтиран на мрежов разклонител и отчита консумираната енергия само на свързаните към разклонителя консуматори. Наличието на електромера позволява прецизното отчитане на потребената електроенергия за въздействие на контролираните параметри - температура и скорост на сушилният агент.

Практическото използване на създадената система позволява контрол и управление на процесите в експерименталната сушилня, запис на измерените величини и последващ анализ на получените резултати.

4.3. Програмно осигуряване за измерване и управление на процесите

За информационното осигуряване на лабораторната конвективна сушилна камера се ползват Windows базирани софтуерни приложения по време на експериментите за снемане на кинетичните криви на сушене на различните плодове и зеленчуци. Същите среди могат да се използват и по време на същински сушилни процеси, но предимството на техническото решение е в това, че системата може да бъде управлявана и от разпространените, надеждни и достъпни микрокомпютърни и микроконтролерни устройства с управляем USB интерфейс.

Преди самите измервания на параметрите е нужно конфигуриране на използваните устройства. На трансмитера T7511, който измерва температурата и относителната влажност на атмосферния въздух, трябва да му се зададе IP адрес от вътрешната LAN мрежа на предприятието. За настройване на конфигурационните му параметри се използва софтуера Tsensor, като предварително трансмитерът трябва да е включен в конфигурационен режим, чрез сервизен джъмпер. За тестване на

настройките се използва друг софтуер - Sensor reader, който представя измерените и архивирани данни графично и таблично. Интерфейсът на трансмитера позволява да се използват данните от него и във vi-приложения на програмната среда LabVIEW.

Вграденият RS-232 интерфейс на електронната везна и специализиран софтуер EVLTest се използват за архивиране показанията на везната през 60s. Този интервал е настройваем и може да се задава в интервала 10÷600s в зависимост от сушената суровина и текущите стойности на сушилният агент. Събраните данни за изменението на масата на материала във времето, се използват за построяването на кривите на сушене на различни плодове и зеленчуци при зададени температура и скорост на сушилният агент в камерата.

Събирането на информация и управлението на процеса в системата за сушене се извършва от персонален компютър с помощта на интерфейсен модул NI USB-6009 [3, 4, 5, 147]. Персоналният компютър разполага със софтуер за измерване и управление – LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Последният представлява графична програмна среда на фирмата National Instruments, разполагаща с множество библиотеки и инструменти. Освен това, тази среда е еднакво удобна както за оформянето на удобен и лесно разбираем потребителски интерфейс, така и за писането на програмния код, реализиращ бизнес логиката на сушилният процес. Използвайки графичния език G, лесно се изграждат програми и подпрограми за измерване и управление, наречени виртуални инструменти.

Изборът на LabVIEW за контрол на параметрите на сушилния е направен поради богатия инструментариум на развойната среда, простотата при работа с графичния език G, позволяващ на не програмисти да конструират програми, като просто влачат и пускат виртуални образи на лабораторните инструменти. Друго, не по-маловажно, предимство на LabVIEW е възможността му да се адаптира към различни хардуерни платформи, като за това се грижат разработчиците от National Instruments. Налични са интерфейси за Raspberry Pi, ARM и PIC микроконтролери.

Разработени са vi-инструменти в средата LabVIEW, които управляват всеки един от посочените елементи на системата за сушене: нагреватели, честотният инвертор на вентилатора, прочитането на данните от T7511, стойностите на температурните сензори в камерната конвективна сушилня. За плавно регулиране на температурата на агента е разработен ШИМ за цифровия изход, въздействащ на нагревателите, който се управлява от софтуерен ПИД регулатор.

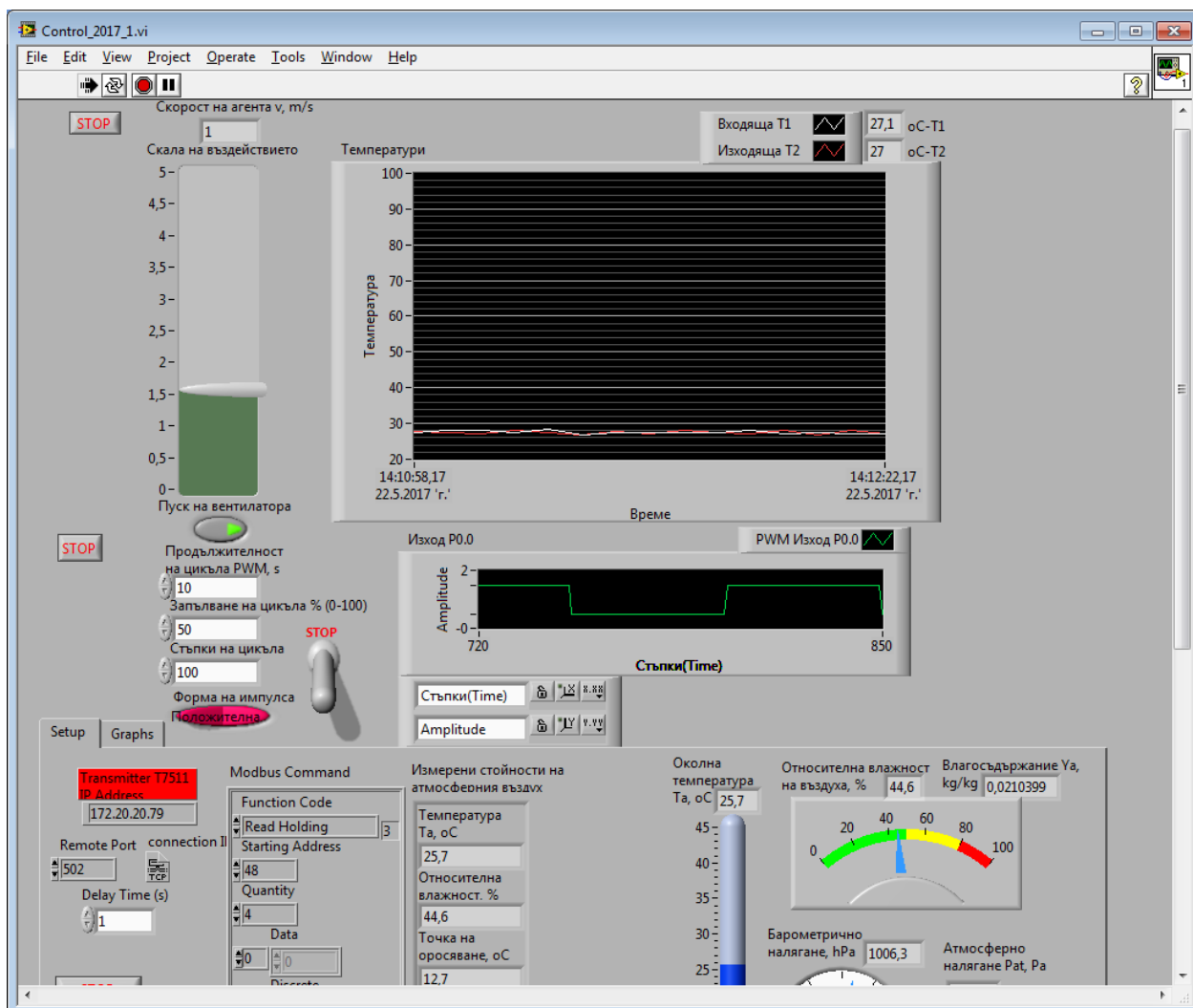
Проектираната система позволява поддържането на предварително определени стойности на температурата и скоростта на сушилния агент в камерата. Освен за управлението, системата събира и архивира текущите стойности на параметрите по време на процеса, които се ползват за последващ анализ. Натрупването на данни от протеклите достатъчно голям брой цикли на сушене са изключително ценни и полезни. Чрез тях могат да се направят анализи и да се усъвършенства моделът на управление на конвективната сушилня.

Продължителността на експериментите е различна при различно зададени стойности на параметрите в сушилната камера. Някои от експериментите са с продължителност повече от 24 часа, като поради късен старт на експериментите може да има и такива, които се разпростират в три календарни дни. Това е съществено неудобство за регистрирането и контрола на процеса. Доразвита е възможността за отдалечено, през Internet, управление на параметрите. Тази функционалност ще бъде запазена, като се предвижда да има достъп от много потребители, намиращи се физически на различни места, едновременно. Тези потребители могат да бъдат разделени на различни групи, според правата, които имат за достъп до процеса. Някои могат да бъдат само с права за следене и наблюдение на процеса, а други - освен за следене, да имат права и за управление на процеса.

На фиг.6 е показан момент от процеса сушене, с реализираното програмно управление в LabVIEW средата.

Разработените софтуерни продукти за експерименталната сушилня позволяват измерване на параметрите на околната среда, контрол на енергийните разходи, измерване на масата на материала, изменение и

поддържане на температурата и скоростта на сушилният агент в технологично зададените граници, както и съхранение на данните от процеса.



фиг. 6. Изглед от работата на системата за управление на сушилният процес в конвективна сушилня

Събраните данни се използват за построяване на обобщената крива на сушене на различни плодове и зеленчуци, както и за анализ на качеството на управлението на процеса сушене.

4.4. Реализация на системата за контрол и управление на режимните параметри

Разгледани са различни сценарии за управление на процеса сушене [14, 27, 54, 61, 74, 119, 133], но е предпочетено реализирането му с генетичен алгоритъм. Генетичният алгоритъм (ГА) е метод за самообучение,

мотивиран от аналогия с биологичната еволюция, чрез претърсване на пространството от хипотези, за да се намери най-добрата хипотеза. ГА променя на всяка стъпка популацията от индивиди, като избира тези от текущото поколение, които ще продължат развитието си, т.е. ще се използват за следващата генерация [13, 21, 40, 125]. Селекцията на най-добрите индивиди става въз основа на функционал или функционали (целеви функции), даващи оценка за близостта на индивида с желаното решение. Правилата по които става изборът на индивиди от текущата популация са: селекция, мутация и възпроизвеждане (кръстосване).

