



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Факултет по Телекомуникации

Катедра: Радиокомуникации и видеотехнологии

маг. инж. Христо Иванов Христов

**ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИНФРАЧЕРВЕНА ТЕРМОГРАФИЯ ЗА
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЖИВИ ТЪКАНИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Кабелни и оптични комуникационни системи

Научен ръководител: доц. д-р инж. Калин Лъчезаров Димитров

СОФИЯ, 2021

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет по Телекомуникации при Технически Университет – София на редовно заседание, проведено на 28.06.2021 г. (протокол № 32).

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 11.11.2021 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически Университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-31/26.07.2021 на Ректора на ТУ – София в състав:

1. Доц. д-р инж. Иво Руменов Драганов - ТУ - София
2. Доц. д-р инж. Росен Георгиев Милетиев – ТУ - София
3. Проф. д-р инж. Александър Богданов Бекярски – пенсионер
4. Проф. д-р инж. Тодор Димитров Ганчев – ТУ - Варна
5. Доц. д-р инж. Валентина Илиева Маркова – ТУ - Варна

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Александър Бекярски
2. Доц. д-р инж. Иво Драганов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се във Факултета по Телекомуникации, блок 1, стая 1254

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ на Факултета по Телекомуникации. Изследванията по дисертационния труд са направени от автора, като резултатите от тях са подкрепени от научно-изследователски проекти.

Автор: маг. инж. Христо Христов

Заглавие: „Използване на инфрачервена термография за изследване на живи тъкани“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически Университет – София

1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В съвременната медицина термографията се използва като неинвазивно образно средство. Служи за предварителна диагностика на различни видове тумори и други заболявания. Използва се в ревматологията, дерматологията, ортопедията, при изследване на съдовата дисфункция, при рани от изгаряне, измръзване, при диагностициране на рак на гърдата, диабетна невропатия и периферни съдови нарушения, а също така за откриване на проблеми, свързани с гинекологията, кардиологията, при бъбречната трансплантация, неонаталната физиология, скрининга на треска и мозъчното изобразяване. Тя е безвредна за пациента.

Инфрачервената термография намира широко приложение и във ветеринарната медицина като дава диагностична информация. Методът е щадящ, не предизвиква допълнителен стрес у животните и служи за ранна диагностика на редица заболявания, като е предпочитан за наблюдения на свободно отглеждани или диви животни в естествената им среда.

Инфрачервената термография се използва успешно и в растениевъдството. Участва в изследвания на растителния метаболизъм, при наблюдението на различни патогенни процеси, дава информация за стадите на развитие на културите, за заболявания, позволява проследяване на усвояемостта на водата и други различни съставки. Това я прави ценен помощник в планирането и осъществяването на различните мероприятия по отглеждането на културите.

Цел на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се проучат възможности за използване на инфрачервената термография за изследване на живи тъкани.

Въз основа на направения в първа глава литературен обзор и критичен анализ на проведения анализ, за успешното постигане на целта на дисертацията са дефинирани следните задачи:

1. Да се разработи подход за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване чрез инфрачервена термография и радиометричен модел на излъчванията в инфрачервената област от диви животни с цел локализацията им в естествената им среда.
2. Да се разработи подход за откриване на топлинен стрес и методика за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко чрез инфрачервена термография.
3. Да се разработи радиометричен подход за измерване на температурата на растителен лист.

Научна новост- Разработените: подход за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване, радиометричен модел на излъчванията в инфрачервената област от диви животни, с цел локализацията им в естествената им среда, подход за откриване на топлинен стрес при крави за мляко, чрез безконтактно, многоточково, радиометрично измерване в инфрачервения спектър, с оценка на повърхностната температура на вимето, методика за проследяване на физиологичното състояние на млекодайки крави, като се използва ректалната температура, повърхностната температура в три точки на заден крайник, температурно-влажностния индекс, повърхностните температури на виме и плешка и радиометричен подход за измерване на повърхностна температура на растителен лист дават възможност самостоятелно или като част от по-големи проекти да се използват в бъдеще за развитие на животновъдството и растениевъдството. Комбинирането на данните от инфрачервената термография с някои индекси, параметри и физиологични показатели, показват иновативността на настоящия дисертационен труд.

Практическа приложимост- Изследването за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване показва, че термографията може да участва в създаването на модели за оценка на въздействието на различни мисловни процеси върху ума и оттам върху физиологичните реакции на човешкото тяло или прогнозиране на реакцията на организма към промяната на околната среда, промяната на здравословното състояние и промяната на различни психологически фактори, пораждащи различни видове стрес.

Разработения радиометричен модел на излъчванията в инфрачервена област от диви животни позволява участие в механизми за преброяване на популациите, откриване и регистриране на районите на местообитания, изследване на миграционните процеси, идентифициране на начините и правилата за придвижване в големи стада, новородени или малки, скрити в гората, изучаване на естественото местообитание на определени групи и породи животни в дивата природа, извършвани от въздуха.

Разработените подход и методика дават възможност инфрачервената термография в комбинация с температурно-влажностния индекс и някои от физиологичните показатели като дишане, пулс и ректална температура при определени условия да се използват за откриване на топлинен стрес и за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко.

Радиометричният подход за измерване на температурата на растителен лист дава ясни насоки как с най-малко отклонения да се извършват такива температурни измервания. Проследяването на правилното развитие на културите изисква изследванията да се извършват в естествената им среда, на полето или в оранжерията. Това ще даде възможност при всякакви отклонения, които могат да показват проблем, да се търси причината незабавно и да се реагира възможно най-бързо.

Апробации- В кравеферма на практика е прилаган подхода за определяне състояние на топлинен стрес при крави за мляко. При периодично наблюдение

ветеринарният лекар извършва и заснемане с термокамера. При стойност на температурно-влажностен индекс около 78–79 и повече, ако срещне повърхностна температура на вимето около 39 и нагоре веднага започват двукратно оросяване или поливане на кравата с вода и включване на вентилация в залата. След тези манипулации отново заснемат животното с термокамерата и регистрират по-ниски повърхностни температури на вимето, което на практика показва приложимостта и ефективността на разработения подход.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в Основните постижения и резултати на дисертационния труд са изложени в 5 публикации, както следва: 1 в списание "Intl J. Reasoning-based Intelligent Systems" (IJRIS 2020) (В процес на отпечатване) и 4 на международни конференции "ICEST 2017", "ICEST 2018", "ICEST 2019", и „Electronica 2021“.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е с обем от 143 страници и включва съдържание, списък с използваните съкращения, въведение, четири глави, заключение, изводи и насоки за развитие, списък с научно-приложни и приложни приноси, списък с използваната литература и списък с публикациите. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

2. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА Преглед на използването на инфрачервената термография за изследване на живи тъкани

1.1. Използване на инфрачервена термография в хуманната медицина

- 1.1.1. Значимостта на цифровата инфрачервена термография при предотвратяване рака на гърдата.
- 1.1.2. Клинични приложения на инфрачервената термография в пластичната хирургия.
- 1.1.3. Приложение за оценка на артрит.
- 1.1.4. Използване на инфрачервена термография при оценката на нарушение на действието на мейбомската жлеза.
- 1.1.5. Приложение в спортната медицина.
- 1.1.6. Тестване за треска.
- 1.1.7. Диагностициране на меланом.
- 1.1.8. Проследяване на резултати от лечение и нелекарствени терапии.
- 1.1.9. Използване на термографията като диагностичен метод в кардиологията.
- 1.1.10. Значение за проучване на диабета.
- 1.1.11. Участие на термографията в интегрирана диагностична техника за мониторинг на системните реакции.

1.1.12. Приложение на инфрачервената термография при лечение на изгаряния и при изследвания на температурното разпределение върху човешката кожа.

1.2. Приложение на инфрачервена термография във ветеринарната медицина.

1.2.1. Използване на инфрачервена термография за превенция на инфекциозни заболявания при животните.

1.2.2. Диагностика на белодробните изменения при свинете чрез инфрачервена термография.

1.2.3. Участие в методики за мониторинг на здравното състояние на вимето, при откриване и проследяване на възпалителни процеси и ранна диагностика на мастит при крави за мляко.

1.2.4. Инфрачервената термография като метод за оценка на топлинния толеранс при крави отглеждани за мляко

1.2.5. Инфрачервената термография успешно се прилага при различни проучвания на диви животни.

1.2.6. Приложение на инфрачервената термография за ранно откриване на копитни лезии и куцота.

1.2.7. Използване на термография за мониторинг на качеството на живот и хуманното отношение към животни отглеждани във ферми.

1.3. Използване на инфрачервена термография в растениевъдството

1.3.1. Неинвазивна диагностика на жизнеспособността на семената чрез инфрачервена термография.

1.3.2. Ефектът от развитието на гъста мана по краставици, визуализирани чрез цифрова инфрачервена термография.

1.3.3. Използване на инфрачервената термография при изучаване на процесите на адаптация на растенията, способността им за аклиматизиране, издръжливост и оцеляване в условия на преохлаждане и измръзване през студените сезони.

1.3.4. Използване на инфрачервената термография като инструмент за наблюдение на различни видове стрес при растенията.

1.3.5. Ролята на инфрачервената термография в растителната защита.

1.3.6. Култивиране на сортове и създаване на модели за отглеждането им.

1.3.7. Използване на инфрачервената термография при изследване на взаимодействията между растенията и околната среда, за екологични проучвания и природен мониторинг.

1.3.8. Спектрални отразяващи свойства на растителните параметри.

1.3.9. Откриване на почвена соленост.

1.3.10. Оценка и прогнозиране на добивите.

1.3.11. Оценка на зрелостта.

1.3.12. Значение на инфрачервената термография за откриване на механични щети по реколтата и оценката им.

1.3.13. Използване на термични изображения за откриване на стресови реакции в лозови насаждения подложени на различни поливни режими.

1.3.14. Наблюдаване на водното съдържание и стрес при черешови дръвчета.

1.3.15. Изпарение, транспирация, евапотранспирация [ET]. Методи за моделиране на евапотранспирацията. Приносът на инфрачервената термография за мониторинг и управление на водните ресурси.

1.4. Критичен анализ

В медицината съществуват методи за инфрачервена образна система за анализ на структурата на кръвоносните съдове [109], за откриване и контрол на стрес и моментни психически състояния [108]. Съществуват методи за извършване на оценка и сравнения на повърхностната температура на различни точки от човешкото лице, които се основават на извличане на температурата на челото и носа [112]. Този подход обаче не отчита корелацията между различните точки в другите области на лицето, което би могло да разшири технологията в посока персонално разпознаване, личностна идентификация, а така също за откриване и контрол на различни видове стрес.

Съществуват много изследванията във ветеринарната област насочени към крави отглеждани във ферми, които използват инфрачервена термография [30-43, 148-150]. Съчетанието на термографски данни с физиологични показатели и други параметри може да покаже различни зависимости, от които да се направят значими изводи. Това налага по-нататъшни проучвания на крави чрез използването на термография в комбинация с различни фактори като паритет, мляко производство, ректална температура, честота на дишане, време спрямо храненето и доенето, брой отелвания и крави при различни условия на околната среда като температура, скорост и влажност на въздуха, които не са били взети под внимание в някои експерименти. Такива термографски изследвания ще дадат възможност да се проследяват по-лесно, по-бързо, с по-малко ресурси различни фактори, като топлинен стрес, физиологично състояние и др.

