

Michał Kaliszan

**OKREŚLANIE CZASU ZGONU
NA PODSTAWIE POMIARÓW TEMPERATURY
WYBRANYCH OKOLIC CIAŁA
BADANIA NA MODELU ZWIERZĘCYM**

Praca doktorska wykonana w Katedrze i Zakładzie Medycyny Sądowej Akademii Medycznej w Gdańsku i przedstawiona Radzie Wydziału Lekarskiego w celu ubiegania się o stopień doktora nauk medycznych w zakresie medycyny

Promotor: dr hab. med. Roman Hauser, prof. nadzw. AMG

Gdańsk 2006

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	1
1.1. Znaczenie czasu śmierci dla medycyny sądowej.....	1
1.2. Dotychczas opracowane metody określania czasu śmierci.....	2
1.2.1. Metody oparte na ocenie zmian zachodzących po śmierci.....	2
1.2.2. Metody oparte na pomiarze temperatury zwłok.....	4
1.2.3. Metody łączące pomiar temperatury zwłok z obserwacją zmian pośmiertnych.....	17
1.3. Opracowane metody określania czasu śmierci a praktyka sądowo-lekarska.....	18
1.4. Możliwości dalszych badań w celu precyzyjniejszego ustalania czasu śmierci.....	18
2. CEL PRACY.....	20
3. MATERIAŁY I METODYKA.....	21
4. WYNIKI I ICH DYSKUSJA.....	27
4.1. Doświadczenia uwzględniające pomiary temperatury od 75 minuty po śmierci zwierząt.....	27
4.2. Doświadczenia uwzględniające pomiary temperatury od 30 minuty po śmierci zwierząt przy kontrolowanym przepływie powietrza.....	50
5. WNIOSKI.....	91
6. STRESZCZENIE.....	98
7. SUMMARY OF Ph.D. THESIS.....	101
8. PIŚMIENNICTWO.....	104

1. WSTĘP

1.1. Znaczenie czasu śmierci dla medycyny sądowej

Określanie czasu, w którym nastąpiła śmierć jest problemem towarzyszącym medycynie sądowej od początków istnienia tej dziedziny medycyny. Ustalenie czasu zgonu należy do podstawowych zadań medyka sądowego obecnego na miejscu ujawnienia zwłok. Wraz z wstępnym rozpoznaniem przyczyny zgonu determinuje przebieg podjętych czynności śledczych, a w sytuacji popełnienia przestępstwa nadaje kierunek prowadzonemu przez prokuraturę i policję dochodzeniu.

W aspekcie prawa karnego precyzyjne ustalenie czasu śmierci pozwala na weryfikację zeznań świadków, zawężenie kręgu osób podejrzanych oraz na ocenę podawanego przez nie alibi, zwłaszcza, że obecnie czas przemieszczania się nawet na znaczne odległości staje się coraz krótszy. Tak więc, wobec mało dokładnej lub błędnej oceny czasu śmierci, niezgodne z prawdą tłumaczenie się podejrzanego, że w chwili przestępstwa przebywał w odległym od jego popełnienia miejscu, może okazać się trudne do podważenia.

Ustalenie czasu śmierci ma niekiedy znaczenie na obszarze prawa cywilnego gdyż może decydować o kolejności dziedziczenia lub ewentualnych zobowiązaniach wynikających z kolejności zgonów. Z problemem takim możemy mieć do czynienia, kiedy w jednym czasie zostaną ujawnione zwłoki dwóch lub więcej spokrewnionych osób (np. w sytuacji zbiorowego zabójstwa czy wypadku z kilkoma ofiarami śmiertelnymi).

Mimo podejmowanych w ciągu ostatnich przeszło 100 lat prób wypracowania metod pozwalających na precyzyjną ocenę czasu śmierci, dokładność tych metod, zarówno przy stosowaniu pojedynczych z nich, jak i łączeniu kilku, nadal odbiega od wymaganej i nie spełnia warunków odpowiadających przyjętym w medycynie sądowej standardom. W pierwszych około 6 h po śmierci określają ją granice błędu wynoszące około ± 2 h, w

kolejnych około 14 h po śmierci zakres błędu wzrasta do około ± 3 h, a podczas następnych około 10 h ulega zwiększeniu do około $\pm 4,5$ h. Dokładność stosowanych metod zmniejsza się zdecydowanie z zakończeniem procesu umierania. Tak więc od objęcia wszystkich narządów śmiercią biologiczną, co następuje zazwyczaj około 24 h po śmierci, szacowanie czasu zgonu ma wymiar jedynie orientacyjny [1-9].

1.2. Dotychczas opracowane metody określania czasu śmierci

Aktualnie znane metody oceny czasu zgonu można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa, to metody oparte na ocenie zachodzących w zwłokach procesów pośmiertnych. Druga grupa, to metody oparte na analizie procesu stygnięcia zwłok, polegające na pomiarze temperatury zwłok w różnych miejscach ciała (ang. *temperature-based methods*). Metody drugiej grupy uznawane są za bardziej dokładne, szczególnie w początkowym (do 20 h) okresie po śmierci.

1.2.1. Metody oparte na ocenie zmian zachodzących po śmierci

Spośród metod wykorzystujących pośmiertne zmiany zachodzące w organizmie ludzkim przy ocenie czasu śmierci w pierwszych kilkudziesięciu godzinach po zgonie należy wyróżnić określanie stopnia wysycenia i przemieszczalności płam opadowych, rozwinięcia stężenia pośmiertnego, wysychania rogówki oka, jak też badanie reakcji interletalnych polegające na ocenie pobudliwości mięśni szkieletowych na bodziec mechaniczny (zjawisko Zsako) lub elektryczny, reakcji mięśni twarzy (mięśni okrężnych: oka i ust) na bodziec elektryczny, reakcji źrenicy oka na wkroplenie do worka spojówkowego lub wstrzyknięcie do przedniej komory oka środków zwężających źrenicę (np. pilokarpiny, acetylocholino) lub ją rozszerzających (np. atropiny) [1-16].

W późniejszym okresie po śmierci wskazówką pozwalającą w dużym przybliżeniu (do kilku dni, tygodni, a nawet miesięcy) ocenić czas zgonu jest stopień zaawansowania tzw. przemian późnych, tj. gnicia, zmian tłuszczowoskowych, strupienia, czy ewentualnego przeobrażenia torfowego.

W przypadku zwłok zeszkieletowanych dokładność ustalenia czasu śmierci ulega dalszemu pogorszeniu, a przy szacowaniu czasu śmierci opierać się można jedynie na wyglądzie, ciężarze czy kruchości kości. Pozwala to na określenie jedynie minimalnego czasu jaki upłynął po śmierci, np. kilkadziesiąt lat [1-4].

Poszukiwania metody pozwalającej na określenie czasu zgonu obejmują również analizę procesów biochemicznych zachodzących w organizmie, tj. badanie aktywności enzymów w tkankach i płynach ustrojowych, oznaczanie zawartości związków organicznych i nieorganicznych, w tym produktów rozkładu białek [1,17-20]. Z metod wykorzystujących procesy biochemiczne wartą szczególnej uwagi jest metoda określania czasu śmierci na podstawie aktywności enzymów wątrobowych: dehydrogenazy mleczanowej i dehydrogenazy jabłczanowej. Metoda ta pozwala na ocenę czasu zgonu z dokładnością do kilku dni w okresie nawet do 35. dnia po śmierci [21-23].

Coraz większe znaczenie dla ustalania czasu śmierci ma szybko rozwijająca się dziedzina medycyny sądowej, jaką jest entomologia sądowa. Opiera się ona na wykrywaniu obecności i określaniu stadium rozwoju larw i owadów znalezionych na zwłokach. Metoda ta może też być pomocna w ustaleniu, czy zwłoki były przemieszczane z innego, charakterystycznego dla danego gatunku owadów środowiska [24-26].

Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem stopnia rozpadu DNA do oceny czasu, w jakim nastąpiła śmierć. Stopień rozpadu DNA można ocenić za pomocą cytometrii przepływownej. Jest to jednak jeszcze metoda eksperymentalna wymagająca dopracowania. Dotychczas nie znalazła szerszego zastosowania w praktyce medyczno-sądowej [27,28].

Do najświeższych dokonań medycyny sądowej w zakresie określania czasu śmierci należy metoda wykorzystująca jedno z najnowszych analitycznych osiągnięć techniki, tj. H-MRS (protonową spektroskopię rezonansu magnetycznego). Przy jej pomocy identyfikowano produkty rozkładu tkanki mózgowej. Według szeregu autorów H-MRS pozwala na określenie czasu śmierci w okresie od około 30 do około 400 h *post mortem* [27,29,30].

Z innych metod wykorzystujących procesy nekrochemiczne, lecz dotychczas uznawanych za metody o mniejszym znaczeniu ze względu na niewielką dokładność, należy wymienić metody analityczne polegające na ocenie stężenia potasu lub hipoksantyny w ciałku szklistym oka [7,18,27,31], chlorków w osoczu [32], badaniu biochemicznym płynu stawowego [33] czy płynu mózgowo-rdzeniowego [31,34,35]. Czas śmierci próbowano również określać na podstawie obecności treści pokarmowej w żołądku szacunkowo przyjmując, że pokarm pozostaje w żołądku średnio 2-3 h po jego spożyciu, przy czym zaznaczono, że posiłki tzw. ciężkostrawne mogą w nim zalegać nawet do kilku godzin [36]. Podejmowano także próby wykorzystania pomiarów impedancji elektrycznej tkanek oceniając w ten sposób czas zgonu w okresie do około 20-tego dnia po śmierci [37,38].

1.2.2. Metody oparte na pomiarze temperatury zwłok

Na odrębne, dokładniejsze omówienie zasługują metody wykorzystujące proces stygnięcia zwłok. W literaturze jako pierwsze istotne dokonanie dla określania czasu zgonu na podstawie pośmiertnego spadku temperatury wymienia się pracę Harry Rainy'ego, profesora Uniwersytetu w Glasgow [39]. Analizując piśmiennictwo znaleźć można również doniesienia z okresu wcześniejszego. Cytowana bywa praca Davey'a [5,40], w której autor opisywał badania temperatury zwłok 8 żołnierzy brytyjskich zmarłych na Malcie w 1828 roku, a następnie 10 kolejnych zmarłych w chłodniejszym klimacie, tj. na Wyspach Brytyjskich. Jednak na podstawie swoich badań Davey nie pokusił się o ocenę czasu zgonu. Inne doniesienia z tego okresu to prace Dowlera (lub Fowlera) z lat 1844 i 1845 i Hensley'a z 1846 [5], w których opisywano pomiary temperatury w różnych miejscach ciała. Wnioski z tych badań ograniczały się do zanotowania w niektórych przypadkach wzrostu temperatury bezpośrednio po śmierci. Po wymienionych doniesieniach nastąpił okres około 17 lat przerwy, po czym opublikowana została praca Taylora i Wilkesa [41]. Autorzy ci opisali pomiary temperatury skóry brzucha wykonywane za pomocą przykładanego na powierzchnię ciała termometru rtęciowego. Przedstawiona przez nich metoda badań z aktualnego punktu widzenia nie zapewnia prawidłowości wyników ze względu na wpływ czynników zewnętrznych i sposobu przyłożenia termometru. Nie mniej jednak Taylor i Wilkes zauważyli pośmiertny wzrost temperatury ciała oraz wolniejszy jej spadek we wczesnym okresie po śmierci, nie wprowadzając jeszcze terminu *plateau*. Zaobserwowali również, że głębiej położone tkanki mają podwyższoną temperaturę w czasie, kiedy skóra osiąga już temperaturę otoczenia. Również ci autorzy nie wykorzystali otrzymanych wyników do opracowania metody określania czasu zgonu.

W roku 1863 Richardson [5] zauważył, że w przypadku śmierci z wykrwawienia ciało ochładza się znacznie szybciej. Zwrócił przy tym uwagę, że w takich przypadkach czas śmierci może być błędnie oceniony, co spowodować mogło np. oskarżenie niewinnej osoby o udział w zbrodni. W 1866 roku inny badacz, Erb [42], obserwował w kilku przypadkach pośmiertny wzrost temperatury ciała, następnie jej ustabilizowanie się i powolny spadek. Kolejny badacz, Nysten [5], wyraził pogląd, że w przypadku śmierci przez uduszenie ciało stygnie znacznie dłużej, nawet do 3 dni przed całkowitym wystygnięciem, niż w przypadkach śmierci z przyczyn innych. Pogląd ten został podważony przez Taylora i Wilkesa [41], którzy stwierdzili, że ciało stygnie równie szybko, niezależnie od przyczyny śmierci.

Rainy [39] jako pierwszy zastosował wobec procesu stygnięcia zwłok newtonowskie prawo stygnięcia, uwzględniając w badaniach czynnik temperatury otoczenia. Mierząc kilkakrotnie temperaturę w odbytnicy zmarłych zdołał doświadczalnie ustalić nachylenie krzywej spadku temperatury w czasie, zgodnie z newtonowskim współczynnikiem stygnięcia. Ponadto badacz ten potwierdził istnienie fazy początkowego wolniejszego spadku temperatury, opisanej w późniejszym czasie przez Shapiro [43] jako faza *plateau* spadku temperatury oraz ustalił wyliczony czas zgonu jako czas minimalny. Obliczenia Rainy'ego, oparte na rachunku logarytmicznym, pozwalały na określenie prawdopodobnego przedziału czasowego, w którym mógł nastąpić zgon. Niezależnie od tego Rainy wykazał nieprzydatność pomiarów temperatury powierzchniowej skóry do określenia czasu zgonu, jak również niekorzystny wpływ zmian temperatury otoczenia na użyteczność pomiarów ciepłoty ciała w aspekcie ustalania czasu śmierci.

Wkrótce po doniesieniu Rainy'ego, Seydeler [44] zaobserwował nieregularny spadek temperatury mierzonej pod pachą, tzn. na początku powolny, później szybszy i znowu powolny. Stwierdził ponadto, że odzież w jaką ubrany jest zmarły nie ma większego wpływu na stygnięcie ciała.

Zaproponował określanie czasu zgonu na podstawie opracowanych przez siebie tabel, w których dokładność podana była w godzinach.

W roku 1880 ukazała się praca Burmana [45], w której autor na podstawie badań temperatury mierzonej pod pachą za pomocą własnoręcznie skonstruowanego termometru (pozwalającego na odczyt temperatury bez wyjmowania termometru spod pachy) wyciągnął wniosek, że spadek temperatury w pierwszych 12 h po zgonie zachodzi liniowo i wynosi 1,6 °F/h (co odpowiada około 0,9 °C/h). Nie zauważył przy tym występowania początkowego wolniejszego schładzania zwłok.

Kolejnym badaczem zajmującym się pośmiertnym spadkiem temperatury ciała był Womack [46], który w 1887 roku przeprowadził serię eksperymentów z użyciem termometru rtęciowego. Termometr ten przytwierdzał za pomocą taśmy do powierzchni brzucha. Twierdził, że ze skali swojego termometru mógł odczytywać wartości temperatury z dokładnością do $\frac{1}{4}$ stopnia, co wydaje się wysoce wątpliwe. Również nie obserwował pośmiertnego *plateau* temperatury. Zaproponowane przez Womacka skomplikowane obliczenia matematyczne miały jakoby pozwolić na określenie czasu zgonu z dokładnością do kilku minut, co podobnie jak dokładność wskazań zastosowanego termometru jest nieprawdopodobne.

Następne lata, ze względu na sytuację spowodowaną zawirowaniami politycznymi i działaniami wojennymi na świecie, charakteryzowały się brakiem badań i co za tym idzie publikacji w tej dziedzinie, a posiadana wiedza nie była zbyt wykorzystywana.

W okresie międzywojennym ukazały się dwie prace niemieckiego badacza, Muellera [47,48], w których opisywał eksperymenty z użyciem jak na tamte czasy bardzo nowoczesnej aparatury pomiarowej, tj. termorezystora, przy czym wyniki badań były zapisywane w sposób ciągły na automatycznie przesuwającej się papierowej taśmie. Posiadany sprzęt pozwalał na ciągłe monitorowanie temperatury w odbytnicy w sposób dotychczas nieosiągalny. W

swoich publikacjach Mueller zawarł wykresy zmienności temperatur uwzględniające stopień rozwinięcia tkanki tłuszczowej. Podał ponadto odpowiednie tabele pozwalające na odczyt czasu zgonu przy różnych temperaturach otoczenia. Zaznaczył jednak, że czas zgonu powinien być ustalany przez specjalistę medycyny sądowej na podstawie nie tylko swoich wyników, ale także w oparciu o inne metody niezwiązane z pomiarem temperatury. Również Mueller nie obserwował *plateau* spadku temperatury.

Tuż przed wybuchem II Wojny Światowej ukazała się jeszcze praca innego niemieckiego medyka, Schwarke [49], który korzystał z podobnej metodyki jak Mueller.

Po przerwie w prowadzeniu badań nad metodami określania czasu zgonu, w 1953 roku Schwarz i Heidenwolf [50] zaprezentowali pierwszą standardową krzywą sigmoidalną, wykazując znaczne spowolnienie stygnięcia ciała w pierwszym okresie po śmierci. Krzywa ta miała mieć zastosowanie w ograniczonym zakresie temperatur (około 17°C), dla dowolnej masy ciała i każdego rodzaju odziania zwłok. Jak się później okazało krzywa Schwarza i Heidenwolfa zastosowania nie znalazła.

W roku 1955 De Saram i wsp. [51] przeprowadzili pomiary temperatury w odbytnicy na zwłokach przestępców, na których wykonano karę śmierci. Szczególna sytuacja dawała im możliwość rozpoczynania pomiarów temperatury bardzo krótko po śmierci. Badania były prowadzone w gorącym klimacie, w temperaturze otoczenia około 30 °C, co ograniczało użycie matematycznie opisanych krzywych spadku temperatury w czasie do takich, rzadko spotykanych w Europie, warunków klimatycznych. Nie mniej jednak De Saram i wsp. [51] do proponowanego przez dotychczasowych badaczy modelu jednowykładniczego spadku temperatury dodali istotny składnik, uwzględniający pośmiertne spowolnienie spadku temperatury (*plateau*). Dzięki temu obliczenia czasu śmierci charakteryzowały się względnie niskim rozrzutem błędów.

W kolejnej pracy De Saram [52] prowadził pomiary temperatury w wątrobie i zauważył, że w pierwszych kilku godzinach po śmierci temperatura w wątrobie jest zbliżona do temperatury mierzony w odbytnicy.

W 1956 roku Lyle i Cleveland [53], korzystając z postępu technologicznego, zastosowali 6-kanałowy termometr pozwalający na ciągły pomiar i zapis temperatury w sześciu różnych miejscach. Autorzy ci wykonali jednoczesne pomiary temperatury skóry klatki piersiowej, skóry czoła, odbytu, wątroby, mózgu i mięśni uda. Nie wypracowali jednak żadnej użytecznej metody określania czasu zgonu, chociaż zauważyli interesujące fakty. Mianowicie, że spośród rozważanych miejsc pomiarowych ciała krzywe temperatura-czas dla mózgu mają najbardziej, natomiast odpowiednie krzywe dla skóry mają najmniej regularny charakter. Zauważyli ponadto, że czas jaki upłynął od śmierci nie może być wiarygodnie określony po 24 h od śmierci, lub gdy temperatura ciała obniży się na tyle, że nieznacznie różni się od temperatury otoczenia.

Pewnym przełomem w pracach nad ustaleniem metody określania czasu śmierci w oparciu o pomiar temperatury zwłok była praca opublikowana w 1958 roku przez Fiddesa i Pattena [54]. Autorzy wiązali nadzieje z ustaleniem szybkości pośmiertnego spadku temperatury ciała na podstawie co najmniej dwukrotnych pomiarów w pewnym odstępie czasu. Wystandaryzowali spadek temperatury przyjmując, że w chwili śmierci wynosi on 0, natomiast po zakończeniu procesu stygnięcia wynosi 1. Spadek temperatury od standardowej wyjściowej ($37\text{ }^{\circ}\text{C}$) do temperatury otoczenia wyrazili jako różnicę procentową. Wadą metody była konieczność co najmniej dwukrotnego pomiaru temperatury zwłok w wyraźnym odstępie czasowym bez ich przemieszczania oraz założenie, że temperatura otoczenia od chwili śmierci do zakończenia pomiarów jest niezmienna. Kiedy w 1965 roku James i Knight [55] zweryfikowali ową metodę na badanych przez siebie przypadkach nie stwierdzili jej przewagi nad metodami opierającymi się na funkcji jednowykładniczej.

W 1958 roku Sellier [56] przedstawił oryginalne podejście do opisu spadku temperatury zwłok. Zastosował bowiem w tym celu termodynamiczny model nieskończenie długiego cylindra, jako teoretyczny model ciała ludzkiego. Do obliczeń matematycznych Sellier wykorzystał dane uzyskane przez De Sarama i wsp. [51]. Udowodnił matematycznie, że promień ciała jest najważniejszym elementem charakteryzującym krzywe stygnięcia, natomiast czynniki dodatkowe, jak odzież i przykrycie ciała, są mniej znaczące. Sellier także obserwował spowolnienie stygnięcia ciała w początkowym okresie po śmierci. Dowodził, że nie jest to skutek właściwości termoizolujących tkanek tłuszczowej lecz tego, że powoduje ona zwiększenie objętości i, co za tym idzie, promienia ciała (cylindra). Funkcja opisująca ten model umożliwia określenie gradientu temperatury oraz wpływu warunków krańcowych stygnięcia. Z drugiej strony sam autor uważał, że jego model może okazać się zbyt skomplikowany, aby mógł być wykorzystywany w powszechnej praktyce.

Jak widać, przedstawione powyżej dokonania w tematyce ustalenia czasu śmierci, wynikające z analizy procesu stygnięcia zwłok, były jedynie częściowym postępem, a w niektórych przypadkach stanowiły nawet krok wstecz.

Istotny postęp nastąpił dopiero w 1962 roku, tj. po około 100 latach od opracowania przez Rainy'ego modelu uwzględniającego newtonowskie prawo stygnięcia. Wtedy to Marschall i Hoare [57] zaproponowali model dwuwykładniczy, wykazując, że ciało w pierwszych 12 h po śmierci nie stygnie zgodnie z prawem Newtona, lecz nieco wolniej. Przebieg krzywej spadku temperatury miał charakter sigmoidalny. Przyczyn wolniejszego spadku temperatury w początkowym okresie po śmierci upatrywali w pośmiertnym metabolizmie i produkcji ciepła oraz we wpływie powierzchniowych tkanek ciała o ograniczonej przewodności cieplnej. W opracowanym modelu dwuwykładniczym (równ. 1) składowa zawierająca wykładnik p reprezentuje pośmiertną fazę *plateau* temperatury, natomiast składowa zawierająca

wykładnik Z – newtonowską część przebiegu spadku temperatury. Według Marshalla i Hoare [57], czas jaki upłynął od śmierci można wyliczyć na podstawie równania:

$$(T-T_U)/(T_0-T_U) = [(p/p-Z)e^{-Zt}] - [(Z/Z-p)e^{-pt}] \quad (\text{równ. 1})$$

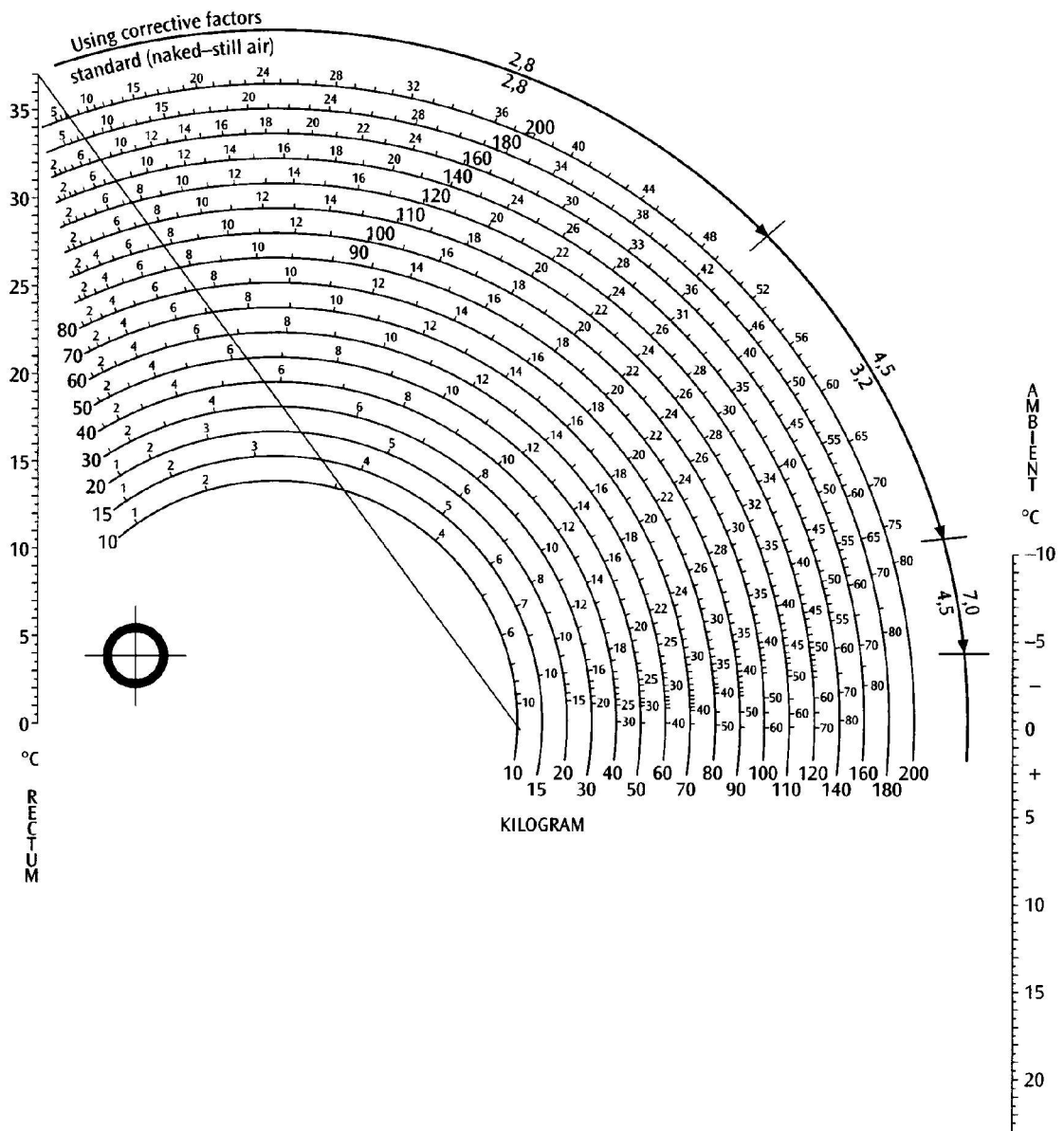
gdzie T oznacza temperaturę mierzoną głęboko w odbyticy ($^{\circ}\text{C}$), T_0 – temperaturę w odbyticy w chwili śmierci ($37,2^{\circ}\text{C}$), T_U – temperaturę otoczenia ($^{\circ}\text{C}$), t – czas jaki upłynął od zgonu (h), $Z = 0,8 \cdot S$, gdzie S jest polem powierzchni ciała wg DuBois dzielonym przez masę ciała, przy stałej $p = 0,4$. Marshall i Hoare w dalszych rozważaniach wykazali, że opracowany przez nich model dwuwykładniczy może być stosowany również dla osób ubranych, jednak wszelkie czynności przy zwłokach, jak ich przewracanie czy przenoszenie, mogą przyczynić się do zwiększenia błędu w ocenie czasu śmierci. Podsumowując swoje ówczesne badania Marshall [58] stwierdził, że „ocena czasu śmierci na podstawie pomiaru temperatury zwłok nigdy nie będzie niczym więcej niż tylko przybliżeniem”.

Jak wspomniano wcześniej, pierwszym autorem, który użył sformułowania *plateau* pośmiertnego spadku temperatury i zagadnieniu temu poświęcił publikację był Shapiro [43]. W swojej pracy podkreślał, że każda metoda oceny czasu śmierci musi uwzględniać początkowy wolniejszy spadek temperatury ciała.

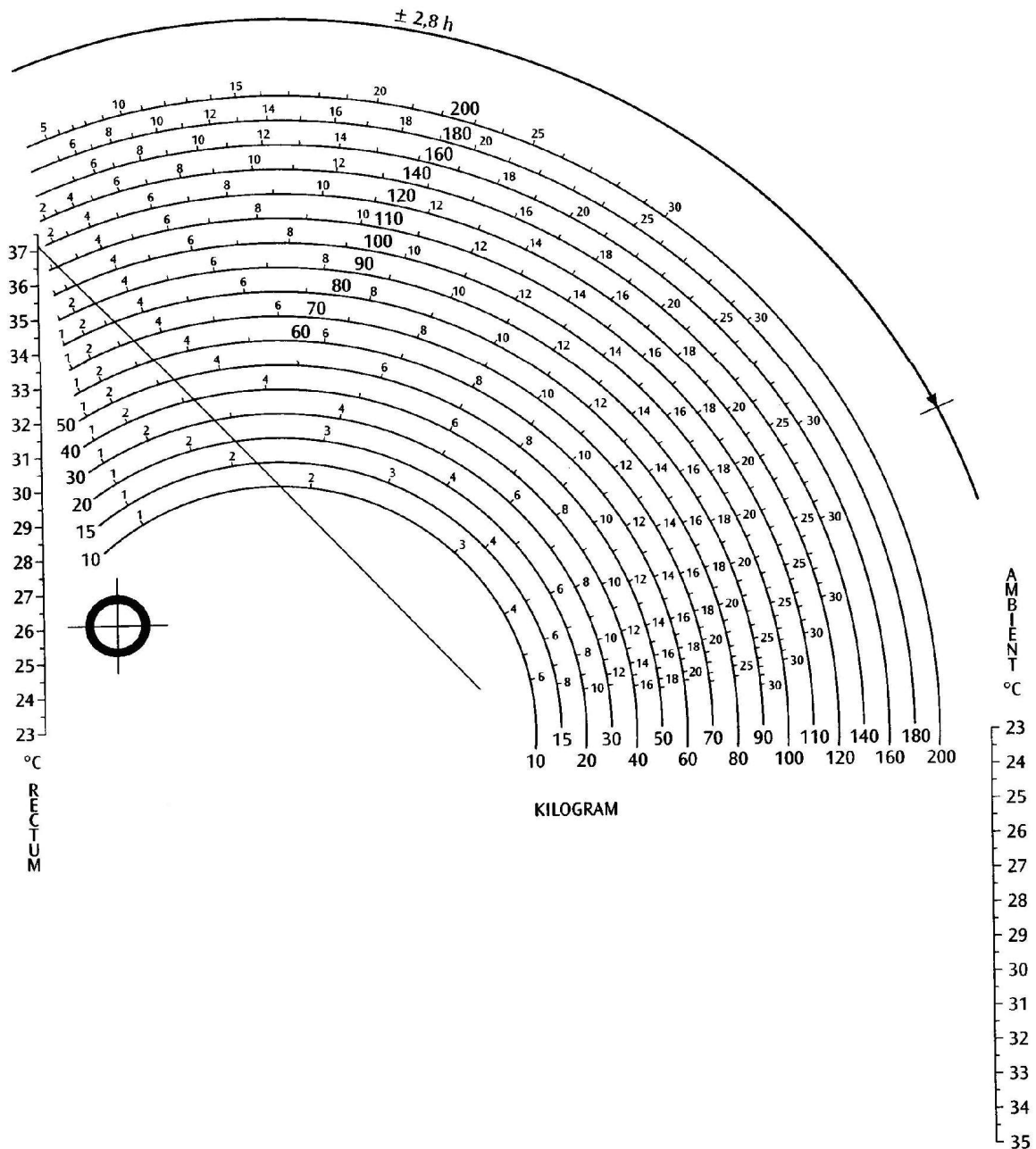
W roku 1974 Brown i Marshall [59] wykazali, że zastosowanie więcej niż dwóch członów wykładniczych jedynie komplikowało model, nie dając precyzyjniejszych rezultatów. Stosując natomiast model dwuwykładniczy można było indywidualnie określać czas zgonu wykonując jeden tylko pomiar temperatury w odbyticy i uwzględniając proporcje ciała oraz temperaturę otoczenia w wystandaryzowanych warunkach stygnięcia.

Wzór opisujący model dwuwykładniczy zaczęto wykorzystywać dopiero w końcu lat 80-tych XX wieku, kiedy Henssge [60] poddał go pewnej modyfikacji. Mianowicie, zaprezentował uproszczoną metodę ustalania

newtonowskiego współczynnika stygnięcia i ustalił statystyczne wartości odchylenia pomiędzy wyliczonym a faktycznym czasem zgonu dla procesu stygnięcia w wystandaryzowanych warunkach. Dzięki badaniom procesu stygnięcia ciała przeprowadzonym na dużej ilości zwłok ludzkich oraz na imitujących ciało ludzkie specjalnie opracowanych fantomach wypełnionych substancją żelową, Henssge i współpracownicy rozszerzyli zakres zastosowania metody do różnych warunków stygnięcia, wykorzystując empiryczne mnożniki poprawkowe dla masy ciała, stopnia odziania i warunków w jakich przebywały zwłoki. Opracowali także do dziś stosowane w praktyce przez medyków sądowych nomogramy umożliwiające łatwe odczytywanie (a nie wyliczanie) czasu zgonu (ryc. 1 i 2).



Ryc. 1. Nomogram do odczytywania czasu zgonu na podstawie jednokrotnego pomiaru temperatury w odbyciu, przy uwzględnieniu temperatury otoczenia i masy ciała, przy 95 % przedziale ufności. Nomogram przeznaczony do zastosowania przy temperaturze otoczenia poniżej 23 °C.



Ryc. 2. Nomogram do odczytywania czasu zgonu na podstawie jednokrotnego pomiaru temperatury w odbycie, przy uwzględnieniu temperatury otoczenia i masy ciała, przy 95 % przedziale ufności. Nomogram przeznaczony do zastosowania przy temperaturze otoczenia powyżej 23 °C.

Aby odczytać czas zgonu z nomogramów Henssgego należy za pomocą linii prostej połączyć wartość temperatury zmierzonej w odbycie (na skali po stronie lewej) z temperaturą otoczenia (na skali po stronie prawej), a następnie poprowadzić kolejną linię prostą wychodzącą ze środka koła znajdującego się

po stronie lewej nomogramu i przechodzącą przez skrzyżowanie linii poprowadzonej uprzednio z linią prostą umieszczoną standardowo na nomogramie.

Czas jaki upłynął od zgonu należy odczytywać w godzinach w miejscu przecięcia poprowadzonej linii z łukowato przebiegającą linią uwzględniającą masę ciała (w kilogramach) osoby zmarłej [60-62].

Do odczytywania czasu zgonu służy również program komputerowy stworzony na podstawie opracowania Henssgego i wsp. [63]. W dalszych badaniach zakres zastosowania metody „nomogramowej” rozszerzono do różnych warunków stygnięcia, np. dla zwłok pływających w wodzie [64], spoczywających na podłożach izolujących lub przyspieszających efekt stygnięcia [65], czy podlegających nagłym zmianom temperatury otoczenia [66]. Dla powyższych warunków na nomogramie zaznaczono także możliwe odchylenia między czasem odczytanym a faktycznym czasem zgonu.

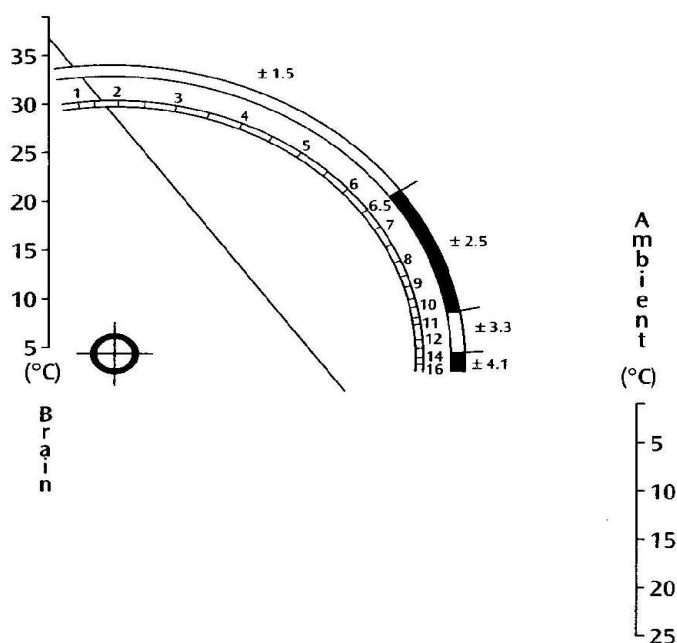
Opracowane przez Henssgego i wsp. [67] fantomy znalazły także zastosowanie w odtwarzaniu przebiegu stygnięcia zwłok w dowolnych warunkach, również w miejscu, w którym dane zwłoki znaleziono. Przeprowadzone badania weryfikujące z wykorzystaniem fantomów i zwłok ludzkich uwiarygodniły metodę „nomogramową”, która jest po dzień dzisiejszy uznawana za wiodącą metodę służącą do określania czasu zgonu we wczesnym okresie pośmiertnym [10, 60, 61].