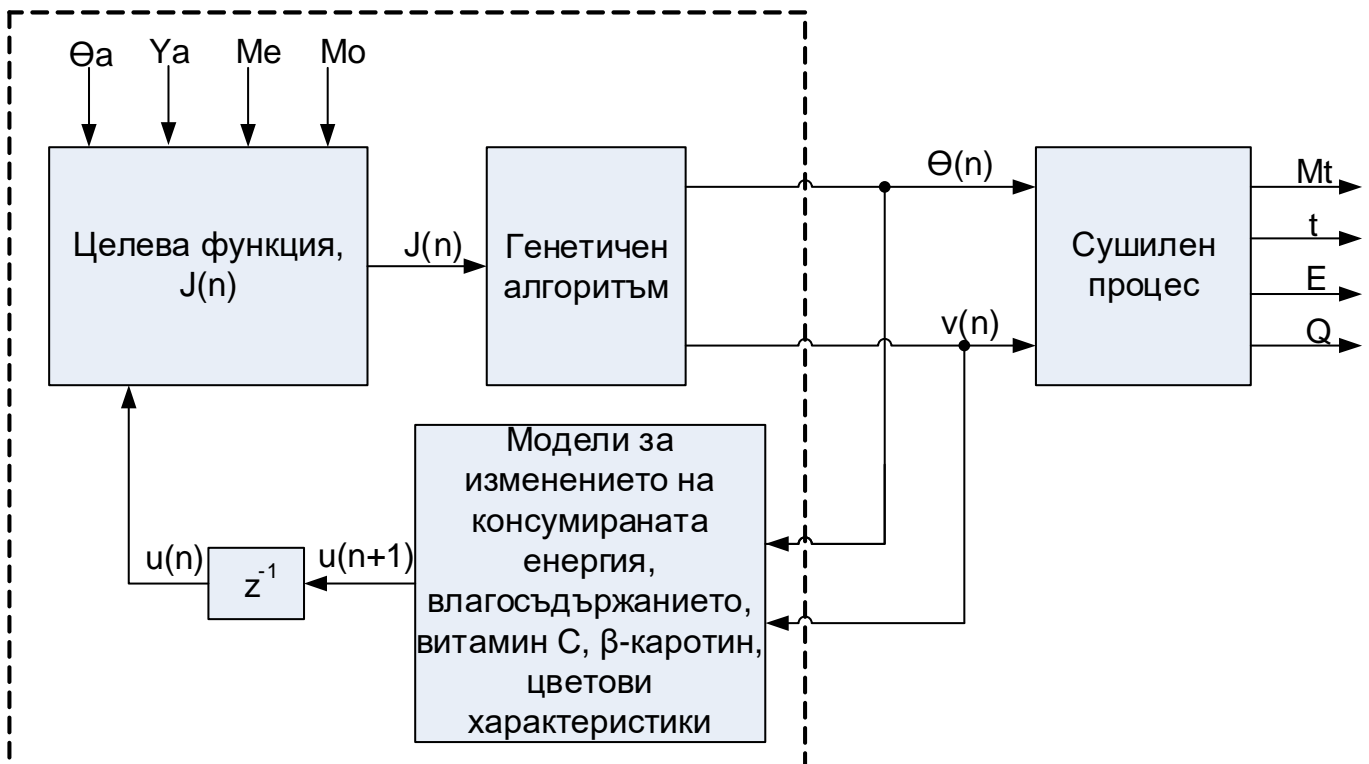
Генетичният алгоритъм може да се приложи за решаване на различни оптимизационни задачи, за решаването на които не са подходящи стандартните оптимизационни методи, включително и такива, при които целевата функция е прекъсната, недиференцируема, стохастична или силно нелинейна [91]. За ГА “най-добрата хипотеза” е тази, която оптимизира определена, предварително дефинирана за конкретната задача числова мярка, наречена годност (fitness) на хипотезите. Макар, че не е гарантирано намирането на оптималните стойности, генетичните алгоритми често успяват да намерят елементи с висока степен на годност.

За проектираната система за управление и оптимизация на сушилните параметри се използва реализация на генетичен алгоритъм в MATLAB. LabVIEW средата се обръща към MATLAB, като предава параметрите по подразбиране и променените за изчисляване от алгоритъма.

За реализиране на управление на сушилния процес, по предложени комплексен критерий, се прилага показаната структурна схема на фиг.7 [3, 4, 13, 76, 77]. Входните променливи са моментните стойности – температура θ_a и влагосъдържание Y_a на атмосферния въздух, начално M_o , равновесно M_e и текущо M_t влагосъдържание на материала. Целевата функция е $J(n)$.

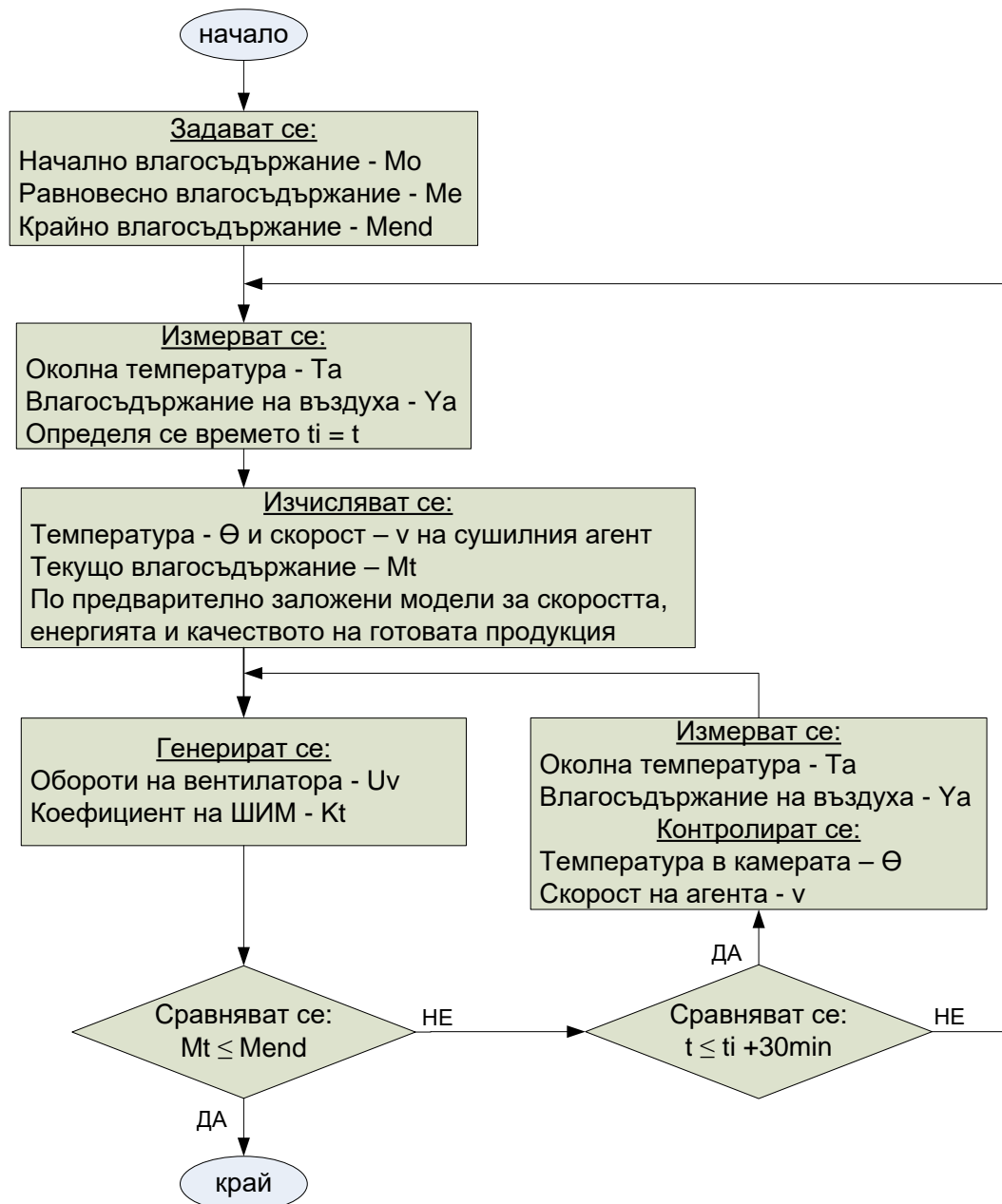
Изходните управляеми променливи, изчислени от генетичния алгоритъм, са температура θ и скорост v на сушилния агент. Тези стойности трябва бъдат поддържани в сушилната камера за определен период от време. Изменението на влагосъдържанието на материала (M_t) се определя по предварително дефинирания модел от сметите кинетичните криви. Съгласно

този модел, при известни стойности на сушилният агент, ще може да се предскаже новото влагосъдържание на материала във всеки момент от време t за целия процес. Съобразно предишните стойности на сушилният агент е събрана и съхранена информация за потребената енергия (E) и изменението на качествените характеристики на сушимия материал (Q). Освен изменението на влагосъдържанието в оптимизационната процедура могат да се зложат и различни качествени показатели по представените модели в т.4.1.



фиг. 7. Блок схема на оптимизационния цикъл за управление

Избран е фиксиран период от време 30min, съгласно т.3.2 [3], за преизчисляване на управляемите променливи - температура и скорост на сушилният агент, при променени входни величини. Промените над управляемите променливи са ограничени съобразно технологичните изисквания за сушене и зададеното качество Q на готовата продукция представени в Таблица 3. Последователността от действията на системата е илюстрирана в представения алгоритъм на работа, фиг.8.



фиг. 8. Блок схема на алгоритъма за управление

4.5. Експериментални изследвания на системата за контрол и управление на режимните параметри в сушилнята

Проведени са значителен брой експерименти, с предложената на фиг.5 структурна схема на системата за управление на сушилния процес [3], за определяне на продължителността на процеса и консумираната енергия при постоянни стойности на режимните параметри – температура и скорост на сушилния агент [117]. Част от експерименталните резултати са представени в Таблица 11.

Таблица 11

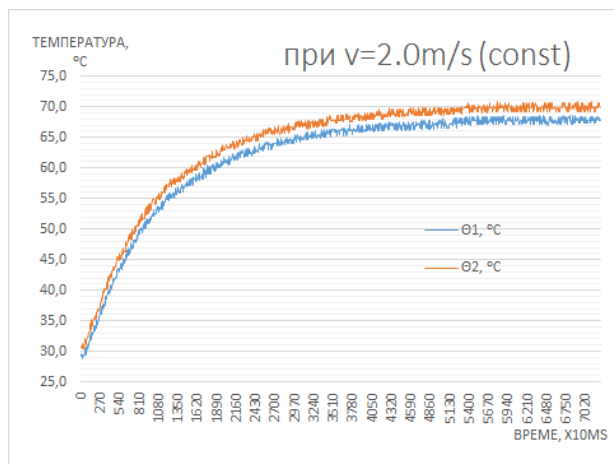
Сравнение на консумацията на енергия и продължителността на процеса сушене на 1kg кайсии при постоянни параметри на сушилният агент

| Сушилен агент | | Атмосферен въздух | | Консумирана енергия | Времетраене |
|---------------|---------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------|
| Температура | Скорост | Температура | Относителна влажност | | |
| 50°C | 0.5m/s | 29.8÷ 32.6°C | 27.1÷ 50.7% | 6.2kWh | 36h |
| 50°C | 1.0m/s | 28.8÷ 30.9°C | 23.8÷ 48.1% | 6.5kWh | 34h |
| 50°C | 1.5m/s | 29.8÷ 31.1°C | 26.3÷ 46% | 5.9kWh | 25.25h |
| 50°C | 2.0m/s | 29.9÷ 38.6°C | 25.7÷ 43.6% | 5.5kWh | 22h |
| 65°C | 0.5m/s | 28.9÷ 38°C | 29.4÷ 41.4% | 4.5kWh | 17.5h |
| 65°C | 1.25m/s | 31.1÷ 38.8°C | 29.6÷ 43.1% | 4.8kWh | 13.5h |
| 65°C | 2.0m/s | 29.9÷ 38.6°C | 25.7÷ 43.6% | 5.0kWh | 12.5h |
| 70°C | 0.8m/s | 32.4÷ 39.3°C | 34.8÷ 48.1% | 7.2kWh | 14h |
| 70°C | 2.0m/s | 31.4÷ 37.5°C | 24.4÷ 45.0% | 7.2kWh | 13.5h |
| 75°C | 1.0m/s | 32.4÷ 39.5°C | 29.5÷ 59.4% | 5.5kWh | 12h |
| 80°C | 0.5m/s | 27.8÷ 34°C | 26.9÷ 43.5% | 6.3kWh | 13.5h |
| 80°C | 1.0m/s | 28.8÷ 31.5°C | 20.6÷ 30.3% | 5.8kWh | 10.5h |
| 80°C | 1.5m/s | 26.9÷ 30.9°C | 27.2÷ 45.3% | 8.2kWh | 8.25h |
| 80°C | 2.0m/s | 28.6÷ 30.5°C | 26.2÷ 35.4% | 5.0kWh | 7.5h |