Много и различни изследвания чрез инфрачервена термография има направени в помощ на растениевъдството [50-74]. От практическа гледна точка е важно да се изследва при фиксиран ъгъл на наблюдение на радиометъра до какви разстояния е целесъобразно да се правят измервания в реална обстановка и каква е зависимостта им от площта на обекта, от излъчвателната способност на средата около и обекта на изследване и от температурите в системата.

Изводи към първа глава

Направения обзор ни показва, че в съвременността инфрачервената термография играе много важна роля във всички сфери интересувани се от живи тъкани. Тя е неинвазивен и напълно безопасен диагностичен метод. Позволява да се определи физиологичното състояние на тъкани, органи или зони въз основа на излъчваната от тях топлина, на базата на която можем да съдим за скоростта на промяна на метаболизма в местната област. [1, 3, 39]. Проследяването на повърхностното температурно разпределение е залегнало в много и различни приложения в хуманната, ветеринарната медицина и аграрния сектор.

ВТОРА ГЛАВА Разработване на подход за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване чрез инфрачервена термография и радиометричен модел на

излъчванията в инфрачервената област от диви животни с цел локализацията им в естествената им среда.

2.1. Фактори и характеристики влияещи върху точността на измерванията.

Изображенията от инфрачервените камери показват температурата на телесната повърхност, генерирана от комбинация от производство на топлина вътре в тялото и фактори на околната среда, външни за обекта [83]. Много и различни фактори, които влияят на разпространението на температурата, като основен носител на информацията при тези изследвания, благоприятстват или създават проблеми свързани с точността на измерванията. Невъзможността да се предвиди и/или контролира в някои случаи поведението на изследваните обекти, физиологична вариабилност на кръвния им поток [8], а така също недостатъци на хардуера, често пъти оказват съществено влияние върху резултатите. Отчитане значението на тези фактори при провеждане на изследванията, може да минимизира произтичащите от това грешки [7].

2.1.1. Външни фактори и характеристики

- 2.1.1.1. Атмосфера и атмосферни явления.
- 2.1.1.2. Телесни покрития - физически характеристики.
- 2.1.1.3. Материи покриващи изследваните повърхности.
- 2.1.1.4. Групата геометрични фактори.
- 2.1.1.5. Разстояние от източника до измерващото устройство.
- 2.1.1.6. Зрително поле
- 2.1.1.7. Ефективна дистанция за измерване
- 2.1.1.8. Температурни измервания на групирани еднородни обекти.
- 2.1.1.9. Факторът околна среда
- 2.1.1.10. Инфрачервени характеристики на изследвания обект
- 2.1.1.11. Неточности в измерването дължащи се на зависимата от времето грешка на инфрачервената камера.
- 2.1.1.12. Поведенчески фактор.
- 2.1.1.13. Технически фактори

2.1.2. Вътрешни [физиологични] фактори

- 2.1.2.1. Стресор
- 2.1.2.2. Кръвообращение.
- 2.1.2.3. Физическа активност.
- 2.1.2.4. Подкожна структура.
- 2.1.2.5. Потоотделяне

2.2. Разработване на подход за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване.

2.2.1. Цел на изследването

Целта на това проучване е да изследва връзките между температурите в различните зони на лицето на човек при умствено натоварване [MWL-mental workload], като мозъкът на участниците първоначално беше в покой, а след това беше натоварен с аритметични изчисления. По време на експеримента са търсени корелации между точки и области са направени статистически обработки.

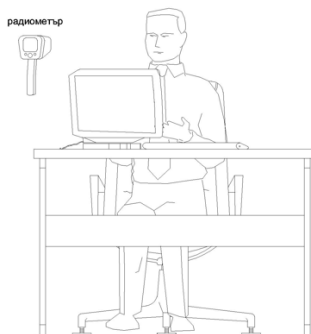
2.2.2. Мотивация

За съжаление в днешно време разчитане на калкулатора дори при прости изчисления. Ученикът автоматично посяга към своя калкулатор веднага щом види задача за пресмятане. Зависимостта от калкулатори, вместо естествените умствени способности на хората, може да доведе до загуба на интелектуални възможности. Това показва, че ние не практикуваме само математика, която калкулаторът не може, но че практикуваме математика заради способността ѝ да развива ума [84 – 88]. Вродената способност на хората да решават математически задачи, без да се отчитат приложенията, винаги е бил ценен метод за поддържане и стимулиране на ума [89-92]. Факт е, че калкулаторите са най-полезни в среда, която изисква или неща, които по същество са невъзможни за хората да се изчисляват с някаква разумна скорост, или за изчисления с доста големи числа. Увеличаването на умственото натоварване, причинено от използването на подходящ избор на аритметични задачи, е подходящо за оценка на промените в процесите на човешкото тяло [93-97].

Теоретична база на изследването

Всеки обект с температура по-висока от абсолютната нула $[-273^{\circ}\text{C}]$ ще излъчва спонтанно и постоянно електромагнитно излъчване [104]. По дефиниция цялото падащо лъчение ще бъде погълнато от абсолютно черно тяло в непрекъснат спектър съгласно закона на Планк [111]. Съществуват методи за извършване на оценка и сравнения се основават на извличане на температурата на челото и носа. Този подход обаче не отчита корелацията между различните точки в другите области на лицето. Предложеното проучване дава възможност за улавяне на температурни промени и в други части и области на лицето, като метода предоставя възможност за точна оценка и сравнения и е по-чувствителен от конвенционалните методи.

2.2.3. Опитна постановка, екипировка и инструментариум



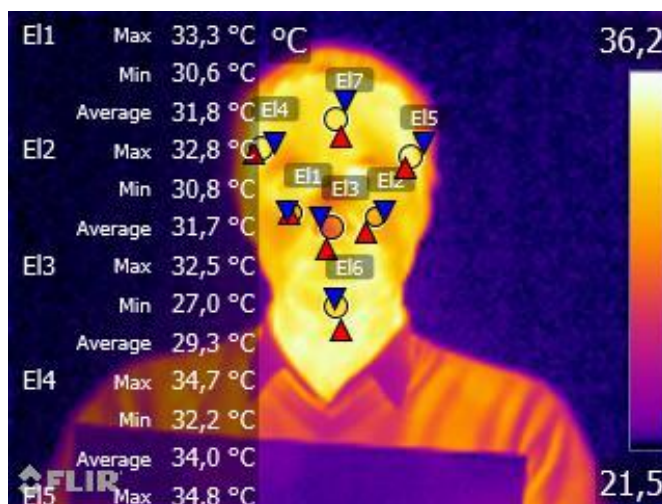
Фиг. 2.2. - Опитна постановка

За създаване на умствено натоварване използвахме задачи с изваждане и събиране на числа [85, 114]. В началото кожната повърхност на всички участници се темперира, за да се избегне въздействието на предишната външна температура [115]. Осигурена е постоянна околна температура и относителна влажност, без принудително движение на въздуха и работещи близко разположени системи за отопление или охлаждане, което до голяма степен

гарантира, че резултатите от температурните промени са свързани само с психологически фактори. След завършване на експеримента качеството на термографските снимки е визуално проверено. По време на експеримента са използвани задачи, отпечатани на обикновена хартия, за да се избегне допълнителното влияние на компютърния екран. Измерването е безконтактно, неинвазивно и безопасно за участниците и околната среда. Това позволява да се проследи промяната в реакцията на мозъка и нервната система, съответно на кръвообращението и метаболизма, изразена чрез съответна промяна в повърхностната температура на определени части на човешкото лице.

2.2.4. Резултати

Хода на експеримента е предварително планиран. Информирани е комисията по етика на Техническия университет в София (където се проведе експериментът) и е получено одобрението и. Участниците са запознати с проучването и оборудването. Получено е тяхното писмено информирано съгласие за участие в експериментите, като им е обяснено, че могат да се оттеглят от него по всяко време. На всеки човек са направени по 21 снимки, 10 в състояние на покой и 11 в състояние на MWL. Изображенията са обработени със софтуера на FLIR версия 5.12.17041.2002. Използван е 0.98 като стойност за коефициент на излъчване [107]. Избрани са 7 региона на интерес (фиг.2.3)



Фиг. 2.3. Пример на инфрачервено изображение заснето по време на експеримента

От всяка зона е взета средна стойност на температурата и след това е подредена в таблица, която е по-дълга от сто реда и не е показана тук.

Табл. 2.1. Обобщение на температурите по зони.

	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
Минимална °C	30,7	29,8	22,2	31,4	31,1	30,1	31,7
Максимална °C	34,7	34,3	34,1	35,2	35,2	34,5	35,0
Средна °C	33,0	32,6	28,0	33,7	33,7	32,5	33,8

Поради варирането на абсолютната температура в различните зони в широки граници, са използвани централни статистически моменти [117]. Изчислени са отклонения за всеки човек, поотделно за случаите „почивка“ и „Умствена работа“. От дисперсионните стойности в случая „Умствена работа“ са извадени стойностите от частта „Почивка“. Накрая са изчислени корелациите между различните зони за всички измервания (табл. 2.4).

Табл. 2.4. Корелация между зоните

E11-E12	E11-E13	E11-E14	E11-E15	E11-E16	E11-E17
0,9	0,7	0,7	0,4	0,9	0,9
E12-E13	E12-E14	E12-E15	E12-E16	E12-E17	
0,7	0,5	0,3	0,8	0,9	
E13-E14	E13-E15	E13-E16	E13-E17		
0,4	0,3	0,7	0,8		
E14-E15	E14-E16	E14-E17	E15-E16	E15-E17	E16-E17
1,0	1,0	0,6	0,9	0,4	0,9

2.3. Разработване на радиометричен модел на излъчванията в инфрачервена област от диви животни с цел локализацията им в естествената им среда.

2.3.1. Цел на изследването

Целта на настоящата работа е да покаже значението на инфрачервената радиометрия при провеждането на различни изследвания върху диви животни в техните естествени условия на живот.

Мотивация

Инфрачервената радиометрия дава възможност за наблюдение и контрол на здравословното състояние на животните в дивата природа [130-138, 119]. Много патологични процеси и заболявания възникват чрез локални промени в производството на топлина, променящи модела на притока на кръв в засегнатите органи или тъкани. Благодарение на кръвния поток и проводящия пренос на топлина от дълбочината на тялото към неговата повърхност, се смята, че инфрачервените изображения могат да отразяват процесите протичащи дълбоко в тялото [126,127]. В дивата природа радиометрията може да се използва за ранна диагностика и мониторинг на тежки заразни болести, като бяс и шап например. Установено е, че повишаването на телесната температура може да настъпи преди появата на клинични симптоми. Има изследвания, показващи възможностите на инфрачервената радиометрия за откриване на много сериозни и смъртоносни заболявания при животни като чума, грип, туберкулоза и други. Инфрачервената радиометрия позволява дистанционно наблюдение на физическите и физиологичните параметри на различни животински видове. Способността да се

извършват такива наблюдения върху животни, в естествената им среда от въздуха, го прави много предпочитан и важен механизъм за различни изследвания.

