

Artykuł przeglądowy

Przydatność pomiarów termowizyjnych w stadach krów mlecznych

**Przemysław Racewicz¹, Jakub Sobek²,
Michał Majewski¹, Jolanta Różańska-Zawieja^{3#}**

¹Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Medycyny Weterynaryjnej i Nauk o Zwierzętach,
Zakład Weterynaryjnej Ochrony Zdrowia Publicznego,
ul. Słoneczna 1, 62-002 Złotniki

²Linc Polska Sp. z o.o.,
ul. Hallera 6/8, 60-104 Poznań

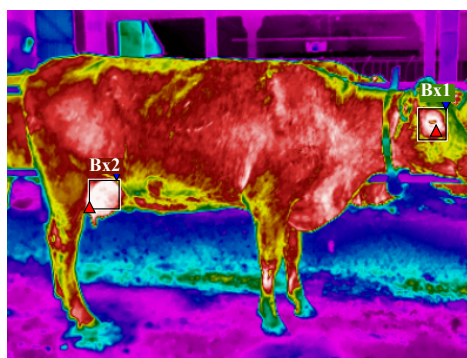
³Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Medycyny Weterynaryjnej i Nauk o Zwierzętach,
Katedra Genetyki i Podstaw Hodowli Zwierząt,
ul. Wołyńska 33, 60-637 Poznań; #e-mail: jolek@up.poznan.pl

Badanie termowizyjne (IRT) jest techniką bezdotykowej i zdalnej oceny rozkładu temperatury na powierzchni ciała zwierząt. Uzyskane w badaniu IRT wartości temperatur powierzchniowych zależą od ilościowego wpływu warunków środowiskowych otoczenia oraz odpowiedzi termoregulacyjnej zwierzęcia. Poza wielkością perfuzji krwi, temperatura skóry jest uzależniona od intensywności metabolizmu tkanek, rodzaju i barwy okrywy włosowej oraz grubości tkanki tłuszczowej. W zdrowym organizmie występuje wysoki stopień symetrii rozkładu temperatur pomiędzy poszczególnymi częściami ciała. Analiza powierzchniowego rozkładu temperatury badanego obszaru ciała zwierząt, które znajdują się w warunkach homeostazy z otoczeniem zewnętrznym, dostarcza wielu cennych informacji. Porównując te same części ciała można łatwo zidentyfikować cieplejsze punkty, a dzięki dodatkowej wiedzy uzyskanej podczas szerszej diagnostyki lekarsko-weterynaryjnej wzrasta szansa ustalenia przyczyny takiego stanu. Wiarygodność badania termowizyjnego jest uzależniona od parametrów technicznych kamer, warunków środowiskowych, doświadczenia operatora, indywidualnych cech zwierząt oraz metodologii badania. Ponieważ wiele czynników może mieć wpływ na powierzchniowy rozkład temperatury ciała zwierząt, a tym samym na wynik pomiaru termograficznego, podczas badań termowizyjnych należy zminimalizować wpływ wszelkich bodźców zakłócających pomiary. Dodatkowo, w celu obniżenia ryzyka błędnej interpretacji obrazu, należałoby stosować tzw. protokoły normalizacji parametrów obrazowania, czyli standardy, które pozwalałyby otrzymywać wiarygodne wyniki badań. Głównym ograniczeniem we wdrażaniu tych norm w termografii zwierząt hodowlanych jest brak możliwości porównywania ze sobą termogramów wykonywanych w różnych warunkach środowiskowych. Przeprowadzono badania, których

celem była ocena przydatności kamery termowizyjnej w diagnostyce zmian zapalnych w obrębie skóry u bydła. Stwierdzono, że zastosowana technika wykazuje duży potencjał w prognozowaniu lokalnych stanów zapalnych (choroby racic, wymienia, skóry). Konieczne jest opracowanie protokołów normalizacji parametrów obrazowania, czyli standardów, które pozwolą otrzymywać wiarygodne wyniki badań w różnych warunkach środowiskowych.

SŁOWA KLUCZOWE: termowizja / bydło mleczne / diagnostyka / lokalne stany zapalne

Obrazowanie w paśmie podczerwieni jest techniką bezdotykowej i zdalnej oceny rozkładu temperatury na powierzchni ciała (fot. 1). W weterynarii i naukach o zwierzętach jest wykorzystywane zarówno do celów diagnostycznych, jak i naukowych [14, 23]. Metoda ta pozwala na zobrazowanie promieniowania podczerwonego, a co za tym idzie, pozyskiwanie informacji o fizjologicznych oraz patologicznych procesach zachodzących w ciele zwierząt [3, 7, 24, 40]. Kamery termowizyjne to urządzenia przeznaczone do wykrywania, przetwarzania oraz zapisywania natężenia promieniowania podczerwonego [14].



Pomiary

Bx1	Max	35,7 °C
	Min	17,1 °C
	Average	28,7 °C
Bx2	Max	36,2 °C
	Min	21,6 °C
	Average	32,2 °C

Fot. 1. Termogram bocznej strony ciała krowy, przedstawiający rozkład temperatur powierzchniowych widzianych w obrazowaniu termograficznym z zaznaczonymi obszarami skóry stanowiącymi tzw. okna termiczne (badania własne)

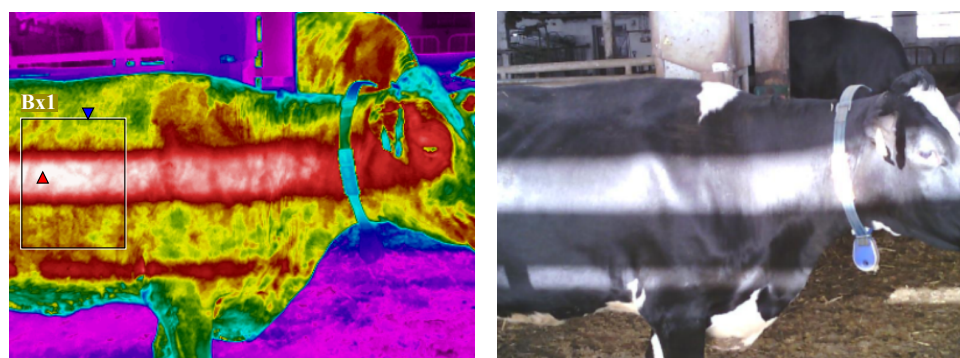
Phot. 1. Thermogram of the side of a cow's body, showing the distribution of surface temperatures seen in thermographic imaging, with 'thermal windows' on the skin indicated (our own work)