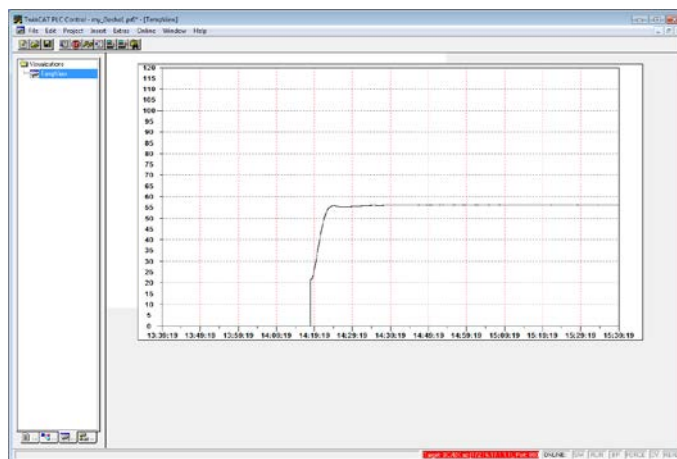
При самото изследване се използват 1kg свежи кайсии, които се разполагат върху лесите на сушилната камера и през тях преминава сушилен агент, добиван от атмосферния въздух, с константни стойности на температурата и скорост на движение, по време на процеса. За край на сушилният процес е прието, масата на сушените кайсии да достигне стойност около 180g. Регистрират се началните и крайни стойности на времето, за определяне на продължителността на процеса, както и консумираната енергия с ватметър ES-32L.

За достигането на определените стойности на сушилният агент е необходимо известно време (фиг.9), което може да бъде минимизирано, чрез употребата на подходящ регулатор на температурата [132]. Проведени са експерименти със софтуерен регулатор и програмируем логически контролер на Beckhoff, фиг.9.б. За регулиране на температурата на

сушилния агент са добавени температурен сензор Pt-100 и модули на Beckhoff за реализация на регулатора. Стабилността на регулираната температура е по-добра (колебания $<1^{\circ}\text{C}$) отколкото при регулатора със ШИМ в LabVIEW средата, фиг.9.а, но неудобствата на варианта с допълнителния регулатор на температура са много.



а)



б)

фиг. 9. Изследване на терморегулатори за сушилната система

Налице е оскъпяването на системата, а също така са необходими и познания за конфигуриране и настройка на още един тип PLC. Поради тези причини е предпочетен вариантът без външен регулатор на температурата на сушилния агент и се търсят възможности за усъвършенстване на регулатора в LabVIEW средата.

С помощта на реализираната система от фиг.4, са снети кинетичните криви за изменението на влагосъдържанието при сушене на кайсии. От тези криви е избран и определен модифицираният модел на Пейдж, описващ с най-висока точност промяната на влагосъдържанието при различни режимни параметри – температура и скорост на сушилния агент [4, 11].

Предложената система е прилагана за определяне на зависимостите на процеса сушене на ябълки и сливи, но не са подробни, както тези за кайсии. Не са проведени в пълен обем и нямат построени и дефинирани аналитични зависимости за изменението на влагосъдържанието при всички температурни стойности и скорости на сушилния агент. Това дава основание за употребата на предложената система за изследване и управление на сушенето и на други плодове и зеленчуци.

4.6. Възможност за отдалечен достъп за следене и настройване на системата за сушене на плодове и зеленчуци

Продължителността на сушилните процеси е значителна по време, от 8 до 36 часа, и може да се предположи, че има вероятност да настъпят и непредвидени обстоятелства в този интервал. Поради тази причина, а също и по време на настройката на регулаторите за температура в системата е търсена възможност за дистанционно наблюдение и промяна на параметрите ѝ [8, 128]. В предложения вариант на системата за управление на процесите в експерименталната конвективна сушилня се използва персонален компютър с Windows операционна система и софтуерни пакети на MATLAB и LabVIEW.

При избора на подходящо приложение за отдалечено управление на работния компютър има няколко ключови характеристики, от които зависи поведението на цялостната система [86]:

- стабилност - неслучайно е на първо място, тъй като в дадени изпълнения системата може да е на труднодостъпно място. Изискването за стабилност е трудно измеримо, но както в повечето случаи стремежът е към 99.99% готовност за адекватна реакция във всеки един момент.

- сигурност - въпреки че потенциален пробив в сигурността не би оказал непоправими щети, желателно е той да бъде избегнат на всяка цена.

- достъпност - често корпоративните/фирмените мрежи са подсигурени от защитни стени (firewall), които са настроени да филтрират изпращането и приемането на данни на определени портове. Това би довело до потенциални проблеми и усложнения при широкообхватни настройки на работната станция.

- потенциални проблеми - системата може да претърпи различни проблеми, които да повлияят негативно на работата ѝ. Пълното изолиране на проблемите е практически невъзможно, но при избора трябва да се намали влиянието им. Такива проблеми са - липса на свързаност, лимит на

брой потребители, промени в настройките и конфигурациите на мрежата и т.н..

- цена - в случай, че е избран продукт, който не предлага безплатен лиценз (било то дори и конкретно за учебни цели), цената би оказала голямо влияние. В повечето случаи разработчиците предлагат безплатни копия за учебни (или некомерсиални) цели.

- популярност - колкото по-малко условия за ползване има дадена система, толкова по-лесна е за употреба. Желателно е приложението, което бъде избрано, да има версии за различни операционни системи, включително и такива за мобилни устройства, като таблети и смартфони.

Това са основните съображения, според които трябва да бъде избрана подходящата технология за отдалечен достъп до работния компютър. Желателно е софтуерът за отдалечен достъп да може да се инсталира и ползва от различни устройства – персонален компютър, таблет, мобилен телефон, микрокомпютър, микроконтролер и др., с разнородни операционни системи – Windows, Linux, MacOS, Android, iOS и др.. Трудно могат да бъдат степенувани различните изисквания, тъй като атрибутите им не са пряко съпоставими, но все пак стабилността и сигурността са ключови при избора.

Безспорен фаворит за отдалечен достъп до PC с Windows е употребата на Microsoft Remote Desktop. Проблем за неговото широко приложение е необходимостта от статичен IP адрес на компютъра, който се използва в системата. Когато той е част от корпоративна мрежа има нищожна вероятност да е със статичен адрес. В 99% от случаите този компютър е получил динамичен адрес от централен рутер на фирмата. Обичайна практика е фирмите да разполагат с ограничен брой (1÷3) статични IP адреси и множество вътрешни динамични адреси на свързаните устройства, раздавани от DHCP server. Този динамичен адрес на устройствата е основен проблем за отдалечения достъп до това устройство през Microsoft Remote Desktop (RDP client).

Поради това обстоятелство са разгледани различни софтуерни продукти с възможност за отдалечен достъп до управляващият PC [8]. С помощта на тези продукти трябва да има достъп до всички хардуерни

устройства и софтуерни продукти, инсталирани на управляващият РС. В тази връзка е направено изследване на различната функционалност на предлаганите софтуерни решения и са обобщени резултатите в Таблица 12.

С най-висока функционалност и работа на най-много устройства, с различни операционни системи за отдалечен достъп, са продуктите – AnyDesk и TeamViewer. Сравнителният анализ на средствата за отдалечен достъп до персоналния компютър, използван в системата за контрол на сушилната инсталация, определя избора на не-комерсиалната платформа TeamViewer.

Таблица 12

Сравнение на функционалността на предлаганите софтуери за отдалечен достъп до компютърна система

| Софтуер за отдалечен достъп | да се стартира от | | | | | да се свърже към | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-----------------------|-----|-------------------------------------|-------|-------|-----------------------|-----|
| | Настолни/ персонални компютри | | | Мобилни устройства | | Настолни/ персонални компютри | | | Мобилни устройства | |
| | Windows | MacOS | Linux | Android | iOS | Windows | MacOS | Linux | Android | iOS |
| AnyDesk | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Microsoft Remote Desktop | + | + | | + | + | + | | | | |
| Chrome Remote Desktop | + | + | + | + | + | + | + | + | | |
| TeamViewer | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Shared Screen | | + | | | | | + | | | |
| AeroAdmin | + | + | + | | | + | | | | |
| RemotePC | + | + | + | | | + | + | + | | |
| VNC Viewer | + | + | + | + | + | + | + | + | | |
| AirMirror/AirDroid | | | | + | + | | | | + | + |
| SupRemo | + | + | | + | + | + | + | | | |

Основните характеристики, които повлияха на избора, са достъпността и популярността на продукта. TeamViewer не изисква каквито и да е настройки и намеса над топологията на мрежата - компютърът получава свой идентификационен номер и е достъпен от всяко устройство, което има връзка с Интернет. Напоследък се наблюдават ограничения при употребата

на продукта, заложен от производителя, при инсталиране на сървърна операционна система. Предпоставката е, че след като се използва сървърна операционна система, то употребата на TeamViewer е комерсиална и трябва да се закупи лиценз за работа с него. Друг забелязан проблем, също свързан с използването в корпоративна мрежа, е конфигурирането на прокси сървър, използван от организации. В това отношение с настройките на прокси сървър по-добре се справя AnyDesk и успява да се свърже с компютри от вътрешната мрежа на организацията.