W latach 80-tych XX wieku ustalaniem czasu śmierci na podstawie pomiaru temperatury ciała zajmował się Hiraiwa [68]. Rozwinął on wysuniętą w latach 50-tych przez Selliera [56] koncepcję modelu stygnięcia odnoszącego ciało ludzkie do nieskończonego długiego cylindra. Hiraiwa opierał się na pomiarach temperatury w odbytnicy. Deklarował błąd swojej metody poniżej 1 h, a w celu ułatwienia odczytu czasu w jakim nastąpił zgon opracował odpowiedni program komputerowy. Niestety, Hiraiwa [68] nie uniknął pewnych

uproszczeń w rzeczywistości mogących znacznie zwiększać deklarowany błąd oceny czasu zgonu.

W 1985 roku Green i Wright [69] opublikowali pracę, w której opisali metodę określania czasu zgonu bez konieczności używania parametrów odnoszących się do masy ciała. Zaproponowana przez nich technika polega na dwukrotnym pomiarze temperatury w odbyciu w odstępie 1 h oraz na pomiarze temperatury otoczenia. Czas, jaki upłynął od śmierci jest wyliczany na podstawie wartości współczynnika odczytywanego z opracowanego przez autorów wykresu, przedstawiającego teoretyczną krzywą stygnięcia ciała.

Podejmowano także próby wykorzystania innych miejsc dla pomiarów temperatury ciała. I tak, miejscem pozwalającym na stosunkowo precyzyjną ocenę czasu śmierci, zwłaszcza w pierwszych 6 h po śmierci (z dokładnością $\pm 1,5$ h) okazał się mózg [70-72]. Brinkmann, Henssge i ich współpracownicy opracowali dla mózgu nomogram (ryc. 3) umożliwiający, na tej samej zasadzie jak przy nomogramie dla temperatury w odbyciu, łatwe odczytanie czasu jaki upłynął od zgonu.



Ryc. 3. Nomogram do odczytywania czasu zgonu na podstawie jednokrotnego pomiaru temperatury mózgu, przy uwzględnieniu temperatury otoczenia, przy 95 % przedziale ufności.

Korzystnym czynnikiem w przypadku mózgu jest brak wpływu masy ciała na jego temperaturę. Natomiast błąd oszacowania czasu śmierci może zwiększać się ze względu na różną ilość włosów czy nakrycie głowy, wpływające na izolację termiczną mózgu.

Czynnikiem niewątpliwie utrudniającym zastosowanie pomiarów temperatury mózgu jest konieczność wprowadzenia sondy pomiarowej w głąb jamy czaszki.

W latach 90-tych XX wieku Baccino i wsp. [73] przeprowadzili serię eksperymentów wykorzystujących pomiar temperatury ucha zewnętrznego. Temperatura była mierzona i monitorowana za pomocą sondy wprowadzonej do ucha, której końcówka przylegała do błony bębenkowej. Nie obserwowano przy tym *plateau* pośmiertnego spadku temperatury. Zaproponowana metoda może być stosowana dla temperatury otoczenia między 16°C a 23°C, a czas zgonu oblicza się ze wzoru:

$$t [\text{min}] = 56,44 \cdot (37 - T_{\text{ucha}}[^\circ\text{C}]) - 150 \quad (\text{równ. 2})$$

Według autorów wyniki cechują się dokładnością podobną do metody „nomogramowej” Henssgego, a w początkowym okresie po śmierci dokładność ich metody jest nawet większa. Dodatkowo ważnym czynnikiem przemawiającym na korzyść tej metody jest brak ingerencji w odbycie, a zatem metoda ta może być metodą alternatywną przy podejrzeniu seksualnego podłoża zbrodni.

Na uwagę zasługuje istotny wkład badaczy polskich w badania nad pośmiertnym spadkiem temperatury zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. W połowie lat 80-tych XX wieku Miścicka-Śliwka i Śliwka, kontynuujący tradycje gdańskiej szkoły ustalania czasu śmierci [2,3,11-14], opublikowali cykl prac [74-79], w których opisali własne badania nad przydatnością pomiarów temperatury zwłok w kilku miejscach ciała dla oceny czasu śmierci. Z badań tych wynika, że najlepszym dla tego celu miejscem pomiarowym jest serce. Miścicka-Śliwka i Śliwka opracowali nomogram pozwalający odczytać czas zgonu na podstawie pomiaru temperatury w sercu przy uwzględnieniu obwodu klatki piersiowej. Stwierdzili ponadto, podawaną także przez uczonych

niemieckich [70-72], przydatność temperatury mierzonej w mózgu i jej wysoką korelację z czasem śmierci. Miścicka-Śliwka i Śliwka [79] wykonywali także pionierskie pomiary temperatury gałki ocznej zwłok ludzkich.

Z ostatnich podejść do pomiarów temperatury zwłok mającej służyć ocenie czasu zgonu należy wspomnieć metodę proponowaną przez Al-Alousi'ego i wsp. [80-82], polegającą na pomiarze za pomocą termografii mikrofalowej temperatury w trzech miejscach ciała: mózgu, wątrobie i odbycie. Na podstawie swoich badań autorzy ci skonstruowali krzywe średniego przebiegu stygnięcia podanych miejsc, odrębnie dla ciała nagiego i osłoniętego, oraz opracowali trójwykładnicze równanie wykorzystujące dane z przeprowadzonych pomiarów trójmiejscowych. Metoda wymaga znajomości temperatury podanych narządów w chwili śmierci, a niedokładność w tym względzie prowadzi do dużych błędów w ocenie czasu śmierci [5, 80-82].

Niedawne badania Mall i wsp. [83] były próbą określenia czasu śmierci przy jedynie częściowo znanych warunkach przebywania zwłok. W ocenie czasu zgonu miało pomagać ciągle, trwające do kilku godzin, monitorowanie temperatury ciała w celu ustalenia szybkości jej spadku. Na tej podstawie miałyby być ustalane warunki otoczenia, a następnie czas zgonu.

1.2.3. Metody łączące pomiar temperatury zwłok z obserwacją zmian pośmiertnych

Niektórzy autorzy zalecają określanie czasu zgonu przy jednoczesnym użyciu kilku metod. Dokonuje się zarówno pomiaru temperatury ciała w więcej niż jednym miejscu (np. w odbycie i mózgu) [84], jak i łączy się pomiar temperatury ciała z innymi metodami szacowania czasu zgonu [85,86], lub stosuje się kilka metod niezależnych od pomiaru temperatury ciała [87,88]. Według Henssgego i Madei [62] zwłaszcza metoda łącząca pomiar temperatury zwłok z oceną wysycenia płam opadowych, stopnia rozwoju stężenia

pośmiertnego, reakcji mięśni szkieletowych na bodziec elektryczny i mechaniczny oraz farmakologicznej pobudliwości tęczówki oka wykazała się większą wiarygodnością i bardziej precyzyjnym zawężeniem oszacowanego czasu śmierci aniżeli jakakolwiek z dotychczas opisywanych metod. W pewnych sytuacjach, określony metodą pomiaru temperatury zarówno dolny jak i górny limit czasu śmierci może być zawężony przez uwzględnienie jednego lub więcej dodatkowych parametrów.

1.3. Opracowane metody określania czasu śmierci a praktyka sądowo-lekarska

Mimo wieloletnich prac licznych badaczy z różnych stron świata, do chwili obecnej nie opracowano metody pozwalającej na precyzyjne oszacowanie czasu zgonu. Najczęściej medycy sądowi dokonujący oględzin zwłok w miejscu ich ujawnienia posługują się metodą uznawaną za najlepiej dopracowaną ze wszystkich wprowadzonych dotychczas, tzn. nomogramem Henssgego. Nie mniej jednak, równie często uciekają się do liczącej przeszło pół wieku, grubo szacunkowej reguły praktycznej (*rule of thumb*) [89]. Reguła ta zakłada, że ciało stygnie z szybkością 1°C/h , przy czym do wyliczonego na tej podstawie czasu śmierci należy dodać 3 h, uwzględniając w ten sposób pośmiertne *plateau* spadku temperatury.

1.4. Możliwości dalszych badań w celu precyzyjniejszego ustalania czasu śmierci

Analizując obszerną literaturę nie znaleziono opracowań umożliwiających praktyczne wykorzystanie gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu jako miejsc pomiaru temperatury w celu ustalania czasu śmierci. Fakt ten skłonił do podjęcia próby opracowania kolejnej, alternatywnej, przydatnej w

praktyce metody, pozwalającej w założeniu na precyzyjne określenie czasu zgonu w początkowym, kilku- lub kilkunastogodzinnym okresie po śmierci. W celu weryfikacji koncepcji przeprowadzono kontrolowany eksperyment w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Eksperyment ten z wielu powodów, zwłaszcza w związku z potrzebą jak najwcześniejszego rozpoczęcia pomiarów, byłby trudny do przeprowadzenia na ludziach. Mógł jednak zostać wykonany na świniach – zwierzętach o podobnej do człowieka fizjologii. Właśnie taki eksperyment, poszerzony o równoczesne pomiary temperatury mięśni i odbytnic, zaprojektowano i przeprowadzono w przedstawionej pracy doktorskiej.

2. CEL PRACY

1. Wprowadzenie gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu jako miejsc przydatnych dla pomiaru temperatury w celu ustalenia czasu śmierci.
2. Wyprowadzenie i weryfikacja wiarygodnego i dogodnego modelu matematycznego pozwalającego na ustalenie czasu, jaki upłynął od śmierci w początkowym okresie po zgonie, w warunkach temperatury pokojowej, z wykorzystaniem w szczególności gałki ocznej (ciała szklistego oka) i tkanek miękkich oczodołu, a także mięśni i odbytnic jako miejsc pomiaru temperatury.
3. Analiza porównawcza dotychczas stosowanych metod określania czasu zgonu na podstawie pomiaru temperatury ciała.
4. Określenie stopnia istotności wpływu niewielkiego ruchu powietrza na szybkość procesu stygnięcia zwłok.

3. MATERIAŁY I METODYKA

Wszystkie doświadczenia przebiegały według procedury zgodnej ze standardami etycznymi dla eksperymentów na zwierzętach. Badania były prowadzone na terenie przemysłowej rzeźni wykonującej ubój trzody chlewnej (Romex, Łęgowo k/Wągrowca). Rzeźnia posiadała odpowiednie certyfikaty higieniczno-weterynaryjne umożliwiające prawidłową działalność oraz udostępniła odpowiednie izolowane pomieszczenia, w których mógł być przeprowadzony eksperyment naukowy. Badania zostały przeprowadzone na świniami, które nie były ubijane jedynie dla celów eksperymentu, ale stanowiły nadwyżkę przeznaczonych na cele spożywcze zwierząt, która była używana do produkcji pasz dla zwierząt lub częściowo utylizowana.

Badania przeprowadzono dwuetapowo.

W pierwszym etapie (sierpień i wrzesień 2004 r.) badania przeprowadzono na 19 świniami rasy Wielka Biała Polska (13 osobników płci żeńskiej i 6 płci męskiej), o masie ciała od 81 kg do 124 kg (ryc. 4).

W drugim etapie (czerwiec 2005 r.) badania przeprowadzono na 10 świniami rasy Wielka Biała Polska (6 osobników płci żeńskiej i 4 płci męskiej), o masie ciała od 80 kg do 114 kg (ryc. 5).

W obu etapach badań do pomiarów użyto 5 dwukanałowych termometrów P 655 łączonych z sondami igłowymi Pt100, klasa B 1/3 DIN, o wymiarach 100x1,4mm, zakończonymi czujnikiem temperatury długości 20 mm oraz z sondami Pt100, klasa B, o wymiarach 150x3 mm, zakończonymi czujnikiem temperatury długości 40 mm (producent aparatury pomiarowej Dostmann–electronic GmbH, Wertheim-Reicholzheim, Niemcy; termometry nr kat. 5000-0655; sondy igłowe Pt100, klasa B 1/3 DIN nr kat. 6000-9999; sondy Pt100, klasa B nr kat. 6000-1001). Każdy z 5 zestawów pomiarowych: termometr oraz dwie sondy, poddawano kalibracji według wskazówek producenta.

Badane osobniki były wybierane losowo spośród ubijanych podczas cyklu produkcyjnego według obowiązujących procedur. Zwierzęta były ubijane za pomocą standardowo stosowanego w czasie uboju zwierząt prądu elektrycznego przykładanego do grzbietu. Taki sposób uboju zapewniał zachowanie fizjologicznej temperatury wnętrza ciała świń, a jedynie mogło dochodzić do niewielkiego ocieplenia skóry w okolicy przyłożenia prądu [90]. Bezpośrednio po uboju, po stwierdzeniu braku odruchu rogówkowego potwierdzającego zgon zwierzęcia, każdorazowo dwa zwierzęta kładzono powierzchniami brzuszными na drewnianych gretingach o wysokości 15 cm w izolowanym od otoczenia zamkniętym pomieszczeniu o wymiarach: w pierwszym etapie badań około 11x5m i wysokości 3,5 m, w drugim etapie 4,5x3,5m i wysokości 3 m.

W obu etapach badań czynności umieszczenia sond i podłączenia aparatury pomiarowej miały taki sam przebieg.

Po założeniu rozwórki powiekowej w celu uzyskania szerokiej szpary powiekowej, gałki oczne stabilizowano pensetami stabilizacyjnymi.

Sondy igłowe (Pt100, klasa B 1/3 DIN) nr 1 i 3 wkłuwano w twardówkę w okolicy kwadrantów nosowych lewych gałek ocznych, 3 mm od rąbka rogówki, przeprowadzając je przez część płaską ciała rzęskowego do komory ciała szklistego, a dalej ku tyłowi i bocznie od tarczy nerwu wzrokowego na głębokość około 22 mm.

Sondy igłowe (Pt100, klasa B 1/3 DIN) nr 2 i 4 wkłuwano w tkanki miękkie prawych oczodołów w okolicy kąta przyśrodkowego powiek, przeprowadzając je wzdłuż mięśnia prostego przyśrodkowego w kierunku szczeliny oczodołowej górnej na głębokość 25 mm.

Sondy nr 5, 6, 7, 8 (Pt100, klasa B) wprowadzano po rękojeść na całą ich długość (150 mm) w mięśnie i w odbytnice, przy czym sondy nr 5 i 6 w mięśnie lewych zadów z punktu wkłucia leżącego w centralnej części zadu, zaś sondy nr 7 i 8 w odbytnice.

Temperaturę otoczenia mierzono i monitorowano z użyciem sondy nr 9, umieszczonej w części środkowej pomieszczenia, 0,5 m ponad podłożem.

Przypadające na jedno badanie 9 sond sytuowano równolegle do podłoża a ich rękojeści stabilizowano w uchwytach statywów. Zwracano przy tym uwagę, aby sondy oczne (nr 1, 2, 3, 4) nie powodowały po ich zainstalowaniu otwarcia powiek, które u wszystkich osobników były w sposób naturalny zamknięte.

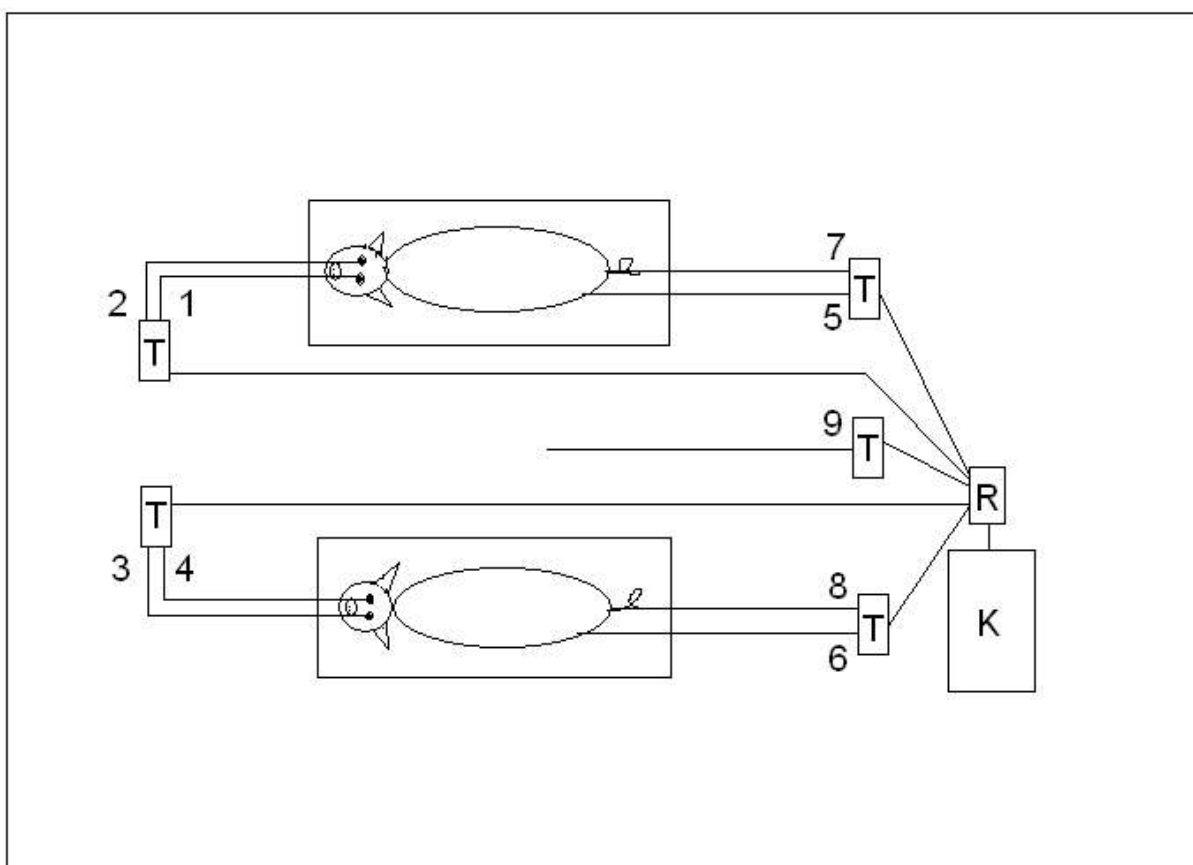
Termometry podłączano do komputera zaprogramowanego na ciągłą rejestrację z częstotliwością 5 min^{-1} przekazywanych wartości temperatury.

Postępowanie poprzedzające włączenie rejestratora w pierwszej serii eksperymentów trwało 75 minut. Natomiast w drugiej serii badań, ze względu na doświadczenie i poprawę organizacji, udało się rozpoczynać monitorowanie temperatury już od 30-tej minuty po ubiciu zwierząt. Zakończenie rejestracji pomiarów następowało po upływie w pierwszym etapie około 20 h, a w drugim etapie po około 15 h od śmierci zwierząt.

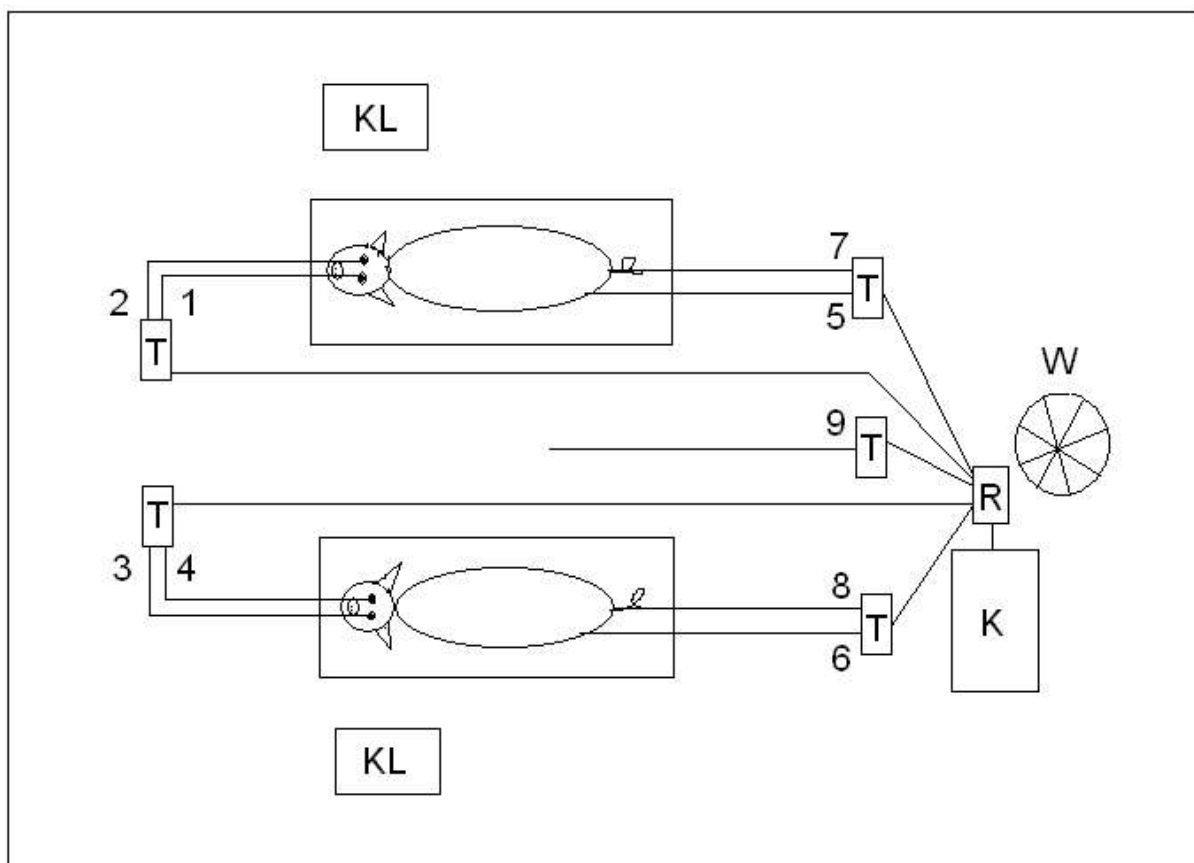
Celem modyfikacji warunków otoczenia i porównania otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi w pierwszym etapie badań, podczas drugiej serii eksperymentów w pomieszczeniu funkcjonowały dwa klimatyzatory K-2700, o wydajności chłodniczej 2700 W, 9000 Btu/h, wylocie dyszy o wymiarach 0,1x0,35 m (produkcji firmy Elhurt Klima, Niemcy) oraz wentylator XS40C2, średnicy 0,4 m (produkcji firmy Sanico, Polska). Zadana dla klimatyzatorów temperatura wynosiła 18 °C. Klimatyzatory były zwrócone dyszami do siebie, ustawione po stronie zewnętrznej zwierząt na wysokości ich łbów. Klimatyzatory i wentylator były ustawione w odległości 2,8 m względem siebie, w miejscach wierzchołków tak utworzonego trójkąta równobocznego. Odległość między każdym z klimatyzatorów a sąsiadującym z nim łbem wynosiła 0,8 m, natomiast między wentylatorem a łbami po 2,5 m. Wentylator znajdował się poza linią zadów. Dysze klimatyzatorów i środek wiatraka wentylatora znajdowały się 0,7 m ponad podłożem. Gałki oczne podczas

eksperymentów znajdowały się około 0,25 m ponad podłożem, natomiast odbytnice i miejsca wklucia sond w mięśnie zadów na wysokości około 0,3 m ponad podłożem.

Prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu mierzono przy użyciu anemometru (Testo 452, nr kat. 0560.4520, Testoterm GmbH, Lenzkirch/Schwarzwald, Niemcy) z użyciem sondy izotropowej, w kształcie kuli o średnicy 4 mm (nr kat. 0635.1549).



Ryc. 4. Schemat przedstawiający pomieszczenie oraz położenie w nim zwierząt i aparatury badawczej w pierwszej serii doświadczeń: T – termometr dwukanałowy, R – rejestrator, K – komputer; cyframi oznaczono numery sond.



Ryc. 5. Schemat przedstawiający pomieszczenie oraz położenie w nim zwierząt i aparatury badawczej w drugiej serii doświadczeń: T – termometr dwukanałowy, R – rejestrator, K – komputer, KL – klimatyzator, W – wentylator; cyframi oznaczono numery sond.

Zainscenizowane w drugim etapie badań warunki miały odpowiadać istniejącym w pomieszczeniach z włączoną klimatyzacją, wentylatorami, z uchylonymi drzwiami lub oknami powodującymi przeciąg. Warunki takie, wymuszonego bądź naturalnego ruchu powietrza, panują często w pomieszczeniach domowych (mieszkania, lokale publicznego użytku, lokale rozrywkowe), będących często miejscem zgonów o charakterze kryminalnym.

Podczas drugiego etapu badań, bezpośrednio przed wkłuwaniem sond ocznych, dokonywano także pomiarów temperatury gałek ocznych przy użyciu termometru laserowego wykorzystującego promieniowanie podczerwone ProScan 510 (Dostmann–electronic GmbH, Wertheim-Reicholzheim, Niemcy, nr kat. 5020-0510). Po każdorazowym rozwarciu powiek promień lasera

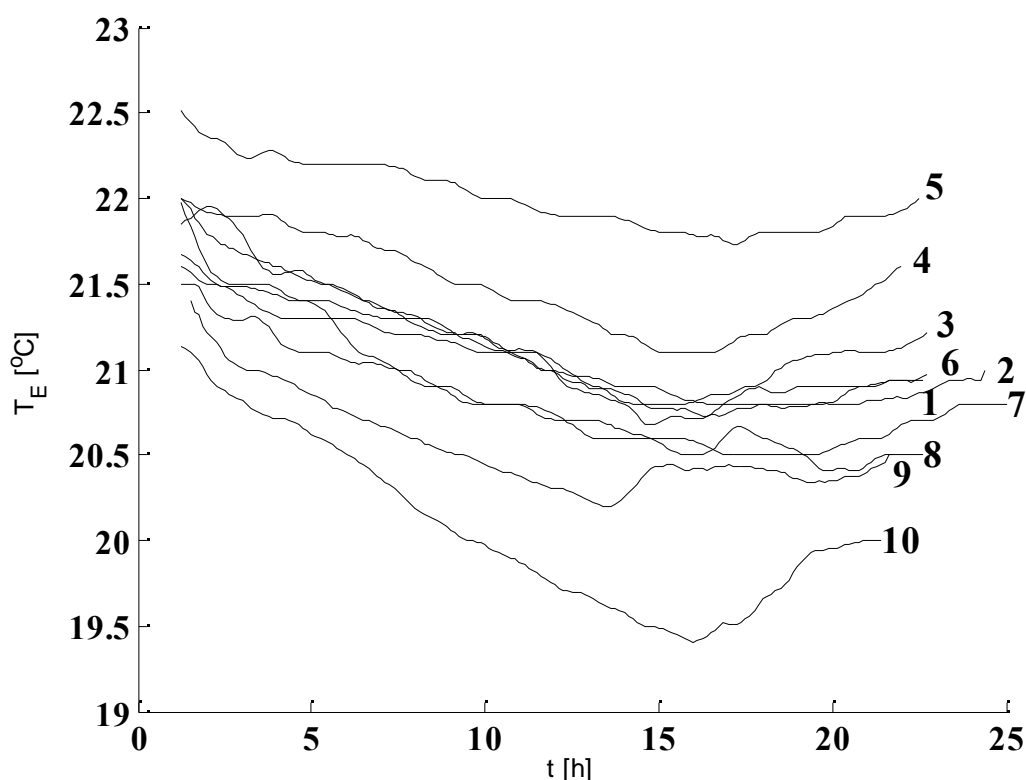
kierowano 3-krotnie w odstępie 15 s z odległości 5 cm na środek źrenicy. Wyniki pomiarów z użyciem termometru laserowego odczytywano bezpośrednio z jego czytnika.

Wyniki otrzymane w obu seriach doświadczeń opracowywano z zastosowaniem programu Microsoft Excel 2000 (Microsoft Corporation, USA) oraz przy użyciu programu obliczeniowego Matlab[®] Software ver. 7.0 (The Math Works, Inc., Natick, MA, USA).

4. WYNIKI I ICH DYSKUSJA

4.1. Doświadczenia uwzględniające pomiary temperatury od 75 minuty po śmierci zwierząt

W pierwszym etapie doświadczeń pomiary pośmiertnej temperatury ciała u świń wykonano w typowej temperaturze pokojowej w lecie (sierpień, wrzesień). Przebiegi czasowe zmian temperatury otoczenia w trakcie eksperymentów przedstawia ryc. 6 (kolejne dni eksperymentu oraz świnię ponumerowano zgodnie z tabelą 1). W obliczeniach wykorzystano średnią temperaturę otoczenia w danym dniu eksperymentu [91].



Ryc. 6. Wykres przedstawiający zmiany temperatury otoczenia w czasie trwania eksperymentów przy rejestracji temperatury rozpoczynanej od 75 minuty po śmierci zwierząt (po 2 świnię każdego dnia, z wyjątkiem dnia 5-tego, kiedy eksperyment był przeprowadzony na jednej świni). Numeracja dotyczy kolejnych dni eksperymentu.

Tabela 1. Dzień eksperymentu, numer porządkowy świni, masa ciała, współczynniki i parametry statystyczne równań jednowykładniczych, opisujących spadek temperatury ciała w czasie w czterech miejscach pomiarowych u badanych świń, począwszy od 75 minuty po ich śmierci.

Dzień eksperymentu_ numer świni [średnia temperatura otoczenia]	Masa ciała [kg]	Współczynniki równania jednowykładniczego i parametry statystyczne															
		Gałka oczna				Tkanki oczodołów				Odbytlica				Mięśnie			
		a	b	rsquare	rmse	a	b	rsquare	rmse	a	b	rsquare	rmse	a	b	rsquare	rmse
1_1 [21,1 °C]	103	16,4	-0,124	0,997	0,202	-	-	-	-	19,9	-0,052	0,994	0,285	20,9	-0,061	0,998	0,171
		15,1	-0,115	0,996	0,218	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1_2 [21,1 °C]	91	16,6	-0,141	1,000	0,075	-	-	-	-	22,1	-0,067	0,990	0,465	19,3	-0,072	0,999	0,146
		15,2	-0,142	0,999	0,100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2_1 [21,1 °C]	88	-	-	-	-	17,0	-0,119	1,000	0,049	21,6	-0,055	0,996	0,273	20,8	-0,065	0,999	0,149
2_2 [21,1 °C]	124	-	-	-	-	16,3	-0,093	0,997	0,182	21,1	-0,048	0,997	0,229	21,2	-0,058	1,000	0,077
3_1 [21,1 °C]	88	14,8	-0,130	0,998	0,133	17,0	-0,118	0,997	0,194	19,3	-0,063	0,999	0,113	18,6	-0,070	0,998	0,171
3_2 [21,1 °C]	112	14,7	-0,111	0,999	0,123	17,0	-0,104	0,997	0,207	19,6	-0,051	0,999	0,097	20,0	-0,054	0,999	0,104
4_1 [21,5 °C]	81	15,1	-0,107	0,999	0,103	16,0	-0,103	0,998	0,157	21,0	-0,063	0,999	0,143	19,2	-0,068	0,999	0,135
4_2 [21,5 °C]	87	13,6	-0,101	0,999	0,110	13,9	-0,102	0,997	0,154	20,7	-0,056	1,000	0,062	20,6	-0,060	0,999	0,128
5_1 [22,0 °C]	102	14,8	-0,098	0,998	0,129	15,3	-0,098	0,999	0,119	20,0	-0,051	0,994	0,275	19,0	-0,060	0,998	0,183
6_1 [21,1 °C]	87	14,7	-0,113	0,995	0,218	15,0	-0,119	0,997	0,193	20,6	-0,064	0,998	0,172	20,6	-0,066	1,000	0,045
6_2 [21,1 °C]	83	14,3	-0,124	0,999	0,110	14,1	-0,136	0,999	0,115	18,2	-0,070	1,000	0,055	19,0	-0,069	1,000	0,067
7_1 [20,8 °C]	78	16,6	-0,115	0,995	0,255	-	-	-	-	20,6	-0,062	1,000	0,064	19,7	-0,069	1,000	0,024
		15,1	-0,114	0,996	0,220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7_2 [20,8 °C]	90	16,0	-0,105	0,994	0,276	-	-	-	-	20,2	-0,055	1,000	0,061	21,0	-0,061	1,000	0,099
		14,8	-0,100	0,997	0,192	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8_1 [20,9 °C]	102	14,6	-0,099	0,997	0,174	14,7	-0,107	0,995	0,221	21,2	-0,052	0,996	0,255	20,9	-0,062	0,998	0,168
8_2 [20,9 °C]	82	15,2	-0,124	0,999	0,122	15,3	-0,117	1,000	0,067	20,0	-0,061	0,998	0,158	19,9	-0,064	0,999	0,148
9_1 [20,5 °C]	108	14,2	-0,110	0,992	0,267	14,7	-0,128	0,981	0,424	22,3	-0,061	0,997	0,232	22,5	-0,064	0,999	0,165
9_2 [20,5 °C]	99	15,1	-0,104	0,996	0,189	16,0	-0,129	0,989	0,348	20,3	-0,064	1,000	0,073	21,1	-0,071	0,999	0,146
10_1 [20,1 °C]	93	16,8	-0,096	0,998	0,179	15,7	-0,100	0,997	0,181	21,6	-0,053	1,000	0,056	22,1	-0,058	0,999	0,108
10_2 [20,1 °C]	109	16,1	-0,112	0,995	0,249	15,9	-0,113	0,996	0,218	20,4	-0,060	0,999	0,130	19,8	-0,063	0,999	0,139

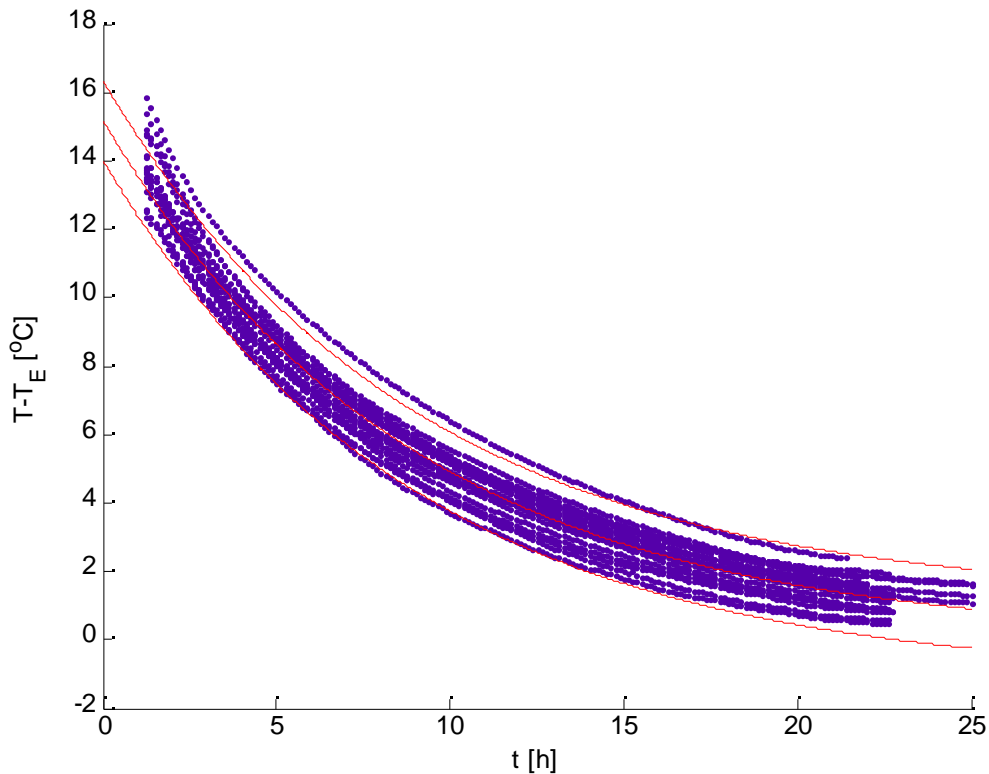
Jak wynika z ryc. 6, zmienność temperatury otoczenia podczas poszczególnych pojedynczych dni doświadczalnych wynosiła maksymalnie $1,5^{\circ}\text{C}$. Odchylenie średnich temperatur pomiędzy wszystkimi dniami eksperymentu mieściło się w granicach 2°C . Warunki eksperymentalne były zatem typowe dla przypadków spotykanych w medycynie sądowej, gdy zwłoki pozostają w warunkach domowych. Oczywiście, według podstawowych zasad termodynamiki, zaobserwowane zależności winny odnosić się również do innych wartości temperatury otoczenia.