W przyrodzie promieniowanie podczerwone emitowane jest przez wszystkie obiekty o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (0 K, czyli $-273,15^{\circ}\text{C}$). Pasmo podczerwieni to całe spektrum elektromagnetyczne pomiędzy światłem widzialnym a światłem

mikrofalowym, zawierające się w długościach fal od 0,7 μm do 1000 μm . Znaczna część tego spektrum nie jest jednak przydatna w kamerach termowizyjnych. Wiele długości fal jest blokowanych przez panujące na Ziemi warunki atmosferyczne i gazy znajdujące się w atmosferze. Istotne są zatem tzw. okna widmowe lub okna transmisji atmosferycznej. Określają one pasma, które mogą być wykorzystane na Ziemi. Wyróżnia się 4 podstawowe pasma: bliska podczerwień (NIR) – 0,8-1,1 μm , krótka podczerwień (SWIR) – 0,9-2,5 μm , średnia podczerwień (MWIR) – 3-5 μm , daleka podczerwień (LWIR) – 7-14 μm .

Działanie kamer termowizyjnych polega na rejestracji na detektorze promieniowania podczerwonego wyemitowanego przez badany obiekt. Na detektorze promieniowanie podczerwone dla poszczególnych pikseli zamieniane jest na odpowiednią wartość oporu elektrycznego. Poziomy oporów z matrycy detektora są następnie przetwarzane do postaci cyfrowej, zapisywane i prezentowane na wyświetlaczu kamery w formie palety kolorów (termogramów), gdzie dany kolor odpowiada punktom o tej samej temperaturze [14, 19].

Opracowanie nowoczesnych detektorów o wysokiej rozdzielczości oraz czułości termicznej, a także rozwój oprogramowania i systemów cyfrowego przekształcania obrazów przyczynił się w ostatnich latach do wzrostu popularności tej techniki, jako metody diagnostycznej służącej do oceny określonych schorzeń u zwierząt hodowlanych. Masowa produkcja kamer termowizyjnych spowodowała w ostatnich latach znaczny spadek ich cen i popularyzację w różnych segmentach życia. Obecnie termografia jest wykorzystywana między innymi do badania urazów i stanów zapalnych układu ruchu [1, 14], wykrywa-



Pomiary

Bx1	Max	42,6 °C
	Min	26,7 °C
	Average	32,8 °C

Fot. 2. Zdjęcie oraz termogram bocznej strony ciała krowy. Termogram przedstawia wpływ działania promieniowania słonecznego na zróżnicowanie temperatur powierzchniowych, widzianych w obrazowaniu termowizyjnym (badania własne)

Phot. 2. Photograph and thermogram of the side of a cow's body. The thermogram shows the effect of sunlight on the variation in surface temperatures seen in thermal imaging (our own work)

nia zapaleń wymienia [10, 30] i zapaleń dróg oddechowych u bydła [34], diagnozowania chorób zakaźnych (np. pryszczycy) [6, 31], badania cyklu rujowego oraz ciąży, kontroli dobrostanu i poziomu stresu [15].

Badanie termowizyjne (IRT – infrared thermography) zwierząt polega na pomiarze temperatury zlokalizowanej na powierzchni ciała. W przypadku zwierząt stałocieplnych, uzyskane w badaniu IRT wartości temperatury zależą od ilościowego wpływu warunków środowiskowych otoczenia oraz odpowiedzi termoregulacyjnej zwierzęcia [8, 37]. Poza wielkością perfuzji krwi, temperatura skóry jest uzależniona od intensywności metabolizmu tkanek, rodzaju i barwy okrywy włosowej oraz grubości tkanki tłuszczowej [11, 12, 20].

Ważnym efektem termoregulacji jest układ krążenia. Utrata ciepła do otoczenia na drodze promieniowania, konwekcji i przewodzenia jest uzależniona głównie od skórno przepływu krwi oraz od temperatury krwi tętniczej [12].

Całkowita energia promieniowania emitowana lub pochłaniana przez ciało zwierzęcia zależy od emisyjności skóry danego gatunku. Współczynnik emisyjności jest niezbędny do określenia temperatury na powierzchni ciała. Należy pamiętać, że ciała o temperaturach powierzchniowych wyższych niż zero bezwzględne, emitują energię na wszystkich długościach fali widma elektromagnetycznego. Największa ilość energii promieniowania podczerwonego (IR) jest emitowana w zakresie długości fali od 7 do 14 μm (LWIR). Dlatego do badań wykorzystano kamerę pozwalającą na rejestrację obrazu dokładnie w tym samym paśmie. U zwierząt 40-60% utraty ciepła następuje w wyniku promieniowania cieplnego i mieści się w zakresie współczynnika emisji 0,97-0,98 [29].

Procesy fizjologiczne zachodzące w tkankach zwierząt stałocieplnych mają wpływ na ich temperaturę. Czynnikiem sprawczym, wpływającym na różnice temperatury w tkankach, jest perfuzja krwi [18]. W zdrowym organizmie występuje wysoki stopień symetrii rozkładu temperatur pomiędzy poszczególnymi częściami ciała. Analiza powierzchniowego rozkładu temperatur badanego obszaru ciała zwierząt, które znajdują się w warunkach homeostazy z otoczeniem zewnętrznym, dostarcza wielu cennych informacji. Porównując te same części ciała można łatwo zidentyfikować cieplejsze punkty, a dzięki dodatkowej wiedzy uzyskanej podczas szerszej diagnostyki lekarsko-weterynaryjnej wzrasta szansa ustalenia przyczyny takiego stanu [5]. Wahania rozkładu temperatur na powierzchni ciała wynikają nie tylko z wielkości skórno przepływu krwi, ale również z intensywności metabolizmu tkanek, gęstości okrywy włosowej oraz grubości tkanki tłuszczowej [11]. Znaczącym czynnikiem, który dodatkowo oddziałuje na wartości temperatury powierzchniowej jest mikroklimat.