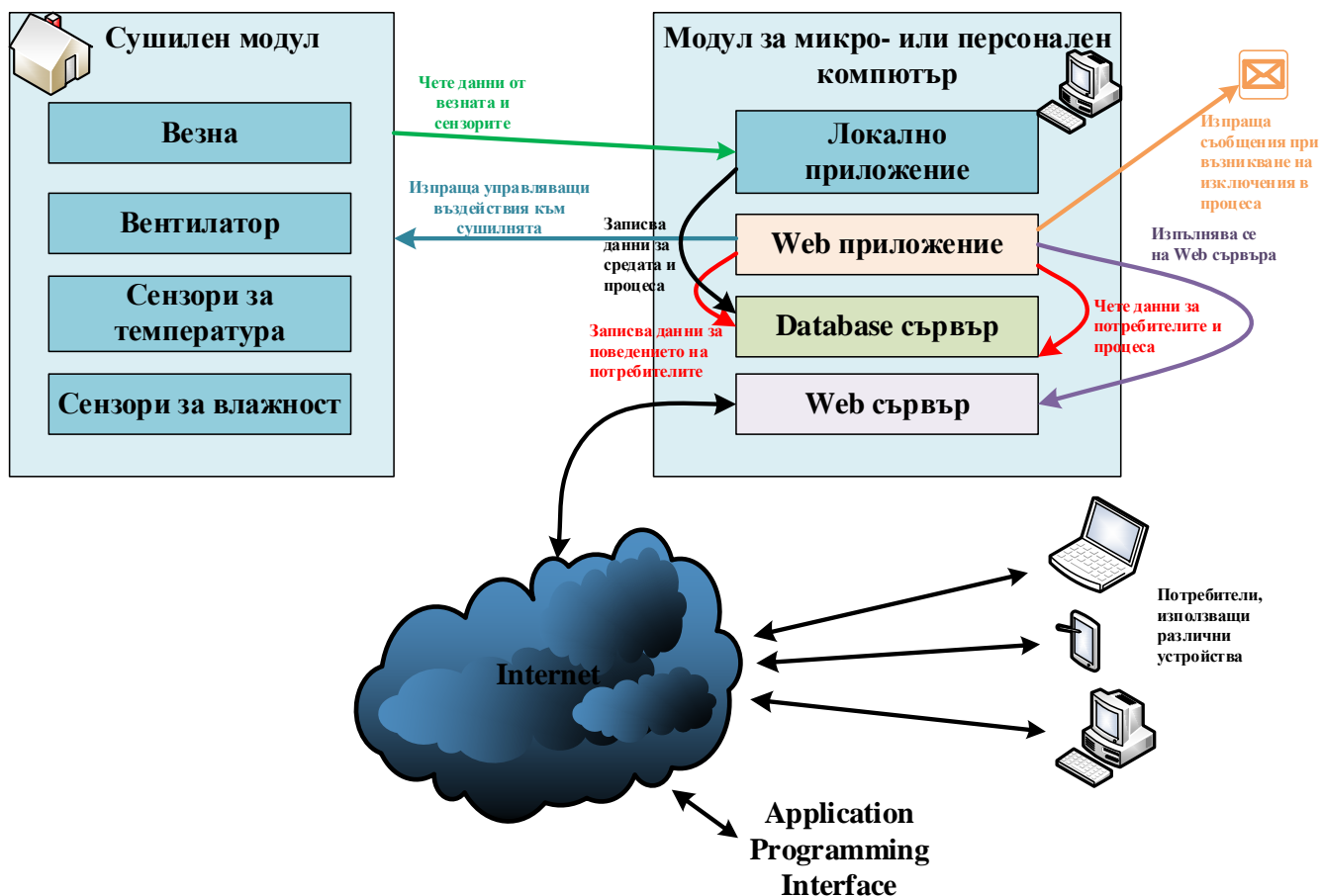
Програмата TeamViewer е с огромна популярност и от производителя (TeamViewer GmbH, Germany) са се погрижили да осигурят приложения, които са официално разработени от тях за всички платформи и операционни системи, включително и за мобилни устройства. За направените изследвания със системата на сушилнята е ползван основно TeamViewer. Предпочетен е заради неговата популярност и надеждна работа, като отдалеченият потребител има пълен контрол над персоналния компютър и в частност над управлението на сушилнята. В една реално работеща система не е желателно да се експериментира с нестабилни софтуерни продукти.

4.7. Развитие на системата за сушене на плодове и зеленчуци, чрез адаптиране на микроконтролер

Събраните знания и натрупаният опит с управлението на процесите сушене в конвективна сушилня и развитието на технологиите и средствата за тяхното практическо приложение, получават своето усъвършенстване с вграждането на управлението в микроконтролер. Локално приложение на микроконтролерния модул се стартира и прочита данни от сушилния модул. То събира данните от сензорите за температура, скорост и като цяло за състоянието на средата в сушилнята и околната среда в помещението, където е сушилнята, фиг.10. Също така получава информацията за теглото на продукта в сушилнята от везната и за скоростта, влажността и температурата на сушилния агент. Може да се добави и разхода на енергия, като се използва подходящ електронен електромер (POWR2 на Shenzhen Sonoff Technologies)

с интерфейс за предаване на регистрираните данни (настоящия има само дисплей за визуализация на отчетените стойности). Преобразува тези данни в структуриран вид и ги запазва в базата от данни.

Този модул няма потребителски интерфейс и работи в бекграунд режим. Не е необходима намесата на оператора-потребител. Създаден е така, че при стартиране на процес на сушене той се стартира автоматично и при завършване на процеса - се затваря автоматично.



фиг. 10. Архитектура на системата за интелигентно управление на сушенето

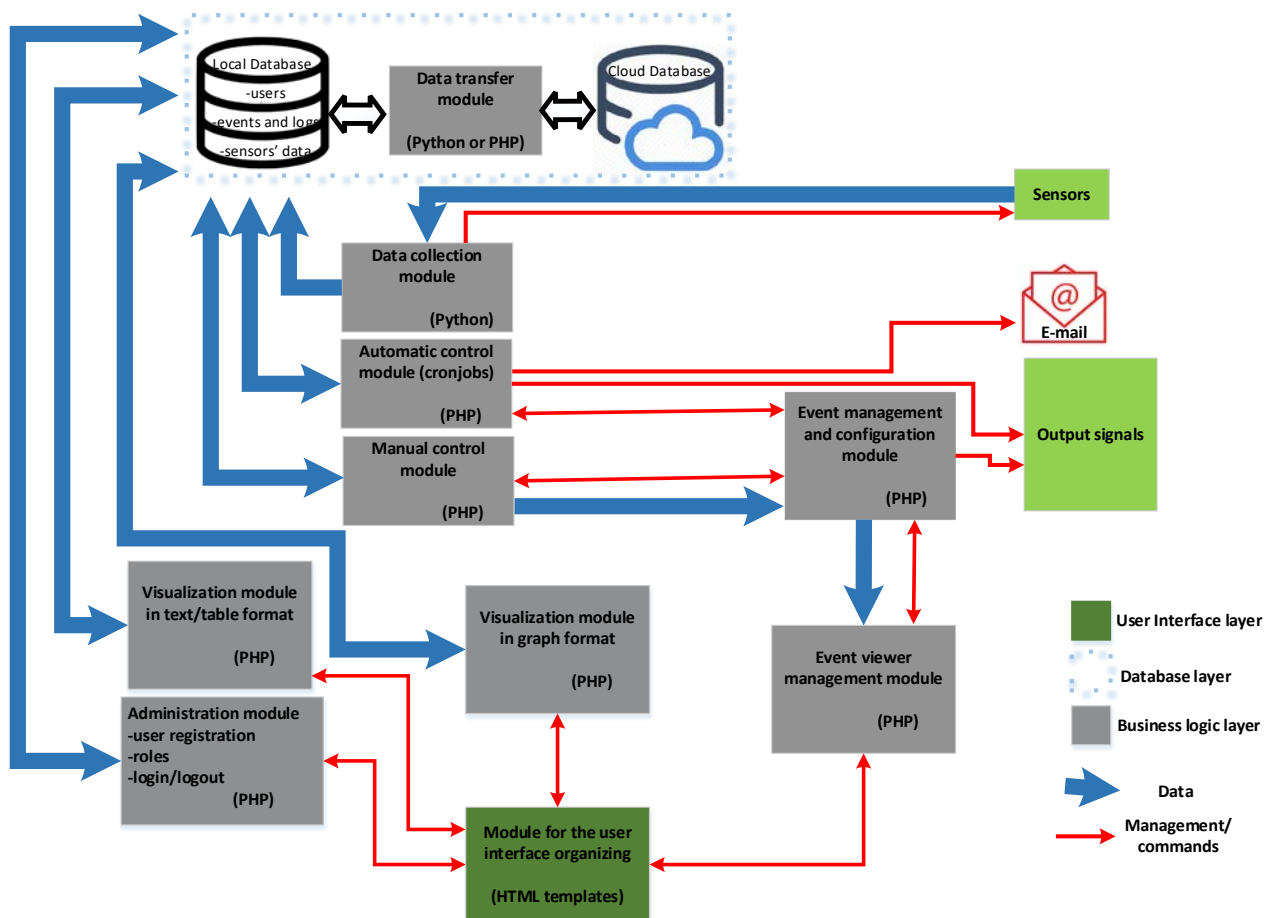
С цел по-голяма автономност, след като предложените алгоритми са проверени експериментално с LabVIEW и MATLAB, е предложено WEB приложение, което реализира цялата функционалност на управлението на конвективната сушилня. Предимството на този подход се състои в това, че за да се изпълнява това приложение е достатъчно да има инсталиран на персоналния компютър или в по-евтиния вариант с микрокомпютър, WEB сървър. Това не е проблем, поради факта, че такива WEB сървъри са разработени с различни версии съобразно използвания хардуер. Всички

работят достатъчно стабилно и могат да се изпълняват на компютри с не особено високи параметри, както и на микрокомпютри и микроконтролери.

Предимството на един такъв подход е, че самото приложение се изпълнява на сървъра. Всички потребители го използват през своя браузър. Не се налага всеки потребител да си го инсталира на своя компютър и в последствие да го настройва. Достатъчно е да си стартира браузъра, а реално няма мобилно устройство или компютър, чиито операционни системи да не предлагат или поддържат браузър. Трябва да се въведе WEB адреса в лентата за адрес и потребителят вече има достъп до приложението и неговите функции. При евентуални обновявания и разширение на функциите не е необходимо да се информират всички потребители един по един и да се правят нови инсталации – всеки от тях вижда новите неща при стартиране на приложението без проблеми. Естествено, различните групи потребители имат достъп до различна функционалност. Някои могат само да проследяват процеса на сушене, а други могат да оказват и съответни управляващи въздействия, като променят температурата на сушене или скоростта на сушилният агент. Самото проследяване на процеса може да бъде чрез таблично представяне на стойностите на параметрите за определен/избран интервал от време от процеса или в графичен вид. Във WEB приложението са реализирани функционалностите за контрол на достъпа на групите потребители, обръщение към базата от данни, където от една страна се прочитат данните за процеса, съхранени от локалния модул, а от друга се записва информация за действията на всеки потребител. Събраните мета данни задължително регистрират кой потребител, кога точно е променял и кои настройки на процеса. Допълнително може да се записват какви елементи от потребителския интерфейс е използвал, къде е кликвал с мишката или курсора на мобилното си устройство, от какъв IP адрес се е свързвал и много др..