Rycina 7 przedstawia wykonane w odstępach 5-minutowych pomiary różnicy temperatury poszczególnych gałek ocznych świń (T) i otoczenia (T_E) dla 21 badanych gałek. Należy tu zaznaczyć, że w przypadku obu świń badanych w dniu 1. i 7. temperatura była mierzona w obu gałkach ocznych, natomiast w dniu 2. pomiaru temperatury w gałkach ocznych nie wykonywano (*vide* tabela 1).

Na ryc. 7 wyraźnie widać bardzo regularny wykładniczy spadek różnicy temperatury, $T-T_E$, podczas całego okresu pomiaru, czyli począwszy od 75. min od śmierci świń. W tabeli 7 zebrano dla każdej ze świń współczynniki a i b poszczególnych równań postaci:

$$T-T_E = a \cdot \exp(b \cdot t) \quad (\text{równ. 3})$$

Na ryc. 7 podano model matematyczny wraz z wykresami średnich zależności wykładniczych pomiędzy różnicą między temperaturą w gałce ocznej i temperaturą otoczenia a czasem dla 21 gałek ocznych. Jakość statystyczna modelu jest bardzo wysoka, o czym świadczą wartości *rsquare* oraz *rmse*. Znaczenie tych parametrów statystycznych jest następujące: parametr *rsquare* stanowi miarę skuteczności dopasowania modelu względem zmienności danych, a parametr *rmse* to pierwiastek ze średniego błędu kwadratowego. Dopasowując model wykładniczy do przebiegu krzywych stosowano metodę najmniejszych kwadratów.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$a = 15,2$ (15,1; 15,3)

$b = -0,113$ (-0,113; -0,112)

rsquare: 0,969

rmse: 0,589

Ryc. 7. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą gałki ocznej (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 75 minuty po śmierci dla 19 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.

Sens fizyczny współczynników występujących w modelu wykładniczym jest następujący: współczynnik a to początkowa różnica temperatur, czyli ekstrapolowana do chwili śmierci ($t = 0$) różnica pomiędzy temperaturą gałki ocznej a otoczeniem; współczynnik b z kolei obrazuje szybkość spadku temperatury.

Analizując dane z tabeli 1 można zauważyć na przykład, że świnia nr 1 badana w dniu 4. (świnia 4_1) miałaby ekstrapolowaną do czasu zgonu temperaturę gałki ocznej, T_D , wynoszącą 36,6 °C. Wynika to z następujących wyliczeń (równanie 3): ponieważ $a = 15,1$ °C przy $T_E = 21,5$ °C to $T_D - T_E = 15,1$ °C, a zatem $T_D = 36,6$ °C. Wyliczona wartość na tym etapie badań wydawała się wiarygodna, zwłaszcza, że nie udało się odnaleźć żadnych doniesień w literaturze na temat prawidłowej temperatury gałki ocznej u świń. Odstąpiono od przeprowadzenia doświadczenia *in vivo*, przyjmując, że średnie wartości $a = 15,2$ °C oraz $T_E = 21,0$ °C dają wysoce prawdopodobną wartość T_D , czyli fizjologiczną temperaturę w gałce ocznej świń wynoszącą około 36,2 °C. Ta wartość temperatury może być nieco wyższa niż u ludzi, gdyż temperatura ciała u świń mieści się w granicach 38-40 °C [92-94], podczas gdy u ludzi zakres ten – jak powszechnie się przyjmuje – wynosi 36,5-37,5 °C.

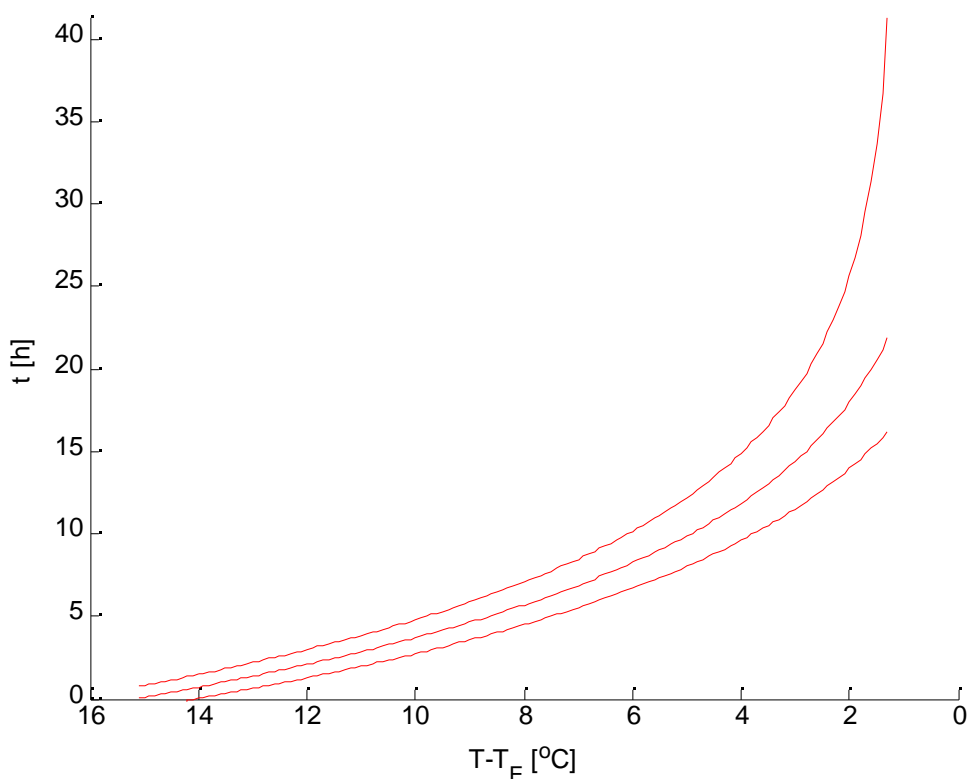
Rozrzut przebiegów czasowych temperatury gałki ocznej dla badanych świń przedstawia ryc. 7. Tylko dane od jednej świni wykraczają minimalnie poza 95% przedział ufności wyprowadzonego modelu matematycznego. Jednowykładniczy model okazuje się być rzetelny i można go stosować do szacowania czasu, jaki upłynął od zgonu w oparciu o zmierzoną temperaturę gałki ocznej. Na potrzeby takiego oszacowania wygodnie jest wykonać proste przekształcenie algebraiczne równania 3 do następującej postaci:

$$t = (1/b) \cdot \ln[(T - T_E)/a] \quad (\text{równ. 4})$$

Rycina 8 ilustruje zmniejszającą się wartość predykcyjną jednowykładniczego modelu ze wzrostem czasu upływającego od śmierci świni. Można zauważyć, że precyzja przewidywania jest wyraźnie mniejsza przy malejącej różnicy temperatury ciała i temperatury otoczenia, $T - T_E$, czyli przy większym ochłodzeniu zwłok.

W tabeli 2 podano dolną i górną granicę 95% przedziału ufności dla czasu, jaki upłynął od zgonu, oszacowanego na podstawie pomiaru temperatury gałki ocznej. Wyraźnie widać, że przewidywania są szczególnie rzetelne, jeżeli

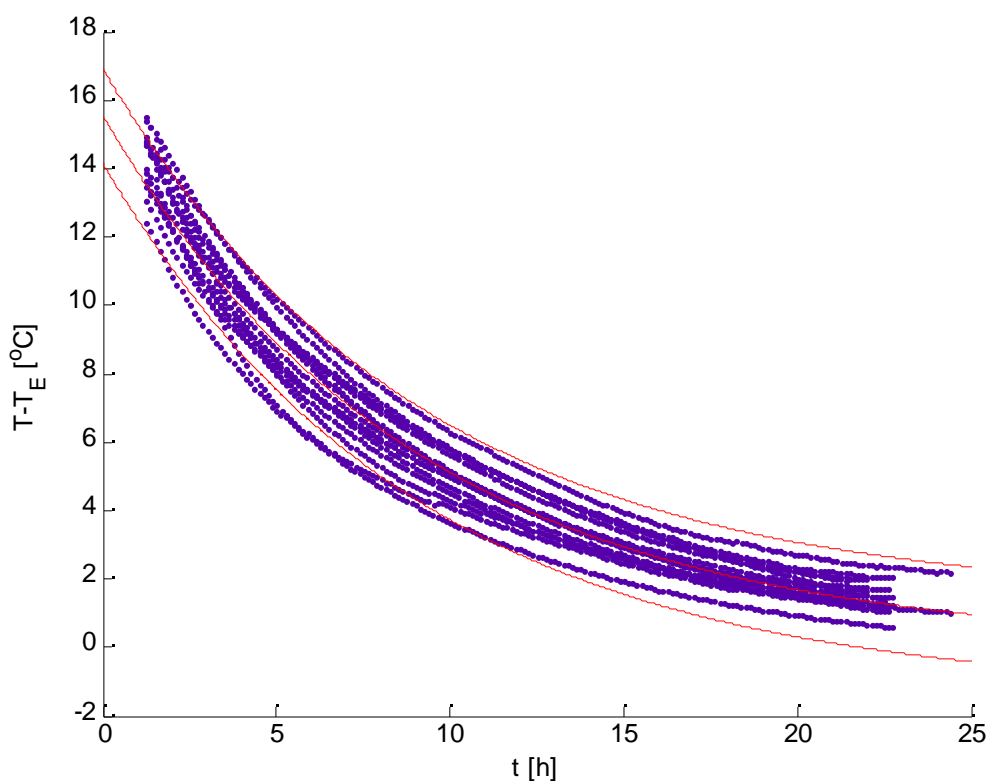
czas od zgonu jest względnie krótki. Jeżeli od śmierci upłynęło więcej niż 20 h, przewidywania na podstawie tego modelu stają się niemożliwe.



Ryc. 8. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w gałce ocznej od 75 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Ryciny 9 i 10 dla tkanek miękkich oczodołu wykazują bliskie podobieństwo z odpowiadającymi im rycinami dla gałki ocznej (ryc. 7 i 8). Współczynniki a i b równania wykładniczego dla poszczególnych świń (tabela 1), jak również współczynniki uśrednionego ogólnego modelu (ryc. 9), wykazują bliskie podobieństwo z współczynnikami uzyskanymi dla gałek ocznych. Oznaczałoby to, że zarówno ekstrapolowana temperatura w chwili śmierci, a , jak i stała szybkości spadku temperatury, b , są podobne. Jest to racjonalne ze względu na bliskość tych miejsc pomiaru temperatury. Jednak rozrzut przebiegów czasowych spadku temperatury jest większy w przypadku

tkanek miękkich oczodołu (ryc. 9) niż w przypadku gałek ocznych (ryc. 7). Ilościowo potwierdza to większa wartość $rmse$ dla tkanek miękkich oczodołu niż $rmse$ dla gałek ocznych (odpowiednio: 0,705 i 0,589). Również rozpiętości pomiędzy dolnymi a górnymi granicami 95% przedziałów ufności dla szacowanego czasu zgonu, odpowiadające tej samej różnicy temperatur $T-T_E$, są nieco większe w przypadku tkanek miękkich oczodołu niż gałek ocznych (tabela 3).



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

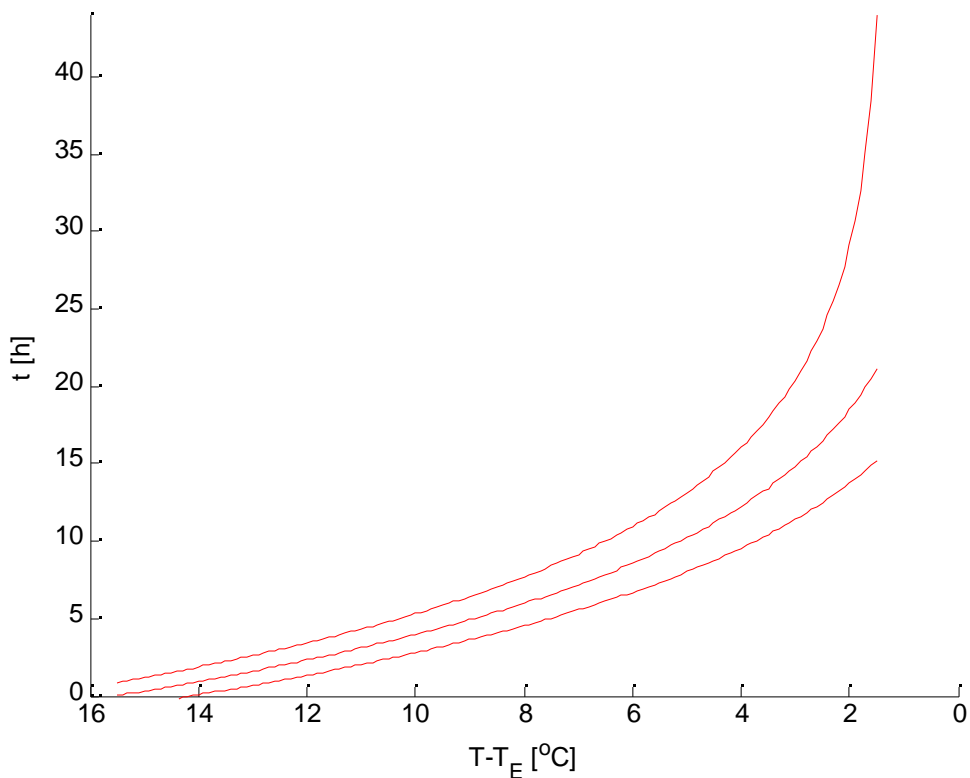
$$a = 15,5 \quad (15,4; 15,6)$$

$$b = -0,111 \quad (-0,112; -0,110)$$

$$rsquare: 0,958$$

$$rmse: 0,705$$

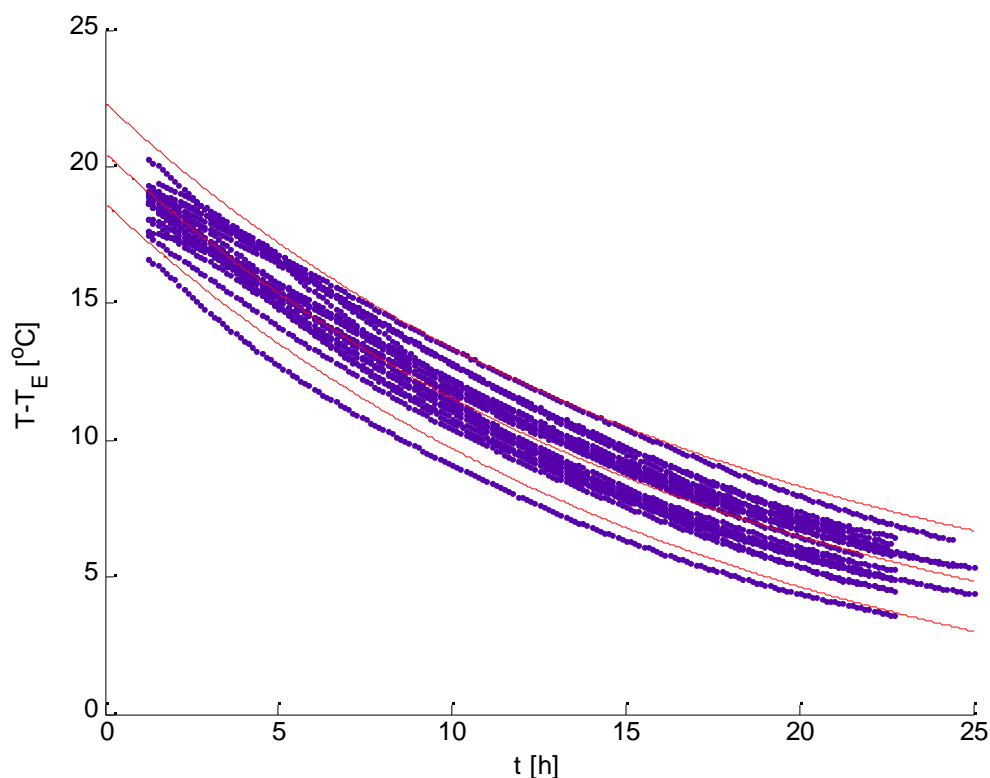
Ryc. 9. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą tkanek miękkich oczodołu (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 75 minuty po śmierci dla 19 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



Ryc. 10. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w tkankach miękkich oczodołu od 75 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Ryciny 11 i 12 odnoszą się do pomiarów temperatury w odbytnicy u świń. Można zauważyć znaczne różnice w porównaniu z odpowiednimi wykresami ilustrującymi pośmiertny spadek temperatury w gałkach ocznych i tkankach miękkich oczodołu. Po pierwsze, na ryc. 11 zaznacza się faza opóźnienia (*plateau*) w początkowym okresie rejestracji temperatury. Widać, że faza ta może trwać nawet do 5-6 h po śmierci. Jest to zgodne z doniesieniami na temat czasu trwania *plateau* u ludzi [43,51,57]. W oparciu o dokonane pomiary nie było jasne, jak w okresie pierwszych 75 min po śmierci manifestuje się *plateau*. Można jednak było wnioskować, że faza opóźnienia jest wyraźna, ponieważ mierzona w odbytnicy temperatura w chwili śmierci wyliczona z

ekstrapolowanych współczynników a (tabela 2) wahała się dla poszczególnych świń w granicach od 39,3°C do 43,2°C. Takie wartości wydają się zbyt wysokimi dla normalnej temperatury fizjologicznej, choć nie są to wartości absurdalne.



$$[T - T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a = 20,5 \quad (20,4; 20,6)$$

$$b = -0,058 \quad (-0,058; -0,057)$$

$$rsquare: 0,946$$

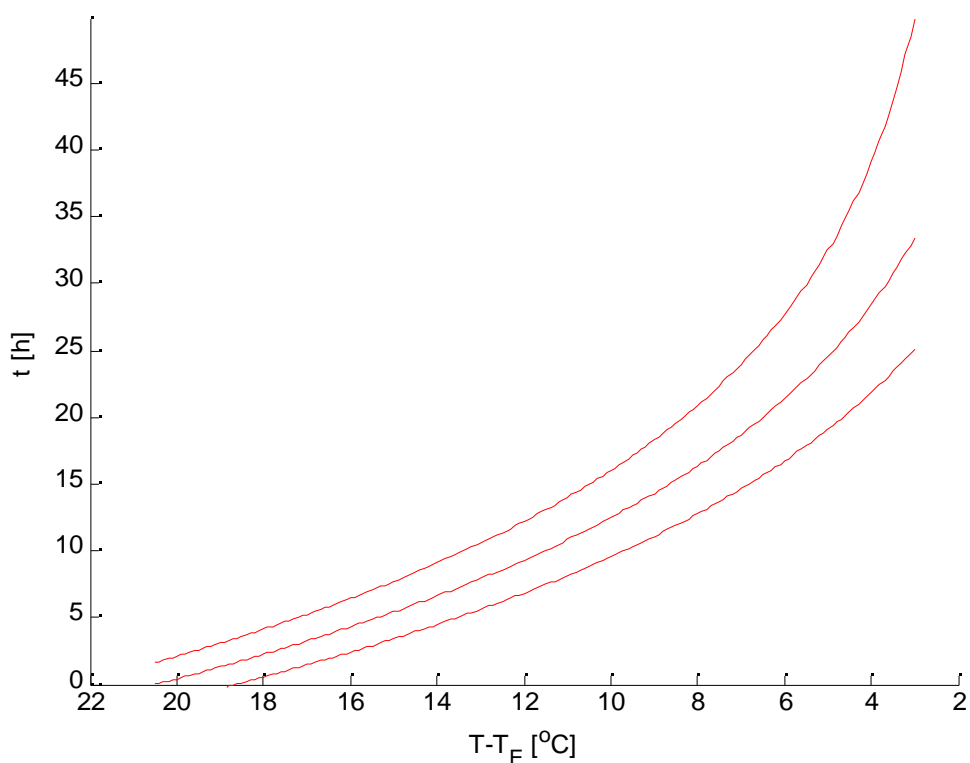
$$rmse: 0,936$$

Ryc. 11. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą odbyticy (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 75 minuty po śmierci dla 19 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.

Średnia stała szybkości zmiany temperatury w odbyticy, b , wynosi $-0,058 \text{ h}^{-1}$ (ryc. 11), co oznacza wolniejsze tempo spadku temperatury w

porównaniu z gałką oczną ($b = -0,113 \text{ h}^{-1}$) czy z tkankami miękkimi oczodołu ($b = -0,111 \text{ h}^{-1}$).

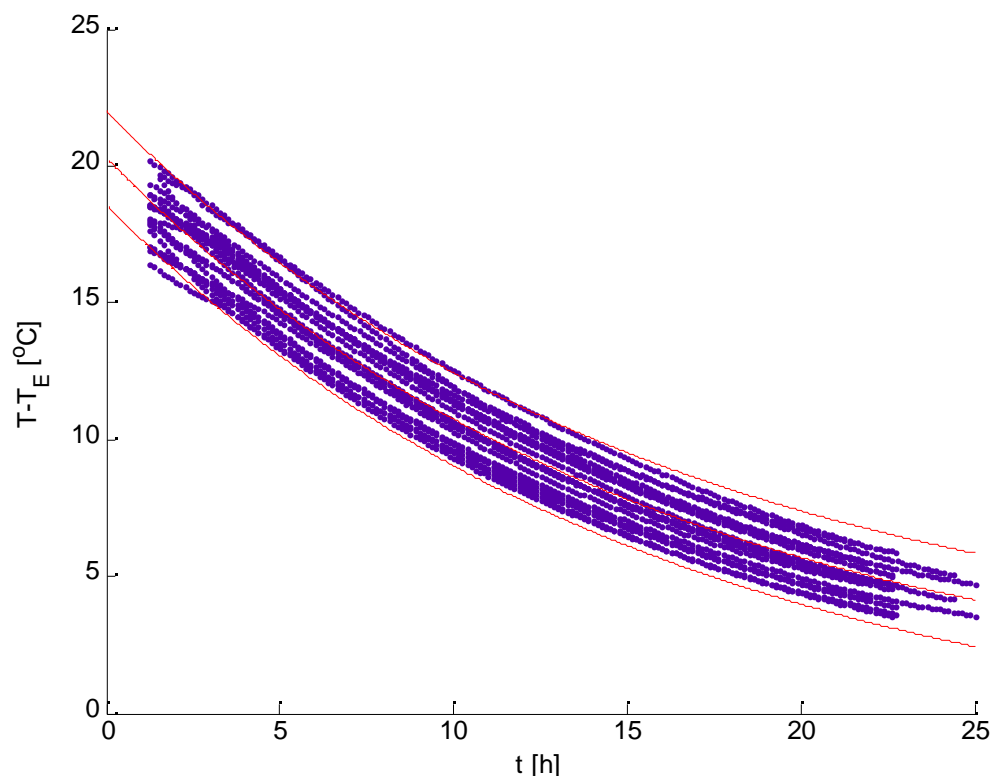
Rycina 12 i tabela 4 pokazują, że błędy w szacowaniu czasu zgonu na podstawie jednowykładniczego modelu opierającego się na temperaturze mierzonej w odbytnicy są większe niż w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu we wcześniejszych okresach po śmierci. Z drugiej jednak strony, dane dotyczące temperatury w odbytnicy pozwalają na szacowanie czasu zgonu po długich okresach czasu (nawet do 30 h), podczas gdy po upływie więcej niż 20 h od zgonu oszacowanie czasu zgonu na podstawie pomiarów temperatury w gałce ocznej i tkankach miękkich oczodołu staje się niemożliwe.



Ryc. 12. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w odbytnicy od 75 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Wyniki pomiarów temperatury w mięśniach (ryc. 13 i 14, tabela 5) są dość podobne do wyników uzyskanych w przypadku odbytnicy. Jak widać na ryc. 13, faza opóźnienia wyraźnie utrzymuje się u niektórych świń po upływie

75 min po śmierci. Choć współczynniki a i b niewiele różnią się od współczynników uzyskanych dla odbytnicy jako miejsca pomiaru temperatury, to różnica ta jest jednak statystycznie znamienne. Temperatura w mięśniach w chwili śmierci, ekstrapolowana z modelu jednowykładniczego (tabela 2), mieści się w granicach od 39,7 °C do 43,0 °C.



$$[T - T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a = 20,3 \quad (20,2; 20,4)$$

$$b = -0,063 \quad (-0,064; -0,063)$$

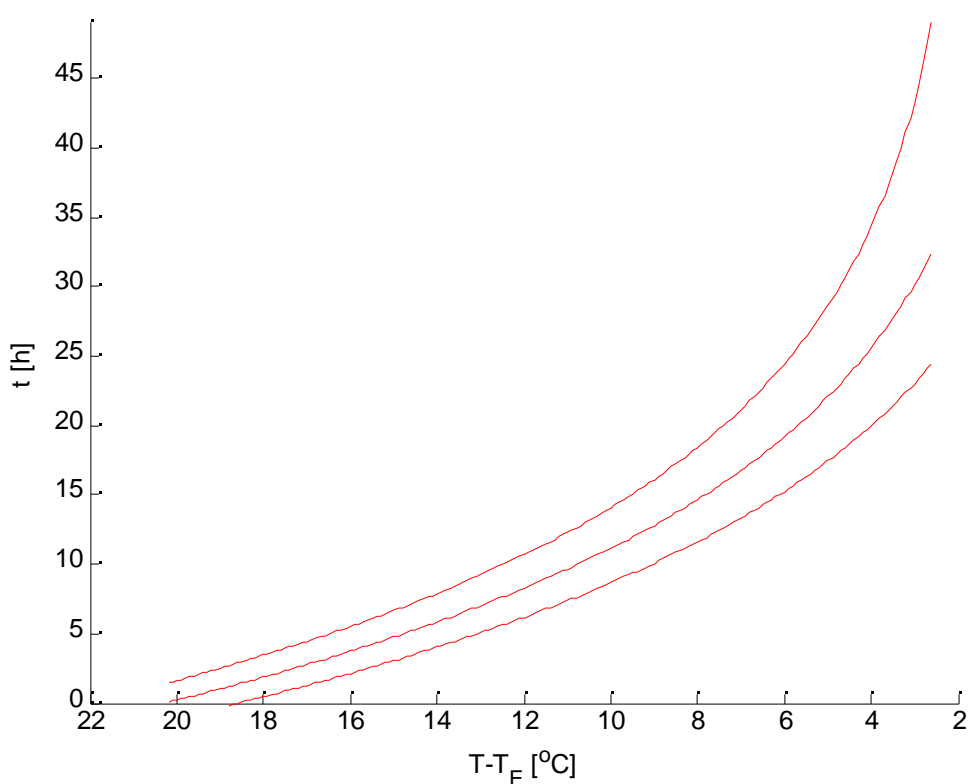
$$rsquare: 0,955$$

$$rmse: 0,868$$

Ryc. 13. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą mięśni (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 75 minuty po śmierci dla 19 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.

Stała szybkości spadku temperatury, wynosząca $-0,063 \text{ h}^{-1}$ sugeruje nieco szybsze stygnięcie mięśni niż odbytnicy ($-0,058 \text{ h}^{-1}$). Dość zaskakujący jest fakt,

iż rozproszenie krzywych przebiegów czasowych temperatury w mięśniach, w porównaniu z odbytnicą, jest mniejsze (odpowiednio: ryc. 13 i 11). Obserwację tę potwierdza wartość parametru *rmse*, która dla mięśni wynosi 0,862; dla odbytnicy natomiast 0,936. Ponadto ryc. 14 i tabela 5 sugerują możliwość nieco precyzyjniejszego oszacowania czasu zgonu na podstawie danych dotyczących mięśni, choć okres, w którym oszacowanie czasu zgonu jest wiarygodne, jest w tym przypadku nieco krótszy niż w przypadku pomiarów temperatury w odbytnicy.



Ryc. 14. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury mięśni od 75 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Tabela 2. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury gałki ocznej i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z

pomiarów rozpoczynanych od 75 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w gałce ocznej; T_E – temperatura otoczenia.

T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max
1,4	15,8	21,2	36,7	7,8	4,7	5,9	7,3
1,6	15,2	20,0	31,4	8,0	4,5	5,7	7,1
1,8	14,5	19,0	28,1	8,2	4,3	5,5	6,8
2,0	14,0	18,0	25,7	8,4	4,1	5,3	6,6
2,2	13,4	17,2	23,8	8,6	3,9	5,1	6,3
2,4	12,9	16,4	22,2	8,8	3,8	4,8	6,1
2,6	12,4	15,7	20,9	9,0	3,6	4,6	5,9
2,8	12,0	15,0	19,8	9,2	3,4	4,5	5,6
3,0	11,5	14,4	18,7	9,4	3,2	4,3	5,4
3,2	11,1	13,8	17,8	9,6	3,1	4,1	5,2
3,4	10,7	13,3	17,0	9,8	2,9	3,9	5,0
3,6	10,3	12,8	16,2	10,2	2,6	3,5	4,6
3,8	10,0	12,3	15,5	10,4	2,4	3,4	4,4
4,0	9,6	11,9	14,9	10,6	2,3	3,2	4,2
4,2	9,3	11,4	14,3	10,8	2,1	3,0	4,0
4,4	8,9	11,0	13,7	11,0	2,0	2,9	3,9
4,6	8,6	10,6	13,2	11,2	1,8	2,7	3,7
4,8	8,3	10,2	12,7	11,4	1,7	2,5	3,5
5,0	8,0	9,9	12,2	11,6	1,5	2,4	3,3
5,2	7,7	9,5	11,8	11,8	1,4	2,2	3,2
5,4	7,5	9,2	11,3	12,0	1,3	2,1	3,0
5,6	7,2	8,9	10,9	12,2	1,1	1,9	2,8
5,8	6,9	8,6	10,5	12,4	1,0	1,8	2,7
6,0	6,7	8,3	10,2	12,6	0,9	1,7	2,5
6,2	6,4	8,0	9,8	12,8	0,8	1,5	2,4
6,4	6,2	7,7	9,4	13,0	0,6	1,4	2,2
6,6	6,0	7,4	9,1	13,2	0,5	1,2	2,1
6,8	5,7	7,1	8,8	13,4	0,4	1,1	1,9
7,0	5,5	6,9	8,5	13,6	0,3	1,0	1,8
7,2	5,3	6,6	8,2	13,8	0,1	0,9	1,6
7,4	5,1	6,4	7,9	14,0	0,0	0,7	1,5
7,6	4,9	6,2	7,6				

Tabela 3. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury tkanek miękkich oczodołu i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 75 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w tkankach miękkich oczodołu; T_E – temperatura otoczenia.

T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max
1,6	14,9	20,5	38,5	8,0	4,5	6,0	7,7
1,8	14,3	19,4	32,6	8,2	4,4	5,8	7,4
2,0	13,7	18,5	29,1	8,4	4,2	5,5	7,2
2,2	13,2	17,6	26,6	8,6	4,0	5,3	6,9
2,4	12,7	16,8	24,6	8,8	3,8	5,1	6,7
2,6	12,3	16,1	23,0	9,0	3,6	4,9	6,4
2,8	11,8	15,5	21,6	9,2	3,5	4,7	6,2
3,0	11,4	14,8	20,4	9,4	3,3	4,5	6,0
3,2	11,0	14,3	19,4	9,6	3,1	4,3	5,7
3,4	10,6	13,7	18,4	9,8	3,0	4,2	5,5
3,6	10,3	13,2	17,6	10,0	2,8	4,0	5,3
3,8	9,9	12,7	16,8	10,2	2,6	3,8	5,1
4,0	9,6	12,2	16,1	10,4	2,5	3,6	4,9
4,2	9,2	11,8	15,4	10,6	2,3	3,5	4,7
4,4	8,9	11,4	14,8	10,8	2,2	3,3	4,5
4,6	8,6	11,0	14,2	11,0	2,0	3,1	4,3
4,8	8,3	10,6	13,7	11,2	1,9	3,0	4,1
5,0	8,0	10,2	13,1	11,4	1,8	2,8	4,0
5,2	7,7	9,9	12,7	11,6	1,6	2,6	3,8
5,4	7,5	9,5	12,2	11,8	1,5	2,5	3,6
5,6	7,2	9,2	11,8	12,0	1,3	2,3	3,4
5,8	7,0	8,9	11,3	12,2	1,2	2,2	3,3
6,0	6,7	8,6	10,9	12,4	1,1	2,0	3,1
6,2	6,5	8,3	10,6	12,6	1,0	1,9	2,9
6,4	6,2	8,0	10,2	12,8	0,8	1,7	2,8
6,6	6,0	7,7	9,8	13,0	0,7	1,6	2,6
6,8	5,8	7,5	9,5	13,2	0,6	1,5	2,5
7,0	5,6	7,2	9,2	13,4	0,4	1,3	2,3
7,2	5,4	6,9	8,9	13,6	0,3	1,2	2,2
7,4	5,1	6,7	8,6	13,8	0,2	1,1	2,0
7,6	4,9	6,5	8,3	14,0	0,1	0,9	1,9
7,8	4,7	6,2	8,0				

Tabela 4. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury odbytu i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 75 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w odbycie; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
3,0	25,1	33,4	49,9	11,0	8,2	10,8	14,0
3,2	24,4	32,3	47,1	11,2	7,9	10,5	13,6
3,4	23,7	31,3	44,7	11,4	7,6	10,2	13,3
3,6	23,1	30,3	42,7	11,6	7,4	9,9	12,9
3,8	22,5	29,3	40,8	11,8	7,1	9,6	12,6
4,0	21,9	28,4	39,1	12,0	6,8	9,3	12,2
4,2	21,3	27,6	37,6	12,2	6,6	9,0	11,9
4,4	20,7	26,8	36,2	12,4	6,4	8,8	11,5
4,6	20,2	26,0	34,8	12,6	6,1	8,5	11,2
4,8	19,6	25,3	33,6	12,8	5,9	8,2	10,9
5,0	19,1	24,5	32,5	13,0	5,6	7,9	10,6
5,2	18,6	23,9	31,4	13,2	5,4	7,7	10,3
5,4	18,1	23,2	30,4	13,4	5,2	7,4	10,0
5,6	17,6	22,6	29,5	13,6	4,9	7,1	9,7
5,8	17,2	22,0	28,6	13,8	4,7	6,9	9,4
6,0	16,7	21,4	27,7	14,0	4,5	6,6	9,1
6,2	16,3	20,8	26,9	14,2	4,3	6,4	8,8
6,4	15,9	20,3	26,1	14,4	4,1	6,2	8,5
6,6	15,5	19,7	25,4	14,6	3,9	5,9	8,2
6,8	15,0	19,2	24,7	14,8	3,6	5,7	8,0
7,0	14,6	18,7	24,0	15,0	3,4	5,4	7,7
7,2	14,3	18,2	23,3	15,2	3,2	5,2	7,5
7,4	13,9	17,7	22,7	15,4	3,0	5,0	7,2
7,6	13,5	17,3	22,1	15,6	2,8	4,8	6,9
7,8	13,1	16,8	21,5	15,8	2,6	4,5	6,7
8,0	12,8	16,4	20,9	16,0	2,4	4,3	6,4
8,2	12,4	15,9	20,4	16,2	2,2	4,1	6,2
8,4	12,1	15,5	19,8	16,4	2,0	3,9	6,0
8,6	11,8	15,1	19,3	16,6	1,9	3,7	5,7
8,8	11,4	14,7	18,8	16,8	1,7	3,5	5,5
9,0	11,1	14,3	18,3	17,0	1,5	3,3	5,3
9,2	10,8	13,9	17,8	17,2	1,3	3,1	5,0
9,4	10,5	13,6	17,3	17,4	1,1	2,9	4,8
9,6	10,2	13,2	16,9	17,6	0,9	2,7	4,6
9,8	9,9	12,8	16,5	17,8	0,8	2,5	4,4
10,0	9,6	12,5	16,0	18,0	0,6	2,3	4,1
10,2	9,3	12,1	15,6	18,2	0,4	2,1	3,9
10,4	9,0	11,8	15,2	18,4	0,2	1,9	3,7
10,6	8,7	11,5	14,8	18,6	0,1	1,7	3,5
10,8	8,4	11,2	14,4				

Tabela 5. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury mięśni i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 75 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w mięśniach; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
2,6	24,4	32,4	49,1	10,6	7,9	10,2	13,0
2,8	23,7	31,2	46,0	10,8	7,6	9,9	12,6
3,0	23,0	30,1	43,3	11,0	7,4	9,7	12,3
3,2	22,4	29,1	41,1	11,2	7,1	9,4	12,0
3,4	21,8	28,2	39,1	11,4	6,9	9,1	11,6
3,6	21,2	27,3	37,3	11,6	6,7	8,8	11,3
3,8	20,6	26,4	35,8	11,8	6,4	8,6	11,0
4,0	20,0	25,6	34,3	12,0	6,2	8,3	10,7
4,2	19,5	24,8	33,0	12,2	6,0	8,0	10,4
4,4	18,9	24,1	31,8	12,4	5,7	7,8	10,1
4,6	18,4	23,4	30,7	12,6	5,5	7,5	9,8
4,8	17,9	22,7	29,6	12,8	5,3	7,3	9,5
5,0	17,5	22,1	28,6	13,0	5,1	7,0	9,2
5,2	17,0	21,5	27,7	13,2	4,9	6,8	9,0
5,4	16,5	20,9	26,8	13,4	4,7	6,5	8,7
5,6	16,1	20,3	26,0	13,6	4,5	6,3	8,4
5,8	15,7	19,7	25,2	13,8	4,3	6,1	8,2
6,0	15,3	19,2	24,5	14,0	4,0	5,9	7,9
6,2	14,9	18,7	23,7	14,2	3,8	5,6	7,6
6,4	14,5	18,2	23,1	14,4	3,7	5,4	7,4
6,6	14,1	17,7	22,4	14,6	3,5	5,2	7,1
6,8	13,7	17,2	21,8	14,8	3,3	5,0	6,9
7,0	13,3	16,8	21,2	15,0	3,1	4,8	6,7
7,2	13,0	16,3	20,6	15,2	2,9	4,6	6,4
7,4	12,6	15,9	20,0	15,4	2,7	4,4	6,2
7,6	12,3	15,5	19,5	15,6	2,5	4,2	6,0
7,8	12,0	15,1	19,0	15,8	2,3	4,0	5,7
8,0	11,6	14,7	18,4	16,0	2,2	3,8	5,5
8,2	11,3	14,3	18,0	16,2	2,0	3,6	5,3
8,4	11,0	13,9	17,5	16,4	1,8	3,4	5,1
8,6	10,7	13,5	17,0	16,6	1,6	3,2	4,9
8,8	10,4	13,2	16,6	16,8	1,5	3,0	4,7
9,0	10,1	12,8	16,1	17,0	1,3	2,8	4,5
9,2	9,8	12,5	15,7	17,2	1,1	2,6	4,3
9,4	9,5	12,1	15,3	17,4	1,0	2,4	4,1
9,6	9,2	11,8	14,9	17,6	0,8	2,3	3,9
9,8	9,0	11,5	14,5	17,8	0,6	2,1	3,7
10,0	8,7	11,2	14,1	18,0	0,5	1,9	3,5
10,2	8,4	10,8	13,7	18,2	0,3	1,7	3,3
10,4	8,2	10,5	13,4	18,4	0,2	1,6	3,1

W tabeli 6 przedstawiono kwadraty współczynników korelacji liniowej, R^2 , pomiędzy obydwoma współczynnikami a i b jednowykładniczych równań opisujących spadek temperatury w różnych miejscach pomiarowych a masą ciała świń. Jak widać, szczególnie w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu, ani a ani b nie korelują z masą ciała. Tego można było spodziewać się dla wszystkich uwzględnionych miejsc pomiarowych w przypadku masy ciała i współczynnika a . Brak jednak korelacji pomiędzy stałą szybkości spadku temperatury a masą ciała świń w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu powoduje, że przy szacowaniu czasu śmierci nie istnieje potrzeba uwzględniania masy ciała. Fakt ten przemawia za przewagą badania temperatury w tych miejscach ciała i stwarza przewagę proponowanej metody nad wymagającą uwzględnienia m.in. masy ciała metodą nomogramową Henssgego.