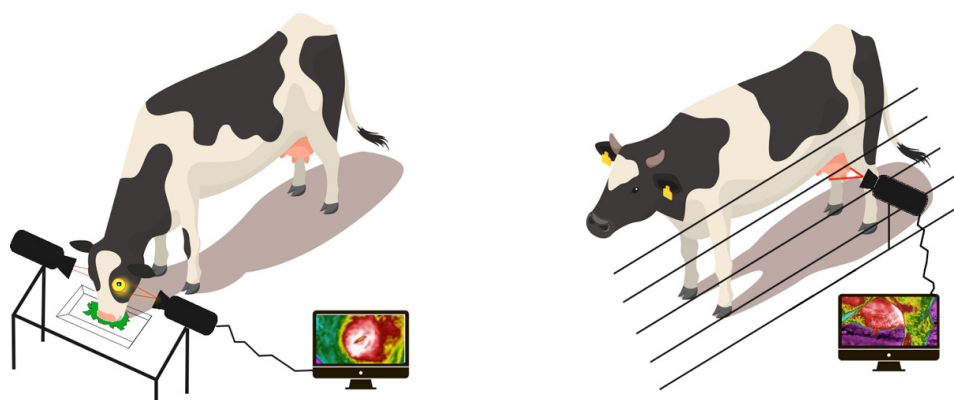
Ważnym elementem podczas pomiarów termograficznych jest utrzymanie w obiekcie, w którym przeprowadza się badanie termowizyjne, możliwie stałej temperatury oraz wilgotności względnej. Ponadto zaleca się, żeby w miejscu, gdzie przeprowadzane są pomiary był ograniczony przepływ powietrza. Zwiększona cyrkulacja powietrza może powodować nierównomierny rozkład temperatury [24]. W niestabilnym termicznie otoczeniu niewielkie, choć istotne różnice w interpretacji termogramu mogą zwiększać odsetek wyników fałszywie dodatnich lub fałszywie ujemnych, co w konsekwencji może skutkować niepoprawną diagnozą stanu zdrowia zwierzęcia.

Na dokładność badania termowizyjnego ma także wpływ natężenie światła (fot. 2). Najbardziej wiarygodne wyniki pomiarowe uzyskuje się w pomieszczeniach słabo oświetlonych.

W sytuacji, gdy ciało zwierzęcia jest wystawiane na działanie promieniowania słonecznego, część promieniowania widzialnego może zostać zaabsorbowana i ponownie emitowana w postaci ciepła lub promieniowania podczerwonego, co będzie skutkowało trudnościami w interpretacji obrazu [7].

Przed przystąpieniem do badania każde zwierzę powinno być poddane aklimatyzacji do warunków otoczenia. Aklimatyzacja powinna trwać minimum kilka minut, a w przypadku, gdy różnica temperatur między pomieszczeniem, w którym przeprowadza się badanie a miejscem, z którego przybyło zwierzę jest duża, czas adaptacji powinien być wydłużony [2, 3]. Potwierdzeniem tej tezy są badania Schaefer i wsp. [35], w których oceniano efektywność termografii jako metody prognostycznej w diagnostyce enzootycznej bronchopneumonii cieląt (syndrom oddechowy bydła; BRDC – Bovine Respiratory Disease Complex). Church i wsp. [7] zwracają uwagę na konieczność zapewnienia stabilnych warunków atmosferycznych podczas termografii, ponieważ nawet niewielka fluktuacja temperatury ($<0,8^{\circ}\text{C}$) na powierzchni ciała zwierzęcia może prowadzić do wzrostu odsetka nieprawidłowych diagnoz.

W trakcie rejestracji obrazów termograficznych zaleca się, aby badane zwierzę znajdowało się w ustalonej pozycji i odległości od kamery. Zaleca się także, aby odległość między kamerą a ciałem zwierzęcia była nie mniejsza niż 1,0-1,2 m [10]. Fotografowany obszar ciała powinien być ustawiony prostopadłe do osi optycznej obiektywu kamery termowizyjnej. Niewłaściwe ustawienie kamery może spowodować wystąpienie zjawiska paralaksy. Zmiana kąta nachylenia obiektywu kamery lub badanego obszaru ciała może spowodować nieprawidłowy odczyt temperatury (zwykle zaniża jej wartości), co prowadzi w konsekwencji do obniżenia dokładności pomiaru. Z tego względu zaleca się, aby pomiary temperatury przy użyciu termowizji odbywały się w warunkach terenowych w sposób możliwie jak najbardziej zautomatyzowany [2, 3, 10, 32]. Przykładem zastosowania

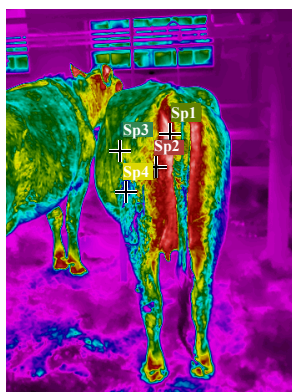


Rys. Przykłady zastosowania automatycznych systemów termowizyjnych służących do oceny różnic temperaturowych w określonych rejonach ciała krów

Fig. Examples of the use of automatic thermal imaging systems for assessing temperature differences in specific regions of a cow's body

Pomiary

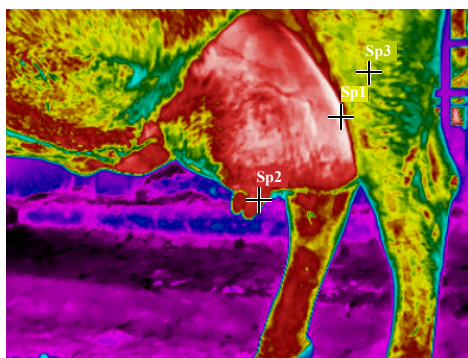
Sp1	36,0 °C
Sp2	29,4 °C
Sp3	22,8 °C
Sp4	10,4 °C



Fot. 3. Profil termiczny zadu, wymienia i tylnych kończyn od strony doogonowej – zwierzę po prawej, oraz prawej powierzchni ciała krowy – zwierzę po lewej (badania własne)

Fig. 3. Thermal profile of the rump, udder and hind limbs from the caudal side – animal on the right, and the right surface of a cow's body – animal on the left (our own work)

wania takich systemów mogłyby być stacje pomiarowe montowane na stanowisku automatycznego systemu zadawania paszy lub wody, służące do odczytu promieniowania podczerwonego z okolicy skóry i kącików oczu u krów. Innym przykładem może być zastosowanie systemu kamer i urządzeń pomiarowych szwedzkiej firmy Agricom zamon-