WEB приложението изпълнява и някои прогнозни функции. То се обръща към API (Application Programming Interface) за локална прогноза на времето, откъдето взема данни за предстоящите няколко дни по часове и при стартиране на сушилен процес предоставя на потребителя информация за

очакваната продължителност на процеса и за евентуалните отклонения от типичното протичане на сушенето, поради много високите температури или примерно по-високата влажност на въздуха, които ще се отразяват на условията в помещението със сушилнята. Свързването към тези API в Интернет става с помощта на така наречените API ключове. Това е уникален идентификатор, който се използва за да се разпознае потребителя или програмата, която се обръща към API. Тези ключове се използват, за да се идентифицира самото приложение, което използва API-то, а не отделните потребители на приложението. Различните платформи, предоставящи като услуга такива интерфейси използват ключа по различни начини. В случая е важно, че за тези прогнози не е необходимо да се идентифицират всички потребители, а този ключ е заложен в приложението. Вече е приложено предлаганото решение в изградената платформа за събиране на данни за атмосферния въздух с архитектурата предложена на фиг.11, [130].



фиг. 11. Архитектура на системата за събиране на данни и обработка на информация

Още една допълнителна и немаловажна функция изпълнява WEB приложението – има възможност за настройка на адрес за електронна поща, на който да изпраща съобщение при възникнали нетипични отклонения за протичането на процеса.

Допълнителен модул за управление на локалната база от данни се използва при микрокомпютри и микроконтролери, тъй като при тях обемът памет е ограничен. Може да се окаже, че базата данни е достигнала критичен обем и поради това всички приложения на устройството да започнат да работят прекалено бавно. Това би затруднило и объркало процеса на сушене, поради което след всеки цикъл на сушене, събраните данни се изпращат в облачна база от данни и се изтриват от локалната.

Глава 5

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ТЕОРИЯТА И ПРАКТИКАТА

Сушенето на плодове и зеленчуци има голям екологичен и икономически ефект, като те са и незаменим хранителен продукт. Сушенето на големи количества материал се осъществява в сушилни. Анализирани са принципите на сушене и видовете сушилни според конструкцията, типа на сушилния агент, методите на сушене и суровината. Очевидно изборът на тип сушилня определя до голяма степен възможностите за управлението на процесите в нея. Конвективните сушилни са най-често използваните за плодове и зеленчуци.

Направен е сравнителен анализ на съществуващи модели сушилни за плодове и зеленчуци и е предложен експериментален прототип на конвективна сушилня. Той позволява измерване, следене и контрол на параметрите на околната среда, енергийните разходи, масата на материала, качеството на готовата продукция, температурата и скоростта на сушилния агент, в технологично зададени граници. Експерименталната сушилня може да се използва по два начина: за събиране и обработка на данни, с цел построяване на кинетични криви на сушене на плодове и зеленчуци и за автоматизирано управление на реален сушилнен процес.

За постигане на необходимата точност при снемане на кинетичните криви на сушене за различни плодове и зеленчуци, трябва да се използва пълната конфигурация на прототипа с персонален компютър и инсталирани

софтуерни среди MATLAB и LabVIEW, електронна везна с комуникационен софтуер към нея, колориметър, ватметър и таймер. За контролни измервания могат да се ползват термометър и анемометър.

Предложени са различни модели на обобщената крива на сушене. Изследвана и доказана е адекватността на модела използван за сушене на кайсии [4, 11, 12, 13, 15, 72, 73, 74, 75], като е описана възможността да се използва за анализ на процеса и за неговото управление, чрез промяна на различните му режимни параметри, определени с цел постигане на ниски енергийни разходи, скъсена продължителност на процеса и очаквано качество на продукцията. Като показатели за качеството на крайния продукт са използвани - витамин С, β -каротин и цветови характеристики.

Предложен е нов качествен показател – загуба на цвят, дефиниран със зависимост (54). Използвайки оптимизационната процедура, реализирана чрез генетичния алгоритъм, по подобие на описаните качествени показатели – витамин С и β -каротин, могат да се добавят и други качествени характеристики, зависещи от параметрите на сушилния процес.

Дефинираният комплексен критерий е проверен за управление на сушилния процес на кайсии, с отчитане на енергийните разходи, интензивността на влагоотделяне и качеството на готовата продукция. Поради доказаната му нелинейна зависимост от параметрите на сушилния процес се налага в различните етапи от сушенето да се използват различни стойности за температурата и скоростта на сушилния агент.

Предложената система за сушене може да се използва и за други плодове и зеленчуци, като за целта е необходимо да се направят аналогични експериментални изследвания за определяне на кинетичните им криви при различни режимни параметри. След което да се избере подходящ модел, описващ зависимостта им от режимните параметри. За да се постигне високо качество на изсушената продукция, трябва да се направят необходимите изследвания за влиянието на режимните параметри върху избрани качествени характеристики.

Предложеният модул за управление на процеса на сушене на кайсии е реализиран в софтуерната среда LabVIEW. Достатъчно е

потребителят/операторът да зададе/въведе желаната стойност на влагосъдържанието на изсушения продукт и да стартира процеса. Софтуерният модул на системата за сушене автоматично ще преизчислява управляващите въздействия на интервал от 30min, като използва модела за изменение на влагоотделянето на съответния продукт и приложените в предходния 30 минутен интервал параметри на сушилният агент. Работата на системата ще завърши след достигане на зададеното влагосъдържание. Действията и намесата на оператора, по време на сушилният процес, са сведени до минимум и основната му роля е да проследява процеса за непредвидени обстоятелства.

Предложения модел за управление на сушилният процес може да постигне намаление с до 42% на консумираната енергия при сушене на кайсии, спрямо сушилен процес с фиксирани температура и скорост на сушилният агент. Това се отразява на продължителността на процеса, която се увеличава до 31% в сравнение с процес, реализиран при постоянни параметри на сушилният агент ($\theta=80^{\circ}\text{C}$ и $v=1.5\text{m/s}$). Икономията на енергия и увеличаването на продължителността на процеса могат да бъдат управлявани чрез тегловните коефициенти на предложения комплексен критерий, описан с уравнение (38). Естествено, при запазване на заложеното качество на готовата продукция.

Представените зависимости (Таблица 6) за продължителността на сушилният процес, помагат на потребителя да планира началния час от денонощието за стартиране на сушенето. Допълнително представените стойности за енергийната консумация на процес с фиксирани параметри в Таблица 5, помагат на потребителя да се ориентира за ефикасността на сушилният процес.

Относително високата цена на компютърното и софтуерно оборудване за реализиране на системата, може да бъде заменено с достъпни и евтини микроконтролери или микрокомпютри, като BeagleBone, JETSON, ODYSSEY, OLinuXino, Raspberry Pi и др.. Софтуерните среди, които се използват в прототипа, в последните години предоставят или версии за подобни устройства, или API интерфейси за отдалечено обръщение и обмен

на данни. В този случай стартирането на генетичния алгоритъм, няма да се реализира на Raspberry Pi (примерно), а микроконтролера/микрокомпютъра ще изпрати заявка към API интерфейса на MATLAB (<https://www.mathworks.com/>) и ще му бъдат върнати изчислените стойности за температурата и скоростта на сушилния агент за следващите 30 минути. Генерирането на управляващи сигнали изисква използването на специфичен хардуер и софтуер, предлаган от National Instruments Corp.. Използването на модула NI USB-6009 е задължително, но може да се избегне инсталирането на LabVIEW, като бъде заменено с изпращането на заявка от Raspberry Pi през съответните програмни интерфейси към онлайн услугите на National Instruments. Полученият отговор определя състоянието на управляващите изходи. Използването на едноплатков микрокомпютър Raspberry Pi, значително би поевтиняло проектираното управление и може да бъде полезно при практическата реализация на вече конфигурирана и настроена система.

Направен е сравнителен анализ и оценка на средите, позволяващи отдалечен достъп с цел управление на технологични процеси и в частност на предложения прототип на сушилня. Показано е, че това отдалечено следене е изключително удобен вариант за продължителните сушилни процеси, които са относително автоматизирани, но има вероятност от възникване на непредвидени ситуации. Също така по този начин се дава възможност на операторът, по време на процеса, да се намесва и променя параметрите, с цел управление времетраенето на процеса.

Освен за управление на сушилен процес, прототипът на системата може да се използва и за обучение на студенти и специалисти от практиката в различни предметни области. За практическа реализацията на сушилната системата са необходими познания по аналогова и цифрова схемотехника, преобразуване и обработка на аналогови и цифрови сигнали, филтрация на сигнали, генериране на управляващи въздействия и др., които са полезни за демонстрация и обучение на студентите в реална система. По време на продължителните сушилни процеси, неминуемо се наблюдава регистриране на грешни/случайни стойности, особено на аналогови величини. Чрез

подходящи методи и LabVIEW средата са реализирани цифрови филтри за ограничаване стойностите на измерванията и недопускане на изчисления с некоректни данни. Самото снемане на кинетичните криви на сушене, може да се разглежда като процес по идентификация на обект и впоследствие данните да се използват за сравняване с описващите модели. Използването на компютърни системи за измерване и управление е още една област, която е полезна в обучението на студентите и специалистите от практиката. Освен работа със специфичните програмни среди, те могат да се обучават и в настройването на регулатори за реален обект, чрез промяна на контролируемите величини – температура и скорост на сушилният агент.

Възможността за отдалечено управление на процеса е голямо предимство. Тенденциите са в бъдеще то да бъде задължителен компонент от управлението на системите. Отдалеченият достъп, с цел управление на процеса, може да бъде демонстриран пред студентите и специалистите от практиката, а защо не и те сами да управляват процеса, чрез подходящ канал за достъп. Подобните технологични процеси много често са с голяма продължителност и не могат да бъдат наблюдавани в рамките на времето за едно упражнение, а от друга страна не могат да бъдат спрени и продължени след седмица в следващото упражнение. Проследяването на истинското развитие на процеса, вместо преглеждането на неговия модел се приема с много по-голям интерес и ангажираност от страна на самите студенти.

С цел по-голямо удобство за работа със предлаганата система за сушене е предложен концептуален архитектурен модел на системата с използване на web приложение с многопотребителски достъп и възможности за следене и управление на сушилният процес от всяка точка с Интернет свързаност и от каквото и да е устройство, на което има браузър. Една такава система би могла да се използва в практиката от дребни производители на сушени продукти и в сферата на обучението.

ИЗПОЛЗВАНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ

- 1 Велчев З., П. Моллов, К. Михалев, В. Шиков. Изменения на основните качествени характеристики на ябълкови резанки при високотемпературно сушене, Международна научна конференция, Съюз на учените - Стара Загора, 2008
- 2 Вучков И. Н. Експериментални изследвания и идентификация. София, Техника, 1990
- 3 Вълов Н. УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСА В ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СУШИЛНЯ. В: Научни трудове на Русенския университет, Русе, Печатна база при Русенски Университет, 2012, стр. 122-126, ISBN 1311-3321.
- 4 Вълов Н. УПРАВЛЕНИЕ НА РЕЖИМНИТЕ ПАРАМЕТРИ ПРИ КОНВЕКТИВНО СУШЕНЕ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ - ДИСЕРТАЦИЯ, Русенски университет „Ангел Кънчев“, Русе, 2014
- 5 Вълов Н., В. Стоянов, Д. Иванова. СИСТЕМА ЗА СЪБИРАНЕ НА ДАННИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СУШИЛНЯ. В: Научна конференция - РУ & СУ'11 секция Електротехника, електроника и автоматика, Русе, Печатна база при Русенски Университет, 2010, стр. 90-95, ISBN 1311-3321.
- 6 Вълов Н., Д. Иванова, В. Стоянов, И. Вълова. СИСТЕМА ЗА КОНТРОЛ И УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСА В ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СУШИЛНЯ. В: Научни трудове на Русенския университет, Русе, Печатна База при Русенски Университет, 2011, стр. 163-169, ISBN 1311-3321.
- 7 Вълов Н., Д. Иванова, И. Вълова, В. Стоянов. SMART УПРАВЛЕНИЕ НА КОНВЕКТИВНА СУШИЛНЯ ЗА КАЙСИИ.// Journal of Mountain Agriculture on the Balkans, 2014, брой 17, стр. 1044-1060, ISSN 1311-0489.
- 8 Вълов Н., Д. Иванова, И. Вълова. ОТДАЛЕЧЕН ДОСТЪП И УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСА СУШЕНЕ ПРЕЗ INTERNET. International Conference Automatics and informatics '15, Sofia, 2015, стр. 47-49
- 9 Георгиева М. Изследване енергийната ефективност на импулсни режими за конвективно сушене на плодове и зеленчуци. Автореферат за присъждане на ОНС „Доктор“, Пловдив, 2005, с.41.
- 10 Иваненко В.П., Крысин А.Г., Пеленко В.В., Усманов И.И. Исследование процесса уноса влаги сушеного абрикоса, УДК 663/664.
- 11 Иванова Д., Н. Вълов, В. Стоянов, И. Вълова. МОДЕЛИРАНЕ КИНЕТИЧНИТЕ КРИВИ НА СУШЕНЕ НА КАЙСИИ. В: Научна конференция - РУ & СУ'11 секция Електротехника, електроника и автоматика, Русе, Печатна База при Русенски Университет, 2011, стр. 170-174, ISBN 1311-3321.
- 12 Иванова Д., Н. Вълов, В. Стоянов. ДЕФИНИРАНЕ НА КРИТЕРИИ ЗА ОПТИМАЛНО УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСА СУШЕНЕ НА КАЙСИИ.// Хранително-вкусова промишленост, 2012, брой 3, стр.38-41
- 13 Иванова Д., Н. Вълов, В. Стоянов. ОПТИМАЛНО УПРАВЛЕНИЕ НА СУШИЛНИ ПРОЦЕСИ НА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ.// Автоматика и информатика, 2012, брой 4, стр. 30-34, ISSN 0861-7562.

- 14 Иванова Д., Н. Вълков. РАЗМИТО УПРАВЛЕНИЕ НА СУШИЛНЯ ЗА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ.// Селскостопанска техника, 2007, брой 2, стр. 2-7, ISSN 0037-1718.
- 15 Илиева-Стефанова Д., Д. Иванова, Н. Вълков. КАЧЕСТВЕНА ОЦЕНКА НА СУШЕНИ КАЙСИИ. Научни трудове на Русенски университет "Ангел Кънчев", том 57, серия 3.4, Русе, Русенски университет "Ангел Кънчев", 2018, стр. 36-40, ISBN 1311-3321.
- 16 Лупу О.Ф. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса сушки абрикос с применением токов высокой частоты., автореферат дис., докт. техн. наук: 05.18.12. - Молдовы, Кишинев, 2005.
- 17 Мумджиян Г. Автоматично управление и регулиране на топлинни процеси. София, техника, 1987.
- 18 Невенкин С. Сушене и сушилна техника, Техника, София, 1993.
- 19 Невенкин С., Р. Златарева, М. Балабанов. Определяне на някои параметри при въздушни слънчеви системи. София, Енергетика, 1983.
- 20 Петков Т. Идентификация на обектите за автоматизация. София, Техника, 1992.
- 21 Стоянов С., Оптимизация на технологични процеси. София, Техника, 1993.
- 22 Христов С., Н. Вълков, Д. Иванова, В. Стоянов. КОНТРОЛ НА ПАРАМЕТРИТЕ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СУШИЛНЯ. В: Студентска научна сесия, Русенски университет, Русе, Печатна база при Русенски Университет, 2011, стр. 17-21, ISBN 1311-3321.
- 23 Abdullah M. Z., Guan, L. C., Lim, K. C., & Karim, A. A. (2004). The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. *Journal of food engineering*, 61(1), 125-135.
- 24 Ahmed M., Akter, M. S., & Eun, J. B. (2010). Peeling, drying temperatures, and sulphite-treatment affect physicochemical properties and nutritional quality of sweet potato flour. *Food chemistry*, 121(1), 112-118.
- 25 Ahmed M., Akter, M., & Eun, J. B. (2011). Optimisation of drying conditions for the extraction of β -carotene, phenolic and ascorbic acid content from yellow-fleshed sweet potato using response surface methodology. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(7), 1356-1362.
- 26 Akoy E. A. O. M., Von Hörsten, D., & Luecke, W. (2008). Drying Kinetics and Colour Change of Mango Slices as Affected by Drying Temperature and Time.
- 27 Akpınar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44, pp.689-1705.
- 28 Altas I.H., A.M. Sharaf. A Generalized direct approach for designing fuzzy logic controllers in Matlab/Simulink GUI environment, *International Journal of Information Technology and Intelligent Computing*, Int. J. IT&IC No.4 vol.1, 2007
- 29 Amin Taheri-Garavanda, Shahin Rafieea, Alireza Keyhania. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions, *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, ISSN: 2228-9860, vol.2 No.2 2011, pp.147-160.

- 30 Arata A. et al. Experimental study of solar heated cabinet type dryer. Proc. 24th. Int. Conference: Solar Energy New Energetic, Technologies for Environment and Agriculture. Verona, Italy, 1986.
- 31 Arata A., V. K. Sharma. Performance evaluation of solar assisted dryers for low temperature drying. Applications I. Plants Description. Renewable Energy, vol.5/6, 1991, pp.735-759.
- 32 Arshad Hussain, Azra Yasmin, Javed Ali. Corporative study of chemical composition of some dried apricot varieties grown in northern areas of Pakistan, Pak.J.Bot., 42(4), 2010, pp.2497-2502.
- 33 Arslan, D., & Özcan, M. M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. Food and bioproducts processing, 89(4), 504-513.
- 34 Arun S. Mujumdar. Handbook of Industrial Drying, 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.
- 35 Aurélie Bechoff, Claudie Dhuique-Mayer, Manuel Dornier, Keith I. Tomlins, Renaud Boulanger, Dominique Dufour, Andrew Westby, Relationship between the kinetics of b-carotene degradation and formation of norisoprenoids in the storage of dried sweet potato chips, Food Chemistry 121 (2010), pp.348-357.
- 36 Aurelie Bechoff. Investigating carotepoid loss after drying and storage of orange-fleshed sweet potato, PhD thesis, 2010
- 37 Babalis S.J., Belessiotis V.G. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs., J. Food Eng, 2004, 65, pp.449-458.
- 38 Beck M.B., G. Van Straten. Model Sensitivity and Uncertainty Analysis. FEDRA, K.A. 1983, pp.261-278.
- 39 Bilel Hadrich, Nabil Kechaou., Mathematical modeling and simulation of shrunk cylindrical material's drying kinetics-Approximation and application to banana, Food and bioproducts processing, 87 -2009, pp.96-101.
- 40 Daraoui N., P. Dufour, H. Hammouri, A. Hottot, Model predictive control during the primary drying stage of lyophilisation, Control Engineering Practice 18 (2010), pp.483-494.
- 41 Dash K.K., S. Gope, A. Sethi, M. Doloi. Study on thin layer drying characteristics star fruit slices, International Journal of Agriculture and Food Science Technology, ISSN: 2249-3050, vol. 4, Number 7 (2013), pp.679-686.
- 42 Di Scala, K., & Crapiste, G. (2008). Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. LWT-Food Science and Technology, 41(5), 789-795.
- 43 Diamante, L., Durand, M., Savage, G. P., & Vanhanen, L. P. (2010). Effect of temperature on the drying characteristics, colour and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits.
- 44 Dong-Gyun Lim, Sang-Suk Lee, Kang-Seok Seo, and Ki Chang Nam. Effects of Different Drying Methods on Quality Traits of Hanwoo Beef Jerky from Low-Valued Cuts during Storage, Korean J. Food Sci. An., vol. 32, No. 5, 2012, pp.531-539.
- 45 Doymaz I. The kinetics of forced convective air drying of pumpkin slices. J. Food Eng, 2006, 79, pp.243-248.