Tabela 6. Korelacja pomiędzy współczynnikami a i b modelu jednowykładniczego przedstawiającego pośmiertny spadek temperatury świń i ich masą ciała.

Współczynniki modelu wykładniczego	Kwadrat współczynnika korelacji (R^2)			
	Gałka oczna	Tkanki oczodołów	Odbytnica	Mięśnie
a	0,002	0,068	0,027	0,145
b	0,037	0,128	0,365	0,320

Analiza krzywych stygnięcia dla poszczególnych miejsc pomiaru dla każdego z 19 zwierząt z osobna (ryc. 7, 9, 11 i 13; tabela 1) prowadzi do wniosku, iż w okresie prowadzenia pomiarów temperatury, tzn. począwszy od 1,25 h od zgonu, temperatura ciała wraz z upływem czasu ulega zmniejszeniu zgodnie z funkcją jednowykładniczą. Jest to zgodne z prawem termodynamiki przypisywanym Izaakowi Newtonowi. Krzywe obrazujące przebieg czasowy temperatury w odbytnicy wykazują na swoim początku wyraźne spłaszczenie, co wskazuje na istnienie *plateau* temperatury (faza opóźnienia) w pierwszych

75 min po śmierci zwierząt (ryc. 11). Mniejsze spłaszczenie początkowej części krzywych stygnięcia, świadczące o odchyleniu od funkcji jednowykładniczej, widoczne jest na ryc. 13 w przypadku pomiarów temperatury w mięśniach.

Odchylenia od modelu jednowykładniczego, widoczne na ryc. 11 i 13, są względnie niewielkie i nie wpływają w sposób znamieny na krzywe uśrednione.

Należy tu zauważyć, że analizując indywidualne krzywe poszczególnych świń na ryc. 7, 9, 11, 13 można byłoby w niektórych przypadkach wykazać lepsze dopasowanie punktów pomiarowych do dwuwykładniczego modelu niż do modelu jednowykładniczego. Z reguł matematycznych wynika niegorsze dopasowanie do modelu bardziej złożonego, również jeżeli faza opóźnienia nie jest wyraźnie zaznaczona. Wartości *rsquare* bliskie 1 oraz niskie wartości *rmse* wskazują jednak, że model jednowykładniczy jest wystarczająco dobry dla analizowanych przypadków. Rozrzut krzywych stygnięcia obserwowanych 75 min po śmierci dla 19 świń sprawia, że zwiększenie korelacji nie jest znamienne ze względu na drugi wyraz wykładniczy. Zatem model dwuwykładniczy dla opisu matematycznego otrzymanych w powyższym doświadczeniu danych nie ma przewagi, jeśli chodzi o wiarygodność obliczeń czasu śmierci, nad modelem jednowykładniczym.

Pojawia się pytanie, czy brakujące dane na temat temperatury dla pierwszych 75 min po śmierci uwidaczniałyby *plateau* na średnich krzywych stygnięcia. Jeżeli początkowe *plateau* faktycznie by istniało, żadne oszacowanie czasu zgonu w tym okresie nie byłoby możliwe, oprócz oceny długości *plateau*. W badanym przypadku okresem tym byłby okres od 0 do 1,25 h po śmierci. Gdyby z kolei nie istniało *plateau*, pozwoliłoby to na dokładniejszą ocenę czasu śmierci, chociaż tylko w bardzo krótkim okresie po śmierci. Dysponując danymi z pomiarów temperatury od 75 min po śmierci można szacować czas jaki upłynął od zgonu na podstawie modelu jednowykładniczego (tabele 2–5).

Ze względu na znaczny rozrzut krzywych stygnięcia poszczególnych miejsc ciała obserwowany na ryc. 7, 9, 11 i 13 statystyczna zmienność poszczególnych mnożników poprawkowych modeli wykładniczych zalecanych do stosowania w medycynie sądowej (np. dla masy ciała, wilgotności otoczenia czy siły wiatru) również wydaje się dyskusyjna [60]. Choć mnożniki te mogłyby mieć zastosowanie w przypadku sztucznego fantomu poddawanego działaniu różnych kontrolowanych warunków środowiskowych, jest jednak mało prawdopodobne, by wspomniane poprawki mogły znamienne zwiększać rzetelność szacunków czasu zgonu u indywidualnie zdywersyfikowanych organizmów ciepłokrwistych.

Kolejna wątpliwość wiąże się z przetwarzaniem matematycznym doświadczalnych danych temperatury, mającym na celu możliwie najprecyzyjniejszą rekonstrukcję krzywych stygnięcia. Niektórzy autorzy uważają, że uwzględnienie dwóch pomiarów temperatury przeprowadzonych w około godzinny odstęp czasu [69] lub też ciągła rejestracja temperatury zwłok przez określony czas (np. 4,25 h) po śmierci [83] poprawi oszacowanie czasu zgonu. Mogłoby się tak faktycznie stać w przypadku indywidualnego obiektu, dla którego miałyby zastosowanie konkretne, dla niego wyprowadzone równanie wykładnicze. Dla rzeczywistych przypadków, precyzja oszacowania czasu śmierci będzie oczywiście mieścić się w zakresie zmienności międzyosobniczej. Problem nie polega na rekonstrukcji indywidualnych wykresów, takich jak przedstawione dla świń na ryc. 7, 9, 11 i 13, lecz na rzetelności ekstrapolacji modeli matematycznych do momentu, gdy zaczyna się stygnięcie zwłok.

Jednowykładnicze równanie opisujące pośmiertny spadek temperatury w poszczególnych miejscach ciała podlega racjonalnej interpretacji fizycznej. W tym równaniu współczynnik a oznacza różnicę temperatur pomiędzy danym miejscem pomiaru a otoczeniem, $T - T_E$, ekstrapolowaną do $t = 0$, czyli do chwili śmierci. Temperaturę w chwili śmierci, T_D , można zatem wyliczyć z zależności

$a = T_D - T_E$. Współczynnik a , raz wyznaczony z danych eksperymentalnych można zaadaptować do dowolnej temperatury otoczenia T_E , jeżeli znana jest już T_D . Zakładając, że średnia temperatura otoczenia podczas eksperymentów wynosiła $T_E = 21\text{ °C}$ (ryc. 6), można wyliczyć średnią temperaturę panującą w gałce ocznej świni w chwili śmierci z równania opisanego przy ryc. 9. Ponieważ $a = T_D - T_E$, czyli $15,2 = T_D - 21$. Zatem $T_D = 36,2\text{ °C}$. Analogicznie ekstrapolowana temperatura w tkankach miękkich oczodołu w chwili śmierci wynosi $36,6\text{ °C}$ (ryc. 10), w odbytnicy $41,5\text{ °C}$ (ryc. 12), a w mięśniach $41,3\text{ °C}$ (ryc. 14). Według niektórych autorów [95,96] średnia temperatura gałki ocznej u człowieka wynosi $34-35\text{ °C}$. Podawana temperatura może być nieco zaniżona ze względu na pomiar powierzchni rogówki (*vide* pomiary z użyciem termometru laserowego przeprowadzone w następnym etapie badań). Temperatura ciała świni określana jest na około $38-40\text{ °C}$ [92-94]. Niestety, temperatury gałki ocznej świni dotychczas nie zmierzono. Wobec posiadanych danych literaturowych wartość temperatury w gałce ocznej świni wynosząca $36,2\text{ °C}$, oszacowana na podstawie modelu jednowykładniczego, wydawała się być rzetelna. Również wartość $36,6\text{ °C}$ dla tkanek miękkich oczodołu wydawała się rozsądna. Wartości te wydają się być w zgodzie z wartością $36,6\text{ °C}$ dla temperatury błony bębenkowej, którą można oszacować z wykresów zawartych w pracy Klonta i Lambooy'a [93] na temat pomiarów temperatury u świń. Dostępne po serii pomiarów rozpoczynanych od 75 min po śmierci dane pozwoliły na przyjęcie, że model jednowykładniczy zadowalająco opisuje pośmiertne zmiany temperatury w gałce ocznej i tkankach miękkich oczodołu. Dzieje się tak z powodu braku *plateau* na wykresach stygnięcia dla tych miejsc pomiarowych.

Ekstrapolowana wartość temperatury w chwili śmierci w odbytnicy ($41,5\text{ °C}$) oraz mięśniach ($41,3\text{ °C}$) wydaje się być wyższa niż fizjologiczna. Jak podają opracowania weterynaryjne [92-94], temperatura u świń waha się w granicach od $38,0\text{ °C}$ do $40,0\text{ °C}$ w odbytnicy i od $38,5\text{ °C}$ do $40,2\text{ °C}$ w mięśniach.

Wartości te są nieco niższe niż uzyskane w drodze ekstrapolacji z zastosowanego modelu jednowykładniczego. Zatem uzasadnione jest przypuszczenie, że we wczesnej fazie po śmierci istnieje faza *plateau* spadku temperatury w odbyticy i mięśniach.

Współczynnik b w zależnościach przedstawionych na rycinach 7, 9, 11 i 13 oznacza stałą szybkości procesu stygnięcia w poszczególnych miejscach ciała. Średnia wartość tego współczynnika wynosi $-0,113 \text{ h}^{-1}$ dla gałek ocznych, $-0,111 \text{ h}^{-1}$ dla tkanek miękkich oczodołu, $-0,058 \text{ h}^{-1}$ dla odbyticy i $-0,063 \text{ h}^{-1}$ dla mięśni. Zatem stała szybkości spadku temperatury w gałkach ocznych świń jest prawie dwukrotnie wyższa niż analogiczna stała szybkości spadku temperatury w odbyticy. Jest to spowodowane różnicami anatomicznymi poszczególnych miejsc pomiaru temperatury i, w konsekwencji, różnymi wartościami cieplnej przewodności właściwej.

Podczas gdy współczynnik a zależy wyłącznie od temperatury otoczenia, na współczynnik b może wpływać szereg parametrów związanych z organizmem i otoczeniem, takich jak masa ciała, pole powierzchni ciała, stopień otyłości, wilgotność otoczenia, przepływ powietrza, ubranie itp. Pytanie brzmi, w jakim stopniu współczynnik b zależy od czynników indywidualnych i czy przyjęcie proponowanych przez różnych autorów poprawek uwzględniających te czynniki w znamienny sposób wpłynie na prawidłowość szacowania czasu zgonu wobec znacznej zmienności międzyosobniczej.

Wydaje się, że praktyczna przydatność owych poprawek, skądinąd na pierwszy rzut oka racjonalnych, jest wysoce dyskusyjna [60]. Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza korelacji nie potwierdza zakładanej wartości praktycznej najczęściej podawanego czynnika poprawkowego, tzn. masy ciała, dla podwyższenia wiarygodności przewidywań czasu zgonu. Z tabeli 6 jasno wynika, że korelacje pomiędzy masą ciała świń (wahającą się od 81 kg do 124 kg) oraz stałą szybkości stygnięcia b wykazują generalnie niskie wartości. W przypadku równania stygnięcia gałki ocznej, korelacja pomiędzy b i masą

ciała jest na poziomie $R^2 = 0,037$, a w przypadku tkanek miękkich oczodołu $R^2 = 0,128$, czyli są to poziomy graniczące z brakiem korelacji. Istnieje większa, nadal jednak słaba korelacja dla mięśni $R^2 = 0,320$ i odbyticy $R^2 = 0,365$. Mimo to, dla pojedynczego przypadku szansa na poprawę oszacowania czasu zgonu z wykorzystaniem równania wykładniczego skorygowanego o masę ciała danego osobnika, nawet w przypadku pomiarów temperatury w mięśniach i odbyticy, jest niewielka.

Niektórzy autorzy proponują korzystanie z równania wielowykładniczego z indywidualnymi wyrazami wykładniczymi uwzględniającymi temperaturę w różnych miejscach ciała [81,82]. Zakłada się, że równania te umożliwiają lepsze oszacowanie czasu zgonu. Podejście to z termodynamicznego punktu widzenia wydaje się jednak problematyczne. Niewątpliwie, równania jednowykładnicze wiarygodnie opisują stygnięcie poszczególnych miejsc ciała [82]. Być może, średnia wartości czasu, jaki upłynął od śmierci, wyliczona z tych prostych równań mogłaby zredukować błąd szacunkowy. Jednak równania wielowykładnicze z członami odpowiadającymi poszczególnym miejscom pomiarowym nie mają w tym przypadku sensu fizycznego. W niniejszej pracy doktorskiej wyprowadzono statystycznie i przetestowano równania z użyciem szeregu zmiennych pod kątem wiarygodności oszacowania czasu zgonu. Uwzględniano, na przykład, stosunek różnic temperatury w poszczególnych miejscach ciała i temperatury otoczenia. Zatem, oznaczając temperaturę w czasie t w gałce ocznej jako T_1 i odpowiadającą jej temperaturę w odbyticy jako T_2 , otrzymywano równanie:

$$(T_1 - T_E)/(T_2 - T_E) = [a_1 \cdot \exp(-b_1 t)]/[a_2 \cdot \exp(-b_2 t)] \quad (\text{równ. 5})$$

Równanie 5 można przekształcić następująco:

$$(T_1 - T_E)/(T_2 - T_E) = a' \cdot \exp(-b' t) \quad (\text{równ. 6})$$

gdzie $a' = a_1/a_2$ oraz $b' = b_1 - b_2$. Z równania powyższego można otrzymać czas, jaki upłynął od zgonu:

$$t = k_1 \ln(T_2 - T_E) - k_1 \ln(T_1 - T_E) + k_2 \quad (\text{równ. 7})$$

gdzie $k_1 = 1/b'$, $k_2 = (\ln a')/b'$.

Współczynniki równania, uzyskane metodą analizy regresji przedstawiają się następująco:

$$t = -7,180 \ln(T_1 - T_E) - 2,562 \ln(T_2 - T_E) + 27,697 \quad (\text{równ. 8})$$

Niestety, okazało się, że dopasowanie danych eksperymentalnych do powyższego modelu było bardzo słabe: $rmse = 1,600$.

Wyrowadzono także równanie dwuwykładnicze w postaci zaproponowanej przez Al-Alousi'ego i wsp. [82]. Uzyskano następujące wyrażenie:

$$t = 22,493 \cdot \exp[-0,201 (T_1 - T_E)] + 7,864 \cdot \exp[-0,136 (T_2 - T_E)] \quad (\text{równ. 9})$$

Wartość $rmse$ dla tego równania poprawiła się w stosunku do równania 8, ale w dalszym ciągu była wysoka i wyniosła 1,412. Odpowiednie wartości $rmse$ dla otrzymanych w niniejszej pracy danych wynosiły: 0,589 dla gałki ocznej; 0,705 dla tkanek miękkich oczodołu; 0,936 dla odbytnicy i 0,868 dla mięśni.

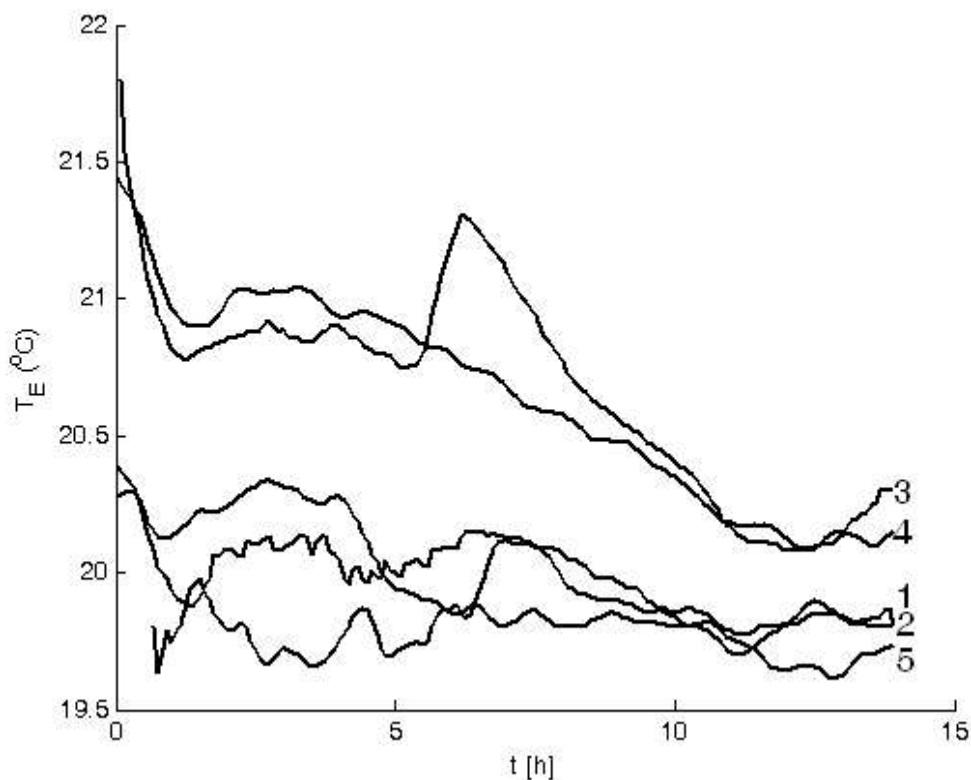
Zatem lepszym okazał się model najprostszy i oparty na podstawowych zasadach termodynamiki.

4.2. Doświadczenia uwzględniające pomiary temperatury od 30 minuty po śmierci zwierząt przy kontrolowanym przepływie powietrza

Istota kolejnego etapu badań związana była z *plateau* temperatury, czyli występującym bezpośrednio po śmierci okresem zwolnienia jej spadku. Kilkugodzinna faza *plateau* przy pomiarach ciepłoty odbytnicy jest powszechnie znana [43,51,57]. Analiza wyników pomiaru temperatury poczynając od 75 min po śmierci, przeprowadzona w pierwszym etapie badań [91], wskazywała na brak *plateau* przy rejestracji ciepłoty gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów. Sytuacja taka umożliwiałaby określanie czasu zgonu we wcześniejszym okresie niż w przypadku pomiarów temperatury w odbytnicy czy mięśniach, czyli praktycznie w okresie bezpośrednio następującym po śmierci. Weryfikacja tej tezy była celem kolejnego eksperymentu, cechującego się wcześniejszym początkiem pomiarów temperatury zwłok świń.

Eksperyment przeprowadzono w temperaturze pokojowej w lecie (czerwiec). Temperaturę otoczenia stabilizowały urządzenia klimatyzacyjne. Przebiegi zmian temperatury otoczenia podczas pomiarów przedstawia ryc. 15. Wynika z nich, że podczas poszczególnych cykli doświadczalnych temperatura oscylowała w granicach nieprzekraczających $\pm 1,2$ °C, a maksymalne odchylenie średnich temperatur wynosiło 0,8 °C (19,9-20,7 °C). Podczas eksperymentu zapewniono w pomieszczeniu stały przepływ powietrza, dzięki użyciu dwóch klimatyzatorów i wentylatora.

Rycina 16 obrazuje różnice temperatur między gałkami ocznymi świń (T) a otoczeniem (T_E) dla 9 badanych gałek (w 3. dniu pomiar temperatury gałki ocznej nie został przeprowadzony – *vide* tabela 7 i tabela 8). Na ryc. 16 widać dwuetapowy charakter spadku różnicy temperatury $T-T_E$: przebieg krzywych w pierwszej fazie stygnięcia, tj. między około 0,5 h a 1,5 h po śmierci świń, jest wyraźnie inny od przebiegu w późniejszym okresie.



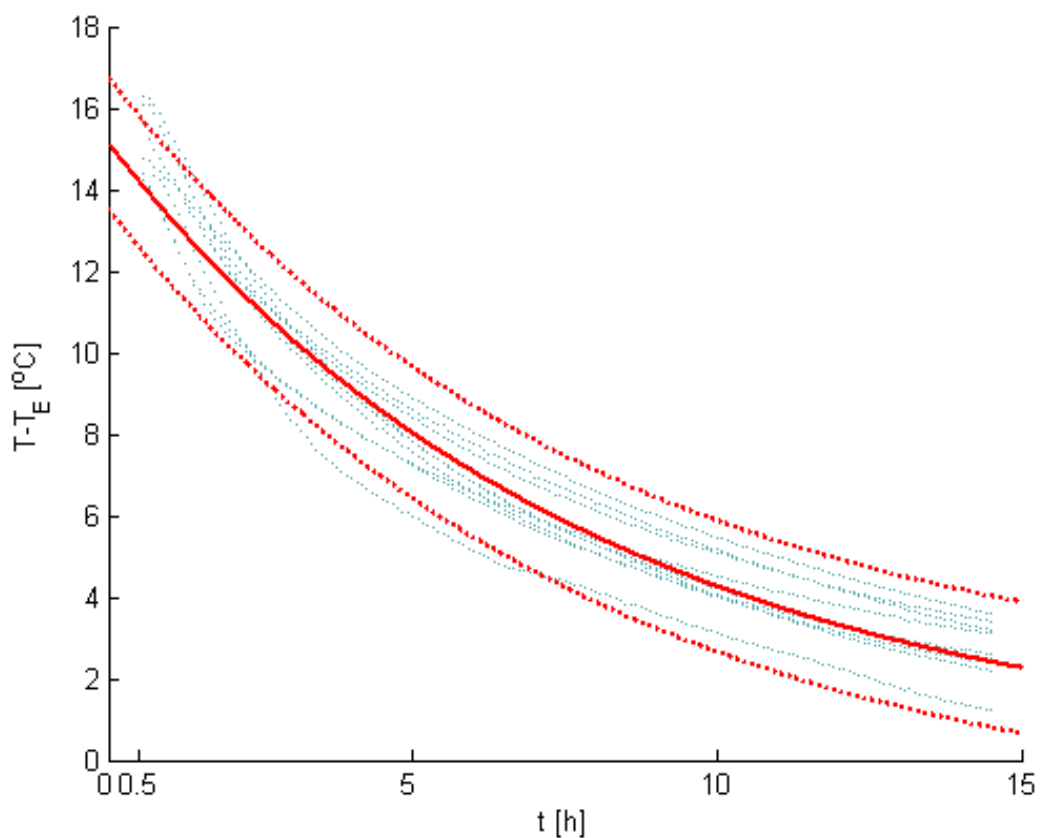
Ryc. 15. Wykres przedstawiający zmiany temperatury otoczenia w czasie trwania eksperymentów przy rejestracji temperatury rozpoczynanej od 30 minuty po śmierci zwierząt (po 2 świnie każdego dnia). Numeracja dotyczy kolejnych dni eksperymentu.

Ilustruje to także ryc. 17, która jednocześnie wskazuje na wysoką precyzję przewidywania czasu śmierci we wczesnym okresie *post mortem*. Podobne spostrzeżenia odnośnie przebiegu spadku temperatury dotyczą krzywych schładzania tkanek miękkich oczodołu: ryc. 18 i 19, a także mięśni: ryc. 20 i 21 oraz odbytów: ryc. 22 i 23.

Wobec ewidentnie dwuetapowego przebiegu krzywych, wynikającego z bardzo wczesnego rozpoczęcia rejestracji pomiarów, do oceny czasu zgonu, oprócz modelu jednowykładniczego, opisanego na ryc. 16, 18, 20 i 22, posłużono się także modelem dwuwykładniczym:

$$T - T_E = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + c \cdot \exp(d \cdot t) \quad (\text{równ. 10})$$

opisanym na ryc. 24, 26, 28 i 30.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

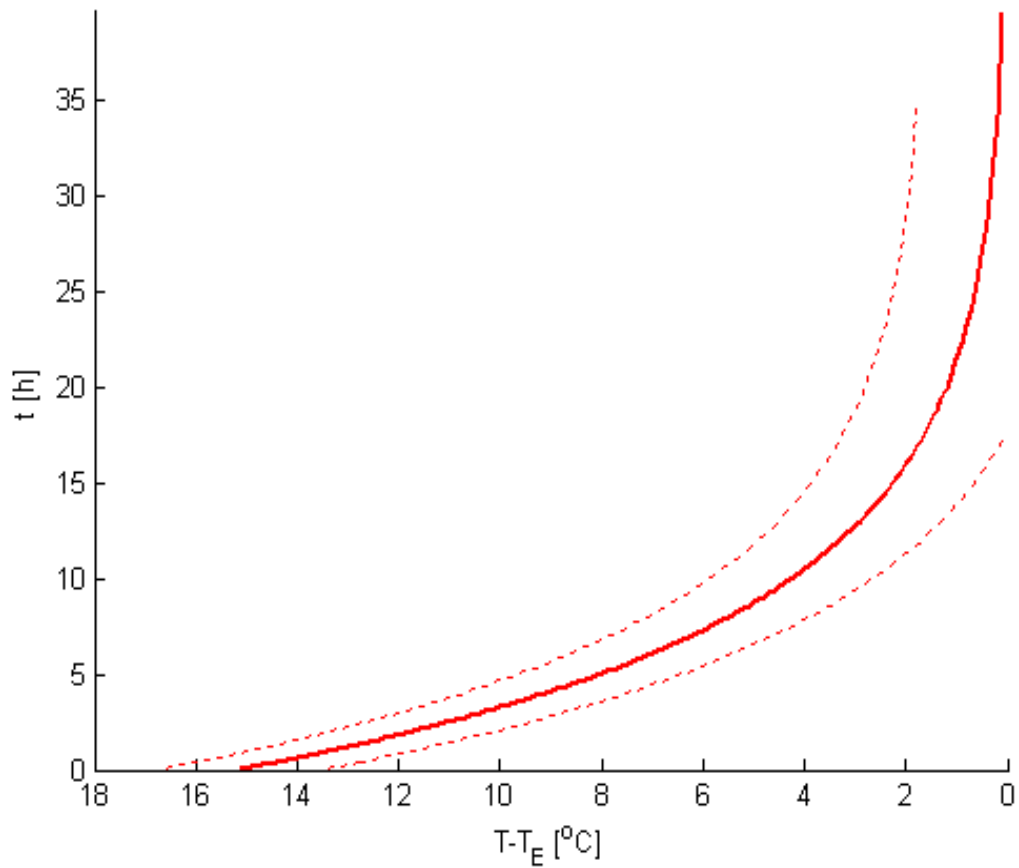
a = 15,1 (15,0; 15,3)

b = -0,127 (-0,128; -0,125)

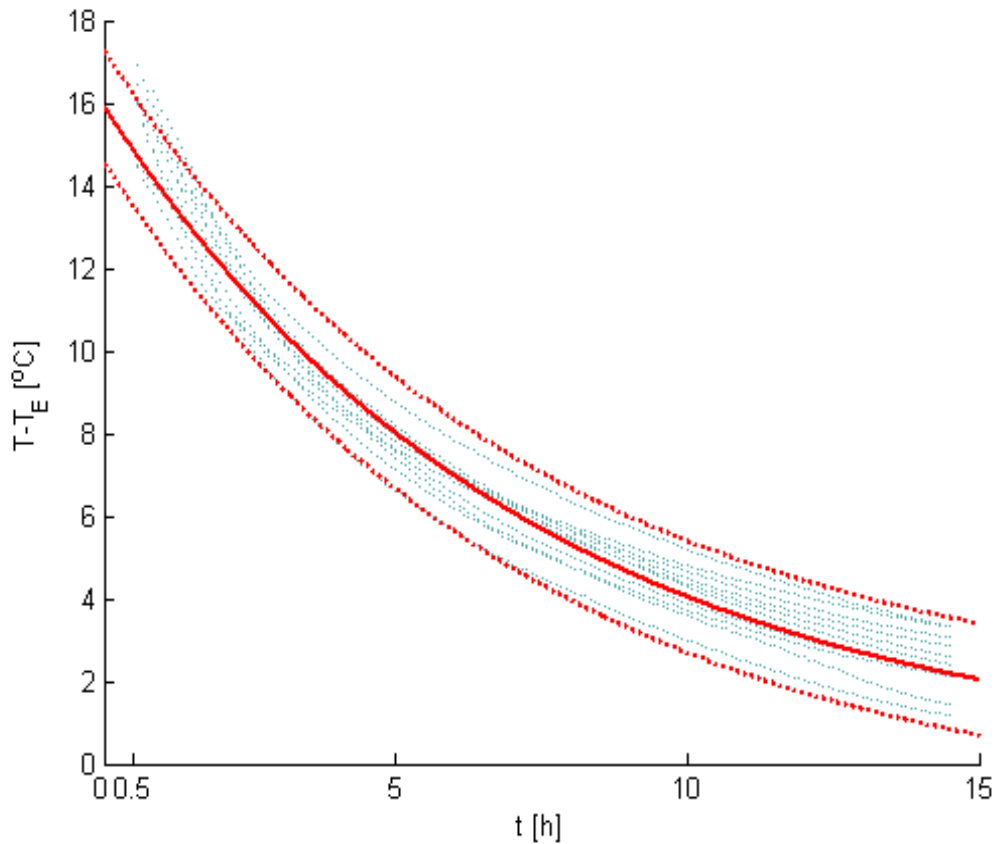
rsquare: 0,938

rmse: 0,821

Ryc. 16. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą gałki ocznej (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



Ryc. 17. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w gałce ocznej od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

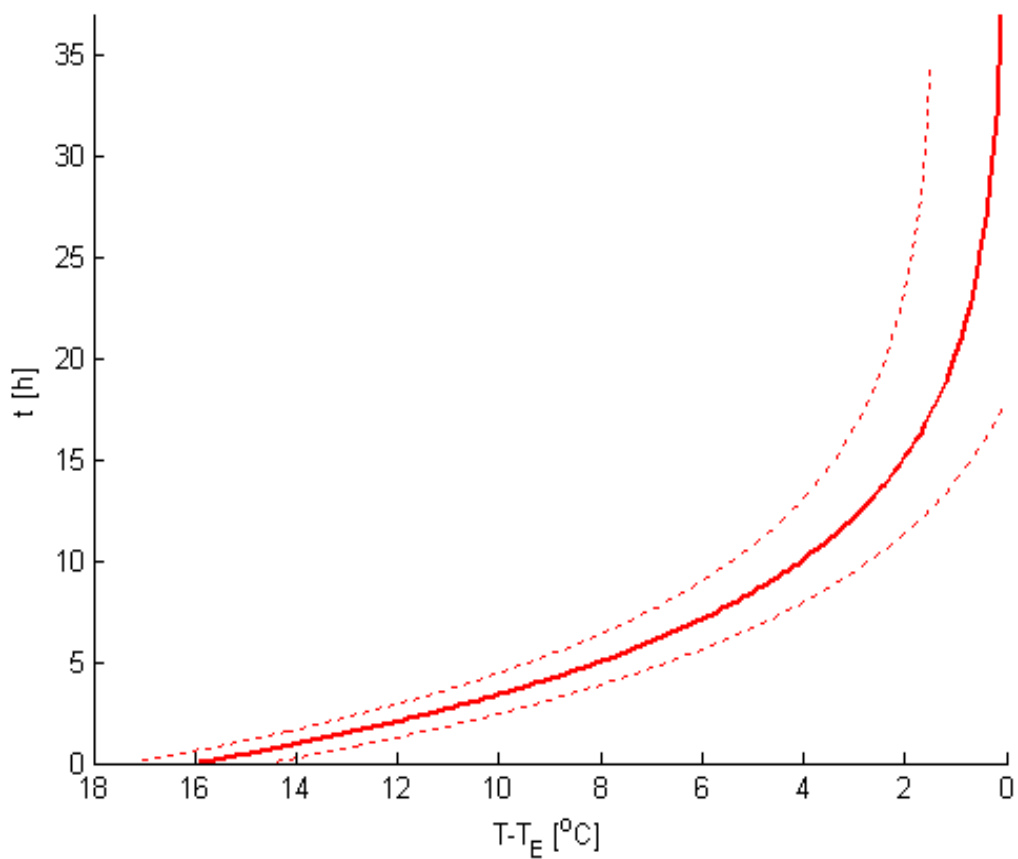
a = 15,9 (15,8; 16,0)

b = -0,137 (-0,139; -0,136)