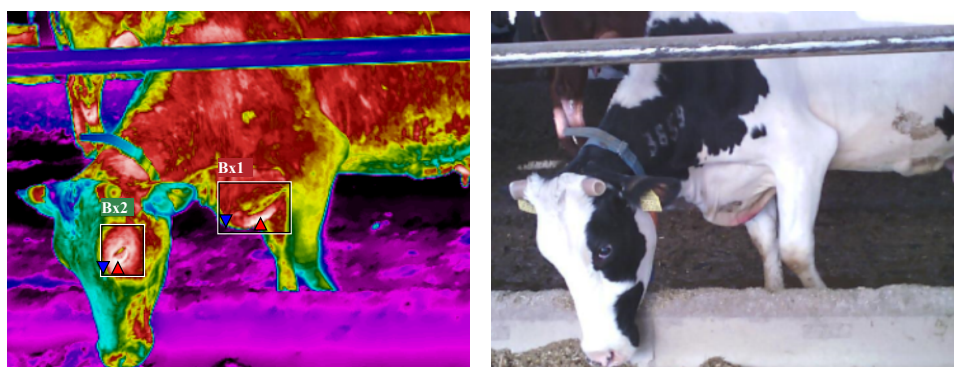


Pomiary

Sp1	36,8 °C
Sp2	31,8 °C
Sp3	25,8 °C

Fot. 4. Zdjęcie oraz termogram bocznej powierzchni wymienia od strony lewej – ćwiartka przednia lewa i tylna lewa (badania własne)

Phot. 4. Photograph and thermogram of the lateral surface of the udder from the left side – front left and rear left quarters (our own work)



Pomiary

Bx1	Max	35,3 °C
	Min	6,6 °C
	Average	25,4 °C
Bx2	Max	35,5 °C
	Min	17,7 °C
	Average	29,1 °C

Fot. 5. Zdjęcie oraz termogram bocznej powierzchni skóry głowy i tułowia krowy od strony lewej, z zaznaczonym obszarem, w którym odnotowano wyższą temperaturę w stosunku do okolicznych tkanek (badania własne)

Phot. 5. Photograph and thermogram of the lateral surface of the skin of the head and torso of a cow from the left, with the area indicated where the temperature was higher in relation to the surrounding tissues (our own work)

Pomiary

Bx1	Max	35,7 °C
	Min	6,6 °C
	Average	23,4 °C
Sp1		26,8 °C



Fot. 6. Zdjęcie oraz termogram bocznej powierzchni skóry okolicy stawu skokowego i śródstopia widziane od strony prawej, z zaznaczonym obszarem, w którym odnotowano najwyższą temperaturę w stosunku do okolicznych tkanek (badania własne)

Phot. 6. Photograph and thermogram of the lateral surface of the skin around the hock and metatarsus seen from the right, with the area indicated where the temperature was highest in relation to the surrounding tissues (our own work)

towanych w korytarzu przepędowym prowadzącym do hali udojowej, którego celem jest ocena potencjalnych zmian zapalnych w wymieniu [16].

Z badań Stewart i wsp. [39] wynika, że w obrazowaniu IRT wartość rozkładu temperatury z okolicy środkowego kąta oka koreluje z temperaturą wewnętrzną ciała. W nomenklaturze termograficznej obszar ten opisuje się jako tzw. okno termiczne organizmu. Jest to jedno z miejsc na termograficznej mapie ciała, które w minimalnym stopniu podlega procesom termoregulacji [29, 39].

Zastosowanie termowizji do pomiaru temperatury samego oka i jego okolicy jest szybkie, stosunkowo łatwe i mniej inwazyjne w porównaniu z alternatywnymi metodami pomiaru temperatury ciała, takimi jak termometria doodbytnicza, mikroczipy termiczne czy bolusy dozwaczowe, rejestrujące parametry fizjologiczne u przeżuwaczy [10].

Wiarygodność badania termowizyjnego jest uwarunkowana szeregiem czynników zależnych od parametrów technicznych kamer, warunków środowiskowych, doświadczenia operatora, indywidualnych cech zwierząt oraz metodologii badania. Ponieważ wiele czynników może mieć wpływ na powierzchniowy rozkład temperatury ciała zwierząt, a tym samym na wynik pomiaru termograficznego, podczas badań termowizyjnych należy zminimalizować wpływ wszelkich bodźców zakłócających pomiary [3, 40]. Na tym etapie kluczowe znaczenie ma prawidłowy dobór sprzętu oraz dostosowanie parametrów kalibracyjnych kamery do warunków obiektu, w którym dokonywany jest odczyt, czyli temperatura oraz wilgotność względna powietrza, odległość kamery od badanego obiektu oraz emisyjność badanej powierzchni [14, 17].

W pomiarach termowizyjnych bardzo ważną rolę odgrywa standaryzacja. Ujednolicenie metodologii w badaniach daje możliwość porównywania wyników oraz warunkuje poprawność ich interpretacji. Obecnie istnieje kilka podstawowych typów standardów stosowanych w dziedzinie pomiarów temperaturowych człowieka. Niektóre z nich odnoszą się do technicznych aspektów termografii, takich jak specyfikacja stosowanych urządzeń i systemów pomiarowych. Istnieje również kilka norm poświęconych metodom testowania i kalibracji sprzętu termowizyjnego, np. zastosowanie określonych modeli statystycznych (regresja paraboliczna, krzywa ROC – receiver operating characteristic curve) oraz określonych algorytmów, w celu stworzenia standardu dla prawidłowej oceny gorączki u ludzi [26, 37]. Niestosowanie się do określonego protokołu diagnostycznego prowadzi często do błędów pomiarowych i interpretacyjnych [3].

W weterynarii i naukach pokrewnych nadal istnieje ogromne zapotrzebowanie na prowadzenie badań naukowych w celu ujednolicenia informacji z zakresu badań z wykorzystaniem kamer IRT. Głównym ograniczeniem we wdrażaniu norm dotyczących termografii zwierząt jest brak możliwości porównywania ze sobą termogramów, wykonywanych w różnych warunkach środowiskowych [38]. W celu zminimalizowania ryzyka błędnej interpretacji obrazu, w najbliższym czasie powinny zostać opracowane tzw. protokoły normalizacji parametrów obrazowania, czyli standardy, które pozwalałyby otrzymywać wiarygodne wyniki badań. Trudność standaryzacji polega na tym, że wiele czynników środowiskowych oraz fizjologicznych organizmu ma wpływ na wyniki badań [37, 38]. Przestrzeganie określonych zaleceń w wykonywaniu badań może przyczynić się do zobiektywizowania procesów analizy badań termograficznych i znacznego zmniejszenia ilości błędnych diagnoz [38]. Dopelnieniem działań standaryzacji powinno być organizo-