-
- 46 Drake, M. A., Sensory analysis of dairy Foods, *Journal of Dairy Science* vol.90 No.11, 2007, pp.4925-4937.
 - 47 Duffy Y.A., W.A. Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. Willy, New York, 1991.
 - 48 Dufour P. Control engineering in drying technology: Review and trends, special issue of drying technology on progress in drying technologies (5), 24- 2006, pp.889-904.
 - 49 Edeh R.I., E.U. Madukwe and I.C. Obizoba, Effects of household storage on ascorbic acid content of some selected Nigerian vegetables, *Pakistan Journal of Nutrition* vol.12 (2) 2013, ISSN 1680-5194, pp.150-153.
 - 50 Elamin O.M. Akoy. Effect of Drying Temperature on Some Quality Attributes of Mango Slices. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, ISSN 2351-8014 vol. 4 No. 2 Jul. 2014, pp.91-99.
 - 51 Elham Meisami-asl, Shahin Rafiee. Mathematical modeling of kinetics of thin-layer drying of apple (var. Golab). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, ISSN 1682-1130, 2009, vol.11.
 - 52 Enemo R.E., U.E. Ekpunobi, D. Nnubia, and T.U. Onuegbu. Comparative study on the ascorbic acid content of some common Nigerian vegetables (*Solanum gilo*, *Gnetum africanum*, *Gongomera latifolium*, and *Vernonia amygalina*). *Pacific Journal of Science and Technology*. vol.11(2) 2010, pp.499-503.
 - 53 Erbay Z. , Icier, F. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50, 2010 pp.441-464. , ISSN 1040-8398
 - 54 Filho R.M., Wolf M.R.M. and Vasconcelos L.G.S. Development of a suitable optimal operating control strategy for large scale dryer. *Compt. Chem. Eng.*, 21, 1997, pp.589-594.
 - 55 Gallego-Juárez J. A. , G. Rodriguez-Corral J.C. Gálvez Moraleda, T.S Yang. A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration, *Drying Technology: An International Journal* 1999 vol.17, Issue 3, pp.597-608.
 - 56 Ghatrehsamani S.H., Dadashzadeh M. and Zomorodian A. Kinetics of apricot thin layer drying in a mixed and indirect mode solar dryer, *International Journal of Agriculture Sciences*, ISSN:0975-3710, vol.4, Issue 6, 2012, pp.262-267.
 - 57 Goyal R. K., A. R. P. Kingsly, M.R. Manikantan, S. M. Ilyas. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, pp.176-180.
 - 58 Habir R., Schmitz U. and Bars R. Optimal choice of horizons for predictive control by using genetic algorithms. *Chin. J. Comput. Phys.*, 28, 2004, pp.53-58.
 - 59 Hakan Okyay Menges, Can Ertekin, Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples, *Journal of Food Engineering*, vol.77, 2006, pp.119-125.
 - 60 Henderson, S.M., and Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6:169–174.
 - 61 Henry A. Váquiro, José Bon, José L. Diez. Fuzzy logic application to drying kinetics modelling, *Proceedings of the 17th IFAC World Congress (IFAC'2008)*, pp.2206-2211.

- 62 Hilaire Nahimana, Arun S. Mujumdar, Min Zhang. Drying and radial shrinkage characteristics and changes in color and shape of carrot tissues (*Daucus carota* L) during air drying. *African Journal of Biotechnology*, ISSN: 1684-5315, vol.10(68), 2 November 2011, pp.15327-15345.
- 63 Hindra F., & Baik, O. D. (2006). Kinetics of quality changes during food frying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(3), 239-258.
- 64 Hiromichi Itoh, Hirotsugu Tomita, Yuichi Uno, Naomasa Shiraishi, Development of method for non-destructive measurement of nitrate concentration in vegetable leaves by near-infrared spectroscopy. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress (IFAC'11)*, pp.1773-1778.
- 65 Hosain Darvishi, Asie Farhang, Eisa Hazbavi. Mathematical modeling of thin-layer drying of shrimp, *Global Journal of Science Frontier Research Mathematics & Decision Sciences*, ISSN: 2249-4626, vol.12 Issue 3 ver.1.0 March 2012, pp.83-89
- 66 Howard L.A. , A.D. Wong, A.K. Perry, and B.P. Klein. b-Carotene and ascorbic acid retention in fresh and processed vegetables, *Journal of food science* 1999 vol.64, No.5, pp.929-936.
- 67 Howe E. D. Principles of drying and evaporating. *Sun World* vol.4 №6, 1980, pp.182-185.
- 68 Huyck B. , F. Logist, J. De Brabanter, J. Van Impe, B. De Moor. Constrained model predictive control on a programmable automation system exploiting code generation: Practical Considerations, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress (IFAC'11)*, pp.12207-12212.
- 69 Idlimam A., C.S. Ethmane Kane and M. Kouhila. Single layer drying behaviour of grenade peel in a forced convective solar dryer, *Revue des Energies Renouvelables* vol.10 No2 (2007), pp.191-203.
- 70 Ihns R., L. M. Diamante, G. P. Savage and L. Vanhanen. Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 2011, pp. 275-283.
- 71 İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers, *Journal of Food Engineering*, vol.55, issue 3, December 2002, pp.209-216.
- 72 İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan. Modeling of drying kinetics of single apricots. *Journal of Food Engineering* 58, 2003, pp.23-32.
- 73 Irme L., *Solar Drying in A. S. Mujumdar. Handbook of Industrial Drying*. New York, Marcel Decker Inc., 1995.
- 74 Ivanova D., N. Valov, D. Ilieva. COMPARATIVE ANALYSIS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND MATHEMATICAL MODELS FOR APRICOTS DRYING. *International conference Automatics and informatics'2016*, Sofia, 2016, pp. 121-124, ISBN 1313-1850.
- 75 Ivanova D., N. Valov, I. Valova, D. Stefanova. OPTIMIZATION OF CONVECTIVE DRYING OF APRICOTS.// *TEM journal - Technology, Education, Management, Informatics*, 2017, No Vol.6, No.3, pp. 572-577, ISSN 2217-8309.

-
- 76 Ivanova D., N. Valov, V. Stoyanov. DYNAMIC MODELS FOR APRICOTS DRYING USING GENETIC ALGORITHM.// Information, communication and control systems and technologies, 2013, No 1, pp. 29-33, ISSN 1314-7455.
- 77 Ivanova D., N.Valov, V. Stoyanov. OPTIMAL CONTROL OF THIN-LAYER DRYING OF APRICOTS.// International journal emerging of technology and advanced engineering (IJETA), 2016, No vol.6, Issue5, pp. 26-32, ISSN 2250-2459.
- 78 James G. Brennan. Food Processing Handbook, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006, ISBN: 3-527-30719-2
- 79 Johannes Tiusanen M., H. Tapani Jokiniemi, Mikko I. Hautala. Grain dryer temperature optimization with simulation and a test dryer, 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, 2013 (IFAC Agricontrol 2013), pp.12-17.
- 80 Jokić S., Velić D., Bilić M., Lukinac J., Planinić M., Bucić-Kojić A. Influence of process parameters and pre-treatments on quality and drying kinetics of apple samples. Czech J. Food Sci., vol.27 2009, pp.88-94.
- 81 José Bon, Carmen Rossello, Antoni Femenia, Valeria Eim, Susana Simal. Mathematical modeling of drying kinetics for apricots: Influence of the external resistance to mass transfer. Drying Technology, 25, 2007, pp.1829-1835.
- 82 Kalbasi M., Heat and moisture transfer model for onion drying, Drying technology vol.21, No.8, 2003, pp.1575-1584.
- 83 Kamil Sacilik, Ahmet Konuralp Elicin, Guran Unal. Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer, Journal of Food Engineering, vol.76, 2006, pp.362-368.
- 84 Karabulut, I., A. Topcu, A. Duran, S. Turan, B. Ozturk. Effect of hot air drying and sun drying on color values and β -carotene content of apricot (*Prunus armenica* L.).LWT-Food Science & Technology, vol.40(5), 2007, pp.753-758.
- 85 Kaymak-Ertekin F., Gedik A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, appricots and potatoes. LWT - Food Science and Technology 2004, 37(4), pp.429-438.
- 86 Kiseleva T. F. Drying Technology: Educational and methodical complex, Technological Institute of food industry, Kemerovo, 2007, 117 p. (in Russian).
- 87 Kmiecik W., Lisiewska Z., Słupski J., Gebczynski P., The effect of pre-treatment, temperature and length of frozen storage on the retention of chlorophylls in frozen brassicas. Acta Sci. Pol., Technol. Aliment. 7(2), 2008, pp.21-34.
- 88 Kocsis L., U. Schlemm, H. Richter, J. Mellmann, I. Farkas, On-line microwave measurement of the moisture content of wheat, Proceedings of the 17th IFAC World Congress (IFAC'2008), pp.631-635.
- 89 Kowalski S. J. and A. Rybicki, Computer simulation of drying optimal control, Transport in Porous Media vol.34, 1999, pp.227-238.
- 90 Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2003). Drying kinetics of some vegetables. Journal of Food engineering, 59(4), 391-403.
- 91 Liuping Wang. Model Predictive control system design and implementation using MATLAB, 2009 Springer-Verlag London Limited, ISBN 978-1-84882-330-3 e-ISBN 978-1-84882-331-0.
- 92 Luanda G. Marques, Manoel M. Prado, José T. Freire, Vitamin C content of freeze-dried tropical fruits, 11th International Congress on Engineering and Food, 2011, pp.493-499.

-
- 93 Magdalini Krokida and Zacharias Maroulis. Quality changes during drying of food materials, *International Journal of Food Science and Technology* 2001, 36, pp.529-538.
- 94 Majid Rasouli, Sadegh Seiedlou, Hamid R. Ghasemzadeh, Habibeh Nalbandi. Convective drying of garlic (*Allium sativum* L.): Part I: Drying kinetics, mathematical modeling and change in color, *Australian Journal of Crop Science (AJCS)*, ISSN: 1835-2707, 5(13) 2011, pp. 1707-1714.
- 95 Martynenko I., Computer-vision system for control of drying processes, *Drying Technology*, vol.24, 2006, ISSN: 0737-3937 e-ISSN:1532-2300, pp.879-888.
- 96 Md. Raisul Islam, J.C. Ho, A. S. Mujumdar. Convective Drying with Time-Varying Heat Input: Simulation Results. *Drying Technology*, vol. 21, №7, 2003, pp.1333-1356.
- 97 Mirzaee E., Rafiee S., Keyhani A., Emam-Djomen Z., Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research Agricultural Engineering*, 55, 2009 (3), pp.114-120.
- 98 Mirzaee E., S. Rafiee, A. Keyhani. Evaluation and selection of thin-layer models for drying kinetics of apricot (cv. NASIRY). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, ISSN 1682-1130, 2010, vol.12(2), pp.111-116.
- 99 Mohammad Esmaili Adabi, Ali Motavalli, Ali M. Nikbakht, Mohammad Hadi Khoshtaghaza. Investigation of some pretreatments on energy and specific energy consumption drying of black mulberry. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 19 (1) (2013), pp.89-105.
- 100 Mohammad Esmaili Adabi, Saeid Minaei, Ali Motavalli, Ahmad Taghizadeh, Mohsen Azadbakht. Energy consumption, effective moisture diffusion and activation energy in drying of thyme leaves (Part II), *International Journal of Agronomy and Plant Production*. ISSN: 2051-1914, vol.4 (9) 2013, pp.2404-2412.
- 101 Montazer-Rahmati M.M., B. Amini-Horri. From laboratory experiments to design of a conveyor-belt dryer via mathematical modeling, *Drying Technology*, 23- 2005, pp.2389-2420.
- 102 Mortaza Aghbashlo, Mohammad H. Kianmehr, Hadi Samimi-Akhijahani. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of barberries fruit. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49, pp.2865-2871.
- 103 Motevali Ali, S. Minaei. Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 18 (1) (2012), pp.63-72.
- 104 Mulet A., Garcia - Pascual, P., Sanjuan, N., Garcia - Reverter J., Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering* 2002, 53 (1), pp.75-81.
- 105 Nazmi Izli, Esref Isik. Batch drying characteristics of dent corn (*Zea mays* var. *indentata* Sturt.), *Journal of Food, Agriculture & Environment* vol.11 (1) 2013, pp.259-263
- 106 Oğuz Bozkir. Thin-layer drying and mathematical modelling for washed dry apricots, *Journal of Food Engineering*, vol.77, 2006, pp.146-151.