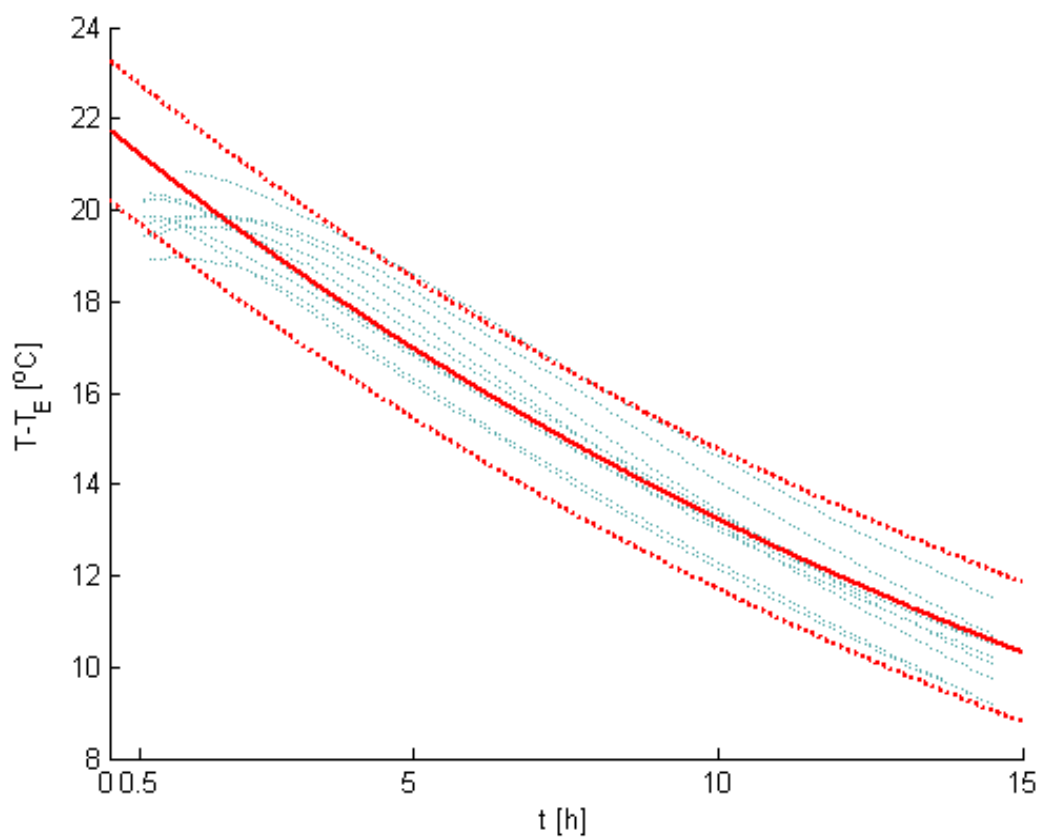
rsquare: 0,961

rmse: 0,691

Ryc. 18. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą tkanek miękkich ocozodu (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



Ryc. 19. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w tkankach miękkich oczodołu od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

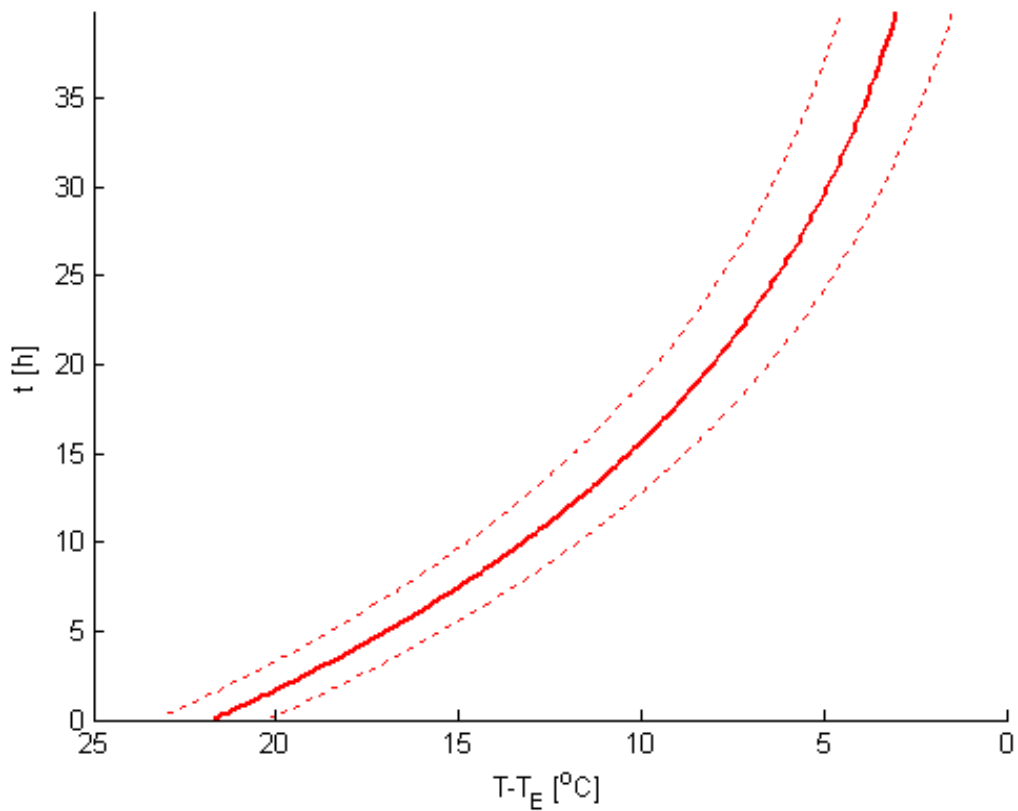
$a = 21,8$ (21,7; 21,9)

$b = -0,050$ (-0,050; -0,049)

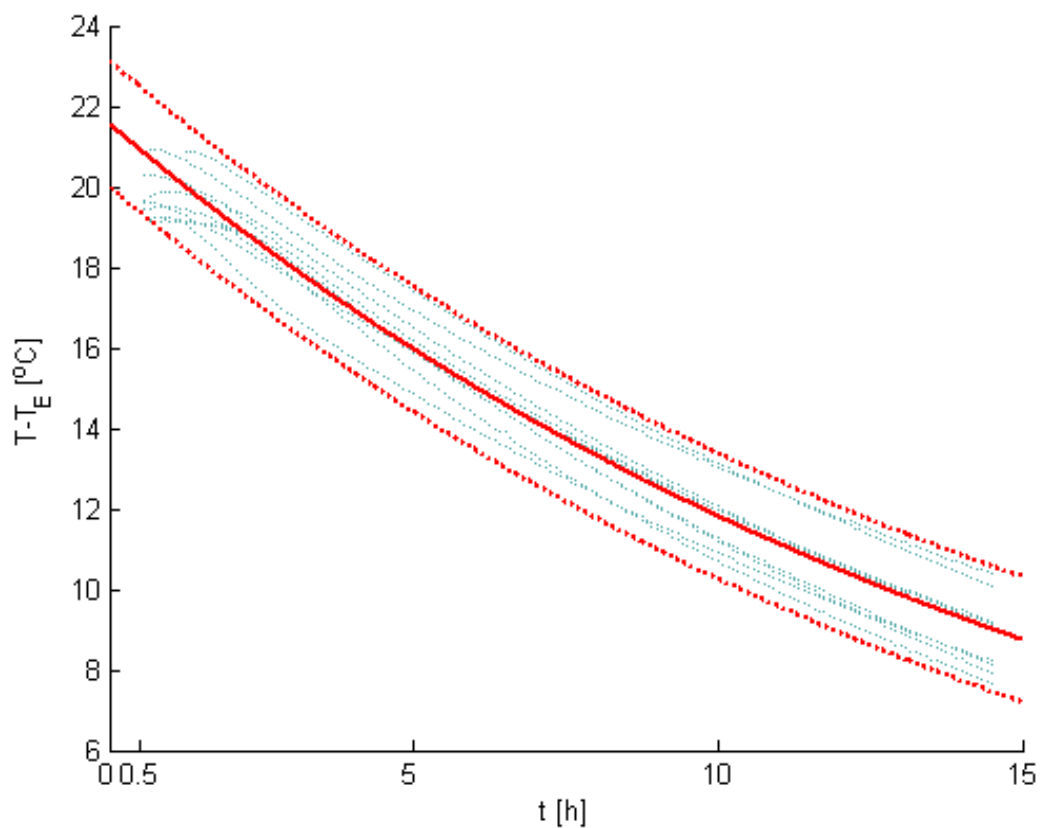
rsquare: 0,938

rmse: 0,778

Ryc. 20. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą mięśni (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



Ryc. 21. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury mięśni od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

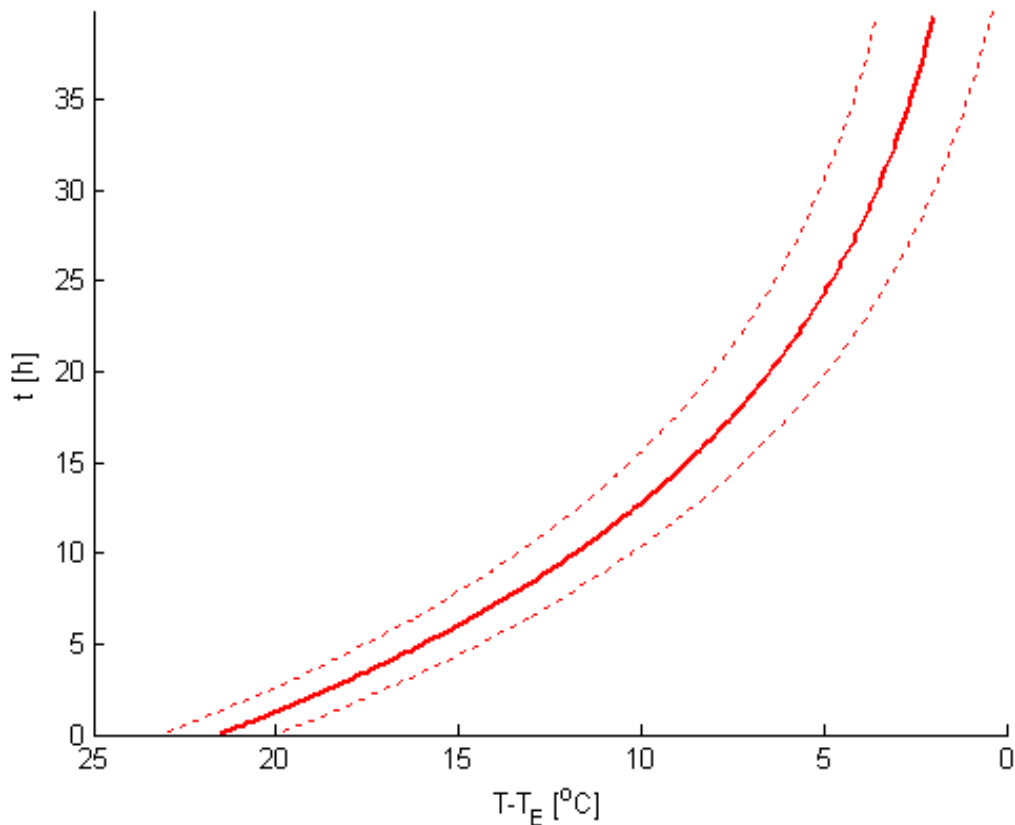
a = 21,6 (21,5; 21,7)

b = -0,060 (-0,061; -0,059)

rsquare: 0,947

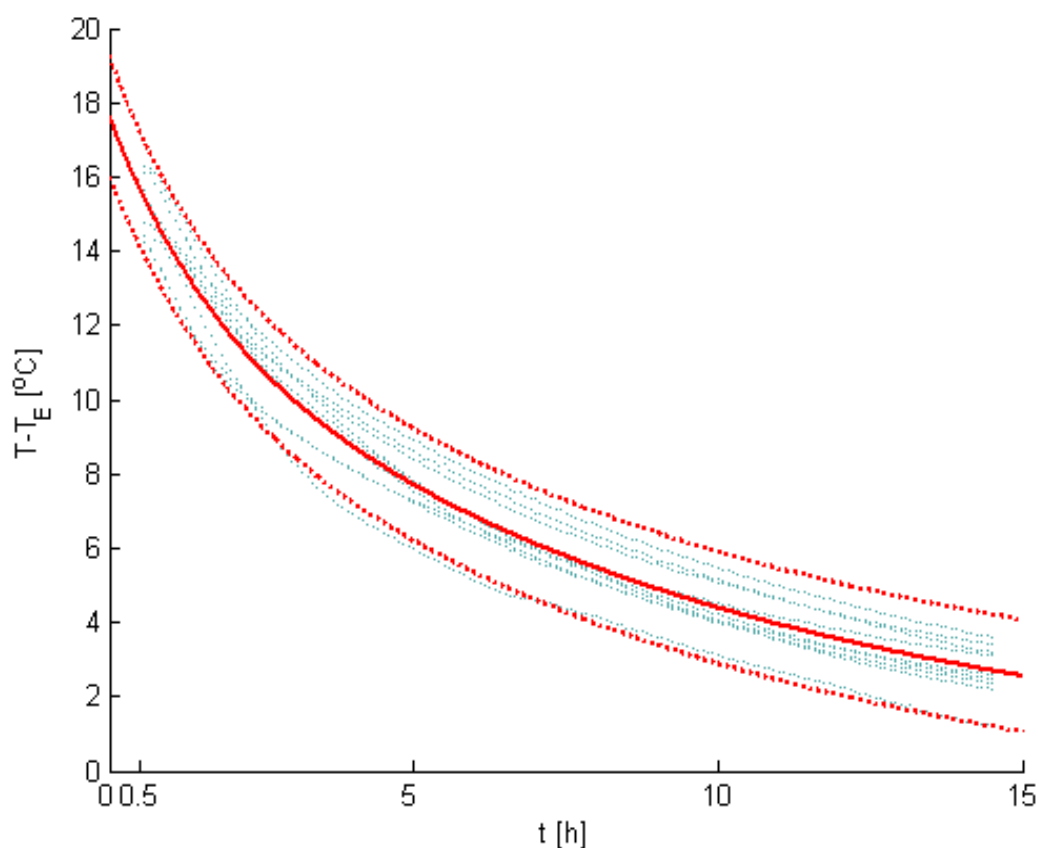
rmse: 0,794

Ryc. 22. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą odbytncy (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



Ryc. 23. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu jednowykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w odbytnicy od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Pomiary różnicy temperatur między poszczególnymi gałkami ocznymi, tkankami oczodołów, mięśniami i odbytnicami (T) a otoczeniem (T_E) i opis tych zmian w czasie z wykorzystaniem modelu dwuwykładniczego przedstawiają kolejno ryc. 24 i 25 - dla gałek ocznych, ryc. 26 i 27 - dla tkanek oczodołów, ryc. 28 i 29 - dla mięśni oraz ryc. 30 i 31 - dla odbytów.



$$[T - T_E] = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + c \cdot \exp(d \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a_1 = 4,8 \quad (4,2; 5,4)$$

$$b_1 = -0,629 \quad (-0,808; -0,451)$$

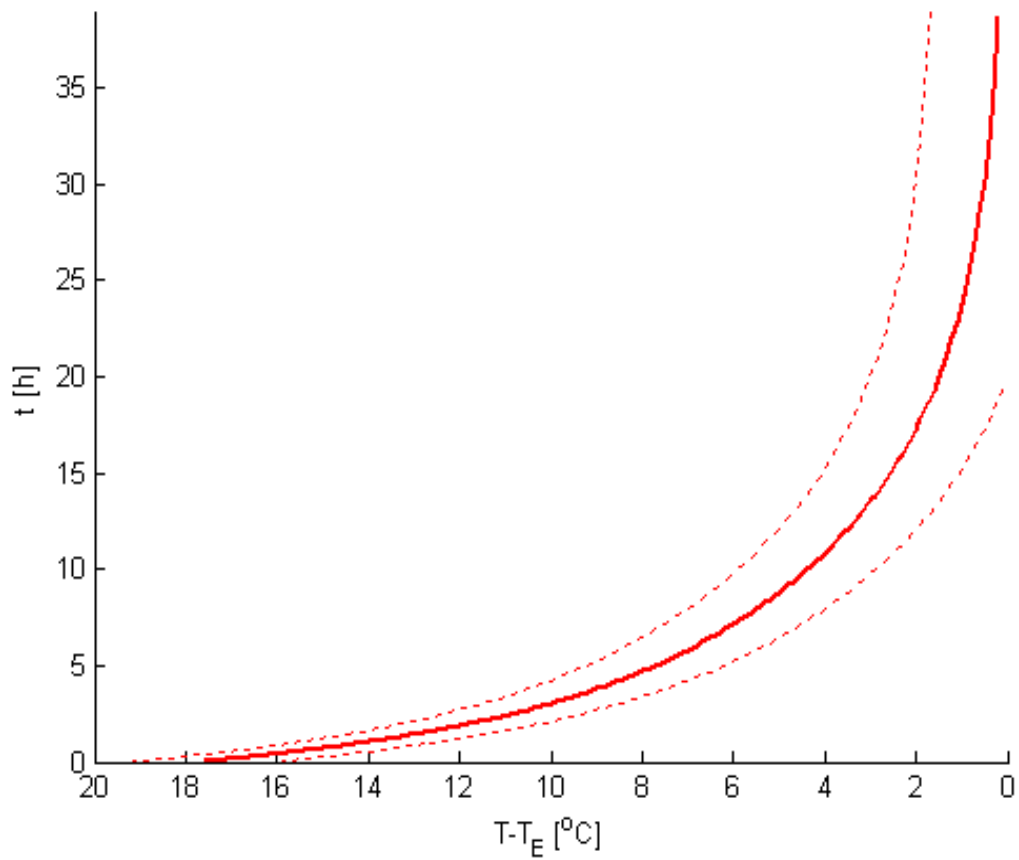
$$c = 12,9 \quad (12,1; 13,6)$$

$$d = -0,108 \quad (-0,113; -0,102)$$

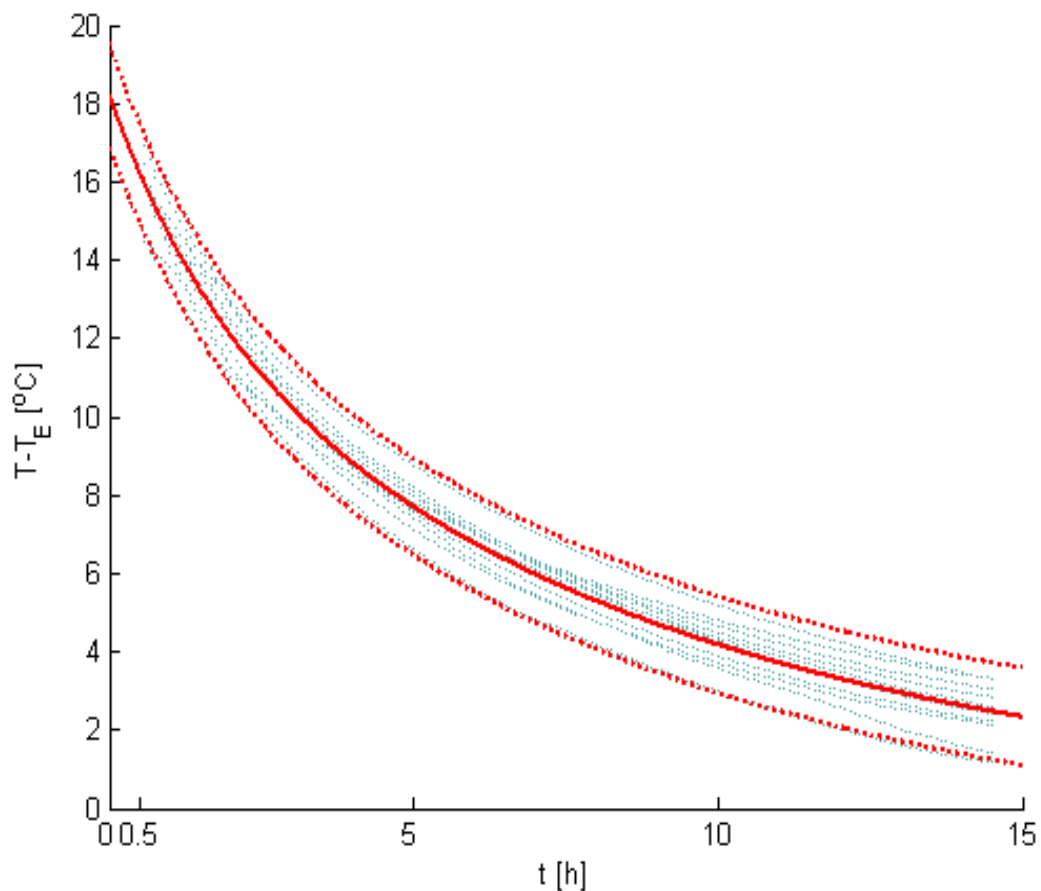
$$\text{rsquare: } 0,946$$

$$\text{rmse: } 0,768$$

Ryc. 24. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą gałki ocznej (T), a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego.



Ryc. 25. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w gałce ocznej od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + c \cdot \exp(d \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% limitem ufności):

$$a_1 = 4,9 \quad (4,4; 5,5)$$

$$b_1 = -0,579 \quad (-0,713; -0,446)$$

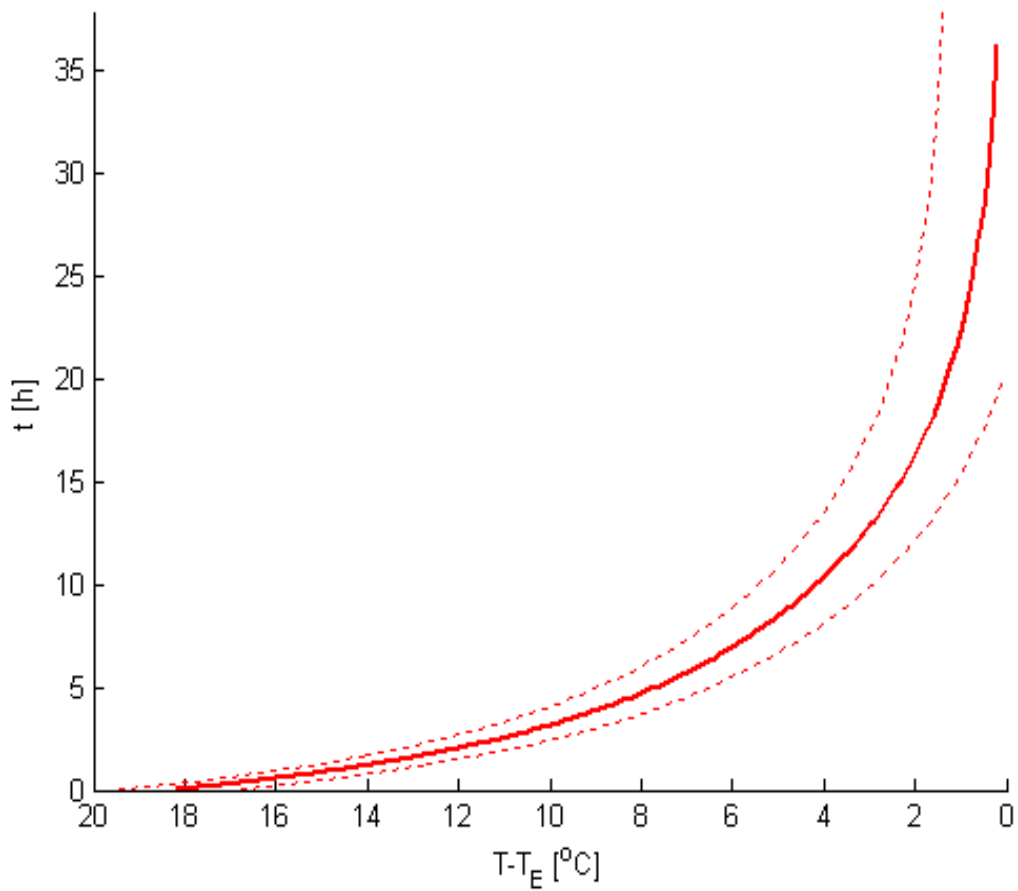
$$c = 13,2 \quad (12,5; 14,0)$$

$$d = -0,116 \quad (-0,121; -0,110)$$

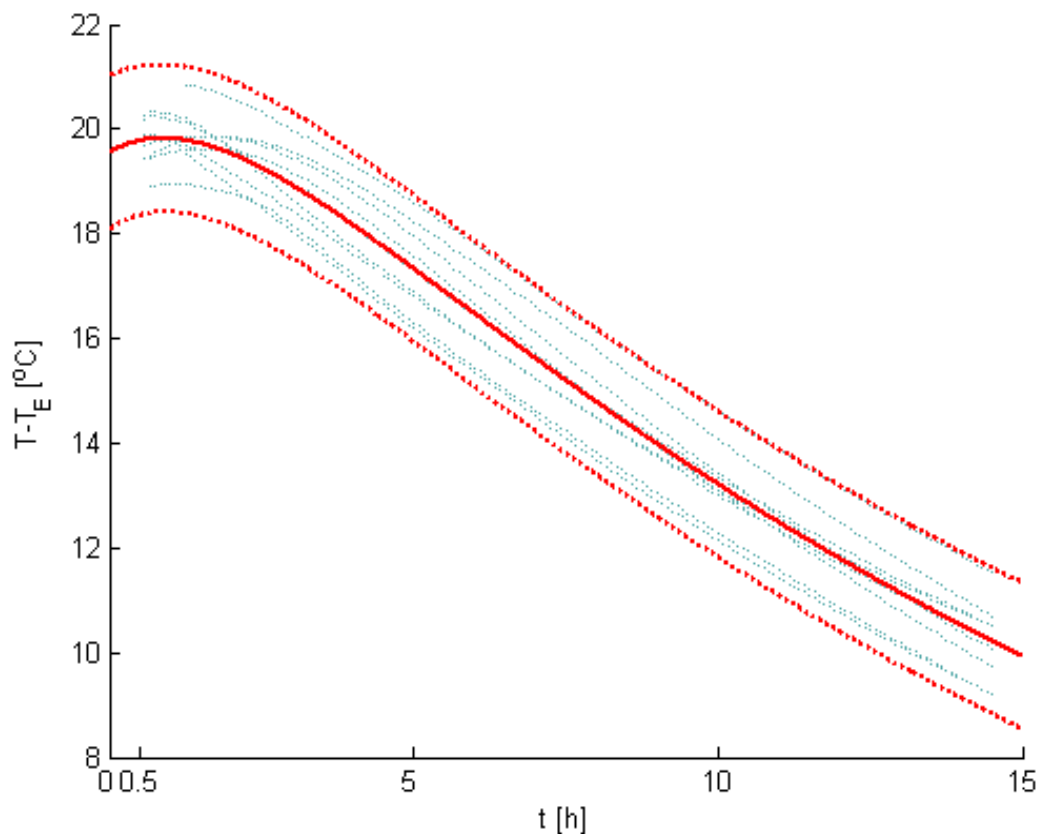
$$\text{rsquare: } 0,967$$

$$\text{rmse: } 0,629$$

Ryc. 26. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą tkanek miękkich odczołu (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego.



Ryc. 27. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w tkankach miękkich oczodołu od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + c \cdot \exp(d \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a_1 = -4,0 \quad (-4,5; -3,5)$$

$$b_1 = -0,501 \quad (-0,641; -0,360)$$

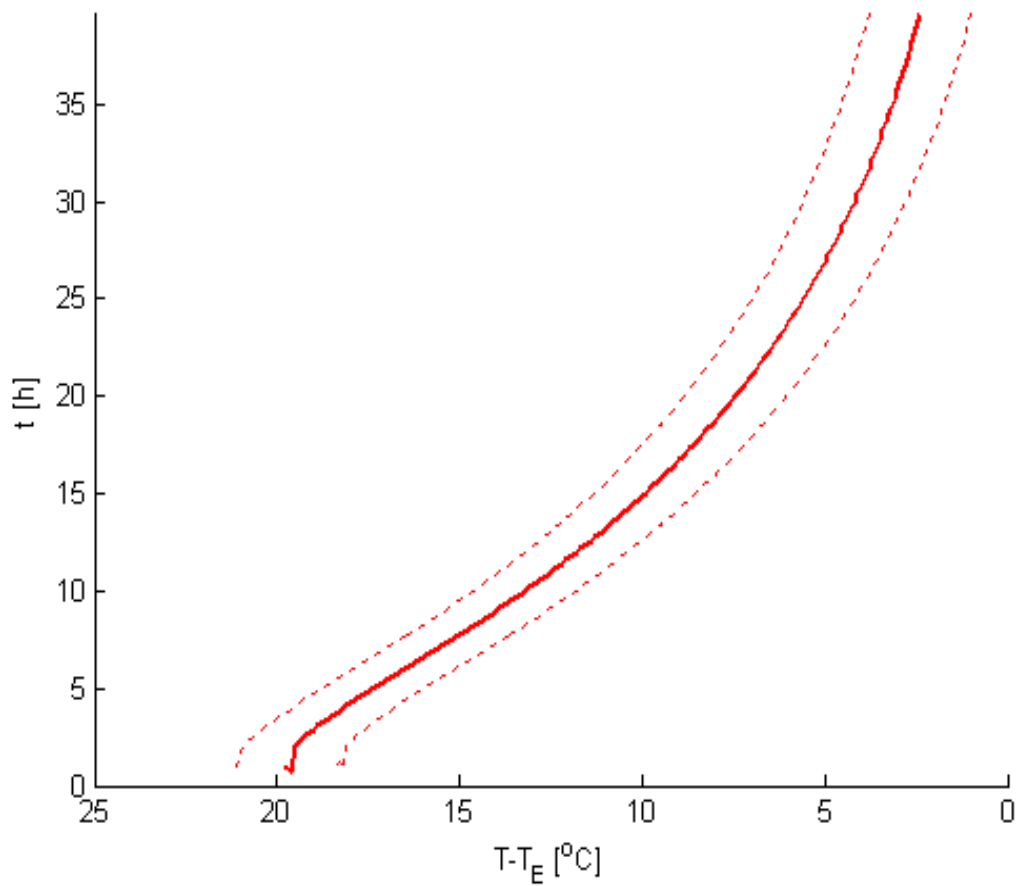
$$c = 23,6 \quad (22,9; 24,2)$$

$$d = -0,058 \quad (-0,060, -0,055)$$

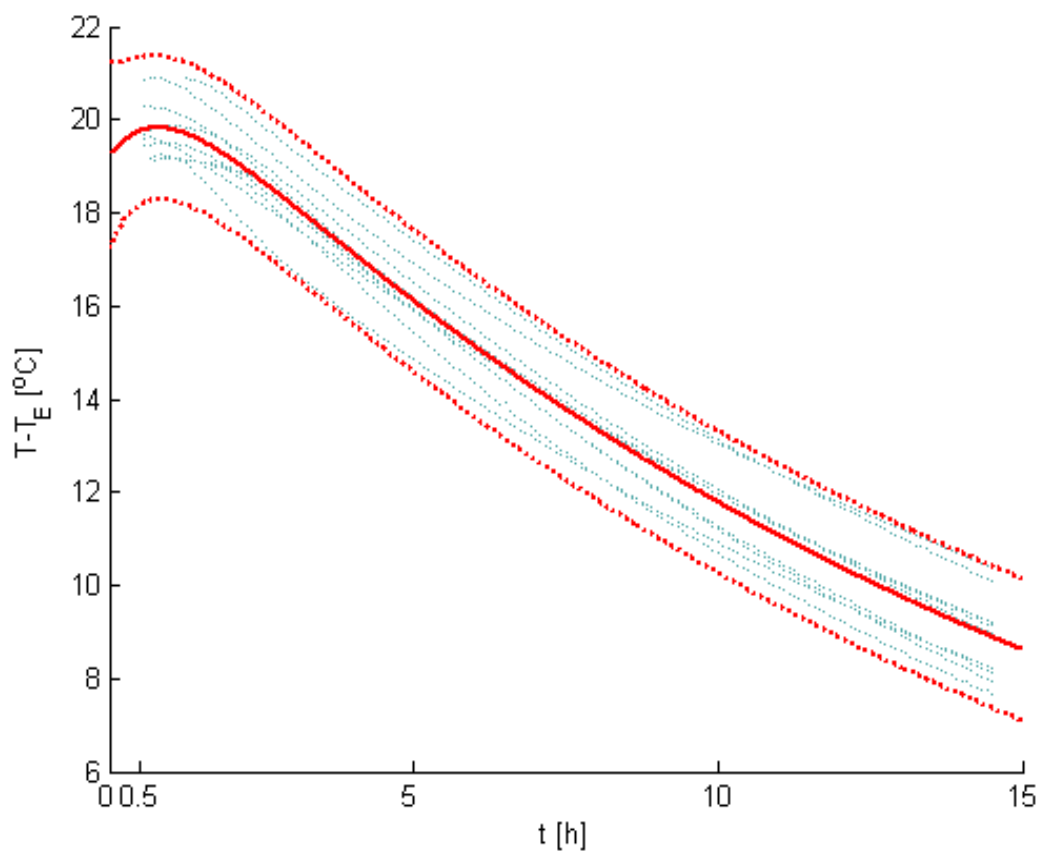
$$\text{rsquare: } 0,949$$

$$\text{rmse: } 0,711$$

Ryc. 28. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą mięśni (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego.



Ryc. 29. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego z użyciem pomiaru temperatury mięśni od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.



$$[T-T_E] = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + c \cdot \exp(d \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a_1 = -2,8 \quad (-4,1; -1,7)$$

$$b_1 = -1,129 \quad (-1,651; -0,607)$$

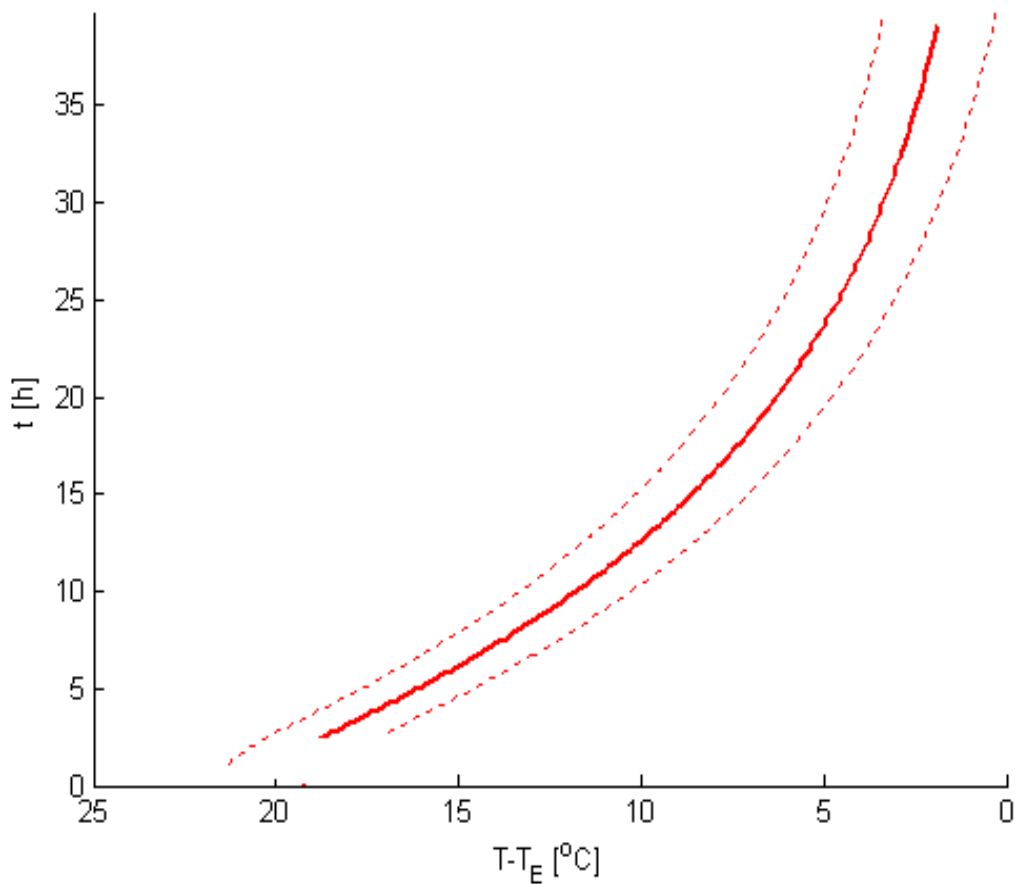
$$c = 22,1 \quad (21,8; 22,3)$$

$$d = -0,063 \quad (-0,064; -0,061)$$

$$rsquare: 0,950$$

$$rmse: 0,776$$

Ryc. 30. Wykres przedstawiający różnicę między mierzoną temperaturą odbytnicy (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach począwszy od 30 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt. Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego.