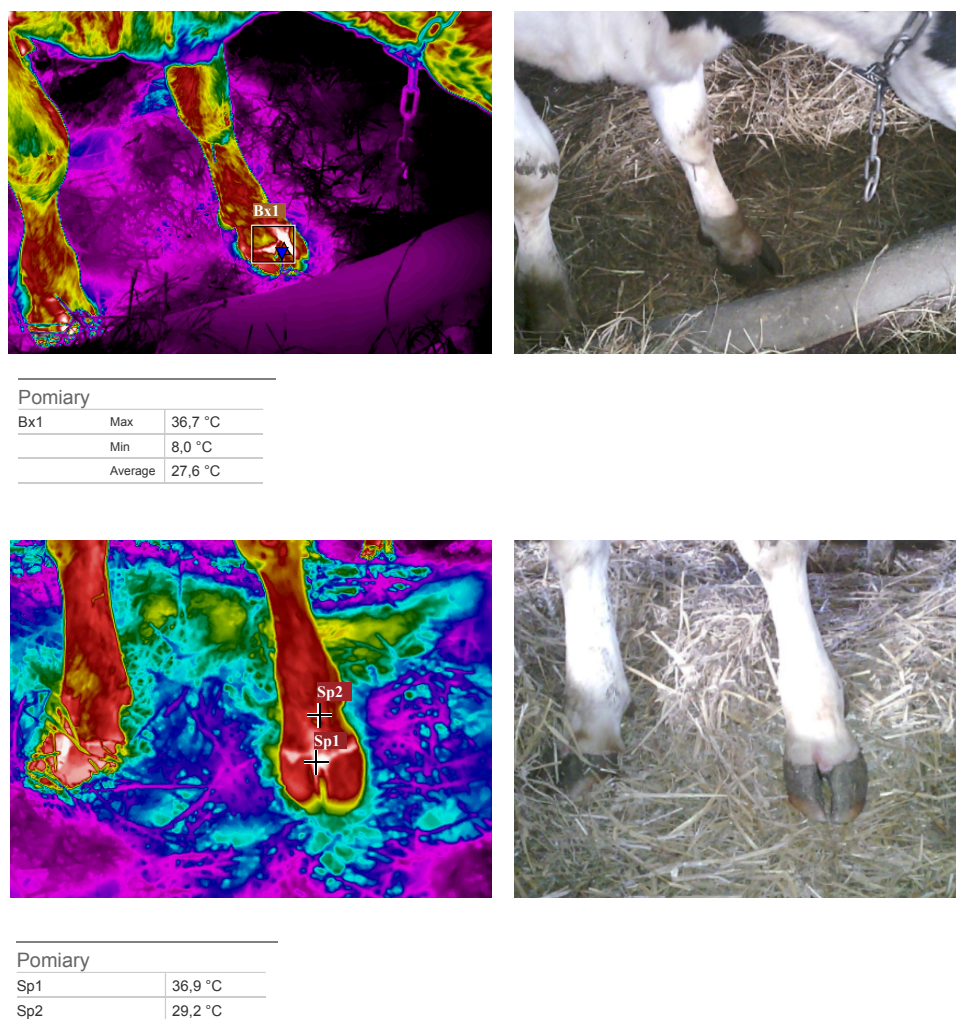
wanie szkoleń i warsztatów z zakresu termografii zwierząt, mających na celu podnoszenie kompetencji operatorów z zakresu wdrażania ściśle ustalonych procedur dotyczących obrazowania, zgodnego z założeniami danego standardu [28, 37].

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną normą cyfrowej wymiany informacji medycznych z zakresu diagnostyki obrazowej jest DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Standard DICOM powstał w celu popularyzacji cyfrowej wymiany danych, ułatwienia tworzenia oraz rozbudowy systemów archiwizacji obrazów diagnostycznych oraz wymiany informacji medycznych z innymi systemami informatycznymi stosowanymi w medycynie i weterynarii. Rozwój tego przedsięwzięcia z zakresu weterynaryjnych technik obrazowania diagnostycznego pozwoli na porównywanie pomiarów termograficznych przeprowadzanych przy użyciu różnych urządzeń i przez różnych operatorów, z uwzględnieniem różnych czynników mogących zakłócać wyniki pomiaru [36, 37].

Przeprowadzono badania, których celem była ocena przydatności kamery termowizyjnej w diagnostyce zmian zapalnych w obrębie skóry u krów mlecznych. Do badań zastosowano kamerę termowizyjną FLIR T540 z niechłodzonym, mikrobolometrycznym przetwornikiem obrazu w technologii VOx (Vanadium Oxide – tlenek wanadu) o efektywnej rozdzielczości 464x348px (161 472 pikseli). Przetwornik tej kamery pozwala na rejestrację obrazu w oknie widmowym LWIR z częstotliwością 30 klatek/s (30 fps). Temperaturowy zakres pomiaru zastosowanej kamery wynosi od -20°C do 120°C (od -4°F do 248°F). Czułość temperaturowa wybranej kamery to $<30\text{ mK}$ przy 30°C , co oznacza, że kamera pozwala na zobrazowanie różnic temperaturowych na poziomie $0,03^{\circ}\text{C}$. Dodatkowo kamera jest wyposażona w drugi przetwornik obrazu światła widzialnego o rozdzielczości 5 MPx. Dzięki temu możliwa jest jednoczesna rejestracja obrazu w paśmie podczerwonym, jak i w paśmie widzialnym. Jest to szczególnie przydatne przy późniejszej obróbce obrazów.

Na fotografii 3. przedstawiono profil termiczny prawej powierzchni ciała krowy (zwierzę po lewej) oraz zadu, wymienia i tylnych kończyn od strony doogonowej (zwierzę po prawej). Na podstawie uzyskanego obrazu stwierdzono różnice temperatury powierzchniowej w poszczególnych obszarach ciała. Temperatura otoczenia podczas detekcji wynosiła 5°C , a wilgotność względna 80%. Aparat został skalibrowany do temperatury otoczenia i warunków absorpcyjnych w czasie skanowania. Wartość emisyjności 0,95 została ustawiona w kamerze przed wykonaniem skanowania. Najwyższą temperaturę, wynoszącą $36,0^{\circ}\text{C}$ (Sp1 – kolor biały), zaobserwowano w okolicy odbytu i sromu oraz tylnej ściany wymienia. Wymienione struktury anatomiczne to tzw. okna termiczne, czyli obszary powierzchni skóry, które są dobrze perfundowane przez krew oraz miejsca, w których temperatura na powierzchni skóry jest wysoko skorelowana z temperaturą wewnętrzną ciała. Niższą temperaturę, wynoszącą $29,4^{\circ}\text{C}$ (Sp2 – kolor czerwony), odnotowano na tylnoprzysrodkowej powierzchni ud (*regio femoralis caudalis et medialis*) oraz dystalnych odcinkach kończyn tylnych, w okolicy *regio digitorum pedis*.