-
- 107Ömer Beyhan, Taki Demir. Effects of SO₂ Application on Drying Time and Some Quality Characteristics of Dried Fruits on the “Hacıhaliloglu” Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Variety, *Journal of Applied Biological Sciences*, ISSN: 1307-1130, 3(3) 2009, pp.29-32.
- 108Orak H.H. , T. Aktas, H. Yagar, S. Selen Isbilir, N. Ekinci and F. Hasturk Sahin. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L) fruit, *Food Science and Technology International* (18) 2012, pp.391-402.
- 109Orikasa, T., Wu, L., Shiina, T., & Tagawa, A. (2008). Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 303-308.
- 110Pahlavanzadeh H, Basiri A, Zarrabi M. Determination of parameters and pre-treatment solution for grape drying. *Drying Technology*, 2001, 19(1), pp.217-226.
- 111Patricia Moreira Azoubel, Silvana Belém De Oliveira, Ana Júlia De Brito Araújo, Ízis Rafaela Alves Silva, Kil Jin Park. Influence of osmotic pretreatment on the total carotenoids content of dried mango, *CIGR - International Conference of Agricultural Engineering, XXXVII Congresso brasileiro de engenharia agrícola – Conbea 2008*.
- 112Pedreschi F., León, J., Mery, D., & Moyano, P. (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 39(10), 1092-1098.
- 113Preetinder Kaur, Ashok Kumar, Sadhna Arora, Birinder Singh Ghuman, Quality of dried coriander leaves as affected by pretreatments and method of drying, *Eur Food Res Technol* (2006) 223 Springer-Verlag, pp.189-194.
- 114Quirijns E. J., Van Willigenburg, L. G. and Van Boxtel, A. J. B.. New perspectives for optimal control of drying processes. *International symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2000*, pp.437-442.
- 115Rajeev Bhat, Abd Karim Alias, Gopinadham Paliyath. *Progress in Food Preservation*, John Wiley&Sons, 2012.
- 116Ranganna, S. *Handbook of analysis and quality control for fruits and vegetable products*, 2 nd edition, Mc Graw Hill, New Delhi, 1986.
- 117Sacilik K., A. Elicin, G. Unal. Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76 (2006), pp.362-368.
- 118Sadegh Seiiedlou, Hamid R. Ghasemzadeh, Nasser Hamdami, Faramarz Talati and Mohammad Moghaddam. Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International Journal of Agriculture & Biology*, ISSN: 1560–8530, 09–215/ZSA/2010/12–2, pp.171–178.
- 119Saliha Erenturk, Koksal Erenturk. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot, *Journal of Food Engineering*, vol.78, (3) 2007, pp.905-912.
- 120Sandeep Kushwaha. Comparative effect of cabinet, microwave and freeze drying on physical and nutritional quality of Onion Stalk, *Asian J.Exp.Biol.Sci.(AJEBS)* 3 (3) 2012, ISSN 0975-5845, pp.531-535.
- 121Santos P. H. S., M. A. Silva. Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables-A Review, *Drying Technology*, ISSN: 0737-3937, (26) 2008, pp.1421-1437.

-
- 122 Sharma V. K., A. Colangelo and G. Spagna. Experimental Performance of an Indirect Type Solar Fruit and Vegetable Dryer. Cairo, Energy Convers. Mgmt, vol.34, 1993, pp.293-308.
- 123 Sheetal Gupta, Jyothi Lakshmi A and Jumuna Prakash, Effect of different blanching treatments on ascorbic acid retention in green leafy vegetables, Natural product radiance, vol.7 (2) 2008, ISSN 1680-5194, pp.111-116.
- 124 Sunita Rai, Attar Singh Chauhan, Quality attributes of drum-dried papaya-cereal flakes developed from ripe papaya (*Carica Papaya L.*), EJEAFChe, ISSN:1579-4377, 01/2008; vol.7(5), pp.2914-2931.
- 125 Ugur Yuzgec, Yasar Becerikli, Mustafa Turker. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms. The Instrumentation, Systems and Automation Society, vol.45, №4, 2006, pp.589-602.
- 126 UNECE standard DDP-15 concerning the marketing and commercial quality control of Dried Apricots, United nations, New York and Geneva, 2012.
- 127 Valov N., D. Ivanova, V. Stoyanov. INFORMATION TOOLS FOR DRYER FOR FRUITS AND VEGETABLES. SIELA 2012, XVIIth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, Sofia, 2012, pp. 336-343, ISBN 1314-6297.
- 128 Valov N., I. Valova. DRYING PROCESS MANAGEMENT LABORATORY WITH REMOTE ACCESS. IEEE ITHET 2017 - 16th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, Ohrid, Macedonia, 2017
- 129 Valov N., I. Valova. SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF THE DRYING PROCESS. International conference on e-Learning'14, Tenerife, Spain, University of La Laguna, 2014, pp. 96-102, ISBN 976-954-712-611-4.
- 130 Valov N., I. Valova. RASPBERRY PI AS A TOOL TO COMBINE DIFFERENT COURSES PART OF UNIVERSITY EDUCATION. 18th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET 2019), Magdeburg, Germany, IEEE, 2019, ISBN 9781728124643.
- 131 Vardan Mkrttchian, Sliding mode thermal control system for dryer in agriculture productions, 16th Triennial World Congress 2005 IFAC, pp.46-51.
- 132 Vojtech Veselý, Adrian Ilka. Gain-scheduled PID controller design, Journal of Process Control 23 (2013), pp.1141-1148.
- 133 Yuzgec U., Y. Becerikli, M. Turker. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms. The Instrumentation, Systems and Automation Society, vol.45, №4, 2006, pp.589-602.
- 134 Zare D., M. Ranjbaran, M. Niakousari, M. Javidi. Thin layer drying and equilibrium moisture content equations for canola (*Brassica napus L.*), Iran Agricultural Research, vol.31, No.1, 2012, pp.11-20.
- 135 http://vlashki-engineering.com/images/sample_pic/Software_for_Calculation_and_Visualization_of_the_Thermodynamic_States_of_Moist_Air.pdf
- 136 <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal>
- 137 <https://ik-sushka.com/drying/>
- 138 [https://nutrients.readthedocs.io/en/latest/03_dir/\\$_03-detail-6-methods-2-aoac.html](https://nutrients.readthedocs.io/en/latest/03_dir/$_03-detail-6-methods-2-aoac.html)

- 139 <https://sauermanngroup.com/en-GB/measuring-instruments/portable-instruments/anemometers>
- 140 https://shtrakov.net/Heat_Phys.htm
- 141 https://tct.bg/bg/chamber_tunnel_belt_dryers
- 142 <https://www.aqua-calc.com/calculate/humidity>
- 143 <https://www.beneco.net/sushilni-po-ustroystvo.html>
- 144 <https://www.calladan.com/susheni-plodove>
- 145 <https://www.cometsystem.com/products/reg-T7511>
- 146 <https://www.healthycanning.com/dehydration-weight-test/>
- 147 <https://www.ni.com/en-rs.html>
- 148 https://www.stringmeteo.com/synop/temp_month_bolc.php

Публикации на автора използвани в монографията:

1. Иванова Д., Н. Вълков, В. Стоянов. Оптимално управление на сушилни процеси на плодове и зеленчуци.// Автоматика и информатика, 2012, брой 4, стр. 30-34, ISSN 0861-7562.
2. Иванова Д., Н. Вълков, В. Стоянов. Дефиниране на критерии за оптимално управление на процеса сушене на кайсии.// Хранително-вкусова промишленост, 2012, брой 3, стр.38-41
3. Вълков Н. Управление на процеса в експериментална сушилня. В: Научни трудове на Русенския университет, Русе, Печатна база при Русенски университет, 2012, стр. 122-126, ISBN 1311-3321.
4. Ivanova D., N. Valov, V. Stoyanov. Dynamic models for apricots drying using genetic algorithm.// Information, communication and control systems and technologies, 2013, No 1, pp. 29-33, ISSN 1314-7455.
5. Вълков Н., Д. Иванова, И. Вълкова, В. Стоянов. Smart управление на конвективна сушилня за кайсии.// Journal of Mountain Agriculture on the Balkans, 2014, брой 17, стр. 1044-1060, ISSN 1311-0489.
6. Вълков Н. Управление на режимните параметри при конвективно сушене на плодове и зеленчуци - дисертация, Русенски университет „Ангел Кънчев“, Русе, 2014
7. Valov N., I. Valova. System for monitoring and control of the drying process. International conference on e-Learning'14, Tenerife, Spain, University of La Laguna, 2014, pp. 96-102, ISBN 976-954-712-611-4.
8. Вълков Н., Д. Иванова, И. Вълкова. Отдалечен достъп и управление на процеса сушене през Internet. International Conference Automatics and informatics '15, Sofia, 2015, стр. 47-49
9. Ivanova D., N.Valov, V. Stoyanov. Optimal Control of Thin-layer Drying of Apricots.// International journal emerging of technology and advanced engineering (IJETAЕ), 2016, No vol.6,Issue5, pp. 26-32, ISSN 2250-2459.
10. Ivanova D., N. Valov, D. Ilieva. Comparative analysis of artificial neural network and mathematical models for apricots drying. International conference Automatics and informatics'2016, Sofia, 2016, pp. 121-124, ISBN 1313-1850.

11. Valov N., I. Valova. Drying Process Management Laboratory with Remote Access. IEEE ITHET 2017 - 16th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, Ohrid, Macedonia, 2017
12. Ivanova D., N. Valov, I. Valova, D. Stefanova. Optimization of Convective Drying of Apricots.// TEM journal - Technology, Education, Management, Informatics, 2017, No Vol.6, No.3, pp. 572-577, ISSN 2217-8309.
13. Илиева-Стефанова Д., Д. Иванова, Н. Вълков. Качествена оценка на сушени кайсии. Научни трудове на Русенски университет "Ангел Кънчев", том 57, серия 3.4, Русе, Русенски университет "Ангел Кънчев", 2018, стр. 36-40, ISBN 1311-3321.
14. Valov N., I. Valova. Raspberry Pi as a tool to combine different courses part of university education. 18th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET 2019), Magdeburg, Germany, IEEE, 2019, ISBN 9781728124643

**ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА КОНВЕКТИВНА
СУШИЛНЯ ЗА ПЛОДОВЕ И ЗЕЛЕНЧУЦИ -
МОНОГРАФИЯ**

гл. ас. д-р инж. Николай Петков Вълков

рецензенти:

проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев
доц. д-р инж. Никола Николаев Николов

Първо издание

Формат: 60/84/16

Тираж: 20

Издателство: Бряг Медиа Груп ЕООД
Русе

2021

ISBN 978-619-90584-7-3