Ryc. 31. Wykres pozwalający odczytać czas jaki upłynął od zgonu na podstawie wyprowadzonego modelu dwuwykładniczego z użyciem pomiaru temperatury w odbytnicy od 30 minuty po śmierci zwierząt. Linie przerywane przedstawiają 95% przedział ufności modelu.

Dane statystyczne przedstawione na ryc. 24, 26, 28 i 30 dowodzą, że jakość predykcyjna modelu dwuwykładniczego jest znacznie lepsza niż modelu jednowykładniczego (ryc. 16, 18, 20, 22). Świadczą o tym wartości *rsquare* oraz *rmse*, których znaczenie jak również znaczenie współczynników modelu jednowykładniczego wyjaśniono powyżej. Natomiast znaczenie współczynników występujących w modelu dwuwykładniczym jest następujące. Suma współczynników a_1 i c to początkowe różnice temperatur, czyli

ekstrapolowane różnice między temperaturą gałki ocznej, tkanek oczodołu, mięśni i odbytnicy a otoczeniem w chwili śmierci ($t = 0$). Z kolei współczynniki b_1 i d oznaczają stałe szybkości spadku temperatury dla badanych miejsc. Współczynniki a , a_1 , b , b_1 , c , d zostały zebrane w tabelach 7 i 8, a ich średnie wartości przedstawiono na rycinach 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 i 30.

Tabela 7. Dzień eksperymentu, masa ciała i współczynniki równania jednowykładniczego opisującego pośmiertny spadek temperatury u poszczególnych badanych świń począwszy od 30 minuty po ich śmierci.

Dzień eksperymentu_ numer świni [średnia temperatura otoczenia]	Masa ciała [kg]	Współczynniki równania jednowykładniczego spadku temperatury świń							
		Gałki oczne		Tkanki oczodołów		Mięśnie		Odbytnica	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1_1 [20,0 °C]	96	16,0	-0,139	16,2	-0,135	23,0	-0,045	22,9	-0,056
1_2 [20,0 °C]	80	15,4	-0,137	16,2	-0,145	21,4	-0,057	20,4	-0,063
2_1 [19,9 °C]	100	17,0	-0,145	15,9	-0,151	21,2	-0,049	20,8	-0,055
2_2 [19,9 °C]	114	15,7	-0,116	15,7	-0,126	21,5	-0,049	22,0	-0,052
3_1 [20,7 °C]	90	-	-	16,3	-0,176	22,0	-0,052	21,5	-0,064
3_2 [20,7 °C]	103	15,2	-0,172	17,8	-0,168	21,0	-0,054	21,6	-0,065
4_1 [20,6 °C]	108	15,5	-0,105	16,2	-0,116	22,2	-0,050	21,6	-0,070
4_2 [20,6 °C]	96	15,2	-0,110	14,7	-0,124	22,0	-0,045	21,8	-0,059
5_1 [19,9 °C]	98	13,9	-0,125	17,0	-0,137	-	-	-	-
5_2 [19,9 °C]	102	13,3	-0,111	14,0	-0,109	21,7	-0,049	21,8	-0,059

Tabela 8. Dzień eksperymentu, masa ciała i współczynniki równania dwuwykładniczego opisującego pośmiertny spadek temperatury u poszczególnych badanych świń począwszy od 30 minuty po ich śmierci.

Dzień eksperymentu_ numer świni [średnia temperatura otoczenia]	Masa ciała [kg]	Współczynniki równania dwuwykładniczego spadku temperatury świń															
		Gałka oczna				Tkanki oczodołów				Odbytnica				Mięśnie			
		a ₁	b ₁	c	d	a ₁	b ₁	c	d	a ₁	b ₁	c	d	a ₁	b ₁	c	d
1_1 [20,0 °C]	96	10,9	-1,533	15,1	-0,132	7,0	-1,132	15,1	-0,126	-1,4	-0,507	23,4	-0,058	-4,4	-0,340	25,4	-0,054
1_2 [20,0 °C]	80	5,1	-0,500	12,7	-0,117	5,8	-0,513	13,2	-0,123	2,6	-1,409	20,2	-0,062	-2,9	-0,249	23,5	-0,064
2_1 [19,9 °C]	100	7,3	-0,387	11,6	-0,106	5,9	-0,570	12,5	-0,122	-1,3	-0,722	21,3	-0,058	-2,1	-0,462	22,3	-0,054
2_2 [19,9 °C]	114	6,2	-0,661	12,9	-0,093	6,4	-0,538	12,1	-0,096	0,0	-0,358	22,0	-0,053	-3,5	-2,406	21,7	-0,050
3_1 [20,7 °C]	90	-	-	-	-	4,9	-1,216	15,0	-0,164	-4,4	-0,782	22,8	-0,071	-6,6	-0,454	25,4	-0,066
3_2 [20,7 °C]	103	7,4	-0,677	11,4	-0,134	4,0	-0,548	15,2	-0,149	-5,0	-0,726	23,3	-0,073	-4,0	-0,665	22,3	-0,060
4_1 [20,6 °C]	108	3,2	-0,571	13,9	-0,093	4,3	-0,519	13,8	-0,098	-3,9	-1,202	22,3	-0,073	-7,0	-0,420	26,1	-0,066
4_2 [20,6 °C]	96	2,8	-0,867	14,2	-0,102	4,3	-0,807	13,0	-0,110	-3,7	-0,919	22,8	-0,064	-7,7	-0,365	26,7	-0,063
5_1 [19,9 °C]	98	5,1	-1,038	12,4	-0,111	7,0	-0,507	12,8	-0,105	-	-	-	-	-	-	-	-
5_2 [19,9 °C]	102	6,0	-0,861	11,3	-0,091	4,6	-0,621	11,8	-0,090	-3,0	-2,001	21,9	-0,061	-2,5	-0,582	22,7	-0,053

Średnie wartości współczynnika b w modelu jednowykładniczym wynoszą: $-0,127 \text{ h}^{-1}$ dla gałek ocznych oraz $-0,137 \text{ h}^{-1}$ dla tkanek oczodołu (odpowiednio ryc. 16 i 18). Natomiast średnie wartości współczynników spadku temperatury w modelu dwuwykładniczym, tj. współczynnika b_1 – istotnego dla procesu stygnięcia w okresie około 0,5-1,5 h *post mortem* oraz współczynnika d – istotnego dla dalszego przebiegu schładzania są następujące (ryc. 24 i 26): dla gałek ocznych $-0,629 \text{ h}^{-1}$ (współczynnik b_1) oraz $-0,108 \text{ h}^{-1}$ (współczynnik d), dla tkanek oczodołu $-0,579 \text{ h}^{-1}$ (współczynnik b_1) oraz $-0,116 \text{ h}^{-1}$ (współczynnik d). Potwierdza to, że osadzone powierzchownie gałki oczne i tkanki miękkie w krótkim okresie po śmierci ochładzają się wyraźnie szybciej, co można zaobserwować na ryc. 16, 18, 24 i 26 jako bardziej strome nachylenie krzywych odpowiadające temu okresowi czasu. Jest to zgodne z powszechnie znanym faktem, że stygnięcie części rdzeniowej ciała przebiega wolniej niż tkanek podpowierzchniowych [97].

Rozproszenie przebiegów czasowych spadku temperatury, tak dla modelu jednowykładniczego jak i dwuwykładniczego, jest większe w przypadku gałek ocznych (ryc. 16 i 24) niż w przypadku tkanek oczodołu (ryc. 18 i 26). Wskazują na to ilościowo wartości *rmse*: odpowiednio 0,821 i 0,691 dla modelu jednowykładniczego (ryc. 16 i 18) oraz 0,768 i 0,629 dla modelu dwuwykładniczego (ryc. 24 i 26). Także rozpiętości między dolnymi a górnymi granicami 95% przedziałów ufności dla wyliczonego zarówno z modelu jednowykładniczego jak i dwuwykładniczego czasu zgonu, odpowiadające tej samej różnicy temperatur $T-T_E$, są większe w przypadku gałek ocznych niż tkanek oczodołu (tabela 9 wobec tabeli 11 oraz tabela 10 wobec tabeli 12).

Dolną i górną granicę 95% przedziału ufności dla czasu jaki upłynął od zgonu, oszacowanego na podstawie temperatury gałki ocznej, podano w tabeli 9 dla modelu jednowykładniczego i w tabeli 10 dla modelu dwuwykładniczego. Te same granice *Min* i *Max* wyliczone w oparciu o temperaturę tkanek miękkich oczodołu podano w przypadku zastosowania modelu jednowykładniczego w tabeli 11, zaś w przypadku modelu dwuwykładniczego w tabeli 12.

Ocena przebiegu procesów stygnięcia gałek ocznych i tkanek oczodołów (ryc. 16, 18, 24, 26; tabele 7 i 8) wskazuje, że mierzona w tych miejscach temperatura w miarę upływu czasu zmniejsza się zgodnie z funkcją dwuwykładniczą. Wyraźnie widoczna zmiana charakteru krzywych stygnięcia następuje po upływie krótkiego czasu od śmierci, wynoszącego około 1,5-2 h, czyli po 1-1,5 h od momentu rozpoczęcia rejestracji w drugiej serii doświadczeń. W badaniach poprzedniego etapu [91] dokonanie tego spostrzeżenia nie było możliwe, ponieważ pomiary rozpoczynano 1,25 h *post mortem*, kiedy temperatura badanych miejsc spadała już zgodnie z funkcją jednowykładniczą.

Na żadnym z wykresów stygnięcia gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu (ryc. 16, 18, 24, 26) faza *plateau* temperatury nie zaznacza się. Żadna z krzywych spadku temperatury nie nosi także cech mogących wskazywać na obecność fazy *plateau* w okresie poprzedzającym początek pomiarów.

Analiza danych zawartych na ryc. 16-31 i w tabelach 7-16 wskazuje, że precyzja szacowania czasu zgonu dla wszystkich mierzonych miejsc ciała spada funkcyjnie z czasem, wraz ze spadkiem różnic temperatur $T-T_E$. Zarówno model jednowykładniczy (ryc. 16-23 oraz tabele 7, 9, 11, 13, 15) jak i model dwuwykładniczy (ryciny 24-31 oraz tabele 8, 10, 12, 14, 16) przewidują wzrastające z czasem prawdopodobne różnice między rzeczywistym a wyliczonym czasem zgonu. Większy błąd dotyczy górnej granicy 95 % przedziału ufności, co dobrze ilustrują ryc. 25, 27, 29 i 31, zwłaszcza ich części dotyczące dłuższego czasu, który upłynął od śmierci. Tym samym, zgodnie ze spostrzeżeniami zanotowanymi w pierwszym etapie badań [91], wraz z upływem czasu od zgonu stopniowo wzrasta margines błędu - bardziej po stronie dodatniej, zatem zwiększa się prawdopodobieństwo bardziej zawyżenia (przeszacowania) niż zaniżenia (niedoszacowania) wyliczonego czasu zgonu.

Przewagę właściwości predykcyjnych modelu dwuwykładniczego nad modelem jednowykładniczym, szczególnie w odniesieniu do bardzo wczesnego okresu pośmiertnego w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu,

można łatwo stwierdzić porównując ryc. 25 z ryc. 17 lub ryc. 27 z ryc. 19. Potwierdza to także porównanie danych z tabeli 10 z danymi z tabeli 9 oraz danych z tabeli 12 z danymi z tabeli 11.

Podobieństwo w przypadku miejsc pomiarowych, takich jak gałki oczne i tkanki miękkie oczodołów współczynników a i b (tabela 7), współczynników a_1 , b_1 , c , d (tabela 8), parametrów statystycznych (ryc. 16 wobec ryc. 18, ryc. 24 wobec ryc. 26), jak też podobieństwo przebiegów krzywych na ryc. 16 i 18 oraz 24 i 26, wynika z bezpośredniego sąsiedztwa miejsc pomiaru temperatury.

Faza *plateau* przy pomiarach ciepłoty odbytnicy człowieka utrzymuje się do 5-6 h [43,51,57]. Podobny jest czas trwania *plateau* temperatury mierzonej w mięśniach świni i w odbytnicy świni [91]. Jest oczywiste, że w okresie *plateau* szacowanie czasu zgonu nie jest możliwe. Pierwsze obliczenia można podjąć dopiero z chwilą początku spadku temperatury badanych miejsc.

Przeprowadzony eksperyment wykazał brak fazy *plateau* temperatury mierzonej w gałce ocznej i tkankach miękkich oczodołu począwszy od 0,5 h po śmierci zwierząt (ryc. 16, 18, 24, 26). Co prawda, nie wyklucza to ewentualnego istnienia tej fazy w okresie poprzedzającym pomiary (<0,5 h od uboju). Z przyczyn technicznych możliwość rozpoczęcia w tym okresie badań jest nierealna.

Przyjmując, że *plateau* na krzywych schładzania nie występuje, to wyliczona metodą ekstrapolacji najmniejsza różnica między granicami 95% przedziału ufności dla czasu jaki upłynął od zgonu byłaby nie mniejsza od około 0,8 h dla gałek ocznych (tabela 10) oraz od około 0,7 h dla tkanek oczodołu (tabela 12). Z sądowno-lekarskiego doświadczenia wynika, że sytuacje, w których działania diagnostyczne dotyczące ustalania czasu śmierci podejmowane byłyby w tak krótkim okresie po zgonie, nieprzekraczającym 0,5 h, nie zdarzają się. Zatem brak danych na temat temperatury w pierwszych minutach *post mortem* nie ma praktycznego znaczenia.

Tabela 9. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury gałki ocznej i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w gałce ocznej; T_E – temperatura otoczenia.

T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T_E [°C]	Min	t [h]	Max
1,0	13,9	21,4	-	8,0	3,6	5,0	6,8
1,2	13,3	20,0	-	8,2	3,4	4,8	6,6
1,4	12,7	18,8	-	8,4	3,3	4,6	6,3
1,6	12,2	17,7	-	8,6	3,1	4,5	6,1
1,8	11,8	16,8	34,6	8,8	3,0	4,3	5,9
2,0	11,3	16,0	28,9	9,0	2,8	4,1	5,7
2,2	10,9	15,2	25,7	9,2	2,7	3,9	5,5
2,4	10,5	14,5	23,3	9,4	2,5	3,8	5,2
2,6	10,1	13,9	21,5	9,6	2,4	3,6	5,0
2,8	9,7	13,3	20,1	9,8	2,2	3,4	4,8
3,0	9,4	12,8	18,9	10,0	2,1	3,3	4,7
3,2	9,1	12,3	17,8	10,2	2,0	3,1	4,5
3,4	8,7	11,8	16,8	10,4	1,8	3,0	4,3
3,6	8,4	11,3	16,0	10,6	1,7	2,8	4,1
3,8	8,1	10,9	15,3	10,8	1,6	2,7	3,9
4,0	7,8	10,5	14,6	11,0	1,4	2,5	3,8
4,2	7,6	10,1	13,9	11,2	1,3	2,4	3,6
4,4	7,3	9,8	13,4	11,4	1,2	2,2	3,4
4,6	7,0	9,4	12,8	11,6	1,1	2,1	3,3
4,8	6,9	9,1	12,3	11,8	1,0	2,0	3,1
5,0	6,5	8,7	11,8	12,0	0,8	1,8	3,0
5,2	6,3	8,4	11,4	12,2	0,7	1,7	2,8
5,4	6,1	8,1	10,9	12,4	0,6	1,6	2,7
5,6	5,9	7,8	10,5	12,6	0,5	1,4	2,5
5,8	5,6	7,6	10,1	12,8	0,4	1,3	2,4
6,0	5,4	7,3	9,8	13,0	0,3	1,2	2,3
6,2	5,2	7,1	9,4	13,2	0,2	1,1	2,1
6,4	5,0	6,8	9,1	13,4	0,1	1,0	2,0
6,6	4,8	6,5	8,8	13,6	0	0,8	1,8
6,8	4,6	6,3	8,5	13,8	0	0,7	1,7
7,0	4,5	6,1	8,2	14,0	0	0,6	1,6
7,2	4,3	5,9	7,9	14,2	0	0,5	1,5
7,4	4,1	5,7	7,6	14,4	0	0,4	1,3
7,6	3,9	5,4	7,3	14,6	0	0,3	1,2
7,8	3,8	5,2	7,1	14,8	0	0,2	1,1

Tabela 10. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z dwuwykładniczego równania opisującego różnicę temperatury gałki ocznej i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w gałce ocznej; T_E – temperatura otoczenia.

$T-T_E$ [°C]	Min	t [h]	Max	$T-T_E$ [°C]	Min	t [h]	Max
1,0	15,2	23,7	-	9,0	2,7	3,8	5,2
1,2	14,5	22,0	-	9,2	2,6	3,6	5,0
1,4	13,8	20,6	-	9,4	2,4	3,5	4,8
1,6	13,2	19,4	-	9,6	2,3	3,3	4,6
1,8	12,6	18,3	35,1	9,8	2,2	3,2	4,4
2,0	12,1	17,3	30,3	10,0	2,1	3,0	4,2
2,2	11,6	16,4	27,1	10,2	2,0	2,9	4,0
2,4	11,1	15,6	24,8	10,4	1,9	2,8	3,9
2,6	10,6	14,8	22,9	10,6	1,8	2,6	3,7
2,8	10,2	14,2	21,3	10,8	1,7	2,5	3,5
3,0	9,8	13,5	20,0	11,0	1,6	2,4	3,4
3,2	9,4	12,9	18,8	11,2	1,5	2,3	3,2
3,4	9,0	12,4	17,8	11,4	1,5	2,2	3,1
3,6	8,6	11,8	16,9	11,6	1,4	2,1	3,0
3,8	8,3	11,3	16,0	11,8	1,3	2,0	2,8
4,0	7,9	10,9	15,3	12,0	1,2	1,9	2,7
4,2	7,6	10,4	14,5	12,2	1,1	1,8	2,6
4,4	7,3	10,0	13,9	12,4	1,1	1,7	2,5
4,6	7,0	9,6	13,2	12,6	1,0	1,6	2,3
4,8	6,7	9,2	12,7	12,8	0,9	1,5	2,2
5,0	6,4	8,8	12,1	13,0	0,9	1,4	2,1
5,2	6,2	8,5	11,6	13,2	0,8	1,3	2,0
5,4	5,9	8,1	11,1	13,4	0,7	1,3	1,9
5,6	5,7	7,8	10,6	13,6	0,7	1,2	1,8
5,8	5,4	7,5	10,2	13,8	0,6	1,1	1,7
6,0	5,2	7,2	9,8	14,0	0,5	1,0	1,6
6,2	5,0	6,9	9,4	14,2	0,5	1,0	1,5
6,4	4,8	6,6	9,0	14,4	0,4	0,9	1,5
6,6	4,6	6,3	8,6	14,6	0,4	0,8	1,4
6,8	4,4	6,1	8,3	14,8	0,3	0,8	1,3
7,0	4,2	5,8	8,0	15,0	0,3	0,7	1,2
7,2	4,0	5,6	7,6	15,2	0,2	0,6	1,2
7,4	3,9	5,3	7,3	15,4	0,2	0,6	1,1
7,6	3,7	5,1	7,0	15,6	0,1	0,5	1,0
7,8	3,5	4,9	6,7	15,8	0,1	0,5	0,9
8,0	3,4	4,7	6,5	16,0	0	0,4	0,9
8,2	3,2	4,5	6,2	16,2	0	0,4	0,8
8,4	3,1	4,3	5,9	16,4	0	0,3	0,7
8,6	3,0	4,1	5,7	16,6	0	0,3	0,7
8,8	2,8	4,0	5,5	16,8	0	0,2	0,6

Tabela 11. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury tkanek miękkich oczodołu i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w tkankach miękkich oczodołu; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
1,0	13,9	20,2	-	8,6	3,4	4,5	5,7
1,2	13,3	18,9	-	8,8	3,3	4,3	5,5
1,4	12,8	17,7	-	9,0	3,1	4,2	5,3
1,6	12,3	16,8	30,4	9,2	3,0	4,0	5,2
1,8	11,8	15,9	26,1	9,4	2,9	3,8	5,0
2,0	11,4	15,1	23,4	9,6	2,7	3,7	4,8
2,2	10,9	14,4	21,4	9,8	2,6	3,5	4,6
2,4	10,5	13,8	19,9	10,0	2,5	3,4	4,4
2,6	10,2	13,2	18,6	10,2	2,3	3,2	4,3
2,8	9,8	12,7	17,5	10,4	2,2	3,1	4,1
3,0	9,4	12,2	16,6	10,6	2,1	3,0	4,0
3,2	9,1	11,7	15,7	10,8	2,0	2,8	3,8
3,4	8,8	11,3	15,0	11,0	1,9	2,7	3,7
3,6	8,5	10,8	14,3	11,2	1,7	2,6	3,5
3,8	8,2	10,5	13,7	11,4	1,6	2,4	3,4
4,0	7,9	10,1	13,1	11,6	1,5	2,3	3,2
4,2	7,7	9,7	12,6	11,8	1,4	2,2	3,1
4,4	7,4	9,4	12,1	12,0	1,3	2,1	2,9
4,6	7,2	9,1	11,6	12,2	1,2	1,9	2,8
4,8	6,9	8,7	11,2	12,4	1,1	1,8	2,7
5,0	6,7	8,4	10,8	12,6	1,0	1,7	2,5
5,2	6,5	8,2	10,4	12,8	0,8	1,6	2,4
5,4	6,2	7,9	10,0	13,0	0,7	1,5	2,3
5,6	6,0	7,6	9,6	13,2	0,6	1,4	2,2
5,8	5,8	7,4	9,3	13,4	0,5	1,3	2,0
6,0	5,6	7,1	9,0	13,6	0,4	1,1	1,9
6,2	5,4	6,9	8,7	13,8	0,4	1,0	1,8
6,4	5,2	6,6	8,4	14,0	0,3	0,9	1,7
6,6	5,1	6,4	8,1	14,2	0,2	0,8	1,6
6,8	4,9	6,2	7,8	14,4	0,1	0,7	1,4
7,0	4,7	6,0	7,6	14,6	0	0,6	1,3
7,2	4,5	5,8	7,3	14,8	0	0,5	1,2
7,4	4,4	5,6	7,1	15,0	0	0,4	1,1
7,6	4,2	5,4	6,8	15,2	0	0,3	1,0
7,8	4,0	5,2	6,6	15,4	0	0,2	0,9
8,0	3,9	5,0	6,4	15,6	0	0,1	0,8
8,2	3,7	4,8	6,2	15,8	0	0,1	0,7
8,4	3,6	4,7	5,9				

Tabela 12. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z dwuwykładniczego równania opisującego różnicę temperatury tkanek miękkich oczodołu i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w tkankach miękkich oczodołu; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
1,0	15,4	22,3	-	9,6	2,6	3,4	4,4
1,2	14,6	20,7	-	9,8	2,5	3,3	4,2
1,4	13,9	19,4	37,8	10,0	2,4	3,1	4,0
1,6	13,3	18,3	31,0	10,2	2,3	3,0	3,9
1,8	12,7	17,2	27,3	10,4	2,2	2,9	3,7
2,0	12,2	16,3	24,6	10,6	2,1	2,8	3,6
2,2	11,7	15,5	22,6	10,8	2,0	2,7	3,4
2,4	11,2	14,8	21,0	11,0	1,9	2,5	3,3
2,6	10,7	14,1	19,6	11,2	1,8	2,4	3,2
2,8	10,3	13,4	18,5	11,4	1,7	2,3	3,0
3,0	9,9	12,8	17,4	11,6	1,7	2,2	2,9
3,2	9,5	12,3	16,5	11,8	1,6	2,1	2,8
3,4	9,1	11,8	15,6	12,0	1,5	2,0	2,7
3,6	8,8	11,3	14,9	12,2	1,4	1,9	2,6
3,8	8,4	10,8	14,2	12,4	1,3	1,8	2,5
4,0	8,1	10,4	13,5	12,6	1,3	1,7	2,3
4,2	7,8	10,0	12,9	12,8	1,2	1,7	2,2
4,4	7,5	9,6	12,4	13,0	1,1	1,6	2,1
4,6	7,2	9,2	11,8	13,2	1,0	1,5	2,0
4,8	6,9	8,8	11,4	13,4	1,0	1,4	2,0
5,0	6,7	8,5	10,9	13,6	0,9	1,3	1,9
5,2	6,4	8,2	10,4	13,8	0,8	1,3	1,8
5,4	6,2	7,8	10,0	14,0	0,8	1,2	1,7
5,6	5,9	7,5	9,6	14,2	0,7	1,1	1,6
5,8	5,7	7,2	9,2	14,4	0,7	1,1	1,5
6,0	5,5	7,0	8,9	14,6	0,6	1,0	1,4
6,2	5,3	6,7	8,5	14,8	0,5	0,9	1,4
6,4	5,1	6,4	8,2	15,0	0,5	0,9	1,3
6,6	4,9	6,2	7,9	15,2	0,4	0,8	1,2
6,8	4,7	6,0	7,6	15,4	0,4	0,7	1,1
7,0	4,5	5,7	7,3	15,6	0,3	0,7	1,1
7,2	4,3	5,5	7,0	15,8	0,3	0,6	1,0
7,4	4,2	5,3	6,7	16,0	0,2	0,5	0,9
7,6	4,0	5,1	6,5	16,2	0,2	0,5	0,9
7,8	3,8	4,9	6,2	16,4	0,1	0,4	0,8
8,0	3,7	4,7	6,0	16,6	0,1	0,4	0,7
8,2	3,5	4,5	5,8	16,8	0	0,3	0,7
8,4	3,4	4,4	5,6	17,0	0	0,3	0,6
8,6	3,3	4,2	5,3	17,2	0	0,2	0,6
8,8	3,1	4,0	5,1	17,4	0	0,2	0,5
9,0	3,0	3,9	4,9	17,6	0	0,1	0,5
9,2	2,9	3,7	4,7	17,8	0	0,1	0,4
9,4	2,8	3,6	4,6	18,0	0	0,1	0,4

Tabela 13. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury mięśni i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w mięśniach; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
3,0	31,6	39,9	-	11,6	10,2	12,7	15,5
3,2	30,7	38,6	-	11,8	9,9	12,3	15,1
3,4	29,9	37,3	-	12,0	9,6	12,0	14,7
3,6	29,1	36,2	-	12,2	9,3	11,6	14,3
3,8	28,3	35,1	-	12,4	9,0	11,3	14,0
4,0	27,5	34,1	-	12,6	8,7	11,0	13,6
4,2	26,8	33,1	-	12,8	8,4	10,7	13,2
4,4	26,2	32,2	-	13,0	8,1	10,4	12,9
4,6	25,5	31,3	39,4	13,2	7,9	10,0	12,5
4,8	24,8	30,4	38,1	13,4	7,6	9,8	12,2
5,0	24,2	29,6	36,9	13,6	7,3	9,5	11,9
5,2	23,6	28,8	35,8	13,8	7,1	9,2	11,5
5,4	23,0	28,0	34,7	14,0	6,8	8,9	11,2
5,6	22,4	27,3	33,7	14,2	6,5	8,6	10,9
5,8	21,9	26,6	32,8	14,4	6,3	8,3	10,6
6,0	21,3	25,9	31,9	14,6	6,0	8,0	10,3
6,2	20,8	25,3	31,0	14,8	5,8	7,8	9,9
6,4	20,3	24,6	30,1	15,0	5,5	7,5	9,6
6,6	19,8	24,0	29,3	15,2	5,3	7,2	9,3
6,8	19,3	23,4	28,5	15,4	5,1	7,0	9,1
7,0	18,8	22,8	27,8	15,6	4,8	6,7	8,8
7,2	18,4	22,2	27,1	15,8	4,6	6,4	8,5
7,4	17,9	21,7	26,4	16,0	4,3	6,2	8,2
7,6	17,5	21,2	25,7	16,2	4,1	5,9	7,9
7,8	17,0	20,6	25,0	16,4	3,9	5,7	7,7
8,0	16,6	20,1	24,4	16,6	3,7	5,4	7,4
8,2	16,2	19,6	23,8	16,8	3,5	5,2	7,1
8,4	15,8	19,2	23,2	17,0	3,3	5,0	6,9
8,6	15,4	18,7	22,6	17,2	3,0	4,7	6,6
8,8	15,0	18,2	22,1	17,4	2,8	4,5	6,3
9,0	14,6	17,8	21,5	17,6	2,6	4,3	6,1
9,2	14,2	17,3	21,0	17,8	2,4	4,0	5,9
9,4	13,8	16,9	20,5	18,0	2,2	3,8	5,6
9,6	13,5	16,5	20,0	18,2	2,0	3,6	5,4
9,8	13,1	16,0	19,5	18,4	1,8	3,4	5,1
10,0	12,8	15,6	19,0	18,6	1,6	3,2	4,9
10,2	12,4	15,2	18,5	18,8	1,4	2,9	4,6
10,4	12,1	14,8	18,1	19,0	1,2	2,7	4,4
10,6	11,8	14,5	17,6	19,2	1,0	2,5	4,2
10,8	11,4	14,1	17,2	19,4	0,8	2,3	4,0
11,0	11,1	13,7	16,7	19,6	0,6	2,1	3,7
11,2	10,8	13,4	16,3	19,8	0,4	1,9	3,5
11,4	10,5	13,0	15,9	20,0	0,2	1,7	3,3

Tabela 14. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z dwuwykładniczego równania opisującego różnicę temperatury mięśni i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w mięśniach; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
2,4	31,7	39,7	-	11,0	11,1	13,2	15,6
2,6	30,8	38,3	-	11,2	10,9	12,9	15,2
2,8	29,9	37,0	-	11,4	10,6	12,6	14,9
3,0	29,1	35,8	-	11,6	10,3	12,3	14,5
3,2	28,3	34,7	-	11,8	10,0	12,0	14,2
3,4	27,6	33,6	-	12,0	9,8	11,7	13,9
3,6	26,9	32,6	-	12,2	9,5	11,4	13,5
3,8	26,2	31,7	39,7	12,4	9,3	11,1	13,2
4,0	25,6	30,8	38,3	12,6	9,0	10,8	12,9
4,2	24,9	29,9	37,0	12,8	8,7	10,6	12,6
4,4	24,3	29,1	35,8	13,0	8,5	10,3	12,3
4,6	23,7	28,4	34,7	13,2	8,2	10,0	12,0
4,8	23,2	27,6	33,6	13,4	8,0	9,8	11,7
5,0	22,6	26,9	32,7	13,6	7,8	9,5	11,4
5,2	22,1	26,2	31,7	13,8	7,5	9,2	11,1
5,4	21,6	25,6	30,9	14,0	7,3	9,0	10,8
5,6	21,1	25,0	30,0	14,2	7,0	8,7	10,6
5,8	20,6	24,4	29,2	14,4	6,8	8,5	10,3
6,0	20,1	23,8	28,4	14,6	6,6	8,2	10,0
6,2	19,6	23,2	27,7	14,8	6,3	8,0	9,8
6,4	19,2	22,6	26,9	15,0	6,1	7,7	9,5
6,6	18,8	22,1	26,3	15,2	5,9	7,5	9,2
6,8	18,3	21,6	25,6	15,4	5,6	7,3	9,0
7,0	17,9	21,1	25,0	15,6	5,4	7,0	8,7
7,2	17,5	20,6	24,4	15,8	5,2	6,8	8,5
7,4	17,1	20,1	23,8	16,0	4,9	6,6	8,2
7,6	16,7	19,6	23,2	16,2	4,7	6,3	8,0
7,8	16,3	19,2	22,6	16,4	4,5	6,1	7,7
8,0	16,0	18,8	22,1	16,6	4,2	5,9	7,5
8,2	15,6	18,3	21,6	16,8	4,0	5,6	7,3
8,4	15,2	17,9	21,1	17,0	3,7	5,4	7,0
8,6	14,9	17,5	20,6	17,2	3,5	5,2	6,8
8,8	14,5	17,1	20,1	17,4	3,2	4,9	6,6
9,0	14,2	16,7	19,7	17,6	2,9	4,7	6,3
9,2	13,9	16,3	19,2	17,8	2,6	4,5	6,1
9,4	13,5	16,0	18,8	18,0	2,3	4,2	5,9
9,6	13,2	15,6	18,3	18,2	0,9	4,0	5,6
9,8	12,9	15,2	17,9	18,4	0,8	3,7	5,4
10,0	12,6	14,9	17,5	18,6	0	3,5	5,2
10,2	12,3	14,5	17,1	18,8	0	3,2	4,9
10,4	12,0	14,2	16,7	19,0	0	2,9	4,7
10,6	11,7	13,9	16,3	19,2	0	2,6	4,4
10,8	11,4	13,5	16,0	19,4	0	2,2	4,2

Tabela 15. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z jednowykładniczego równania opisującego różnicę temperatury odbytnicy i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w odbytnicy; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
2,0	29,9	39,5	-	10,6	9,5	11,8	14,5
2,2	29,0	37,9	-	10,8	9,3	11,5	14,1
2,4	28,2	36,5	-	11,0	9,0	11,2	13,7
2,6	27,4	35,2	-	11,2	8,7	10,9	13,4
2,8	26,6	33,9	-	11,4	8,5	10,6	13,0
3,0	25,8	32,8	-	11,6	8,2	10,3	12,7
3,2	25,1	31,7	-	11,8	8,0	10,0	12,4
3,4	24,4	30,7	-	12,0	7,7	9,7	12,1
3,6	23,8	29,8	39,2	12,2	7,5	9,5	11,7
3,8	23,1	28,9	37,6	12,4	7,2	9,2	11,4
4,0	22,5	28,0	36,2	12,6	7,0	8,9	11,1
4,2	22,0	27,2	34,9	12,8	6,8	8,7	10,8
4,4	21,4	26,4	33,7	13,0	6,5	8,4	10,5
4,6	20,8	25,7	32,6	13,2	6,3	8,2	10,2
4,8	20,3	25,0	31,5	13,4	6,1	7,9	10,0
5,0	19,8	24,3	30,5	13,6	5,9	7,7	9,7
5,2	19,3	23,6	29,6	13,8	5,6	7,4	9,4
5,4	18,8	23,0	28,7	14,0	5,4	7,2	9,1
5,6	18,3	22,4	27,8	14,2	5,2	6,9	8,9
5,8	17,9	21,8	27,0	14,4	5,0	6,7	8,6
6,0	17,4	21,3	26,3	14,6	4,8	6,5	8,4
6,2	17,0	20,7	25,5	14,8	4,6	6,3	8,1
6,4	16,6	20,2	24,8	15,0	4,4	6,0	7,9
6,6	16,2	19,7	24,2	15,2	4,2	5,8	7,6
6,8	15,8	19,2	23,5	15,4	4,0	5,6	7,4
7,0	15,4	18,7	22,9	15,6	3,8	5,4	7,1
7,2	15,0	18,2	22,3	15,8	3,6	5,2	6,9
7,4	14,6	17,8	21,7	16,0	3,4	5,0	6,7
7,6	14,2	17,3	21,2	16,2	3,2	4,8	6,4
7,8	13,9	16,9	20,6	16,4	3,0	4,6	6,2
8,0	13,5	16,5	20,1	16,6	2,9	4,4	6,0
8,2	13,2	16,1	19,6	16,8	2,7	4,2	5,8
8,4	12,9	15,7	19,1	17,0	2,5	4,0	5,6
8,6	12,5	15,3	18,6	17,2	2,3	3,8	5,3
8,8	12,2	14,9	18,1	17,4	2,2	3,6	5,1
9,0	11,9	14,5	17,7	17,6	2,0	3,4	4,9
9,2	11,6	14,2	17,3	17,8	1,8	3,2	4,7
9,4	11,3	13,8	16,8	18,0	1,6	3,0	4,5
9,6	11,0	13,5	16,4	18,2	1,5	2,8	4,3
9,8	10,7	13,1	16,0	18,4	1,3	2,6	4,1
10,0	10,4	12,8	15,6	18,6	1,1	2,5	3,9
10,2	10,1	12,4	15,2	18,8	1,0	2,3	3,7
10,4	9,8	12,1	14,8	19,0	0,8	2,1	3,5

Tabela 16. Dolny (Min) i górny (Max) 95 % przedział ufności przewidywanego czasu, który upłynął od śmierci badanych świń obliczonego z dwuwykładniczego równania opisującego różnicę temperatury odbytnicy i otoczenia w czasie, przy uwzględnieniu danych z pomiarów rozpoczynanych od 30 minuty po śmierci zwierząt: T – temperatura mierzona w odbytnicy; T_E – temperatura otoczenia.