W wyniku oddziaływania chłodnego strumienia powietrza od strony lewej, na termogramie w okolicy bocznej prawego uda (*regio femoralis lateralis sinistra*) uzyskano temperaturę na powierzchni skóry równą $10,4^{\circ}\text{C}$ (Sp4 – kolor niebieski). Temperatura IR w okolicy pośladka lewego (*regio glutea sinistra*) wynosiła $22,8^{\circ}\text{C}$ (Sp3 – kolor zielony) i podobnie jak w przypadku obszaru skóry lewego uda, większy wpływ na jej wynik miała temperatura otoczenia.



Fot. 7. Profil termiczny kończyn przednich krowy z wyraźnie zaznaczonym hipertermicznym obszarem skóry w okolicy palców (badania własne)

Phot. 7. Thermal profile of the front limbs of a cow with a clearly visible hyperthermal area on the skin near the toes (our own work)

Temperatura otoczenia, w którym przeprowadza się badanie emisji ciepłej (IRT) ma znaczący wpływ na wartość temperatury odczytywanej z powierzchni ciała [9]. Jak wynika z badań Martello i wsp. [22], temperatura skóry zwierząt prezentuje często niższe wartości w porównaniu do temperatury wnętrza ciała. Zakres różnicy może wahać się od 2 do 7°C (średnio 5°C). Dynamika tych zmian jest również zależna od gatunku, płci, miejsca badania na powierzchni skóry oraz warunków środowiska [4, 22].

Na fotografii 4. przedstawiono zdjęcie oraz termogram bocznej powierzchni zdrowego wymienia od strony lewej (ćwiartka przednia lewa i tylna lewa). Zdjęcie zostało wykonane z dystansu 1 m. Najwyższą temperaturę, wynoszącą 36,8°C (Sp1 – kolor biały), odnotowano w ćwiartce lewej tylnej. Temperatura u podstawy strzyka była niższa i wynosiła 31,8°C (Sp2 – kolor czerwony).

Zapalenia wymienia od lat stanowią główną przyczynę strat ekonomicznych w hodowli krów mlecznych. Pomimo że zostały już opracowane różne metody zwalczania tego schorzenia, nadal najważniejszą kwestią pozostaje wczesna diagnostyka. Termografia jest coraz częściej stosowana w diagnostyce podklinicznych stanów zapalnych gruczołu mlekowego. Nowoczesne kamery charakteryzują się czułością, która pozwala wykryć nieprawidłowe wzorce termiczne nawet w obrębie niewielkiej powierzchni znajdującej się na jednej z ćwiartek gruczołu mlekowego [33]. Dzięki monitoringowi termograficznemu oraz odpowiednim obliczeniom (modelowanie predykcyjne) istnieje możliwość skutecznego wykrywania *mastitis* już na wczesnym etapie rozwoju choroby [4, 27, 33].

Obrazowanie w podczerwieni (IRT) daje również możliwość diagnozowania urazów skóry, takich jak otarcia, zapalenia, ropnie itp., dzięki możliwości prezentowania różnic w gradiencie barw na powierzchni badanego obszaru. Na fotografii 5. widoczne są dwa wyraźnie zaznaczone na biało obszary skóry – w okolicy oka (Bx2) oraz w okolicy przedmostkowej – *regio presternalis* (Bx1), w których odnotowano najwyższe temperatury. W badaniu klinicznym skóry w okolicy przedmostkowej odnotowano objawy charakterystyczne dla przebiegu procesu zapalnego – zaczerwienienie, delikatny obrzęk oraz bolesność, które potwierdziły wstępną diagnozę uzyskaną na podstawie badania termowizyjnego.

Na fotografii 6. przedstawiono profil termiczny bocznej powierzchni skóry okolicy stawu skokowego i śródstopia widziane od strony prawej, z zaznaczonym obszarem, w którym odnotowano najwyższą temperaturę w stosunku do okolicznych tkanek. W obszarach skóry o najwyższej emisji promieniowania podczerwonego potwierdzono w badaniu klinicznym lokalny stan zapalny skóry na tle urazowym.

Badanie termowizyjne stanowi praktyczne narzędzie do wykrywania symetrii i asymetrii temperatury na badanej powierzchni skóry. Oszacowanie w badaniu termowizyjnym subtelnych zmian temperatury w danym obszarze może stanowić ważny wskaźnik we wczesnej diagnostyce kulawizn u bydła [1]. Dokładność badania termograficznego w wykrywaniu schorzeń racic mieści się w zakresie 0,81-0,86% dla czułości i 0,56-0,83% dla swoistości metody [1, 21].

Podczas oceny badania termowizyjnego kończyn przednich krowy odnotowano wyraźne różnice w rozkładzie temperatury w poszczególnych obszarach skóry (fot. 7). Najwyższą temperaturę, wynoszącą 36,7°C, odnotowano w okolicy palców (*regiones digitorum manus*), w szparze międzypalcowej (Bx1 – kolor biały). Znacznie niższą temperaturę, wynoszącą 29,2°C (Sp2 – kolor czerwony) określono na powierzchni skóry w okolicy puszki racicowej, śródreżca (*regio metacarpi*), a także przyśrodkowej strony skóry przedramienia (*regio antebrachii*). W badaniu klinicznym stwierdzono kulawiznę oraz obrzęk i zaczerwienienie skóry. Uzyskane dane z kamery oraz badania lekarsko-weterynaryjnego są w takim przypadku wystarczające do postawienia pełnej diagnozy – zapalenie skóry szpary międzypalcowej (*Dermatitis interdigitalis*).

IRT może być zatem przydatnym, dodatkowym narzędziem do wczesnego diagnozowania kulawizn już na wczesnym etapie formowania się procesu zapalnego w obrębie racic. Systematyczne wykrywanie tego rodzaju schorzeń, szczególnie w okresie wczesnej laktacji, będzie miało ogromne znaczenie dla zachowania wydajności mlecznej w stadzie.

Schorzenia kończyn, a szczególnie racic, stanowią częstą przyczynę brakowania krów. Są problemem zdrowotnym nie tylko związanym z odczuwaniem bólu, ale także obniżeniem produkcji mlecznej, efektywności rozrodu oraz zaburzeniami metabolicznymi, co w konsekwencji prowadzi do znacznych strat ekonomicznych [25]. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest zbyt późne rozpoznawanie zmian chorobowych. Obecnie w diagnostyce terenowej chorób kończyn wykorzystuje się, oprócz specjalistycznych badań klinicznych, także radiografię, ultrasonografię, artroskopię oraz punkcję stawu (artrocentezę) [25]. Jedną z nowoczesnych metod umożliwiających szybką detekcję schorzeń układu ruchu jest termografia [13].