2.3.2. Теоретична част на разработване на радиометричен модел на излъчванията в инфрачервена област от диви животни

Разпространението на светлината в разсейваща и абсорбираща среда може да бъде стриктно изследвано чрез използване на класическата електродинамична теория и теорията на частичната кохерентност. Предпочетен е радиометричният (енергиен) подход за анализ на съответните явления, който е по-ясен от гледна точка на физиката и по-прост от гледна точка на математиката [120, 121, 139]. Този подход води до състава на така нареченото уравнение на разпространението. Това уравнение може да се използва само в случаите, съдържащи се в обхвата на правилното приложение на радиометричните концепции. Ако излъчващото тяло е в топлинно равновесие с околната среда [1], се използва законът на Планк (закон на Планк за излъчване на черното тяло)

$$M_{\lambda}^*(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.3.)$$

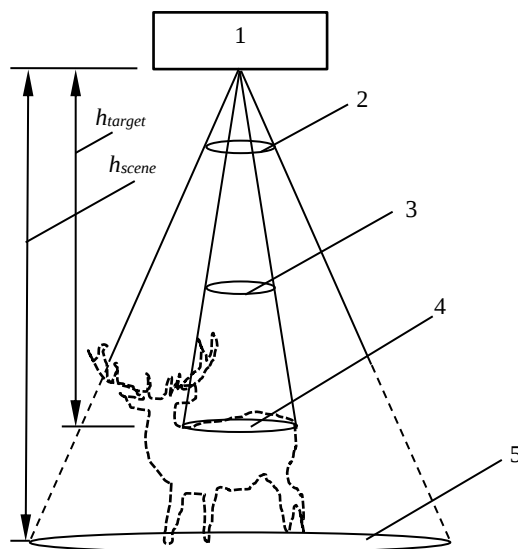
Където $c_1 = 2\pi c^2 h = 3,74 \cdot 10^{-16} W m^2$ е първа радиационна константа, а $c_2 = ch/k_B = 1,44 \cdot 10^{-2} mK$ е втора радиационна константа и в израза * означава, че се отнася за черно тяло.

За по-добър анализ на ситуацията в пространството е използвано измерение, което е свързано не само с елементарната радиационна площ като в (2.2), но и с твърдия ъгъл на видимост и ъгъла на наблюдение.

$$L_{\lambda} = \frac{d^5 \Phi}{d\Omega dA d\lambda \cos\theta} \quad (2.4.)$$

Ако зоната на излъчване е изотропна, тогава връзката между формулите се опростява до:

$$L_{\lambda}^*(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} M_{\lambda}^*(\lambda, T) \quad (2.5.)$$



Фиг. 2.4. Обща постановка на радиометрично изследване на диви животни (1-радиометрично устройство; 2-твърд ъгъл на видимост на радиометричното устройство; 3-твърд ъгъл на видимост на изследваното животно; 4-съществена площ от повърхността на дивите животни, която произвежда радиация (цел); 5-лъчение от повърхността, на която е разположено животното (сцена), h_{target} - разстояние до целта, h_{scene} - разстояние до сцената)

Средата на разпространение се характеризира с обемни коефициенти на разсейване и поглъщане, с ансамблова индикатриса на разсейване и съответната температура. Тук не се разглеждат поляризационните ефекти по време на разпространението на светлината, защото при теоретичния анализ на радиометричните системи приемаме, че разпространението на оптичното лъчение и енергийните взаимодействия са принципно свързани с допускането за пълна кохерентност на лъчението, с приемането, че пространствената конфигурация на това лъчение съответства на сноп от оптични лъчи и с отказ от възможността за отчитане на интерференционните и дифракционните ефекти. Дължината на атмосферния канал в разглеждания случай е малка, а ерозолното съдържание е ниско и в системата няма интензивно поглъщане на лъчение от атмосферен газ. Това ни дава възможност да заключим, че всички лъчения в системата се разпространяват с минимални загуби на енергия, а също така, че явленията интерференция и дифракция са пренебрежимо малки [139].

Задачата за разпространение може да бъде формулирана със следното диференциално уравнение [139]:

$$\frac{dL_\lambda}{dz} = -(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})L_\lambda + \alpha^{(a)} L_\lambda^* + L_{\lambda_{scattered}} \quad (2.7.)$$

където $\alpha^{(s)}$ е коефициентът на разсейване на атмосферата, $\alpha^{(a)}$ е коефициентът на поглъщане на атмосферата. $L_{\lambda_{scattered}}$ е съставката, определена от разсейването от други източници. В нашия случай ще приемем, че тя е твърде ниска и можем да я пренебрегнем.

Приема се, че коефициентите на разсейване и поглъщане на атмосферата са константи по отношение на пространството и спектъра. Това е възможно, тъй като разстоянието е относително малко и също, че се използва малка част от спектъра. Прието е също, че източниците на радиация са изотропни.

След тези предположения (използвайки от (2.2.) до (2.9.)) се получава израз за оптичния поток, който влиза в приемника:

$$\begin{aligned} \Phi_r = S_r \Omega_r \tau_r \left\{ \varepsilon_t \{ \exp[-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})Z] \} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda^* (\lambda, T) d\lambda + \right. \\ \left. + \frac{\alpha^{(a)}}{\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)}} \{ 1 - \exp[-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})Z] \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda^* (\lambda, T) d\lambda \} \right\} \quad (2.10.) \end{aligned}$$

Обобщено е, че потокът в (2.10.) се формира от две основни съставки: тази от целта и тази от атмосферата.

$$\Phi_r = \Phi_t + \Phi_a \quad (2.11.)$$

2.3.3. Изчисления

За да се направи общата теория полезна, се разглежда радиометрично изследване на елен. Ъгълът на наблюдение на радиометричното устройство е фиксиран, ъгълът, под който радиометърът регистрира интересуващата ни част от тялото на животното, се променя в зависимост от височината. Поради тази причина, за да се направи по-точна оценка на навлизането на различни оптични потоци във входния отвор на приемника, ние модифицираме (2.11.) на

$$\Phi_{t,total} = \Phi_t (\Omega = \Omega_t ; Z = h_t) + \Phi_{scene} (\Omega = \Omega_r - \Omega_t ; Z = h_{scene}) \quad (2.12.)$$

$$\Phi_{a,total} = \Phi_{a,t} (\Omega = \Omega_t ; Z = h_t) + \Phi_{a,scene} (\Omega = \Omega_r - \Omega_t ; Z = h_{scene}) \quad (2.13.)$$

За да се извлече правдоподобна числена симулация, се използва литературни данни за съответното диво животно, в случая елените.

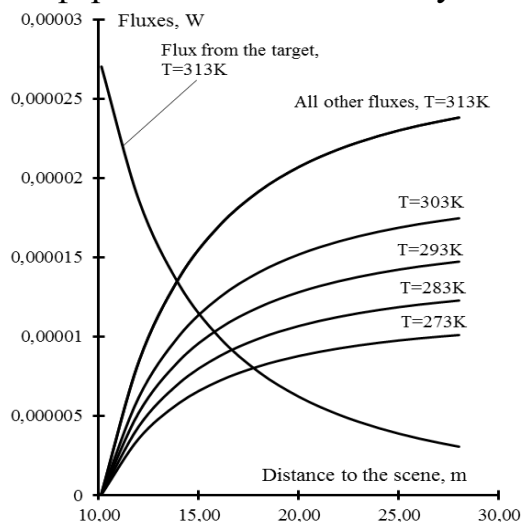
За симулацията избираме следните данни [139, 142, 143]: $T_a = 293K$, $T_t = 313K$, $T_{scene} = 293K$, $\lambda_1 = 8\mu m$, $\lambda_2 = 13\mu m$, $\varepsilon_t = 0,99$, $\varepsilon_{scene} = 0,98$, $\alpha^{(s)} = 0,03km^{-1}$, $\alpha^{(a)} = 0,4km^{-1}$, $\Omega_r = 6.10^{-3}sr$, $A_r = 8.10^{-5}m^2$, $\tau_r = 1$.

С помощта на (2.3.) и (2.5.) извършваме числено интегриране на израз (2.10.). За това използваме Scilab [144]. След това извършваме изчисления за (2.12.) и (2.13.). Част от резултатите са показани в следващата табл. 2.5.

Табл. 2.5. Част от симулационните данни

No	1	2	3		4
$h_{scene}[m]$	10,13	12	14		16
$\Phi_t [W]$, T=313K	$2,7027.10^{-05}$	$1,8598.10^{-05}$	$1,3304.10^{-05}$		$9,9848.10^{-06}$
$\Phi_{all\ other} [W]$, T=293K	$7,3266.10^{-08}$	$6,1923.10^{-06}$	$1,0035.10^{-05}$		$1,2445.10^{-05}$

Сравнени са потока, идващ от обекта, със сумата на потоците от атмосферата и от сцената. Резултатите са показани графично на фиг. 2.5.



Фиг. 2.5. Симулация за един тип цел с температура 313K и коефициент на излъчване 0,99 (диво животно) и различни температури за сцената с коефициент на излъчване 0,98 и атмосфера.

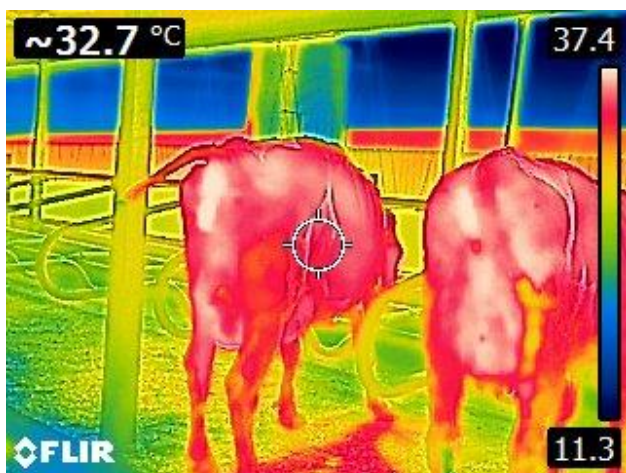
ТРЕТА ГЛАВА Разработка на подход за откриване на топлинен стрес и методика за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко чрез инфрачервена термография

3.1. Практически действия за елиминирането на случайните грешки, грешките допускани при прилагане на методиката и грешките от калибриране, извършени при реално изследване.

Поради факта, че термокамерите сами изчисляват абсолютната и относителната грешка, а грешките в електронния тракт на камерите са под 1% [145], практическите действия в дисертационния труд са насочени предимно към ограничаването или премахването случайните грешки, грешките от методология, които в повечето случай варират в размер на няколко процента и се явяват основните грешки при измерване на температура с инфрачервена камера и грешките от калибриране. При всяко изследване се прави първоначален визуален преглед на снимковия материал.

3.1.1. Отстраняване на грешките от методологията

Следват примери (фигури от 3.1 до 3.4) за грешки в метода. При част от изследване имащо за цел измерване на повърхностната температура на вимето на крави отглеждани за мляко, съществуват физически прегради между обекта и камерата (опашка, крак, част от конструкцията или не е обозначена точно коя крава е заснета)



Фиг. 3.1 Пример за грешка от методология



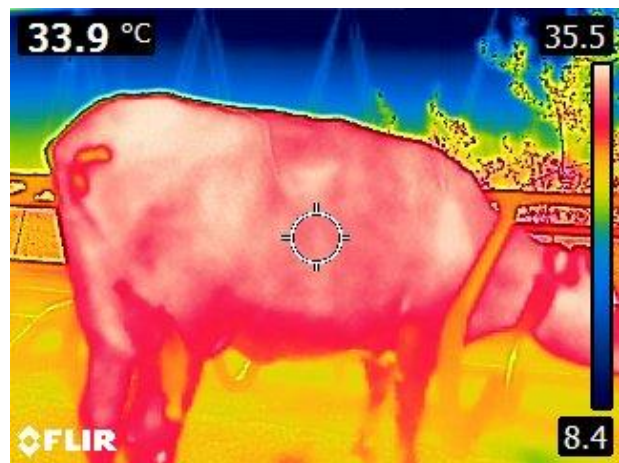
Фиг. 3.2 Пример за грешка от методология

3.1.2. Отстраняване на грешките от калибриране

Следват примери за грешки от калибриране (фигури с номера 3.5 и 3.6). Части от кравите с различно окосмяване, различно кръвоснабдяване и с различна подкожна структура (различни термографски характеристики) са с почти еднакви цветове или части от тялото с еднакво окосмяване и еднаква или близка подкожна структура (близки термографски характеристики) са с различни цветове.