T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max	T-T _E [°C]	Min	t [h]	Max
2,0	29,3	38,3	-	10,6	9,6	11,7	14,2
2,2	28,4	36,8	-	10,8	9,3	11,4	13,8
2,4	27,5	35,4	-	11,0	9,0	11,1	13,5
2,6	26,8	34,1	-	11,2	8,8	10,8	13,2
2,8	26,0	33,0	-	11,4	8,5	10,5	12,8
3,0	25,3	31,8	-	11,6	8,3	10,3	12,5
3,2	24,6	30,8	-	11,8	8,0	10,0	12,2
3,4	23,9	29,8	39,3	12,0	7,8	9,7	11,9
3,6	23,3	28,9	37,7	12,2	7,6	9,5	11,6
3,8	22,7	28,1	36,3	12,4	7,3	9,2	11,3
4,0	22,1	27,3	35,0	12,6	7,1	8,9	11,0
4,2	21,5	26,5	33,7	12,8	6,9	8,7	10,7
4,4	21,0	25,7	32,5	13,0	6,7	8,4	10,4
4,6	20,4	25,0	31,5	13,2	6,4	8,2	10,2
4,8	19,9	24,3	30,4	13,4	6,2	8,0	9,9
5,0	19,4	23,7	29,5	13,6	6,0	7,7	9,6
5,2	19,0	23,1	28,6	13,8	5,8	7,5	9,4
5,4	18,5	22,5	27,8	14,0	5,6	7,3	9,1
5,6	18,0	21,9	27,0	14,2	5,4	7,0	8,8
5,8	17,6	21,3	26,2	14,4	5,2	6,8	8,6
6,0	17,8	20,8	25,5	14,6	5,0	6,6	8,3
6,2	16,7	20,3	24,8	14,8	4,8	6,4	8,1
6,4	16,3	19,7	24,1	15,0	4,6	6,2	7,9
6,6	15,9	19,3	23,5	15,2	4,4	6,0	7,6
6,8	15,6	18,8	22,8	15,4	4,2	5,7	7,4
7,0	15,2	18,3	22,2	15,6	4,0	5,5	7,2
7,2	14,8	17,9	21,7	15,8	3,8	5,3	6,9
7,4	14,4	17,4	21,1	16,0	3,6	5,1	6,7
7,6	14,1	17,0	20,6	16,2	3,4	4,9	6,5
7,8	13,7	16,6	20,1	16,4	3,2	4,7	6,3
8,0	13,4	16,2	19,6	16,6	3,1	4,5	6,1
8,2	13,1	15,8	19,1	16,8	2,9	4,3	5,9
8,4	12,7	15,4	18,6	17,0	2,7	4,1	5,7
8,6	12,4	15,0	18,1	17,2	2,3	3,9	5,4
8,8	12,1	14,7	17,7	17,4	2,3	3,7	5,2
9,0	11,8	14,3	17,3	17,6	2,0	3,6	5,0
9,2	11,5	14,0	16,8	17,8	1,6	3,4	4,8
9,4	11,2	13,6	16,4	18,0	1,5	3,2	4,6
9,6	10,9	13,3	16,0	18,2	1,2	3,0	4,4
9,8	10,6	12,9	15,6	18,4	0	2,8	4,3
10,0	10,4	12,6	15,3	18,6	0	2,6	4,1
10,2	10,1	12,3	14,9	18,8	0	2,4	3,9
10,4	9,8	12,0	14,5				

Ryciny 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 ilustrują różnice temperatur między ciepłotą badanych miejsc (T) a otoczeniem (T_E) dla 9 gałek ocznych (ryc. 16 i 24), 10 tkanek miękkich oczodołów (ryc. 18 i 26), 9 mięśni zadów (ryc. 20 i 28), 9 odbytnic (ryc. 22 i 30) (w 3. dniu pomiar temperatury gałki ocznej nie został przeprowadzony, zaś w dniu 5. temperaturę mięśni i odbytnicy badano tylko u jednego osobnika – *vide* tabele 7 i 8). Ryciny 16, 18, 20, 22 pokazują przebieg krzywych schładzania oraz opisują wyprowadzony model jednowykładniczy dla obliczania czasu zgonu. Ryciny 24, 26, 28, 30 zawierają charakterystykę modelu dwuwykładniczego. Na sporządzonych wykresach wyraźnie widać dwufazowy przebieg spadku temperatury mierzonej w gałce ocznej (ryc. 16 i 24) oraz w tkankach oczodołu (ryc. 18 i 26). Zmiana przebiegu krzywych pojawia się około 1,5-2 h *post mortem* (około 1-1,5 h po rozpoczęciu rejestracji). Na rycinach ilustrujących proces schładzania mięśni (ryc. 20 i 28) oraz odbytnic (ryc. 22 i 30) w przebiegu średniej krzywej dla modelu dwuwykładniczego widoczna jest natomiast bardzo wyraźna faza początkowego *plateau* temperatury. Faza ta jest nieuwzględniona w średniej krzywej na ryc. 20 i 22 uzyskanej przy przyjęciu modelu jednowykładniczego. Ponadto uśrednione krzywe widoczne na ryc. 28 i 30 w początkowym swym przebiegu noszą cechy wskazujące na niższą ciepłotę mięśni i odbytnic w okresie poprzedzającym pomiary, tj. w okresie <30 min *post mortem*.

Obliczone na podstawie modelu jedno- i dwuwykładniczego przedziały czasowe pozwalające odczytać czas śmierci w oparciu o pomiar temperatury w gałkach ocznych, tkankach miękkich oczodołu, mięśniach i odbytnicach podane są w tabelach 9-16.

Opisane ilościowo przez współczynnik *rmse* rozproszenie przebiegów czasowych spadku temperatury mięśni i odbytnic w przypadku modelu jednowykładniczego wynosi: dla mięśni 0,778, dla odbytnic 0,794 (odpowiednio ryc. 20, 22). Rozproszenie to w przypadku modelu

dwuwykładniczego wynosi w tej samej kolejności: 0,711; 0,776 (odpowiednio ryc. 28, 30).

Jak wspomniano kinetykę procesu stygnięcia wszystkich badanych miejsc w warunkach wcześniej rozpoczynanego po zgonie eksperymentu lepiej opisuje dwuwykładniczy model oceny czasu zgonu. Na lepszą statystyczną jakość modelu dwuwykładniczego względem jednowykładniczego, w odniesieniu do wszystkich badanych miejsc wskazuje porównanie wartości *rsquare* oraz *rmse* (ryc. 16 wobec 24, ryc. 18 wobec 26, ryc. 20 wobec 28, ryc. 22 wobec 30). Z wartości tych parametrów wynika, że model dwuwykładniczy najlepiej opisywał przebieg procesu stygnięcia w tkankach oczodołu i gałkach ocznych, gdyż uwzględniał pomijaną przez model jednowykładniczy początkową fazę szybszego spadku temperatury w tych miejscach pomiaru.

Początkowy przebieg krzywych stygnięcia mięśni i odbytnic (ryc. 20 i 28 oraz 22 i 30) wskazuje na pośmiertne podwyższanie się temperatury tych miejsc, trwające do około 1 h od uboju zwierząt. Zjawisko to w jest w medycynie sądowej znane i opisywane [98].

Analizując dane z tabeli 8 i ryc. 24 można wnioskować, że ekstrapolowana z użyciem równania dwuwykładniczego normalna, fizjologiczna temperatura gałki ocznej świni wyliczona z równania 10 (przy $t = 0$) wynosi około 37,9 °C. Ponieważ $a_1 = 4,8$ i $c = 12,9$ przy średniej temperaturze otoczenia $T_E = 20,2$ °C, to $T_D - 20,2 = a_1 + c$, czyli $T_D - 20,2 = 17,7$; zatem $T_D = 37,9$ °C. Stwierdzenie to koreluje z raportami Klonta i Lambooy'a [93] oraz Hanneman i wsp. [94], mówiącymi, że temperatura ciała świni wynosi około 38-40 °C. To wyliczenie również potwierdza prawidłowość zastosowania modelu dwuwykładniczego do opisu pośmiertnego spadku temperatury gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu. Analogicznie wyliczona z równania dwuwykładniczego temperatura wyjściowa tkanek miękkich oczodołu wynosi 38,4 °C, mięśni 39,8 °C i odbytnic 39,4 °C. Wartości te wydają się bardzo wiarygodne.

Dla porównania, wyliczona z użyciem modelu jednowykładniczego odpowiednia ekstrapolowana wartość temperatury gałki ocznej świni T_D w chwili śmierci ($t = 0$), wynosiłaby 35,3 °C. Wynika to z następujących wyliczeń (równanie 3): ponieważ $a = 15,1$ °C przy $T_E = 20,2$ °C to $T_D - T_E = 15,1$ °C, a zatem $T_D = 35,3$ °C. Analogicznie wyliczona z równania jednowykładniczego wartość wyjściowej temperatury tkanek miękkich oczodołu wynosiłaby 36,1 °C, mięśni 42,0 °C i odbytnic 41,8 °C. Jak widać, wartości w przypadku gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu wobec danych z literatury [93,94] są wyraźnie zaniżone, natomiast w przypadku mięśni i odbytnic zawyżone.

Podczas analizy rezultatów badań w początkowym okresie pośmiertnego stygnięcia gałek ocznych, tkanek miękkich oczodołów, mięśni i odbytnic zwrócono uwagę na możliwy brak istotnego znaczenia niewielkiego przepływu powietrza dla procesu stygnięcia tych miejsc [91].

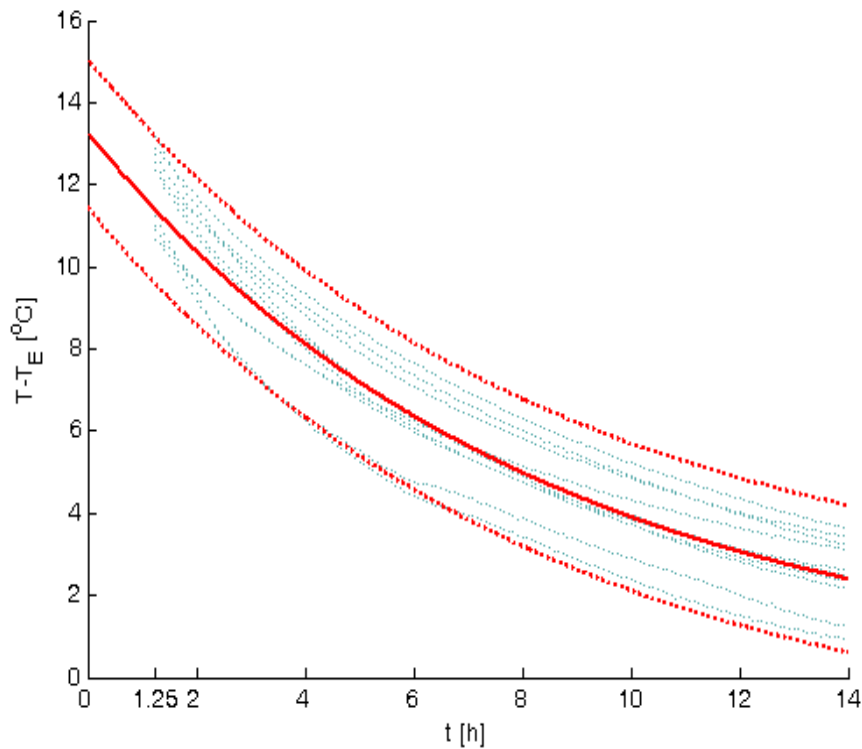
W celu porównania szybkości stygnięcia poszczególnych miejsc ciała zestawiono ze sobą jednowykładnicze modele stygnięcia gałki ocznej, tkanek miękkich oczodołu, mięśni i odbytnic wyznaczone w obu seriach doświadczeń, nie uwzględniając w obliczeniach pierwszych 45 min rejestracji z drugiej serii doświadczeń (rozpoczynanej w rzeczywistości od 30 min po śmierci) tak aby otrzymać ten sam czas początku rejestracji (75 min po śmierci zwierząt). Porównanie odpowiadających tym miejscom wartości stałych szybkości spadku temperatury b przedstawiało się następująco: -0,113 h⁻¹ dla gałek ocznych, -0,111 h⁻¹ dla tkanek miękkich oczodołu, -0,063 h⁻¹ dla mięśni oraz -0,058 h⁻¹ dla odbytnic – w pierwszej serii doświadczeń, do -0,122 h⁻¹ dla gałek ocznych, -0,128 h⁻¹ dla tkanek miękkich oczodołu, -0,052 h⁻¹ dla mięśni oraz -0,062 h⁻¹ dla odbytnic – w drugiej serii doświadczeń (ryc. 32-35).

Widoczna jest także zbieżność wartości stałych szybkości stygnięcia b , wyprowadzonych w eksperymencie rozpoczynanym 75 min po śmierci (-0,113 h⁻¹ dla gałki ocznej, -0,111 h⁻¹ dla tkanek oczodołu, -0,063 h⁻¹ dla mięśni, -0,058 h⁻¹ dla odbytnic) z wartościami współczynników stygnięcia d

uzyskanych w doświadczeniu rozpoczynanym 30 min po śmierci świń (-0,108 h⁻¹ dla gałki ocznej, -0,116 h⁻¹ dla tkanek oczodołu, -0,058 h⁻¹ dla mięśni, -0,063 h⁻¹ dla odbytnic). Współczynniki te (b w modelu jednowykładniczym oraz d w modelu dwuwykładniczym) określają szybkość spadku temperatury rejestrowanej w badanych miejscach począwszy od praktycznie tego samego czasu: w pierwszej serii doświadczeń od 1,25 h *post mortem*, zaś w drugiej serii doświadczeń od około 1,5 h *post mortem*. W opracowaniu wyników pierwszego etapu badań [91] posługiwano się modelem jednowykładniczym, bowiem zapewniał on dla tamtych warunków badań uzyskanie możliwie najprecyzyjniejszego oszacowania czasu zgonu. W opracowaniu wyników drugiego etapu doświadczeń modelowi temu odpowiada drugi człon wykładniczy modelu dwuwykładniczego, opisany przez współczynnik d . Dlatego za jedyne porównywalne z sobą stałe szybkości stygnięcia, opisujące szybkość stygnięcia badanych miejsc w tym samym przedziale czasu, przy porównywaniu modelu jedno- z dwuwykładniczym, mogą być uznane tylko współczynniki b w modelu jednowykładniczym oraz współczynniki d w modelu dwuwykładniczym.

Przedstawione porównania wskazują na brak znaczących różnic między wyznaczonymi w odmiennych warunkach doświadczalnych stałymi szybkości stygnięcia zwłok.

Warunki obu eksperymentów jednak się różniły. W pierwszym etapie badań nie wymuszano przepływu powietrza, natomiast w drugim etapie doświadczeń przepływ powietrza był wymuszany. Ustawienie klimatyzatorów oraz wentylatora zapewniało kierowanie strumienia powietrza na ciała świń oraz ściany pomieszczenia.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

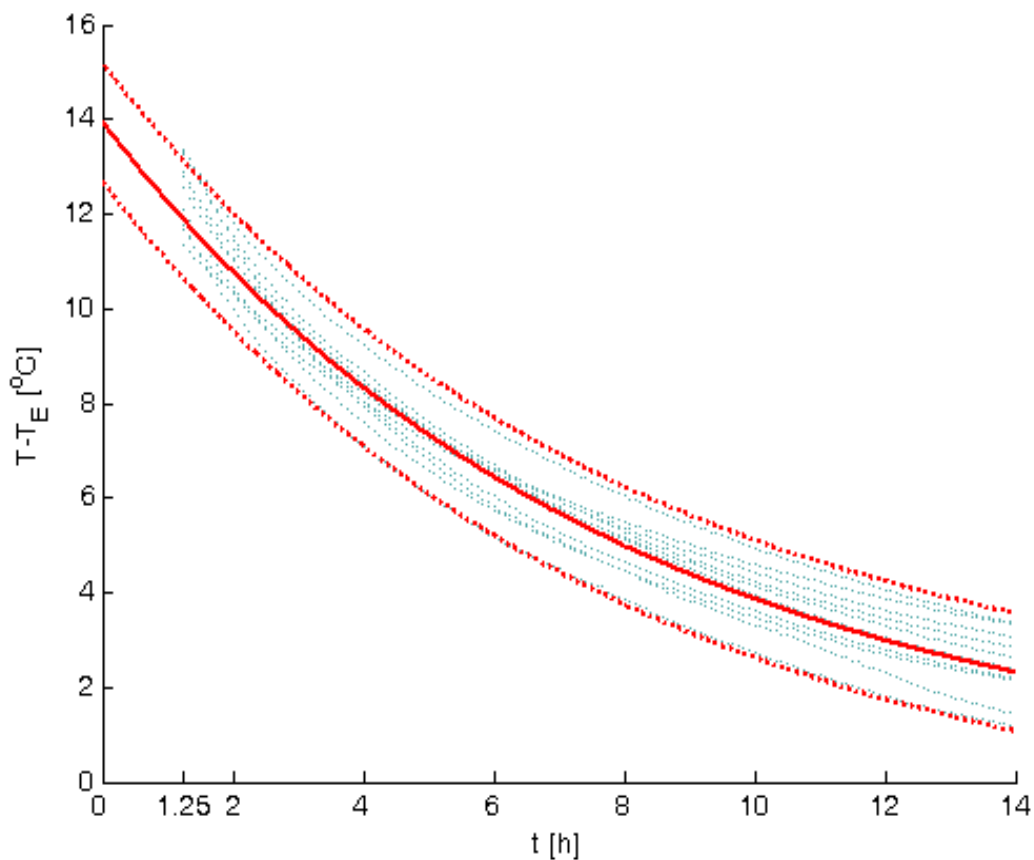
a = 13,3 (13,1; 13,4)

b = -0,122 (-0,125; -0,120)

rsquare: 0,885

rmse: 0,913

Ryc. 32. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą gałki ocznej (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach, przedstawionego od 75 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt (druga seria doświadczeń). Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

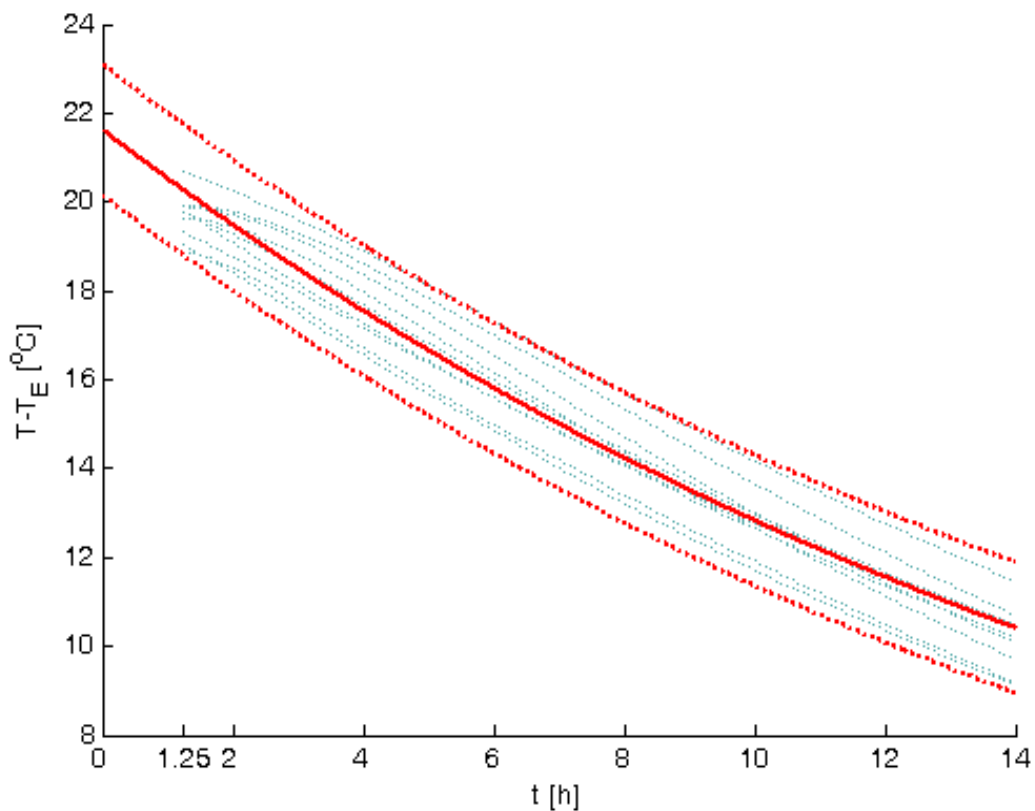
$$a = 13,9 \quad (13,8; 14,1)$$

$$b = -0,128 \quad (-0,130; -0,127)$$

$$\text{rsquare: } 0,947$$

$$\text{rmse: } 0,634$$

Ryc. 33. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą tkanek miękkich odczołu (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach, przedstawionego od 75 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt (druga seria doświadczeń). Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



$$[T-T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

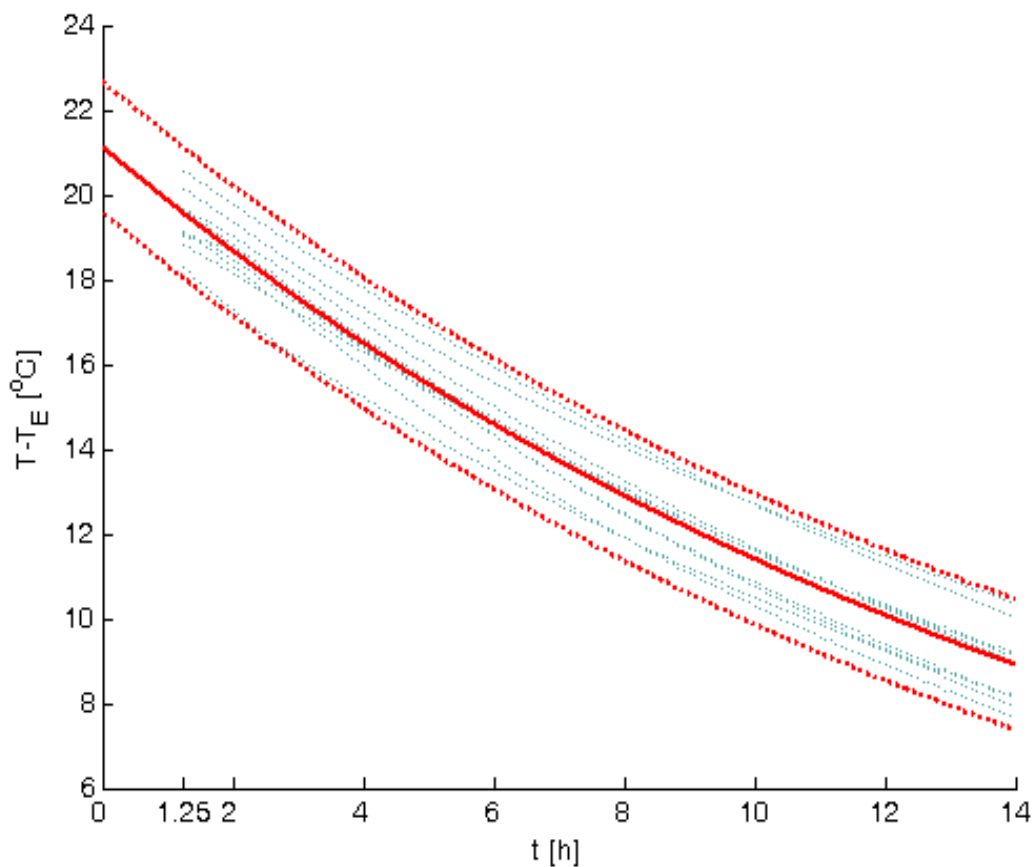
a = 21,6 (21,5; 21,7)

b = -0,052 (-0,053; -0,051)

rsquare: 0,936

rmse: 0,750

Ryc. 34. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą mięśni (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach, przedstawionego od 75 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt (druga seria doświadczeń). Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.



$$[T - T_E] = a \cdot \exp(b \cdot t)$$

Współczynniki (z 95% przedziałem ufności):

$$a = 21,1 \quad (21,1; 21,3)$$

$$b = -0,062 \quad (-0,063; -0,061)$$

$$rsquare: 0,939$$

$$rmse: 0,785$$

Ryc. 35. Wykres przedstawiający różnice między mierzoną temperaturą odbytnicy (T) a temperaturą otoczenia (T_E) w funkcji czasu upływającego od śmierci świni, mierzonego w 5-minutowych odstępach, przedstawionego od 75 minuty po śmierci dla 10 badanych zwierząt (druga seria doświadczeń). Pod wykresem podane są współczynniki z parametrami statystycznymi wyprowadzonego modelu jednowykładniczego.

Wyniki pomiarów przepływu powietrza z użyciem anemometru wykazały, że prędkość powietrza w odległości około 10 cm od wylotu każdego klimatyzatora wynosiła 4-5 m/s a wiatraka wentylatora 3-4 m/s i odpowiadała w

skali Beauforta wiatrowi o sile 3° (określanemu jako łagodny). Malą ona w wyniku rozpraszania strumieni powietrza w ten sposób, że na wysokości 100-150 cm w centrum trójkąta określonego umiejscowieniem użytych urządzeń ulegała zmniejszeniu do wartości 1,7-2,3 m/s, co odpowiadało w skali Beauforta wiatrowi o sile 2° (określanemu jako słaby), osiągając miejscowo w jego obszarze wartości 1-1,2 m/s, odpowiadające w skali Beauforta wiatrowi o sile 1° (określanemu jako powiew) [99]. W odległości do 100 mm od okolic oczodołowych świń prędkość powietrza nie przekraczała 0,3 m/s, natomiast w tej samej odległości od zadów nie przekraczała 0,4 m/s.

Wobec danych literaturowych taka prędkość przepływu powietrza (0,3-0,4 m/s) nie powinna mieć istotnego wpływu na proces pośmiertnego spadku temperatury ciała, a więc także gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów. Wykazano bowiem [100], że działanie powietrza o prędkości $\leq 0,5$ m/s na człowieka nieruchomego i nie okrytego odzieżą nie wpływa istotnie na zwiększenie oddawania ciepła przez ciało. Ta wartość w okolicach gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów nie została w eksperymencie przekroczona, a istniejące w tych okolicach warunki przepływu powietrza odpowiadały sytuacji zbliżonej do powietrza nieruchomego [99,100].

Seryjne pomiary temperatury rogówki z użyciem termometru laserowego wykorzystującego promieniowanie podczerwone, przeprowadzone w celu weryfikacji możliwości pomiaru temperatury gałki ocznej metodą nieinwazyjną, ze względu na rozbieżność odczytywanych w odstępach piętnastosekundowych wyników (tabela 17) zostały zaprzestane. Wyniki pomiarów temperatury gałki ocznej przy pomocy termometru laserowego zdają się potwierdzać słuszność twierdzenia, że w ten sposób rejestrowana jest wyłącznie ciepłota powierzchniowa [91].

Tabela 17. Wyniki pomiarów temperatury gałki ocznej z użyciem termometru laserowego, wykorzystującego promieniowanie podczerwone, przeprowadzonych podczas drugiego etapu badań (ze względu na rozbieżność wyników odstąpiono od dalszych pomiarów).

Dzień badań_nr świni	Temperatura powierzchni gałki ocznej [°C] mierzona 10 min po śmierci i następnie dwukrotnie w 15-sekundowych odstępach		
1_1	31,2	31,0	33,4
1_2	32,3	31,9	30,3
2_1	29,9	31,2	32,6
2_2	28,6	30,2	29,9

Wykonywanie pomiarów laserowych wymagało rozwierania zamkniętych naturalnie po śmierci szpar powiekowych. Zapewne jedną z istotnych przyczyn stwierdzonych różnic między temperaturą ciała szklistego i rogówki była sprzyjająca parowaniu wilgotność powierzchni oka. Natomiast różnice w odczytach kolejnych pomiarów temperatury rogówki może tłumaczyć zjawisko tzw. przedocznego filmu łzowego, czyli pokrywającej powierzchnię oka płynnej, trzywarstwowej, tłuszczowo-wodno-mucynowej struktury grubości 6-20 μm , która jest odtwarzana i rozprowadzana przy każdym mrugnięciu powiek [101]. W warunkach wykonanego eksperymentu produkcja filmu łzowego nie zachodziła a rozprowadzanie fizjologiczne ustąpiło przemieszczaniu związanemu z otwieraniem i zamykaniem powiek. Najprawdopodobniej prowadziło to do zmian w ilości i dystrybucji płynu, co przekładało się na wykazywane różnice odczytów.

Tak więc, przeprowadzony eksperyment wskazuje, że dla osiągnięcia miarodajnego pomiaru temperatury gałki ocznej konieczne jest badanie ciepłoty jej wnętrza.

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań na zwłokach świń mogą mieć bezpośrednie praktyczne konsekwencje dla medycyny sądowej. Analiza danych zawartych na ryc. 7, 9, 11, 13 i tabelach 1-5 wskazuje, że precyzja oszacowania czasu zgonu spada funkcyjnie z czasem. Model jednowykładniczy opisujący wyniki pomiarów temperatury rozpoczynanych 75 min po śmierci zwierząt prawidłowo przewiduje wzrastające z upływem czasu *post mortem* różnice pomiędzy rzeczywistym a wyliczonym czasem zgonu. Błąd oszacowania zwiększa się zwłaszcza w przypadku górnej granicy 95% przedziału ufności. W miarę upływu czasu *post mortem*, bardziej prawdopodobne jest zatem przeszacowanie niż niedoszacowanie czasu, który upłynął od zgonu. W niniejszej pracy wykazano, że w okresie pierwszych 13 h po śmierci największą dokładność wyliczeń czasu zgonu umożliwiają pomiary temperatury gałki ocznej. Okres ten obejmuje różnice między jej ciepłotą T i temperaturą otoczenia T_E powyżej 3,6 °C. Począwszy od około 13 h po śmierci dokładność oszacowań czasu śmierci na podstawie temperatury gałki ocznej zaczyna ustępować dokładności uzyskiwanej z pomiarów ciepłoty mięśni, dla których okres ten określają wartości $T - T_E \leq 8,8$ °C. Począwszy od około 14 h po śmierci dokładność oszacowań na podstawie pomiarów gałkowych ustępuje dokładności uzyskiwanej z pomiarów ciepłoty odbytnicy, dla której okres ten określają wartości $T - T_E \leq 9,0$ °C. W okresie między około 13 a 23,5 h *post mortem* dokładność oceny czasu śmierci jest najwyższa w przypadku pomiarów ciepłoty mięśni, w okresie określanym wartościami $T - T_E \geq 4,6$ °C i $T - T_E \leq 8,8$ °C. Od około 24 h po zgonie do czasu bliskiego całkowitemu wystygnięciu zwłok, dokładność staje się najlepsza dla pomiarów temperatury w odbytnicy. Okres ten określany jest przez wartości $T - T_E \leq 5,2$ °C.

Dokładność przewidywań czasu zgonu na podstawie pomiarów ciepłoty tkanek oczodołu przez cały okres rejestracji była podobna jak w przypadku pomiarów gałkowych. Od czasu około 10,5 h po zgonie, określonego przez

wartości $T - T_E \geq 4,8$ °C, zaczynała ona ustępować dokładności uzyskiwanej na podstawie pomiarów ciepłoty mięśni.

Na podstawie pierwszej serii eksperymentów stwierdzono, że praktyczne znaczenie pomiarów temperatury gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu sięga około 20 h *post mortem*. Należy jednak mieć na uwadze, że przy dłuższym czasie od śmierci pomiary temperatury w odbytnicy i w mięśniach wykazują przewagę nad pomiarami w gałce ocznej i tkankach miękkich oczodołu [91].

Badania wykonane począwszy od 75 min po zgonie wykazały, że pomiary temperatury gałek ocznych i tkanek oczodołów mogą być szczególnie przydatne do oceny czasu zgonu w następującym bezpośrednio po śmierci kilkunastogodzinnym okresie dynamicznego stygnięcia zwłok oraz, że w dalszym okresie schładzania zwłok powinny te pomiary zostać zastąpione pomiarami temperatury mięśni lub odbytnicy. Przedstawione wyniki dowodzą przydatności gałki ocznej i tkanek oczodołu jako miejsc pomiarów temperatury zwłok w diagnostyce czasu śmierci.

Przeprowadzona kolejna seria eksperymentów na świniach z wcześniejszym początkiem rejestracji temperatury (30 min *post mortem*) potwierdziła, że pomiary spadku temperatury w gałce ocznej i tkankach oczodołu mogą stać się metodą z wyboru przy szacowaniu czasu śmierci w pierwszym okresie schładzania ciała. Dzięki maksymalnemu skróceniu procedur technicznych poprzedzających rejestrację temperatury i wykazaniu zakładanego wstępnie braku fazy *plateau* temperatury w przypadku gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu powstała możliwość wiarygodnego szacowania czasu zgonu począwszy od bardzo wczesnego okresu pośmiertnego. Użycie modelu dwuwykładniczego pozwoliło na osiągnięcie w tym okresie znamiennie lepszej niż przy użyciu modelu jednowykładniczego dokładności oceny czasu zgonu. W chwili rozpoczęcia rejestracji (0,5 h *post mortem*), określonej przez różnicę między ciepłotą gałki ocznej i tkanek oczodołu (T) a temperaturą otoczenia (T_E)

wynoszące odpowiednio 15,6 °C oraz 16,2 °C, różnice między rzeczywistym a wyliczonym czasem zgonu wynosiły w przybliżeniu: dla gałek ocznych od +0,5 h do -0,4 h (tabela 10) a dla tkanek miękkich oczodołu od +0,4 do -0,3 h (tabela 12). W czasie 1,5 h *post mortem*, czyli w momencie określonym przez wartość $T-T_E$ wynoszącą w przypadku gałki ocznej 12,8 °C a w przypadku tkanek oczodołu 13,2 °C, różnice między rzeczywistym a wyliczonym czasem zgonu wynosiły: dla gałek ocznych od +0,7 h do -0,6 h (tabela 10), dla tkanek oczodołu od +0,7 h do -0,5 h (tabela 12). Z kolei po upływie 2,5 h od śmierci zwierząt różnice te dla gałek ocznych wynosiły od +1,0 h do -0,8 h (tabela 10), zaś dla tkanek oczodołu od +0,8 h do -0,6 h (tabela 12). Po 5 h od śmierci błąd oszacowania czasu śmierci zawierał się między +1,8 h a -1,4 h dla gałek ocznych (tabela 10) oraz +1,3 h a -1,1 h dla tkanek miękkich oczodołu (tabela 12). Po 10 h od śmierci błąd oszacowania czasu śmierci zawierał się między +3,8 h a -2,5 h dla gałek ocznych (tabela 10) oraz +2,9 h a -2,3 h dla tkanek miękkich oczodołu (tabela 12). Takie wartości błędów są porównywalne, a nawet mniejsze, niż opisywane przez Henssgego i wsp. [72] w badaniu wykorzystującym pomiary pośmiertnej temperatury w mózgu.

Według Henssgego i wsp. dokładność oszacowania czasu śmierci na podstawie pomiarów temperatury mózgu zawiera się w granicach $\pm 1,5$ h (w czasie do 6 h *post mortem*) i $\pm 2,5$ h (w czasie do 10 h *post mortem*). W przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu jednakże nie wchodzi w grę podnoszony przez tych autorów niekorzystny wpływ ilości włosów na przebieg pośmiertnego stygnięcia mózgu. Co więcej pomiar temperatury mózgu wymaga wprowadzenia czujnika temperatury w głąb mózgu, co jest czynnością trudną.