Podsumowując można stwierdzić, że w ostatnich latach znacząco wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem termowizji w diagnostyce weterynaryjnej. Dzięki możliwości szybkiego, bezinwazyjnego i zautomatyzowanego pomiaru temperatury na powierzchni ciała zwierzęcia, technika ta wykazuje duży potencjał w prognozowaniu lokalnych stanów zapalnych (choroby racic, wymienia, skóry). Technika ta jest także pomocna w ocenie dobrostanu zwierząt. Warto jednak zaznaczyć, że nadal istnieje potrzeba dalszych badań naukowych w celu ujednolicenia danych pomiarowych z zakresu termowizji. Konieczne jest opracowanie protokołów normalizacji parametrów obrazowania, czyli standardów, które pozwolą otrzymywać wiarygodne wyniki badań w różnych warunkach środowiskowych.

PIŚMIENNICTWO

1. ALSAOD M., BUSCHER W., 2012 – Detection of hoof lesions using digital infrared thermography in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 95 (2), 735-742 (doi: 10.3168/jds.2011-4762).
2. AMMER K., RING F.J., 2013 – Standard procedures for infrared imaging in medicine. *Physiological Measurement* 33 (3), R33 (<http://iopscience.iop.org/0967-3334/33/3/R33>).
3. BAUER J., DEREN E., 2014 – Standaryzacja badań termograficznych w medycynie i fizykoterapii. *Acta Bio-Optica et Informatica Medica. Inżynieria Biomedyczna* 20 (1), 11-20.
4. BERRY R.J., KENNEDY A.D., SCOTT S.L., KYLE B.L., SHAEFER A.L., 2003 – Daily variation in the udder surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography: potential for mastitis detection. *Canadian Journal of Animal Science* 83, 687-693.
5. BOWERS S., GANDY S., ANDERSON B., RYAN P., WILLARD S., 2009 – Assessment of pregnancy in the late-gestation mare using digital infrared thermography. *Theriogenology* 72 (3), 372-377 (doi: 10.1016/j.theriogenology.2009.03.005).
6. BYRNE D.T., BERRY D.P., ESMONDE H., MCHUGH N., 2017 – Temporal, spatial, inter-, and intra-cow repeatability of thermal imaging. *Journal of Animal Science* 95 (2), 970-979 (doi: 10.2527/jas2016.1005).
7. CHURCH J.S., HEGADOREN P.R., PAETKAU M.J., MILLER C.C., REGEV-SHOSHANI G., SCHAEFER A.L., SCHWARTZKOPF-GENSWEIN K.S., 2014 – Influence of environmental factors on infrared eye temperature measurements in cattle. *Research in Veterinary Science* 96 (1), 220-226 (doi: 10.1016/j.rvsc.2013.11.006).

8. CIELUTKO J., JANISZEWSKI P., 2013 – Praktyczne zastosowanie termowizji u zwierząt. Cz. 1. Zwierzęta hodowlane. *Przegląd Hodowlany* 2, 29-30.
9. COLLIER R.J., DAHL G.E., VANBAALE M.J., 2006 – Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 89, 1244-1253.
10. COOK N., TIMSIT E., COLYN J., CHABOT B., LIU T., WOLFGER B., SCHAEFER A., 2016 – Assessing consistency in radiated thermal output of beef steers by infrared thermography. *Journal of Imaging* 2 (4), 17 (doi: 10.3390/jimaging2030021).
11. FITA K., DOBRZYŃSKI M., CAŁKOSIŃSKI I., DUDEK K., BADER-ORŁOWSKA D., 2007 – The usefulness of the thermography in medical-dental diagnostic – the author's experiences. *Annales Academiae Medicae Stetinensis* 53, Suppl., 3, 34-38.
12. GODYŃ D., 2013 – Zastosowanie kamery termograficznej w ocenie termoregulacji u zwierząt gospodarskich. *Wiadomości Zootechniczne* 4, 91-95.
13. GODYŃ D., 2013 – Zastosowanie termografii w ocenie stanu zdrowotnego kończyn u zwierząt gospodarskich. *Roczniki Naukowe Zootechniki* 40 (1), 77-84.
14. GODYŃ D., 2016 – Znaczenie termografii w diagnozowaniu mastitis. *Wiadomości Zootechniczne* 4, 138-144.
15. GUGOLEK A., JANISZEWSKI P., ZWOLIŃSKI C., KONSTANTYNOWICZ M., 2013 – Wstępne badania nad możliwością wykorzystania termowizji w ocenie ciepłochronności okrywy włosowej zwierząt futerkowych. *Wiadomości Zootechniczne* 1, 3-8.
16. HOVINEN M., SIIVONEN J., TAPONEN S., HANNINEN L., PASTELL M., AISLA A.M., PYORALA S., 2008 – Detection of clinical mastitis with the help of a thermal camera. *Journal of Dairy Science* 91 (12), 4592-4598 (doi: 10.3168/jds.2008-1218).
17. KARWAT T., 2008 – Termowizja – zasady ogólne, środowisko pomiarowe, budowa kamer, przykłady zastosowania. *Izolacje* 13 (5), 33-36.
18. KNÍŽKOVÁ I.K.P., GÜRDİL G.A.K., PINAR Y., SELVI K.Ç., 2007 – Applications of infrared thermography in animal production. *O.M.U. Journal of the Faculty of Agriculture* 22 (3), 329-336.
19. KRUCZEK T., 2002 – Analiza wpływu czynników zewnętrznych na wyniki termowizyjnego pomiaru temperatury. Materiały V Konferencji: Termografia i termometria w podczerwieni. Łódź-Ustroń, 725-732.
20. MADER T.L., DAVIS M.S., BROWN-BRANDL T., 2006 – Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 84 (3), 712-719.
21. MAIN D.C., STOKES J.E., READER J.D., WHAY H.R., 2012 – Detecting hoof lesions in dairy cattle using a hand-held thermometer. *Veterinary Record* 171, 504-506 (doi: 10.1136/vr.100533.).
22. MARTELLO L.S., DA LUZ S.S., GOMES R.C., CORTE R.S.R.P., LEME P.R., 2016 – Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions. *International Journal of Biometeorology* 60, 173-181.
23. MAZUR D., HERBUT E., 2006 – Termowizja jako metoda diagnostyczna. *Roczniki Naukowe Zootechniki* 33 (2), 171-181.
24. MCCAFFERTY D.J., 2007 – The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review* 37 (3), 207-223 (doi: 10.1111/j.1365-2907.2007.00111.x).