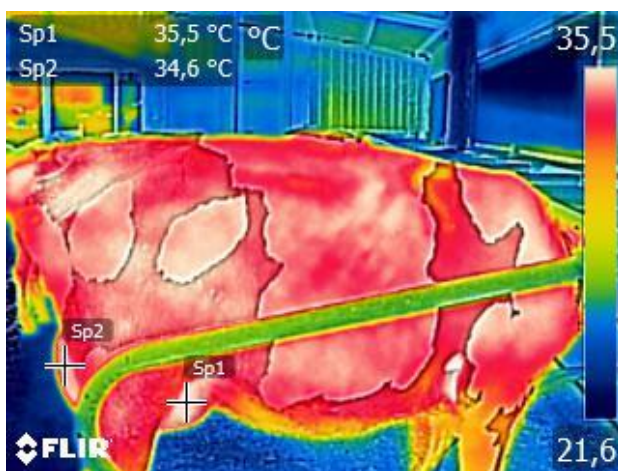
Фиг. 3.5 Пример за грешка при калибриране



Фиг. 3.6 Пример за грешка при калибриране

3.1.3. Определяне размера и отстраняване на случайните грешки

Следващите снимки (термограми 3.8., 3.9., 3.10. и 3.11.) показват случайни грешки открити като от стойностите на измерените повърхностни температури е извадена средноаритметичната стойност на повърхностната температура на вимето в селектираната група крави и стойностите са били извън граничните.



Фиг. 3.9. Пример за случайна грешка



Фиг. 3.10. Пример за случайна грешка

3.2. Разработване на подход за откриване на топлинен стрес при крави отглеждани за мляко чрез използване на инфрачервена термография

3.2.1. Цел, последователност и потенциал за приложимост

Целта на това изследване е да се проучи възможността инфрачервената термография да се използва като потенциален неинвазивен инструмент за ранно и бързо откриване на топлинен стрес при млеконадойни крави отглеждани във ферми. Направени са периодични измервания на температурно-влажностния индекс (ТНІ) според който кравите бяха разделени на три групи. По същото време бяха заснети и термографски изображения на виметата, от които със специализиран софтуер бяха извлечени повърхностните им температури. Данните бяха обработени и анализирани с помощта на статистически методи. При първата група крави – тези с ТНІ до 72, стойностите на повърхностната

температура на вимето (UST) се движат между 35°C и 37°C, а корелационния коефициент между THI и UST на кравите е бил 0,18. При втората група крави - тези с THI между 72 и 79 включително, стойностите на UST се движат от 35,3°C до 39°C, а корелационния коефициент между THI и UST на кравите е бил 0,62. При третата група крави – тези с THI над 79 стойностите на THI са варирали вече между 79,1 и 81,5, стойностите на UST се движат от 38,07°C до 40,1°C, а корелационния коефициент между THI и UST на кравите вече е станал 0,81. Това показва, че съществуват определени връзки и зависимости, които се засилват с повишаване на стойностите на показателите. В заключение можем да кажем, че IRT като неинвазивен, максимално щадящ и бърз метод, може да се използва за насочване на фермерите и ветеринарните лекари към крави, които може да са попаднали под влиянието на топлинен стрес за предприемане на последващи действия.

3.2.2. Методи, материали и инструментариум.

В настоящото изследване са участвали 140 броя Холщайн-Фризийски крави отглеждани за мляко във ферма в Южна България. Измерванията са правени на 31.05.2018, 07.06.2018, 21.06.2018, 02.07.2018, 18.07.2018 и 16.08.2018г по два пъти на ден, съответно в 10:00 и в 17:00 часа. Температурно-влажностния индекс е измерван с уред Kestrel. Измерванията на повърхностните температури са извършвани по метода на инфрачервената термография, като снимките са правени с термокамера FLIR E6. Повърхностните температури са извлечени с FLIR Tools.

Използван е показателя температурно-влажностен индекс (THI) за определяне на състояние на температурен стрес. Съгласно скалирането направено от Armstrong (1994) [153] при THI по-ниско от 72 кравите не се намират в температурен стрес, а при THI между 72 и 79 кравите се намират в лек температурен стрес. [Whittier, 1993] [154] определя THI между 79 и 83 като опасен. Съобразявайки се със скалата на Armstrong (1994) кравите са групирани в три групи. Първата са тези, при които THI е до 72, които трябва да са извън температурен стрес. Втората са тези с лек температурен стрес, при които THI е между 72 и 79 включително. Съответно третата група са тези, при които THI е над 79.

3.2.3. Теоретична постановка при разработване на подход за откриване на топлинен стрес на крави отглеждани за мляко във ферми чрез инфрачервена термография

Нека имаме данни от измервания на две случайни величини. Когато за всяко отделно състояние на системата (за всеки неин елемент) имаме по една значима стойност и за двете променливи, можем да потърсим има ли връзка между тях и колко силна е тя. Тази статистическа оценка става с помощта на коефициента на корелация, който се изчислява като отношение между корелационния момент и произведението на средноквадратичните отклонения на двете случайни величини. Той заема стойности от -1 до +1 и може да се изчисли по следния начин:

$$r_{XY} = \frac{M[(X-m_X)(Y-m_Y)]}{\sigma(X)\sigma(Y)}, [157] \quad (3.22.)$$

Когато $r_{XY} = 0$, няма връзка между изследваните величини. Връзката между тях, ако я има [при $r_{XY} \neq 0$] може да бъде в права или в обратна посока, в зависимост от знака пред коефициента на корелация. Колкото стойността е по-близка до единица, толкова връзката е по-силна и обратно. Ако коефициента на корелация при дадено изследване покаже стойност, която представлява статистическа значимост, т.е. открили сме връзка между тях, можем да започнем да търсим от какъв тип е тази връзка. Това става с помощта на регресионния анализ. Чрез него бихме могли да създадем математически модел на тази зависимост. В общия случай тя може да бъде различна и се описва с функцията $y = g(x)$, където x са стойностите на независимата променлива, а y са стойностите на зависимата променлива.

За да намерим степента на зависимост на променливите, трябва да намерим наклона на графиката, който се дава с отношението на разликата между вертикалните и хоризонталните им координати (разстояния) [157-159]. Ако условно означим две сравнявани точки от кривата като M_1 с координати в правоъгълна координатна система (x_1, y_1) и M_2 съответно с (x_2, y_2) , това означава, че говорим за израз от вида:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (3.23)$$

Това представлява наклона на регресионната линия и ни дава скоростта с която се променят величините по линията на регресия и се дава с изказа:

$$B_{slope} = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{(x-\bar{x})^2}, \quad (3.24.)$$

Където x и y са средните стойности на измерените величини.

ТНІ е индекс за измерване на съвместното влияние на околната температура и относителната влажност на въздуха върху говедата за да се оцени риска от попадането им под топлинен стрес. Неговото изчисляване е започнало много отдавна [161] и има известни няколко формули [162].

3.2.4. Оперативна последователност в метода за определяне на състояние на топлинен стрес на крави за мляко отглеждани във ферма чрез инфрачервена термография.

- Придобиване на термографски изображения,
- Изчисляване на температурно-влажностния индекс към момента на заснемане,
- Разделяне на кравите на групи според ТНІ,
- Сваляне на повърхностни температури от зоните на интерес,
- Прилагане на система за корекция на грешки,
- Статистическа обработка на резултатите,
- Изводи.

3.2.5. Данни от измерванията

Табл. 3.1. Минимални измерени, осреднени и максимални измерени стойности на проследяваните показатели по групи

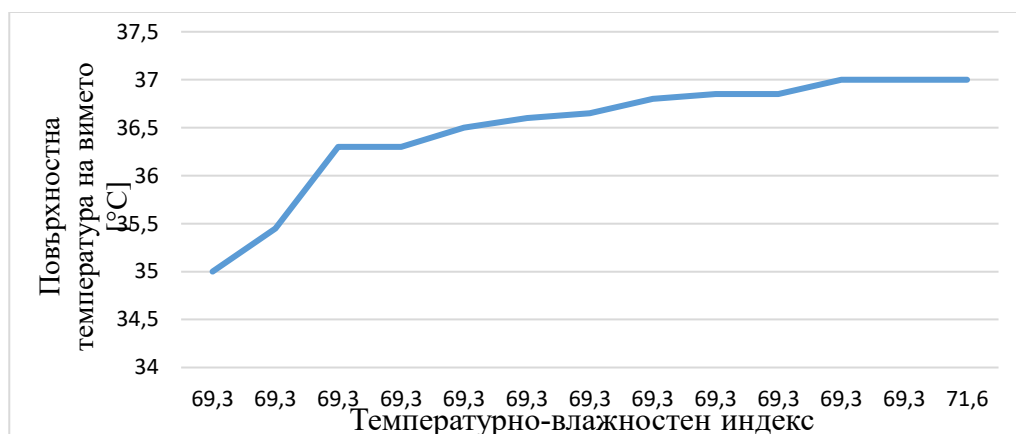
No	Групи	THI min	THI mid	THI max	UST min	UST mid	UST max
1	$THI < 72$	69,3	69,48	71,6	35°C	36,50°C	37°C
2	$72 \leq THI \leq 79$	72,1	75,04	79	35,3°C	37,25°C	39°C
3	$79 < THI$	79,1	80,13	81,5	38,07°C	38,66°C	40,1°C

От резултатите се вижда, че с увеличаването на температурно-влажностния индекс растат и стойностите на повърхностната температура на вимето на кравите от изследването

3.2.6. Термографски изображения

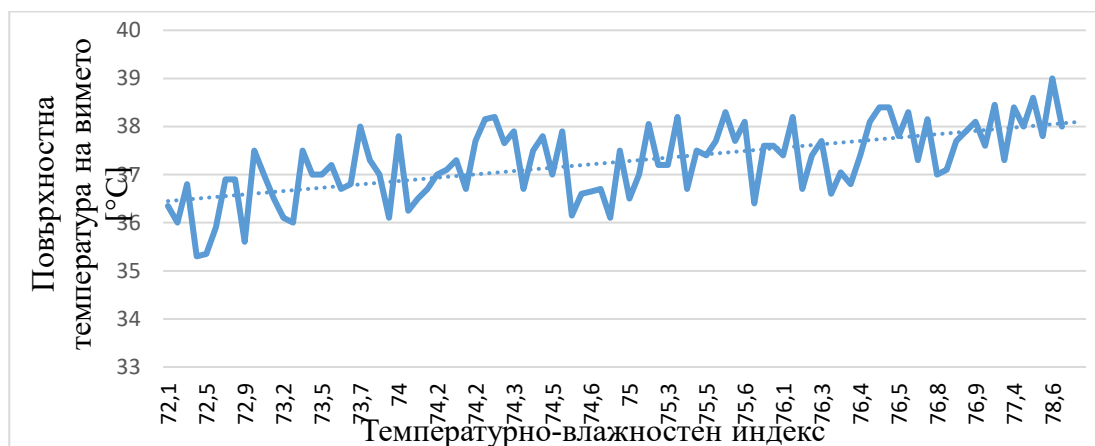
3.2.7. Представяне на резултатите

Първата група включва всички крави, намиращи се при THI под 72. Измерванията направени на 31.05.18 в 10:30 сутринта THI е бил 69,3 и на 02.06.18 има измерване показващо THI = 71,6. Стойностите на UST са били между 35°C и 37°C. Корелационния коефициент между THI и повърхностната температура на вимето (UST) на кравите е бил 0,18. Зависимостта на UST от THI при стойности на THI до 72 е показана на Фигура 1.