Inną metodą cechującą się wysoką dokładnością w początkowym okresie po śmierci, zbliżoną do metody opartej na pomiarach temperatury gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu, jest metoda oparta na pomiarach temperatury błony bębenkowej [73]. Charakter przebiegu procesu stygnięcia gałki ocznej, tkanek miękkich oczodołu i błony bębenkowej jest podobny. Wszystkie trzy struktury

charakteryzują się brakiem obecności fazy *plateau* spadku temperatury. Błąd oszacowania czasu śmierci na podstawie pomiarów temperatury błony bębenkowej wynosi około ± 2 h (w czasie do 7 h *post mortem*) oraz około $\pm 3,5$ h (w czasie do 10 h *post mortem*). Zarówno metoda opracowana w pracy doktorskiej jak i metoda podana przez Baccino i wsp. [73] pozwalają na dokładniejsze oszacowanie czasu śmierci w pierwszych co najmniej 10 h po śmierci niż metody Henssgego i tzw. „*rule of thumb*”, oparte na pomiarach temperatury w odbytnicy. Nie mniej jednak czynnikami mogącymi wpływać na tempo stygnięcia błony bębenkowej, a zarazem mogącymi zwiększać błąd oszacowania czasu śmierci w przypadku pomiarów temperatury błony bębenkowej są m.in. uszkodzenia błony bębenkowej w wyniku urazów czaszkowo-mózgowych z krwawieniem do przewodu słuchowego, procesy zapalne z wysiękiem toczące się w obrębie ucha środkowego i błony bębenkowej lub choćby obecność woskowiny w przewodzie słuchowym. Sama możliwość obecności tego typu zmian w obrębie błony bębenkowej jak i łatwość przeoczenia ich przez lekarza obecnego na miejscu ujawnienia zwłok przemawia na korzyść pomiarów temperatury gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu, które mogą stać się metodą z wyboru przy określaniu czasu śmierci.

Porównywalne wartości błędów przy określaniu czasu zgonu otrzymywali także Miścicka-Śliwka i Śliwka na podstawie pomiarów temperatury serca [77,78]. Metoda ta wymagała jednak uwzględnienia obwodu klatki piersiowej, a błąd oceny zwiększał się w zależności od stopnia odziania zwłok.

Dzięki tabelarycznemu przedstawieniu danych odnoszących się do czasu śmierci, na podstawie pomiaru temperatury gałki ocznej lub tkanek miękkich oczodołu, można bardzo precyzyjnie oszacować czas śmierci w pierwszych około 4 h po śmierci (z dokładnością $\pm < 1$ h). Ze względu na podany jeden zakres dokładności (np. $\pm 1,5$ h, $\pm 2,5$ h itp.) dla początkowego okresu czasu jaki upłynął od śmierci, na tak dokładne oszacowanie czasu śmierci w tym

początkowym okresie *post mortem* nie pozwalają inne, opracowane dotąd metody.

Anatomia i fizjologia gałek ocznych świni i człowieka są sobie bliskie. To podobieństwo musi się odnosić także do kinetyki pośmiertnego spadku temperatury. Za wyborem gałek ocznych przemawia brak wpływu na ich ciepłotę elementów odzieży. Ważny jest także wynikający z homogenności budowy i anatomicznego osadzenia praktyczny brak międzyosobniczych różnic pojemności cieplnej gałek. Wpływ temperatury otoczenia jedynie w nieznacznym stopniu zależy od grubości powiek, związanej ze stopniem otyłości. Powinno to zapewniać porównywalność wyników uzyskanych z różnych zwłok. Powyższe rozważanie odnoszę także w dużym stopniu do tkanek miękkich oczodołu.

Również dla mięśni i odbytnic model dwuwykładniczy lepiej opisuje pośmiertny przebieg spadku ich temperatury i stwarza możliwość dokładniejszego odczytu czasu śmierci niż model jednowykładniczy, przy czym zarówno jeden jak i drugi model, ze względu na obecność fazy *plateau* spadku temperatury, nie pozwala na podstawie pomiarów temperatury tych miejsc ciała na ściśle określaniu czasu zgonu w pierwszych około 4 h *post mortem*.

Zakres prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu podczas drugiej serii badań odpowiadał przeciągom o małej sile (siła wiatru około 2° w skali Beauforta). Temperatura odpowiadała przeciętnej temperaturze pokojowej. Miało to na celu symulację warunków występujących w zamkniętych pomieszczeniach będących szczególnie często miejscem kryminalnych zgonów.

Porównanie wyników badań pierwszej i drugiej serii wydaje się wskazywać na to, że niewielki przepływ powietrza w otoczeniu zwłok, przynajmniej w warunkach przeprowadzonego eksperymentu, nie ma istotnego wpływu na proces stygnięcia gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu, a także mięśni i odbytnic. Jest to spowodowane znikomym przepływem powietrza bezpośrednio w okolicy gałek ocznych, tkanek miękkich oczodołu oraz zadu

zwierząt w warunkach przeprowadzonego eksperymentu ($<0,4$ m/s), a także właściwościami izolującymi powiek (w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu) oraz powłok i tkanki podskórnej (mięśnie i odbytnice).

Nie mniej jednak przeprowadzony eksperyment wykazał, że opracowany wzór matematyczny pozwalający na określanie czasu zgonu, mógłby mieć zastosowanie w przypadku ujawnienia zwłok w pomieszczeniu, w którym zainstalowane są urządzenia wentylacyjne powodujące niewielki ruch powietrza (siła wiatru około 2° w skali Beauforta). Przy obecności klimatyzatora lub wiatraka umieszczonego w pewnej odległości i na różnym poziomie niż ułożone są zwłoki okazuje się, że generowany przez te urządzenia przepływ powietrza w bezpośredniej bliskości zwłok jest minimalny, a istotnym czynnikiem jest jedynie temperatura otoczenia. Należy ponadto pamiętać, że lekarz dokonujący oględzin zwłok na miejscu ich ujawnienia określa orientacyjnie prędkość powietrza w otoczeniu, a nie bezpośrednio przy ciele, i to właśnie ta prędkość jest podstawą do dalszego wnioskowania. Tak więc, w opisanej sytuacji doświadczalnej odpowiadałaby ona wartości około 2° w skali Beauforta, nie zaś rzeczywistej, lokalnej, minimalnej prędkości przepływu powietrza w bezpośredniej bliskości ciała, szczególnie w okolicy oczodołów.

Jeżeli powyższe spostrzeżenia uzupełni się o wykazany w niniejszej pracy doktorskiej brak istotnego wpływu masy ciała, szczególnie w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołu, na szacowanie czasu zgonu, to nasuwa się pytanie na ile uzasadnione jest w takich przypadkach posługiwanie się przy określaniu czasu zgonu powszechnie stosowanymi współczynnikami korekcyjnymi, uwzględniającymi te zmienne [60-62].

Propozycja wykorzystywania temperatury gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu w medycynie sądowej jest uzasadniona nieznacznym wpływem, a nawet brakiem wpływu zmiennych międzyosobniczych (wymiary ciała, ubranie itp.) na szybkość stygnięcia. Inwazyjny charakter tego pomiaru może jednak ograniczać jego wykorzystanie w niektórych krajach ze względów prawnych,

choć wkłucie cienkiej, igłowej sondy do wnętrza gałki ocznej nie powoduje widocznego uszkodzenia gałki ocznej. Niestety, wydaje się, że zaistniałej przeszkody nie można obejść stosując nieinwazyjne termometry laserowe wykorzystujące promieniowanie podczerwone. Próba pomiaru temperatury powierzchniowej oka z użyciem takiego termometru wykazała, że ze względu na pomiar jedynie temperatury powierzchniowej, ulegającej znacznym wahaniom związanym najprawdopodobniej ze zmienną wilgotnością powierzchni oka, dla wiarygodnego określenia temperatury gałki ocznej konieczny jest pomiar temperatury jej wnętrza.

Ponadto, niejako przy okazji przeprowadzonych w pracy doktorskiej badań udało się też określić fizjologiczną temperaturę gałki ocznej świni (38 °C) – wartość dotąd nieopisaną w literaturze.

Podsumowując całość przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykazały one szczególną przydatność takich miejsc ciała jak gałki oczne i tkanki miękkie oczodołów jako miejsc pomiaru temperatury we wczesnym okresie po śmierci mogących służyć wiarygodnemu ustaleniu czasu śmierci. Wprowadzenie opracowanej na zwierzętach metody określania czasu zgonu na podstawie pomiaru temperatury gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów do praktyki medyczno-sądowej u ludzi jest uzasadnione, aczkolwiek wymaga przeprowadzenia eksperymentów weryfikujących według opracowanej metodyki na zwłokach ludzkich.

6. STRESZCZENIE

Przeprowadzono dwuetapowe systematyczne badania na świnich w celu zweryfikowania modeli pośmiertnego spadku temperatury ciała aktualnie wykorzystywanych w medycynie sądowej i zaproponowania metody ulepszonej. W pierwszym etapie badań wykonano 24-godzinne automatyczne pomiary temperatury w czterech miejscach ciała tj. gałkach ocznych (ciele szklistym oka), tkankach miękkich oczodołów, mięśniach i odbytnicach. Pomiary wykonano z użyciem sond termicznych począwszy od 1,25 h po zabiciu świń w przemysłowej rzeźni w typowych warunkach otoczenia (19,5-22,5 °C) i rejestrowano przez około 20 h. W drugim etapie eksperymenty na świnich przeprowadzono według tej samej metodyki począwszy od 0,5 h od momentu zabicia świń i w podobnych warunkach otoczenia (19,9-20,7 °C), a pomiary rejestrowano przez około 15 h. Ponadto, w drugim etapie badań w pomieszczeniu utrzymywano kontrolowany, stały przepływ powietrza, generowany klimatyzatorami i wentylatorem, a także dokonywano dodatkowych pomiarów temperatury oka z zastosowaniem termometru laserowego wykorzystującego promieniowanie podczerwone. Za każdym razem zwierzęta do badań były wybierane losowo w ramach rutynowego procesu produkcyjnego.

Na podstawie wyników otrzymanych w pierwszym etapie badań stwierdzono, że przebiegi czasowe spadku temperatury od 75 min po śmierci uzyskane dla gałki ocznej, tkanek miękkich oczodołu, odbytnicy i mięśni najlepiej pasują do jednowykładniczego modelu termodynamicznego po raz pierwszy zaproponowanego przez H. Rainy'ego w 1868 roku. Ze względu na faktyczną zmienność międzyosobniczą, dodanie drugiego wyrazu wykładniczego do modelu okazało się statystycznie niezamienne dla opisu spadku temperatury ciała rejestrowanego po upływie 75 min od zgonu. Błędym okazało się również założenie poprawy precyzji oceny czasu zgonu w

oparciu o rekonstrukcję indywidualnej krzywej na podstawie dwóch pomiarów temperatury zwłok wykonanych w jednogodzinnym odstępie lub wykonywanych w sposób ciągły przez dłuższy czas (około 4 h). Wykazano, iż opisywane w literaturze zwiększenie precyzji oszacowania czasu zgonu w oparciu o model wielowykładniczy, z indywidualnymi wyrazami wykładniczymi uwzględniającymi tempo stygnięcia kilku okolic ciała, jest artefaktem, przynajmniej w odniesieniu do analizowanych w pracy danych temperaturowych.

Wyniki pracy doktorskiej potwierdzają zasadność wykorzystania gałki ocznej jak też tkanek miękkich oczodołu jako miejsc pomiaru temperatury we wcześniejszych fazach po śmierci. Wykazano, iż zastosowanie równania jednowykładniczego do opisu spadku temperatury gałki ocznej w czasie, zapewnia uzyskanie najbardziej precyzyjnego oszacowania czasu zgonu w okresie do 13 h po śmierci. W przypadku tkanek miękkich oczodołu precyzja oszacowania czasu zgonu przewyższa pomiary w mięśniach i odbytnicach do 10,5 h po śmierci. Z kolei, w późniejszym okresie po śmierci lepsze oszacowanie czasu zgonu zapewniają dane z pomiarów temperatury w mięśniach lub odbytnicy.

W drugim etapie badań na świnich poddano weryfikacji dokonane podczas pierwszej serii badań spostrzeżenia odnośnie możliwego braku *plateau* temperatury (fazy opóźnienia spadku) w początkowym okresie pośmiertnego stygnięcia w przypadku gałek ocznych i tkanek miękkich oczodołów. Wyniki potwierdziły brak fazy *plateau* przynajmniej po upływie pierwszych 30 min *post mortem*. W ten sposób wykazano, że pomiary spadku temperatury mierzonej we wnętrzu gałki ocznej i w tkankach miękkich oczodołu mogą stać się metodą z wyboru przy określaniu czasu zgonu w pierwszym stadium schładzania ciała, z nienotowaną dotąd dokładnością.

Korzystając z możliwości technicznej bardzo wczesnego podjęcia rejestracji pomiarów poddano weryfikacji matematyczne modele stygnięcia:

jedno- i dwuwykładniczego. Stwierdzono, że w bardzo wczesnym okresie pośmiertnym kinetykę stygnięcia wszystkich badanych miejsc ciała (gałki oczne, tkanki miękkie oczodołu, mięśnie i odbytnice) wyraźnie lepiej opisuje model dwuwykładniczy niż model jednowykładniczy. Jednak zarówno jeden jak i drugi model w bardzo wczesnym okresie pośmiertnym dawał możliwość szacowania czasu zgonu z nienotowaną dotąd dokładnością w oparciu o pomiar temperatury gałki ocznej i tkanek miękkich oczodołu. Wykazano przy tym, że niewielki przepływ powietrza obecny w pomieszczeniu, w którym przeprowadzono eksperyment (siła wiatru około 2° w skali Beauforta) nie ma praktycznego wpływu na współczynnik stałej szybkości spadku temperatury, a więc także na pośmiertny proces stygnięcia ciała.

Badania temperatury gałek ocznych z użyciem termometru laserowego, wykorzystującego promieniowanie podczerwone, okazały się dla diagnostyki czasu śmierci mało przydatne. Urządzenie to pozwalało wyłącznie na rejestrację temperatury powierzchniowej oka, nie gwarantując przy tym precyzji pomiarów. Tak więc, wykorzystanie takiego termometru do pomiarów temperatury gałki ocznej nie jest możliwe i konieczny jest pomiar temperatury wewnętrznej gałki ocznej za pomocą sondy igłowej.

Przeprowadzone eksperymenty ponadto pozwoliły określić fizjologiczną temperaturę gałki ocznej świni jako 38 °C.

7. SUMMARY OF Ph.D. THESIS

Michał Kaliszan

ESTIMATION OF THE TIME SINCE DEATH BASED ON THE TEMPERATURE MEASUREMENTS IN CHOSEN BODY SITES STUDIES ON THE ANIMAL MODEL

A systematic two staged study was conducted in pigs to verify the models of postmortem body temperature decrease currently employed in forensic medicine and to propose an improved one. During the first stage of investigations 24-hour automatic temperature recordings were performed in four body sites (eyeball, orbit soft tissues, muscles and rectums) starting 1.25 h after pig killing in an industrial slaughterhouse under typical environmental conditions (19.5 °C-22.5 °C) during approximately 20 h. In the second stage of the experiment temperature recordings were performed using the same method starting 0.5 h after pig killing and recorded for approximately 15 h in the similar environmental conditions (19.9 °C-20.7 °C). Additionally during the study in the second stage of investigations, the airflow in the room in which the investigations were being carried out was controlled, stable, generated by air conditioners and a fan. Moreover in the second experiment the eyeball temperature was additionally measured with use of infra-red laser thermometer. In both stages the animals had been randomly selected under a regular manufacturing process.

Results of the first stage experiment showed, that the temperature decrease time-plots drawn starting 75 min after death for the eyeball, the orbit soft tissues, the rectum and muscle tissue fit the single-exponential thermodynamic model originally proposed by H. Rainy in 1868. In view of the actual intersubject variability, the addition of the second exponential term to the

model was demonstrated to be statistically insignificant for describing the temperature decrease starting from 75 min after death. The improvement of the precision of time of death estimation by the reconstruction of an individual curve on the basis of two dead body temperature measurements taken 1 h apart or taken continuously for a longer time (about 4 h), has also been proved incorrect. It was demonstrated that the reported increase of precision of time of death estimation due to a multi-exponential model, with individual exponential terms to account for the cooling rate of the specific body sites separately, is artefactual, at least in case of temperature data, analyzed in the present work.

The results of the study support the use of the eyeball and also the orbit soft tissues as temperature measuring sites at earlier phases after death. A single-exponential model applied to the eyeball cooling in time has been shown to provide a most precise death time estimation up to approximately 13 h after death. In case of the orbit soft tissues the precision of time of death estimation is higher than obtained on the base of muscles and rectum temperature measurements up to 10.5 h *post mortem*. For the period that follows, a better time of death estimation is obtained from temperature data collected for the muscles or the rectum.

In the second stage of the experiment there was also verified a report of a possible lack of temperature *plateau* (phase of delayed temperature decrease) in the initial period of postmortem cooling of the eyeball and the orbit soft tissues. The results of the second experiment have demonstrated a lack of a *plateau* phase starting, at the latest, 30 min *post mortem*. Therefore, they have confirmed that measurements of temperature decrease inside the eyeball and the orbit soft tissues may be a method of choice for time of death estimation in the first phase of the body cooling and give a possibility to estimate the time of death in the initial *post mortem* phase with an accuracy never before reported.

The appearance of the previously unavailable possibility of an exceptionally early registration of measurements allowed to verify the

mathematical models of cooling: mono- and two-exponential. There was found that in the very early post mortem period, the two-exponential model of time of death estimation on the base of temperature measurements of all studied body sites (eyeballs, orbit soft tissues, muscles and rectums) significantly better describes the kinetics of cooling than the monoexponential one. Nevertheless, also monoexponential and two-exponential model in the early *post mortem* period allowed to estimate the time of death basing on the eyeball and orbit soft tissues temperature measurements with unprecedented precision.

The study also showed that the weak airflow (wind of approximately 2° in Beaufort scale) present in the experimental conditions did not practically affect the course of cooling of the investigated body sites.

Eyeball temperature measurements with a infra-red laser thermometer have proved of little use for the investigation of the time of death. The device merely allowed for recording superficial temperature of the eye without guaranteeing measurement precision. Therefore, the measurements of the eyeball temperature with use of infra-red laser thermometer is not possible and to obtain the precise eyeball temperature one needs to measure its internal temperature with use of a pin probe.

Moreover, the experiments allowed to define the physiological temperature of pig eyeball as 38 °C.

8. PIŚMIENNICTWO

1. Saukko P., Knight B. (2004) Knight's Forensic Pathology. 3ed. Arnold, London, str. 52-97.
2. Raszeja S., Nasiłowski W., Markiewicz J. (1993) Medycyna sądowa. Podręcznik dla studentów. PZWL, Warszawa.
3. Chróścielewski E., Raszeja S. (1990) Sekcja zwłok. Technika z uwzględnieniem metodyki sądowo-lekarskiej i wskazówek diagnostycznych. PZWL, Warszawa.
4. DiMaio V.J., DiMaio D. (2003) Ustalanie czasu śmierci, w: Medycyna Sądowa. Urban&Partner, Wrocław, str. 23-41.
5. Knight B., Nokes L. (2002) Temperature-based methods I, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 3-42.
6. Henssge C. (2002) Temperature-based methods II, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 43-102.
7. Madea B., Henssge C. (2002) Eye changes after death, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 103-133.
8. Madea B., Krompecher T., Knight B., Nokes L. (2002) Muscle and tissues changes after death, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 134-208.
9. Nokes L., Madea B., Knight B. (2002) Changes after death, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 209-243.

10. Henssge C., Madea B., Knight B. (2002) Practical casework, w: (Knight B., red.) The Estimation of the Time Since Death in the Early Postmortem Period. Arnold, London, str. 244-264.
11. Śliwka K. (1984) Ocena pośmiertnej pobudliwości elektrycznej mięśnia szkieletowego szczurów i jej znaczenie dla określania czasu śmierci. Rozprawa habilitacyjna, Akademia Medyczna w Gdańsku, Gdańsk.
12. Bardzik S. (1966) The efficiency of methods of estimating the time of death by pharmacological means. *J. Forensic Med.* **13**, 141-143.
13. Bardzik S. (1967) Reakcje suprawitalne wywołane na drodze chemicznej i ich przydatność dla oznaczania czasu śmierci. Rozprawa doktorska, Akademia Medyczna w Gdańsku, Gdańsk.
14. Bardzik S. (1968) Reakcje suprawitalne źrenic wywołane środkami farmakologicznymi o działaniu miotropowym. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **18**, 267-275.
15. Madea B., Henssge C. (1990) Electrical excitability of skeletal muscle postmortem on casework. *Forensic Sci. Int.* **47**, 207-227.
16. Klein A., Klein S. (1978) Die Todeszeitbestimmung am menschlichen Auge. Med. Diss. Med. Akademie Dresden.
17. Balasooriya B.A.W., Hill C.A.S., Williams A.R. (1984) The biochemical changes in pericardial fluid after death. An investigation of the relationship between time since death and the rise or fall in electrolyte and enzyme concentrations and their possible usefulness in determining the time of death. *Forensic Sci. Int.* **26**, 93-102.
18. Balasooriya B.A.W., Hill C.A.S., Williams A.R. (1984) The biochemistry of vitreous humor. A comparative study of the potassium, sodium and urate concentrations in the eyes and identical time intervals after death. *Forensic Sci. Int.* **26**, 85-91.

19. Bendall J.R., Davey C.L. (1957) Ammonia liberation during rigor mortis and its relation to changes in the adenine and inosine nucleotides of rabbit muscle. *Biochim. Biophys. Acta* **26**, 93-103.
20. Jakliński A., Bryc R. (1974) Zachowanie aktywności adenzynotrójfosfatazy i 5-nukleotydu w mięśniach szkieletowych szczurów we wczesnym okresie pośmiertnym. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **24**, 275-278.
21. Gos T. (1989) Zmiany aktywności dehydrogenazy mleczanowej i dehydrogenazy jabłczanowej ludzkiej wątroby po śmierci. Doniesienie wstępne. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **29**, 125-131.
22. Gos T. (1990) Zmiany aktywności dehydrogenazy mleczanowej i dehydrogenazy jabłczanowej ludzkiej wątroby oraz ich znaczenie dla określania czasu zgonu. Rozprawa doktorska, Akademia Medyczna w Gdańsku, Gdańsk.
23. Gos T., Raszeja S. (1993) Postmortem activity of lactate and malate dehydrogenase in human liver in relation to time after death. *Int. J. Legal Med.* **106**, 25-29.
24. Smith K.G.V. (1986) A Manual of Forensic Entomology. Cornell University Press, Ithaca, NY.
25. Campobasso C.P., Linville J.G., Wells J.D., Introna F. (2005) Forensic genetic analysis of insect gut content. *Am. J. Forensic Med. Pathol.* **26**, 161-165.
26. Clark K., Evans L., Wall R. (2006) Growth rates of the blowfly, *Lucilia sericata*, on different body tissues. *Forensic Sci. Int.* **156**, 145-149.
27. Madea B. (2005) Is there recent progress in the estimation of the postmortem interval by means of thanatochemistry? *Forensic Sci. Int.* **151**, 139-149.
28. Di Nunno N.R., Constantinides F., Bernasconi P., Bottin C., Melato M. (1998) Is flow cytometric evaluation of DNA degradation a reliable method

- to investigate the early postmortem period? *Am. J. Forensic Med. Pathol.* **19**, 50-53.
29. Scheurer E., Itch M., Dietrich R., Kreis R., Huesler J., Dirnhofer R., Boesch C. (2003) Statistical evaluation of ¹H-MR spectra of the brain in situ for quantitative determination of postmortem intervals. *Proc. Int. Soc. Magn. Reson. Med.* **11**, 569.
 30. Scheurer E., Itch M., Dietrich R., Kreis R., Huesler J., Dirnhofer R., Boesch C. (2005) Statistical evaluation of time-dependent metabolite concentrations: estimation of postmortem intervals based on in situ ¹H MRS of the brain. *NMR Biomed.* **18**, 163-172.
 31. Madea B., Kaferstein H., Herman N., Sticht G. (1994) Hypoxantine in vitreous humor and cerebrospinal fluid – marker of postmortem interval and prolonged (vital) hypoxia? *Forensic Sci. Int.* **65**, 19-31.
 32. Querido D. (1990) Linearization of the relationship between postmortem plasma chloride concentration and postmortem interval in rats. *Forensic Sci. Int.* **45**, 117-128.
 33. Madea B., Kreuser C., Banaschak C. (2001) Postmortem biochemical examination of synovial fluid - a preliminary study. *Forensic Sci. Int.* **118**, 29-35.
 34. Schorup K. (1950) Determination of the time of death. Dansk Videnskabs, Kobenhavn.
 35. Fraschini F., Muller E., Zanoboni A. (1963) Postmortem increase of potassium in human cerebrospinal fluid. *Nature* **98**, 1208.
 36. Suzuki S. (1987) Experimental studies on the presumption of the time after food intake from stomach contents. *Forensic Sci. Int.* **35**, 83-117.

37. Querido D. (2000) Temperature-correction of abdominal impedance: improved relationship between impedance and postmortem interval. *Forensic Sci. Int.* **109**, 39-50.
38. Querido D., Philips M.R. (2001) Estimation of postmortem interval. Temperature-correction of extracellular abdominal impedance during the first 21 days of death. *Forensic Sci. Int.* **116**, 133-138.
39. Rainy H. (1868) On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death. *Glasg. Med. J.* **1**, 323-330.
40. Berent J. (2005) Ustalenie czasu zgonu na podstawie pomiarów temperatury. Część I. Od pierwszych badań z dziewiętnastego wieku do koncepcji opartej na modelu dwuwykładniczym Marshalla-Hoare. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **50**, 209-214.
41. Taylor A., Wilkes D. (1863) On the cooling of the human body after death. *Guy's Hosp. Rep.* **9**, 180-211.
42. Erb W. (1866) Über die Agoniesteigerung der Koperwärme bei Krankheiten des Centralnervensystems. *Deutsches Archiv für Klinische Medicin* **12**, 175-195.
43. Shapiro H.A. (1965) The postmortem temperature plateau. *J. Forensic Med.* **12**, 137-141.
44. Seydeler R. (1869) Nekrothermometrie. *Vierteljahrschrift für die Praktische Heilkunde* **26**, 137-148.
45. Burman J. (1880) On the rate of cooling of the human body after death. *Edin. Med. J.* **25**, 993-1003.
46. Womack F. (1887) The rate of cooling of the body after death. *St. Bart's Hosp. Rep.* **23**, 193-200.
47. Mueller B. (1937) Mastdarmtemperatur der Liche und Todeszeit. *Dtsch. Z. Ges. Gerichtl. Med.* **28**, 172-177.

48. Mueller B. (1938) Das Verhalten der Mastdarmtemperatur der Liche unter verschiedenen aussren Bedingungen. *Dtsch. Z. Ges. Gerichtl. Med.* **29**, 158-162.
49. Schwarke R. (1939) Die postmortale Rektumtemperatur und ihre gerichtsmedizinische Verwertberkeit zur Todeszeitbestimmung. *Dtsch. Z. Ges. Gerichtl. Med.* **31**, 256-277.
50. Schwarz F., Heidenwolf H. (1953) Le refroidissement post mortem. Sa signification a quanta l'heure du deces. *Revue Int. Police Crim.* **8**, 339-344.
51. De Saram G., Webster G., Kathirgamataby N. (1955) Post-mortem temperature and the time of death. *J. Crim. Law Criminol. Police Sci.* **1**, 562-577.
52. De Saram G. (1957) Estimation of the time of death by medical criteria. *J. Forensic Med.* **4**, 73-82.
53. Lyle H., Cleveland F. (1956) Determination of the time of death since death by heat loss. *J. Forensic Sci.* **1**, 11-24.
54. Fiddes F.S., Patten T.D. (1958) Patent percentage method for representing the fall in body temperature after death. Its use in estimating the time of death. With a statememnt of the theoretical basis of the percentage method. *J. Forensic Med.* **5**, 2-15.
55. James W., Knight B. (1965) Errors in estimating time since death. *Med. Sci. Law* **5**, 111-116.
56. Sellier K. (1958) Determination of the time of death by extrapolation of the temperature decrease curve. *Acta Med. Leg. Soc.* **2**, 279-302.
57. Marshall T., Hoare F. (1962) Estimating the time of death – the rectal cooling after death and its mathematical representation. *J. Forensic Sci.* **7**, 56-81.
58. Marshall T. (1962) Estimating the time of death. *J. Forensic Sci.* **7**, 189-210.

59. Brown A., Marshall T. (1974) Body temperature as a means of estimating the time of death. *Forensic Sci. Int.* **4**, 125-133.
60. Henssge C. (1988) Death time estimation in case work. I. The Rectal temperature time of death nomogram. *Forensic Sci. Int.* **38**, 209-236.
61. Henssge C, Althaus L., Bolt J., Freileederer A., Haffner H.T., Henssge C.-A., Hoppe B., Schneider V. (2000) Experiences with a compound method for estimating the time since death. I. Rectal temperature nomogram for time since death. *Int. J. Legal Med.* **113**, 303-319.
62. Henssge C., Madea B. (2004) Estimation of the time since death in the early post-mortem period. *Forensic Sci. Int.* **144**, 167-175.
63. <http://www.pathguy.com/TimeDead.htm>;
<http://www.home.t-online.de/home/Christoph.Henssge/t-zeit.htm>
64. Henssge C., Brinkmann B., Puschel K. (1984) Todeszeitbestimmung durch Rektaltemperaturmessungen bei Wassersuspension der Leiche. *Z. Rechtsmed.* **92**, 255-276.
65. Unland M. (1991) Modell zur Bestimmung der Todeszeit aus dem Wärmefluss. Med. Diss. Köln.
66. Althaus L., Henssge C. (1999) Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature. *Forensic Sci. Int.* **99**, 171-178.
67. Henssge C., Hahn S., Madea B. (1986) Praktische Erfahrungen mit einem Abkühlungsdummy. *Beitr. Gerichtl. Med.* **44**, 123-126.
68. Hiraiwa K. (1980) Estimation of post-mortem interval from rectal temperature with the use of computer. *Med. Sci. Law* **20**, 115-125.
69. Green M., Wright J. (1985) Post-mortem interval estimation from body temperature data only. *Forensic Sci. Int.* **28**, 35-36.

70. Brinkmann B., Menzel G., Riemann U. (1978). Postmortale Organtemperaturen unter verschiedenen Umweltbedingungen. *Z. Rechtsmed.* **82**, 207-216.
71. Henssge C., Beckmann E.R., Wischhusen F. (1984) Nomographische Bestimmung der Todeszeit durch Messung der Hirntemperatur. *Beitr. Gerichtl. Med.* **42**, 107-111.
72. Henssge C., Beckmann E.R., Wischhusen F., Brinkmann B. (1985) Determination of the time of death by measurement of central brain temperature. *Z. Rechtsmed* **93**, 1-22.
73. Baccino E., De Saint Martin L., Schulier Y., Guillotaeu P., Le Rhun M., Morin J.F., Leglise D., Amice J. (1996) Outer ear temperature and time of death. *Forensic Sci. Int.* **83**, 133-146.
74. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K. (1984) Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. I. Pośmiertny spadek temperatury w mózgu. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **34**, 223-232.
75. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K. (1985) Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. II. Pośmiertny spadek temperatury w odbytnicy. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **35**, 1-7.
76. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K. (1985) Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. III. Pośmiertny spadek temperatury w wątrobie. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **35**, 73-78.
77. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K. (1985) Badania nad ochładzaniem zwłok w aspekcie ustalania czasu śmierci. IV. Pośmiertny spadek temperatury w sercu. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **35**, 79-84.
78. Miścicka-Śliwka D., Śliwka K. (1986) Nomogram do obliczania czasu śmierci na podstawie wartości temperatury mierzonej w sercu i obwodzie klatki piersiowej. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **36**, 15-20.

79. Śliwka K., Miścicka-Śliwka D. (1985) Badania nad przydatnością wybranych punktów pomiarowych temperatury zwłok dla określenia czasu śmierci na podstawie wielopunktowej ciągłej rejestracji temperatury. *Arch. Med. Sąd. i Krym.* **35**, 85-92.
80. Al-Alousi L.M., Anderson R.A., Worster D.M., Land D.V. (2001) Multiple-probe thermography for estimating the post-mortem interval: I. Continuous monitoring and data analysis of brain, liver, rectal and environmental temperatures in 117 forensic cases. *J. Forensic Sci.* **46**, 317-322.
81. Al-Alousi L.M., Anderson R.A., Worster D.M., Land D.V. (2001) Multiple-probe thermography for estimating the post-mortem interval: II. Practical versions of the triple-exponential formulae (TEF) for estimating the time of death in the field. *J. Forensic Sci.* **46**, 323-327.
82. Al-Alousi L.M., Anderson R.A., Worster D.M., Land D.V. (2002) Factors influencing the precision of estimating the post-mortem interval using the triple-exponential formulae (TEF). II. A study of the effect of body temperature at the moment of death on the postmortem brain, liver and rectal cooling in 117 forensic cases. *Forensic Sci. Int.* **125**, 231-236.
83. Mall G., Eckl M., Sinicina I., Peschel O., Hubig M. (2005) Temperature-based death time estimation with only partially known environmental conditions. *Int. J. Leg. Med.* **119**, 185-194.
84. Henssge C., Frekers R., Reinhardt S., Beckmann E.R. (1984) Todeszeitbestimmung auf der Basis simultaner Messungen von Hirn- und Rektaltemperatur. *Z. Rechtsmed.* **93**, 123-133.
85. Henssge C., Madea B., Gallenkemper E. (1985) Todeszeitbestimmung-Integration verschiedener Teilmethoden. *Z. Rechtsmed.* **95**, 185-196.
86. Honjyo K., Yonemitsu K., Tsunenari S. (2005) Estimation of early postmortem intervals by a multiple regression analysis using rectal

- temperature and non-temperature based postmortem changes. *J. Clin. Forens. Med.* **12**, 249-253.
87. Henssge C, Althaus L., Bolt J., Freilederer A., Haffner H.T., Henssge C.-A., Hoppe B., Schneider V. (2000) Experiences with a compound method for estimating the time since death. II. Integration of non-temperature-based methods. *Int. J. Legal Med.* **113**, 320-331.
88. Henssge C., Madea B., Gallenkemper E. (1988) Death time estimation in case work. II. Integration of different methods. *Forensic Sci. Int.* **39**, 77-87.
89. Moritz A. (1954) Pathology of Trauma. 2nd ed., Lea and Febiger, Philadelphia.
90. Haedrich C., Ortman C., Hofmann O.R., Seilwinder J., Klein A. (2005) Influence of electricity on post-mortal body temperature. *Forensic Sci. Int.* DOI:10.1016/j.forsciint.2005.09.009
91. Kaliszan M., Hauser R., Kaliszan R., Wiczling P., Buczyński J., Penkowski M. (2005) Verification of the exponential model of body temperature decrease after death in pigs. *Exp. Physiol.* **90**, 727-738.
92. Prost E. (1985) Higiena mięsa. *PWRiL*, Warszawa.
93. Klont R.E., Lambooy E. (1995) Influence of preslaughter muscle temperature on muscle metabolism and meat quality in anesthetized pigs of different halothane genotypes. *J. Anim. Sci.* **73**, 96-107.
94. Hanneman S.K., Jerusum-Urbaitis J.T., Bickel D.R. (2004) Comparison of methods of temperature measurements in swine. *Laboratory Animals* **38**, 297-306.
95. Charman W.N., Jennings J.A.M. (2000) Does ocular refraction change with ambient temperature? *Ophtal. Physiol. Opt.* **20**, 408-410.

96. Jurowski P., Goś R., Owczarek G. (2004) Eye surface temperature after different techniques of local anesthesia – preliminary report. *Acta Ophthalmica Poloniae* **106**, 557-560.
97. Frisancho A.R. (1979) Human adaptation. The C.V. Mosby Company, St. Louis.
98. Hutchins G. (1985) Body temperature is elevated in the early post-mortem period. *Hum. Pathol.* **16**, 560-561.
99. Petterssen S. (1964) Podstawy meteorologii. WKiŁ, Warszawa.
100. Holmer I., Nilsson H., Havenith G., Parsons K. (1999) Clothing convective heat exchange – proposal for improved prediction in standards and models. *Am. Occup. Hyg.* **43**, 329-337.
101. Prost M. (1990) Fizjologia i funkcja przedocznego filmu łzowego. *Klinika Oczna* **92**, 111-113.