25. MORDAK R., 2008 – Kulawizny u krów – wieloprzyczynowy problem zdrowotny. *Życie Weterynaryjne* 83 (4), 288-291.
26. NG E.Y.K., KEE E.C., 2008 – Fever mass screening tool for infectious diseases outbreak: Integrated artificial intelligence with bio-statistical approach in thermogram analysis. [In:] N.A. Diakides & J.D. Bronzino (Eds.) *Medical Infrared Imaging* (Chapter 16). CRC Press, Boca Raton, FL.
27. PEZESHKI A., STORDEUR P., WALLEMACQ H., SCHYNTS F., STEVENS M., BOUTET P., PEELMAN L.J., DE SPIEGELEER B., DUCHATEAU L., BUREAU F., BURVENICH C., 2011 – Variation of inflammatory dynamics and mediators in primiparous cows after intramammary challenge with *Escherichia coli*. *Veterinary Research* 42, 10 (doi:10.1186/1297-9716-42-15).
28. PLASSMANN P.R.E., JONES C.D., 2006 – Quality assurance of thermal imaging systems in medicine. *Thermology* 16 (10), 5.
29. POIKALAINEN V., PRAKS J., VEERMÄE I., KOKIN E., 2012 – Infrared temperature patterns of cow's body as an indicator for health control at precision cattle farming. *Agronomy Research Biosystem Engineering*, Special Issue 1, 187-194.
30. POLAT B., COLAK A., CENGİZ M., YANMAZ L.E., ORAL H., BASTAN A., KAYA S., HAYIRLI A., 2010 – Sensitivity and specificity of infrared thermography in detection of sub-clinical mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 93 (8), 3525-3532 (doi: 10.3168/jds.2009-2807).
31. RAINWATER-LOVETT K., PACHECO J.M., PACKER C., RODRIGUEZ L.L., 2009 – Detection of foot-and-mouth disease virus infected cattle using infrared thermography. *Veterinary Journal* 180 (3), 317-324 (doi: 10.1016/j.tvjl.2008.01.003).
32. RING E.F., AMMER K., 2000 – The technique of infrared imaging in medicine. *Thermology International* 10 (1), 7-14.
33. SATHIYABARATHI M., JEYAKUMAR S., MANIMARAN A., PUSHPADASS H.A., SIVARAM M., RAMESHA K.P., DAS D.N., KATAKTALWARE M.A., JAYAPRAKASH G., PATBANDHA T.K., 2016 – Investigation of body and udder skin surface temperature differentials as an early indicator of mastitis in Holstein Friesian crossbred cows using digital infrared thermography technique. *Veterinary World* 9 (12), 1386-1391.
34. SCHAEFER A., COOK N.J., 2013 – Heat generation and the role of infrared thermography in pathological conditions. [In:] Luzi F., Mitchell M., Costa L.N., Redaelli V. (Eds.) *Thermography: Current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine*. Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche, Brescia, Italy; pp. 69-78.
35. SCHAEFER A.L., COOK N.J., BENCH C., CHABOT J.B., COLYN J., LIU T., OKINE E.K., STEWART M., WEBSTER J.R., 2012 – The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography. *Research in Veterinary Science* 93 (2), 928-935.
36. SCHAEFER G., HUGUET J., ZHU S.Y., PLASSMANN P., RING F., 2006 – Adopting the DICOM standard for medical infrared images. Paper presented at the 28th Annual International Conference of the IEEE - Engineering in Medicine and Biology Society; 236-239.
37. SOERENSEN D.D., PEDERSEN L.J., 2015 – Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review. *Acta Veterinaria Scandinavica* 57, 5 (doi: 10.1186/s13028-015-0094-2).

38. SOROKO M., JODKOWSKA E., 2011 – Przydatność badań termograficznych w lecznictwie i użytkowaniu koni. *Medycyna Weterynaryjna* 67, 397-401.
39. STEWART M., SCHAEFER A.L., HALEY D.B., COLYN J., COOK N.J., STAFFORD K.J., 2008 – Infrared thermography as a non-invasive method for detecting fear-related responses of cattle to handling procedures. *Animal Welfare* 17, 387-393.
40. STEWART M., WEBSTER J.R., SCHAEFER A.L., COOK N.J., SCOTT S.L., 2005 – Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare. *Animal Welfare* 14 (4), 319-325.

Przemysław Racewicz, Jakub Sobek,
Michał Majewski, Jolanta Różańska-Zawieja

The use of thermal imaging measurements in dairy cow herds

Summary

Infrared thermography (IRT) is a technique for contactless and remote evaluation of the temperature distribution on the surface of an animal's body. The surface temperature values obtained in IRT depend on the quantitative impact of the conditions of the surrounding environment and the thermoregulatory response of the animal. Besides the blood perfusion volume, the skin temperature depends on the metabolic rate of tissues, the type and colour of the hair coat, and the thickness of the adipose tissue. In a healthy organism, the temperature distribution between individual parts of the body shows a high degree of symmetry. Analysis of the surface temperature distribution of a given area of the body of an animal which is in homeostasis with the external environment provides a great deal of valuable information. By comparing the same parts of the body, we can easily identify hot spots, and the additional knowledge gained during more extensive veterinary diagnostics increases the chance of establishing the cause of this condition. The reliability of IRT depends on the technical parameters of the cameras, environmental conditions, the operator's experience, the animal's individual characteristics, and the testing methodology. As many factors can affect the surface temperature distribution of an animal's body, and thus the result of the thermographic measurement, the effect of any stimuli interfering with the measurements should be minimized during thermal imaging. Additionally, in order to reduce the risk of misinterpretation of the image, normalization protocols for imaging parameters, i.e. standards ensuring reliable results, should be applied. The main limitation in the implementation of these standards in thermography of livestock animals is that it is not possible to compare thermograms made under different environmental conditions. Research has been carried out to assess the suitability of thermal imaging cameras in diagnosing inflammatory changes in the skin of cattle. The technique was found to have great potential in predicting local inflammation (hoof, udder or skin disease). Normalization protocols must be developed for imaging parameters, i.e. standards that will ensure reliable results in a variety of environmental conditions.

KEY WORDS: thermal imaging / dairy cattle / diagnostics / local inflammation