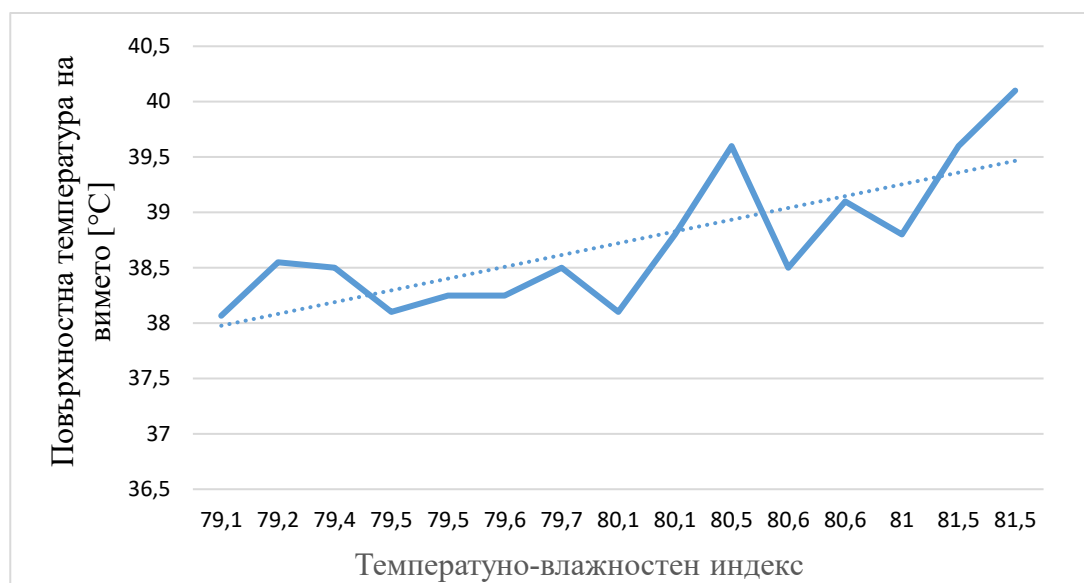
Фиг. 3.15 Зависимостта на UST от THI, при стойности на THI до 72.

Втората група крави са тези при които THI е между 72 и 79. Корелационния коефициент между THI и UST на кравите е 0,62. Зависимостта на UST от THI при стойности на THI от 72 до 79 е показана на Фигура 2.



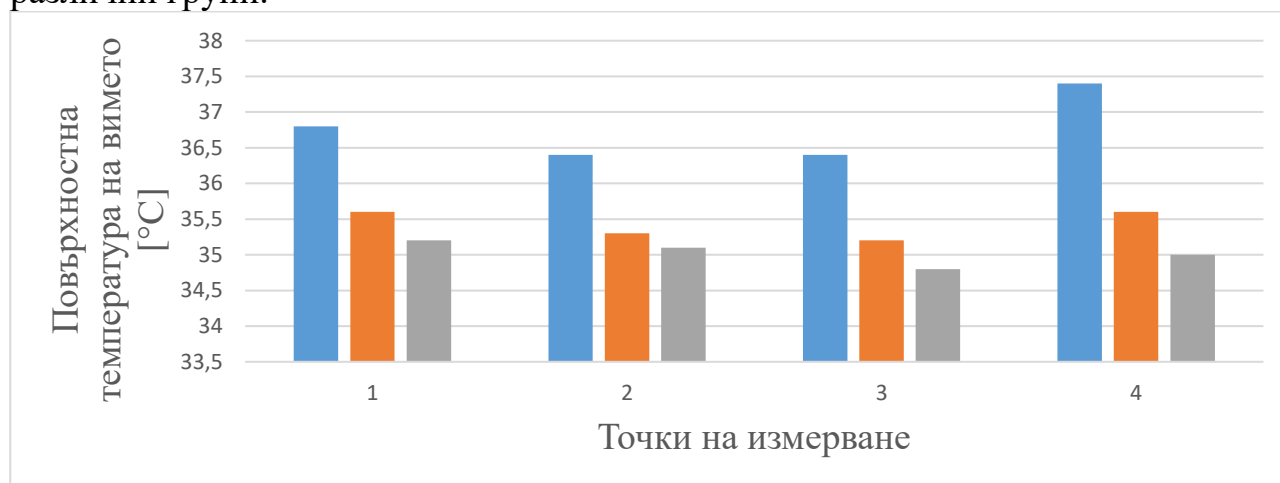
Фиг. 3.16 Зависимостта на UST от THI, при стойности на THI между 72 и 79.

Третата група крави са тези при които THI е над 79. Корелационния коефициент между THI и UST на кравите вече е 0,81. Зависимостта на UST от THI при стойности на THI над 79 е показана на Фигура 3.



Фиг. 3.17. Зависимостта на UST от THI, при стойности на THI над 79.

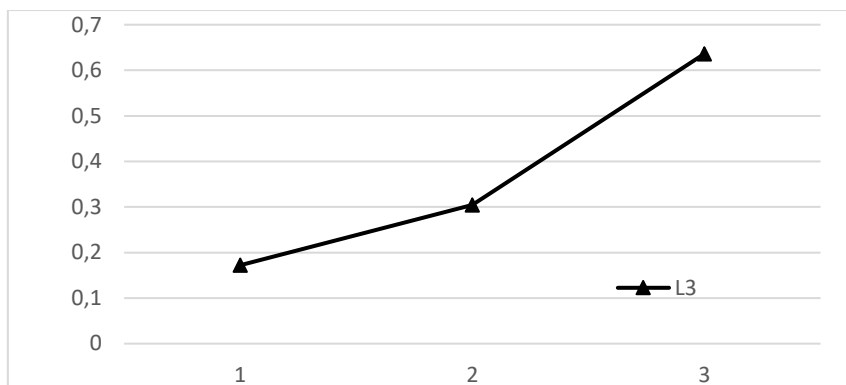
След като са показани графиките на зависимостите на UST от THI за трите различни групи от крави в зависимост от състоянието, в което се намират са показани фамилии графики онагледяващи повърхностното температурно разпределение в различни точки от вимето на крави принадлежащи към трите различни групи.



Фиг. 3.19 Фамилия графики показващи повърхностното температурно разпределение в различни точки от вимето на крави принадлежащи към групата със стойности на THI под 72.

След показването на графиките показващи повърхностното температурно разпределение на вимето на кравите от различните групи, е сметнато за необходимо да се изчисли функцията на наклона на зависимостите на UST от

ТНІ за трите различни групи от крави. За стойности на x са приети стойностите на ТНІ подредени по възходящ ред в рамките на групата, а за y са приети съответстващите им измерени стойности на UST, за всяка група поотделно (съответно точките 1, 2 и 3).



Фиг. 3.28 Функцията на наклона на зависимостите на UST от ТНІ за трите различни групи от крави, съответно в точките 1,2 и 3.

3.3. Разработване на методика за проследяване на физиологичното състояние на млечните крави чрез инфрачервена термография

3.3.1. Цел и потенциал за приложимост

Целта на изследването е да се проучи възможността за използване на инфрачервената термография (IRT) като инструмент за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко. Необходимо е наблюдение на кравите при нормален температурен режим. Тъй като с появата на температурен стрес физиологичните показатели започват да се променят, насочеността е към групата със стойности на температурно-влажностния индекс (ТНІ) под 72. В изследването се проследява повърхностна температура в различни точки на тялото, ректална температура (RT) и (FB) честота на дишане (Frequency of Breathing). Избрани са тези параметри, защото дават най-точни данни за физиологията и могат да бъдат обективно измерени. Заснети са термографски изображения на виметата (UST), краката (LST) и рамената на кравите (SST). Повърхностните температури са извлечени от снимките с помощта на специализиран софтуер. Данните са обработени и анализирани статистически. Коефициента на корелация между UST и SST беше 0,90, между RT и FB беше 0,65, между LST и UST е 0,45 и между LST и SST е 0,39. В заключение може да се каже, че IRT може да се използва за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко.

3.3.2. Методика и инструментариум

В настоящото изследване са участвали термографски снимки на Холщайн-Фризийски крави отглеждани за мляко във ферма. Температурно-влажностния индекс е измерван с уред Kestrel. Измерванията на повърхностните температури са извършвани чрез инфрачервената термография, като е използвана

термокамера FLIR E6. Повърхностните температури са извлечени със специализиран софтуер - FLIR Tools.

Необходимо е да се наблюдават крави в зона на комфорт и затова са проследени физиологичните показатели на кравите в нормална среда на отглеждане, извън температурен стрес. Използвани са температурно-влажностен индекс (THI), който ни дава информация за влиянието на температурата и влажността на въздуха и има известни няколко формули за неговото определяне [162]. Според проучването направено от Armstrong [1994] [153] при THI под 72 кравите не се намират в температурен стрес, затова се насочваме към снимките направени в този диапазон.

3.3.3. Теоретична постановка при разработване на методика за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко във ферми чрез термография

Телесната температура, честотата на дишане и ректалната температура са основни физиологични показатели, които могат да бъдат обективно измерени и ни дават информация за здравния статус на животните.

Инфрачервената термография е метод за откриване и измерване на топлинно лъчение. Според закона на Планк [1900г.]

$$M_{\lambda, \text{black body}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \left[\frac{W}{m^3} \right], [136, 152] \quad (3.25)$$

Където $c_1 = 2\pi c^2 h = 3,74 \cdot 10^{-16} [Wm^2]$ е първа радиационна константа, а $c_2 = ch/k_B = 1,44 \cdot 10^{-2} [mK]$ е втора радиационна константа, всяко тяло с температура различна от абсолютната нула излъчва постоянно като спектъра зависи от температурата му.

Избрани са за изследване краката, тъй като съществуват изследвания показващи възможността за откриване на копитни лезии и куцота при крави чрез инфрачервена термография [148-151]. Вимето е друг орган, който е обект на изследването, защото е голям, слабо окосмен и интензивно работещ като има данни, че температурата му е тясно свързана с телесната температура при немаститни крави [156].

3.3.4. Оперативна последователност в методиката за определяне на състояние на топлинен стрес на крави за мляко отглеждани във ферма чрез термография.

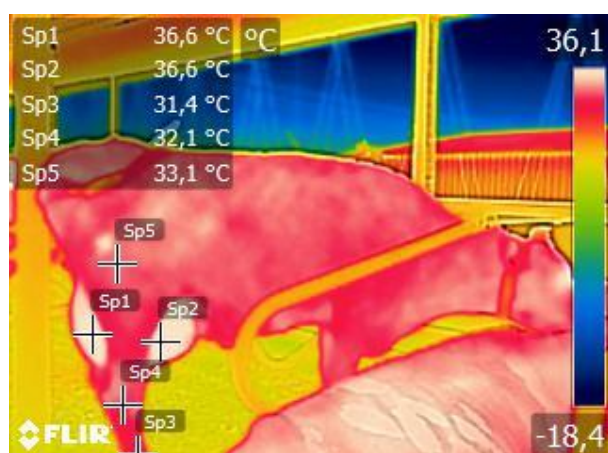
- Придобиване на термографски изображения,
- Изчисляване и измерване на проследяваните индекси и параметри към момента на заснемане,
- Разделяне на кравите на групи,
- Сваляне на повърхностни температури от зоните на интерес,
- Прилагане на система за корекция на грешки,
- Статистическа обработка на резултатите,
- Изводи.

3.3.5. Изчислителна част

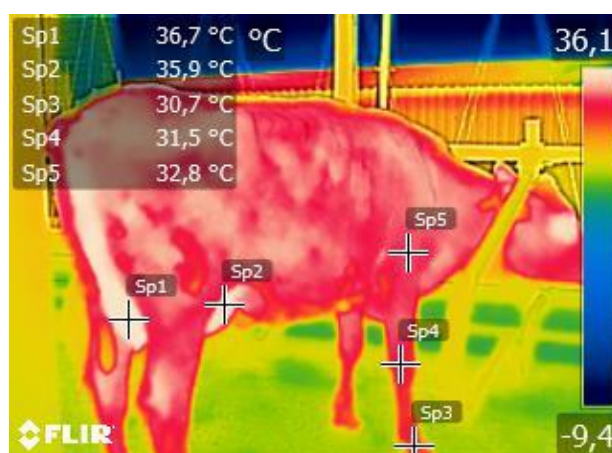
В табл. 3.2. са показани част от измерените стойности на проследяваните показатели.

Термограми	210	198	194	202	184
Ректална температура [°C]	37,3	37,6	37,8	38,1	38,2
Повърхностна темп. на вимето [°C]	37	36,5	36,8	36,3	35,2
Честота на дишане [бр/мин.]	32	36	48	56	44
Повърхностна раменна темп. [°C]	34,8	34,1	34,3	33,6	32,8
Повърхн. темп. на краката - точка 1[°C]	31,7	32,2	32,5	30,7	31
Повърхн. темп. на краката - точка 2[°C]	33,6	33,5	33,6	31,5	31,2
Повърхн. темп. на краката - точка 3[°C]	34,4	34,7	34,4	32,8	31,5

3.3.6. Топлинни изображения

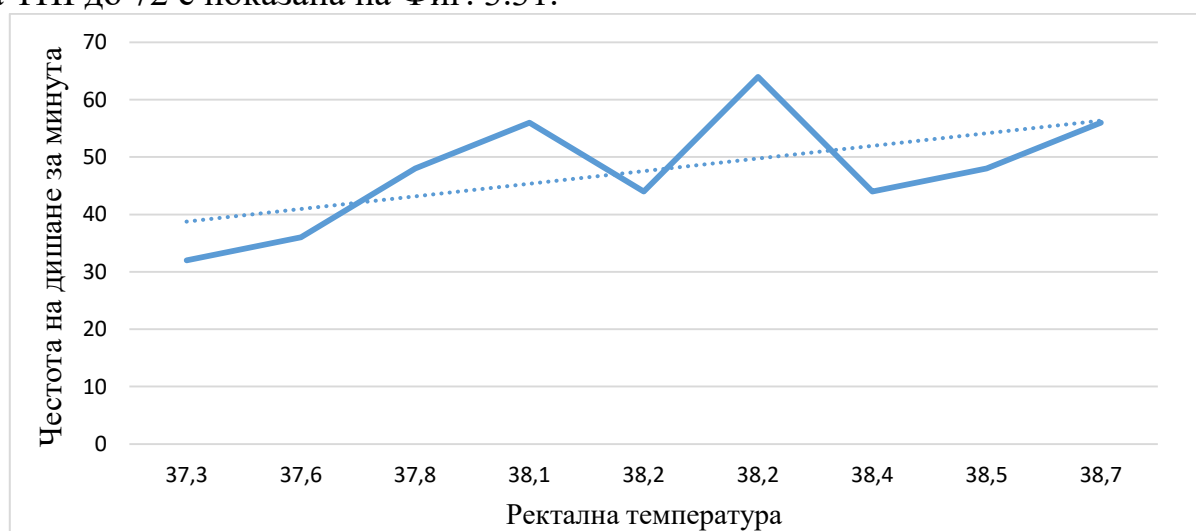


Фиг. 3.29. Пример



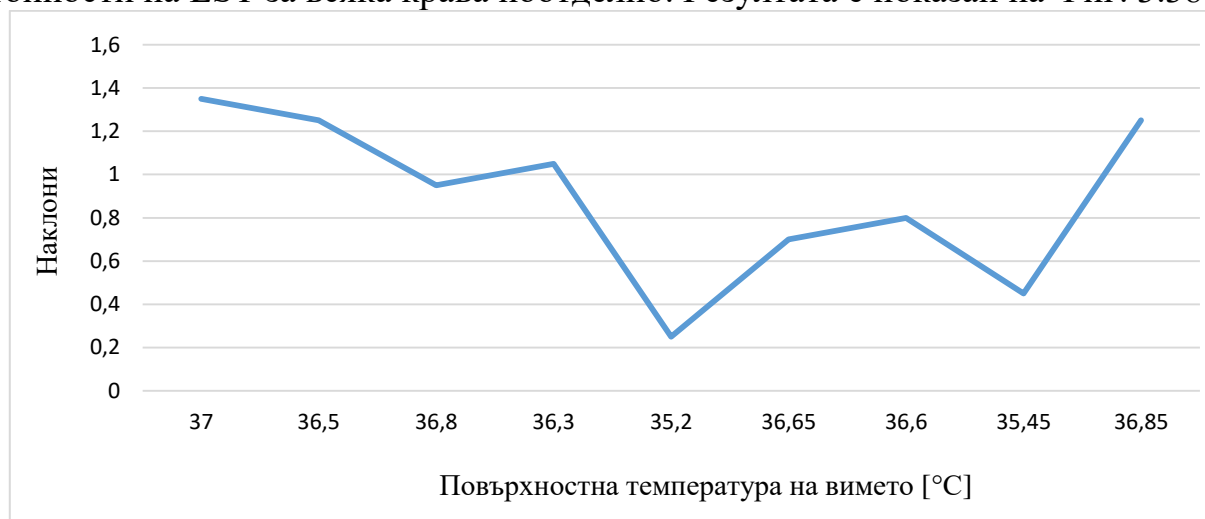
Фиг. 3.30. Пример

Поради факта, че целта е да се наблюдават кравите в нормалната им климатична среда са избрани групата включваща всички крави, намиращи се при ТНІ под 72. Стойностите на UST са между 35,2°C и 37°C. Корелационния коефициент е между UST и SST е 0,90, между RT и FB е 0,65, между LST и UST е 0,45 и между LST и SST е 0,39. Зависимостта между FB и RT при стойности на ТНІ до 72 е показана на Фиг. 3.31.



Фиг. 3.31. Зависимостта на честотата на дишане от ректалната температура, при стойности на температурно-влажностния индекс до 72.

След показването на графиките на зависимостите между UST и LST и повърхностните температури на трите различни точки на краката и точка от плешката за всички крави с THI под 72, е сметнато за необходимо да се изчисли функцията на наклона на LST за всички крави. За стойностите на x е приет поредния номер на крава, като е започнато от 1, които съответстват на стойностите на UST, а за стойностите на y са приети подредените измерени стойности на LST за всяка крава поотделно. Резултата е показан на Фиг. 3.38



Фиг. 3.38. Функцията на наклона за повърхностната температура на краката за всички крави.

След това е изчислена функцията на наклона на средната повърхностна температура на краката и тази на плешката за всички крави. За стойностите на x е приет поредния номер на крава, като е започнато от 1, които съответстват на стойностите на UST, а за стойностите на y са приети подредените средни аритметични стойности на LST и на измерените стойности на повърхностната температура в точка от плешката за всяка крава поотделно. Резултата е показан на Фиг. 3.39.



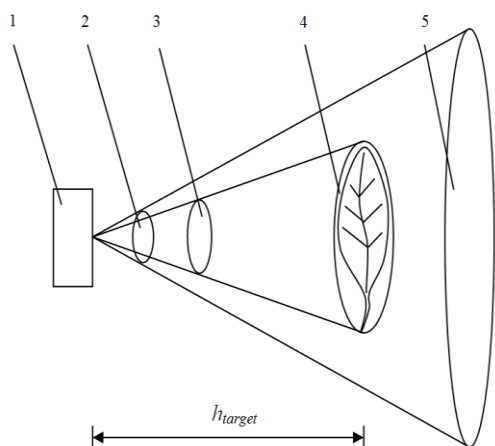
Фиг. 3.39. Функцията на наклона на средната повърхностна температура на краката и тази на точка от плешката за всички крави.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА Разработване на радиометричен подход за измерване на температурата на растителен лист.

В тази глава се показва значението на инфрачервената радиометрия при провеждането на различни изследвания на повърхностната температура на растения. Разглеждат се факторите, които влияят върху измерванията и се очертава тяхното значение. Направени са изводи за значението на разстоянието между термичната камера и обекта на изследване.

4.1. ВЪВЕДЕНИЕ

4.2. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗА РАЗРАБОТКАТА НА РАДИОМЕТРИЧЕН ПОДХОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА РАСТИТЕЛЕН ЛИСТ.



Фиг. 4.1. Обща настройка за радиометрично изследване на растителен лист: 1-Радиометър; 2-Ъгъл на наблюдение на радиометъра; 3-Ъгъл под който радиометъра регистрира листото; 4- Изследваната листна повърхност на растението, която произвежда радиация (цел); 5- Излъчване от околната за листото повърхност (сцена), h_{target} – Разстояние до целта

При описване на енергийните взаимодействия в една система трябва да се вземат под внимание всички фактори оказващи влияние и изразяването им може да се опише с диференциално уравнение, което ще изглежда по следния начин:

$$\frac{dL_{\lambda}}{dz} = -(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})L_{\lambda} + \alpha^{(a)}L_{\lambda,black\ b.} + L_{\lambda,scattered} \quad (4.7.)$$

Където $\alpha^{(s)}$ е коефициент на разсейване на атмосферата, $\alpha^{(a)}$ е коефициентът на поглъщане на атмосферата, а последната съставка $L_{\lambda,scattered}$, показва разсейването от други източници. В нашия случай разстоянието от обекта до камерата е относително малко и граничните съседни обеми са със същата температура, от което следва, че тази съставка на практика не оказва влияние и може да бъде премахната. След известни преобразувания достигаме до израз за общия енергиен поток достигащ до апертурата на радиометъра.

$$\Phi_{\lambda,r} = S_r \Omega_r \tau_r \left\{ \epsilon_t e^{-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})Z} F(T_t; \lambda_1, \lambda_2) + \frac{\alpha^{(a)}}{\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)}} \left[1 - e^{-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})Z} \right] F(T_a; \lambda_1, \lambda_2) \right\} \quad (4.14.)$$

Където $\Phi_t = S_r \Omega_r \tau_r \varepsilon_t e^{-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})z} F(T_t; \lambda_1, \lambda_2)$ (4.17.) е потока идващ от обекта, а $\Phi_a = \frac{\alpha^{(a)}}{\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)}} \left[1 - e^{-(\alpha^{(s)} + \alpha^{(a)})z} \right] F(T_a; \lambda_1, \lambda_2)$ (4.18.) е потока от атмосферата.

4.3. Изчислителна част за разработката на радиометричен подход за измерване на температурата на растителен лист

На основата на развитата в т. 4.2 теория е направено радиометрично изследване на растителен лист, при фиксиран ъгъл на наблюдение на радиометричния сензор. Някои от растителните видове притежават листа със сравнително сложна форма, но на голяма част от тях листата им имат изпъкнала, равнинна, овална форма почти симетрична спрямо две взаимно перпендикулярни оси, което я прави много близка до елиптичната. За нуждите на симулацията можем да апроксимираме формата на растителен лист към тази на елипса. Избрано е елипсовидно листо с дължина 25cm и ширина 20cm. Формата му може да се апроксимира до елипса ($a=0.125m$, $b=0.1m$) с лице

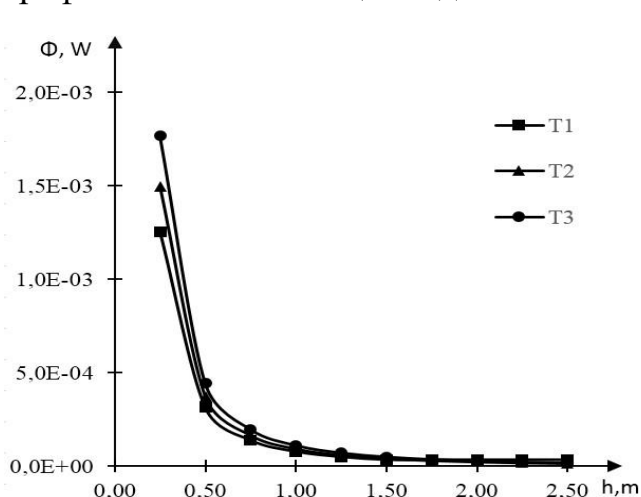
$$S_t = \pi ab \quad (4.23.)$$

Където a е дължината на главната полуос на елипсата, а b е дължината на малката полуос. От тук за лицето на обекта се получава $S_t = 0,039m^2$. Нека при така зададените параметри ъглополовящата на ъгъла на наблюдение на радиометъра да бъде перпендикулярна на пресечната точка на осите на елипсата. Ъгълът, под който радиометъра регистрира интересувашата ни част от листото, се променя в зависимост от разстоянието до камерата. Растенията, които са в добро здраве имат плътни и еластични листа, докато заболели (някои болести) или с недостатъчно съдържание на влага променят известна част от своите физически параметри.

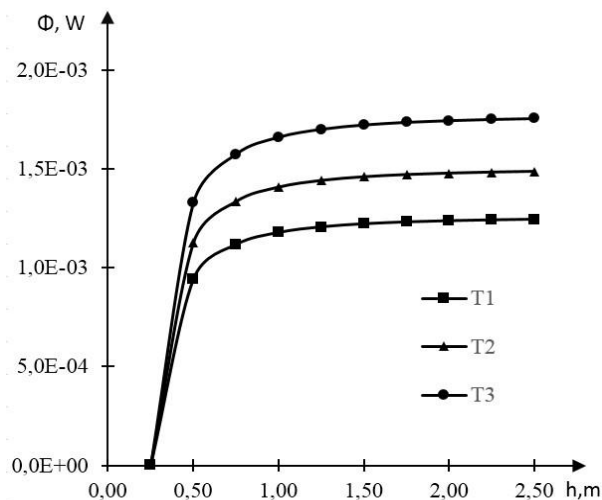
За целите на симулацията избираме следните параметри: [55,125,142,165,166]: $T_t=283, 293, 303K$; $\lambda_1=8\mu m$; $\lambda_2=12\mu m$; $\varepsilon_t=0,88$; $\varepsilon_{сцена}=0,88$; $\alpha^{(s)}=0,03km^{-1}$; $\alpha^{(a)}=0,4km^{-1}$; $\Omega_r = 6,25 \cdot 10^{-1}$; $\tau_r = 1$; $S_r = 8 \cdot 10^{-5}m^2$

От особена важност е да се сравни потока, идващ от листото с потока идващ от атмосферата и сцената и как се променят те с промяната на разстоянието от камерата до изследвания обект, при различни площи и температури. Проследено е как влияе промяната на разстоянието на радиометричната апаратура до обекта върху топлинния поток, който влиза в апертурата на радиометъра от обекта при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25 m до 2,5 m, през 0,25 m за три различни температури. Сцената е на един метър от обекта. Резултатите са показани в Табл. 4.1. Вижда се, че при близки коефициенти на излъчване на обекта и на сцената, след третото увеличение на разстоянието стойността на потока идващ от обекта рязко намалява и стойностите му стават много малки в сравнение с първите три изчисления, което показва, че от практическа гледна точка е добре да се правят измервания при малки разстояния. На фиг. 4.2 са фамилия от графики от данните от табл. 4.1. След това се проследява как влияе промяната на разстоянието от радиометъра до обекта върху общия останал топлинен поток, който влиза в

апертурата на радиометъра при три различни температури. Резултатите са показани в Табл. 4.2. Вижда се, че при близки коефициенти на излъчване на обекта и на сцената, след третото увеличение на разстоянието стойността на общия останал поток идващ от обекта рязко се увеличава и стойностите му стават много големи в сравнение с първите три изчисления. На фиг. 4.3 са фамилия от графики съответстващи на данните от табл. 4.2

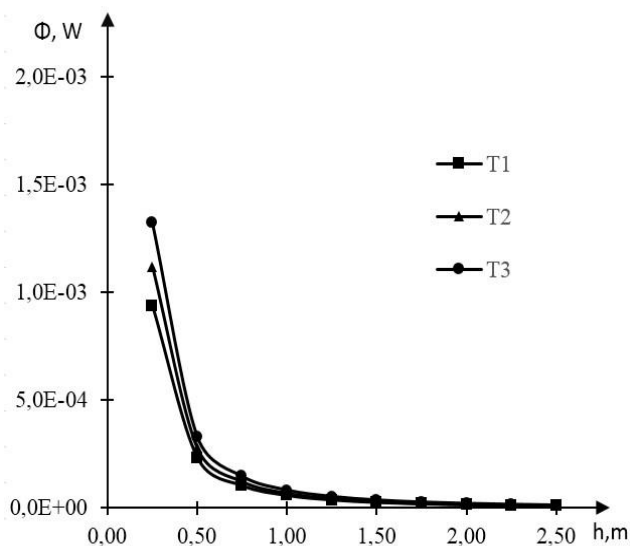


Фиг. 4.2. Изменението на топлинния поток, който влиза в апертурата на радиометъра от обект с лице $S_{\text{обект}} = 0,039 \text{ m}^2$, при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25 m до 2,5 m, през 0,25 m, за три различни температури.

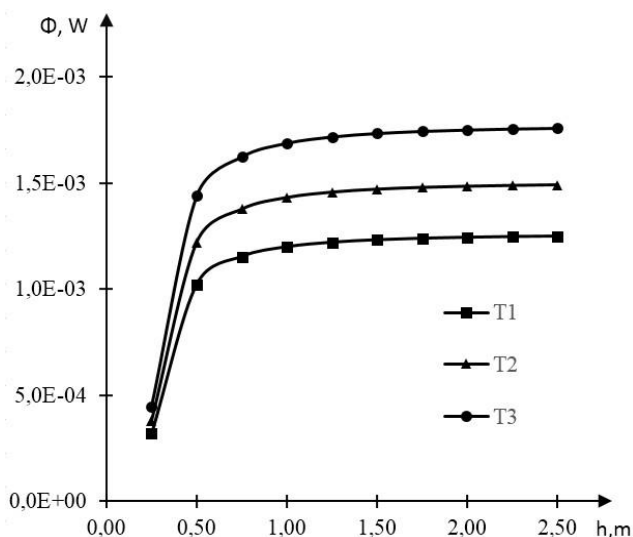


Фиг. 4.3. Стойностите на общия останал топлинен поток, който влиза в апертурата на радиометъра при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25 m до 2,5 m, през 0,25 m, при три различни температури, обект с лице $S_{\text{обект}} = 0,039 \text{ m}^2$ и $\epsilon_{\text{сцена}} = 0,88$.

След това е проследен топлинния поток, който влиза в термокамерата от обекта при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25m до 2,5m, през 0,25m. но при площ на листото с 25% по-малка или $S_{\text{обект}} = 0,0292 \text{ m}^2$. Резултатите са в Табл. 4.3 и показват, че когато площта на листото е значително по-малка от площта, която радиометъра регистрира, след увеличението на разстоянието от радиометъра до обекта над 0,75m стойностите на потока идващ от обекта също стават много малки, което показва, че висока точност може да се очаква при измервания от малки разстояния. На фиг. 4.4 са показани фамилия от графики съответстващи на данните от Табл. 4.3. След това е проследено как промяната на разстоянието на радиометричната апаратура до обекта влияе върху общия останал топлинен поток, който влиза в термокамерата отново при различни температури, но при по-малка площ на изследвания обект. Резултатите са в табл. 4.4 и показват, че когато площта на листото е значително по-малка от площта, която радиометъра регистрира, след увеличението на разстоянието от радиометъра до обекта над 0,75m стойностите на общия останал поток стават много големи, което насочва, че висока точност може да се очаква при измервания от малки разстояния. На фиг. 4.5 са показани фамилия от графики съответстващи на данните от табл. 4.4.



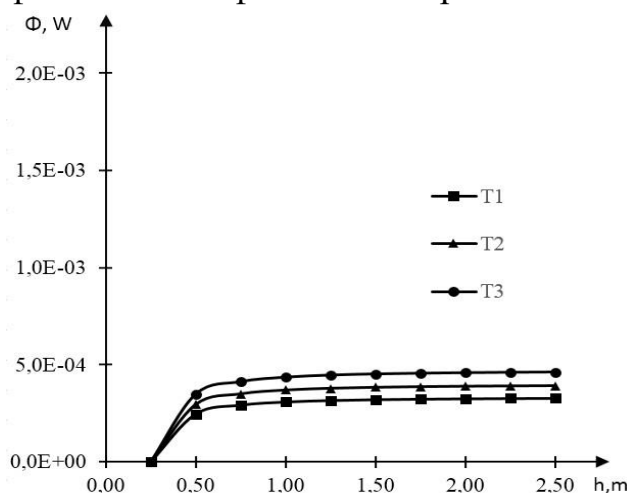
Фиг. 4.4. Изменението на топлинния поток, който влиза в апертурата на радиометъра от обект с лице $S_{\text{обект}} = 0,0292 \text{ m}^2$, при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25 m до 2,5 m, през 0,25 m за три различни температури.



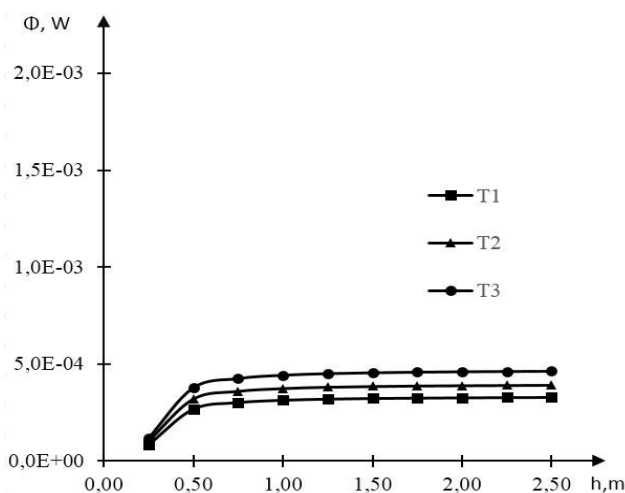
Фиг. 4.5. Стойностите на общия останал топлинен поток, който влиза в апертурата на радиометъра при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25 m до 2,5 m, през 0,25 m, при три различни температури, обект с лице $S_{\text{обект}} = 0,0292 \text{ m}^2$ и $\epsilon_{\text{обект}} = 0,88$

След като са разгледани случаите, когато коефициента на излъчване на обекта на изследване и на сцената са с много близки стойности, се изследва поведението на общия останал поток при същите разстояния и при съответната им промяна и при същите три различни температури, но сцената представлява стена от широко разпространения в практиката полиетилен с ниска плътност (LDPE) с много по-нисък от изследвания обект коефициент на излъчване $\epsilon_{\text{сцена}} = 0,23$. LDPE материалите са популярни за направа на оранжерии, а ъгълът под който радиометъра регистрира листото е приблизително равен на ъгъла на наблюдение на сензорната матрица на радиометъра. Резултатите са показани в табл. 4.5. Видно е, че когато площта на листото е сравнима с площта, която радиометъра регистрира и коефициента на излъчване на сцената е много по-малък от този на обекта, след увеличението на разстоянието от радиометъра до обекта над 0,5m стойностите на общия останал поток стават много големи. Резултатите са показани на фиг. 4.6. като фамилия от криви. След това е представена близка до реалността ситуация като се изследва промяната на общия останал поток при същите разстояния и при съответната им промяна и при същите три различни температури, но сцената е стена от полиетилен с ниска плътност [LDPE] с коефициент на излъчване $\epsilon_{\text{сцена}} = 0,23$, а ъгълът под който радиометъра регистрира листото е много по-малък от ъгъла на наблюдение на сензорната матрица на радиометъра. Резултатите са показани в табл. 4.6. и се вижда, че когато площта на листото е много по-малка от площта, която радиометъра регистрира и коефициента на излъчване на сцената е много по-малък от този на обекта, след увеличението на разстоянието от радиометъра до обекта над 0,5m стойностите на общия останал поток стават много големи и показват отново, че

е препоръчително да се измерва от малки разстояния. Резултатите са показани на фиг. 4.7. като фамилия от криви.



Фиг. 4.6.. Изменението на общия останал топлинен поток, който влиза в апертурата на радиометъра при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25m до 2,5m, през 0,25m, за три различни температури, като сцената е стена от полиетилен с ниска плътност (LDPE) с коефициент на излъчване $\epsilon_{\text{сцена}}=0,23$, а ъгълът под който радиометъра регистрира листото е приблизително равен на ъгъла на наблюдение на сензорната матрица на радиометъра.



Фиг. 4.7. Изменението на общия останал топлинен поток, който влиза в апертурата на радиометъра при промяна на дистанцията на измерванията от 0,25m до 2,5m, през 0,25m, за три различни температури, като сцената е стена от полиетилен с ниска плътност (LDPE) с коефициент на излъчване $\epsilon_{\text{сцена}}=0,23$, а ъгълът под който радиометъра вижда листото е много по-малък от ъгъла на виждане на сензорната матрица на радиометъра.

4.4. Научно-приложни приноси

- 4.4.1. Разработен е подход за оценка на промяната на повърхностната температура на човешко лице по време на умствено натоварване, чрез инфрачервена термография (от стр. 56 до стр. 62, фиг. 2.2 и фиг. 2.3, таблици от 2.1 до 2.4).
- 4.4.2. Разработен е радиометричен модел на излъчванията в инфрачервената област от диви животни, с цел локализацията им в естествената им среда (от стр. 62 до стр. 70, формули от 2.2 до 2.13, фигури 2.4 и 2.5, табл. 2.5).
- 4.4.3. Разработен е подход за откриване на топлинен стрес при крави за мляко, чрез безконтактно, многоточково, радиометрично измерване в инфрачервения спектър, с оценка на повърхностната температура на вимето. (от стр. 79 до стр. 92, формули от 3.21 до 3.24, фигури от 3.12 до 3.28, табл. 3.1)
- 4.4.4. Разработена е методика за проследяване на физиологичното състояние на млекодайки крави, като се използва ректалната температура, повърхностната температура в три точки на заден крайник, температурно-влажностния индекс, повърхностните температури на виме и плешка (от стр. 92 до стр. 102, формули от 3.25 до 3.27, фигури от 3.29 до 3.39, табл. 3.2).

4.4.5. Разработен е радиометричен подход за измерване на повърхностна температура на растителен лист (от стр. 104 до стр. 124, формули от 4.1 до 4.25, фигури от 4.1 до 4.7, таблици от 4.1 до 4.6)

4.5. ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- 4.5.1. Разработен е и е приложен на практика протокол за извършване на измерването. За разлика от други изследвания са избрани седем зони на интерес (фиг. 2.3). Резултатите показват, че термографията може да участва в модели за оценка на въздействието на различни мисловни процеси върху промяната на повърхностната температура на човешкото лице и други физиологичните реакции (табл. 2.4).
- 4.5.2. С помощта на математически радиометричен инструментариум (формули от 2.2 до 2.13), са направени изчисления на топлинния поток от обекта и общия останал поток при различни височини и различни температури (табл. 2.5). Резултатите (табл. 2.5 и фиг. 2.5) показват, че методът е ефективен за детектиране от височина на обекти с различна температура от тази на околната среда и че може да участва в механизми за изследвания на животни извършвани от въздуха, в техните естествени условия на живот.
- 4.5.3. С уред „Kestrel“ е измерван ТНІ и кравите са разделяни на три групи съгласно показанията му. Придобити са термографски изображения от зоните на интерес. Приложена е система за корекция на грешки. Изчислени са корелации и наклони (формули 3.22 и 3.24), като са намерени определени зависимости. Резултатите (табл. 3.1) могат да се използват за известяване на фермерите и ветеринарите за наличие на прагова, стресова температура. Обработени са резултати (фиг. 3.15, фиг. 3.16 и фиг. 3.17), които показват, че инфрачервената термография при определени условия може да се използва за ранно откриване на топлинен стрес при крави за мляко, което може да спаси животни, да редуцира загуби от намаляване на качеството и количеството на млякото, да спести време и средства за терапии.
- 4.5.4. С уред „Kestrel“ е измерен ТНІ. Заснети са крави намиращи извън топлинен стрес, с ТНІ под 72. Със специализиран софтуер са свалени повърхностни температури от зоните на интерес. Измерени са ректалната им температура и честотата на дишане (табл. 3.2). Проследено е съвместното влияние на изследваните фактори. Направена е статистическа обработка на резултатите и са намерени зависимости. Обработени са резултати (табл. 3.2, от фиг. 3.31 до фиг. 3.39), които показват, че инфрачервената термография при определени условия може да се използва за проследяване на физиологичното състояние на крави отглеждани за мляко във ферми.
- 4.5.5. С помощта на математически радиометричен инструментариум (формули от 4.1 до 4.18, 4.24 и 4.25) и други (формули от 4.19 до 4.23) са изчислени стойностите на влизащите в апертурата на радиометъра

топлинен поток от обекта на изследване и целия останал топлинен поток, като разстоянието от радиометричната апаратура до обекта се променя от 0,25m до 2,5m, през 0,25m, при три различни температури и при сцени с близък и много различен коефициент на излъчване от този на изследвания обект. Сцената е на един метър от обекта. Резултатите (от табл. 4.1 до табл. 4.6 и от фиг. 4.2 до фиг. 4.7) доказват високата точност на измерванията при малки разстояния от обекта до радиометъра и когато разликите между ъгълът, под който радиометъра регистрира обекта и твърдия ъгъл на наблюдение на сензорната матрица са малки. Доказана е ефективността на подхода, при което са дадени ясни насоки за използването му в практиката.

5. Списък на публикациите

- 5.1 Kalin Dimitrov, Stanyo Kolev, Hristo Hristov and Viktor Mihaylov, „Evaluation of variances in infrared thermography of a human face during the mental workload“, 52th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2017), Nish, Serbia, 28-30 June 2017, pp 85-88, ISSN: 2603-3259
- 5.2 Kalin Dimitrov, Hristo Hristov and Stanyo Kolev, „Use of infrared radiometry in temperature measurement of wild animals“, 53th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2018), Sozopol, Bulgaria, June 28-30, 2018, Issue 1, pp. 167-170, ISSN online: 2603-3267, ISSN print: 2603-3259
- 5.3 Hristo Hristov, Kalin Dimitrov and Stanyo Kolev, „Use of infrared radiometry in temperature measurement of plant leaf“, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2019), Ohrid, North Macedonia, June 27-29, 2019, Issue 1, pp. 62-65, ISSN online: 2603-3267, ISSN print: 2603-3259
- 5.4 Hristo Hristov, Kalin Dimitrov and Stanyo Kolev, „Use of infrared radiometry in temperature measurement of plant leaf“, Intl J. Reasoning-based Intelligent Systems (IJRIS 2020) (В процес на отпечатване)
- 5.5 Hristo Hristov, Kalin Dimitrov and Toncho Penev, „Use of infrared thermography to monitor the physiological condition of dairy cows“, 12th international conference with international participation Electronica 2021 (В процес на отпечатване)

6. SUMMARY



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS

Department "Radio Communications and Video Technologies"

Mag. Eng. Hristo Ivanov Hristov

Abstract of Ph.D. Thesis

USE OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR RESEARCH OF LIVING TISSUES

The tasks of the dissertation are associated with the development of new approaches, models and methodologies for the study of living tissues through the use of infrared thermography.

In modern medicine, thermography is used as a non-invasive imaging tool. It is used for preliminary diagnosis of various types of tumors and various other diseases. It is used in rheumatology, dermatology, orthopedics, gynecology, cardiology, in kidney transplantation, neonatal physiology, fever screening etc. It is harmless to the patient. It is widely used in veterinary medicine and it provides diagnostic information. The method is gentle, does not cause additional stress in animals and serves for early diagnosis of diseases. Thermography is used successfully and in plant growing. It participates in studies of plant metabolism, in the monitoring of different pathogenic processes in tracing the absorption of the water and various other ingredients.

In the second chapter, a thermographic study is performed and an approach is developed to assess the influence of mental stress on the surface temperature of a human face. A radiometric model of the radiation in the infrared region by wild animals has been developed in order to localize them in their natural environment.

In the third chapter, an approach for detecting heat stress and a methodology for monitoring the physiological condition of dairy cows using infrared thermography, together with various physiological indicators and indices, are developed.

In the fourth chapter a radiometric approach for measuring the temperature of a plant leaf is developed. The values of the heat flux entering the aperture of the radiometer from the object of study and the rest of the heat flow at different distances, at different temperatures and in scenes with close and very different radiation coefficient from that of the object are calculated.