



AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

**PROJEKT STRATEGICZNY
NARODOWEGO CENTRUM BADAŃ I ROZWOJU
„POPRAWA BEZPIECZEŃSTWA PRACY W KOPALNIACH”**

**INFORMACJA Z REALIZACJI ZADANIA
BADAWCZEGO NR 5**

**„Opracowanie zasad zatrudniania pracowników w warunkach zagrożenia
klimatycznego w podziemnych zakładach górniczych”**

w etapach realizowanych przez:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
30-059 Kraków, Al. A. Mickiewicza 30
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii
Katedra Górnictwa Podziemnego

Kierownik części zadania badawczego:
Prof. dr hab. inż. Nikodem Szlązak

W ramach Konsorcjum Naukowo – Przemysłowego Katedra Górnictwa Podziemnego AGH zrealizowała następujące etapy zadania badawczego:

ETAP 9

**Pomiary mikroklimatu i weryfikacja wyników pomiarowych w kopalniach
Jastrzębskiej Spółki Węglowej**

Termin realizacji: 01.11.2011-30.06.2012

Etap nr 26

Bilans cieplny człowieka- obliczenia numeryczne

Termin realizacji: 01.01.2013-30.06.2013

Sprawozdanie z realizacji etapów zadania badawczego

Sprawozdanie poniższe stanowi skrócony wyciąg z opracowań naukowo – badawczych wykonanych w poszczególnych etapach zadania badawczego

ETAP 9

Pomiary mikroklimatu i weryfikacja wyników pomiarowych w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej

Badania przeprowadzono w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej tj. KWK „Borynia-Zofiówka”, KWK „Pniówek”, KWK „Jas-Mos”, KWK „Budryk”, KWK „Krupiński”.

Metodyka pomiarów

Dla oceny warunków klimatycznych opracowano metodykę pomiarową. Metodyka polega na wykonaniu pomiarów parametrów powietrza przepływającego wyrobiskami górnictwami. Wykonano pomiary następujących parametrów: temperatury na termometrze wilgotnym i temperatury na termometrze suchym, prędkości powietrza, intensywności chłodzenia. Wykorzystano standardowe przyrządy pomiarowe będące na wyposażeniu KGP AGH. Metodą psychrometryczną obliczono wilgotność względna i właściwą powietrza.

Pomiary wykonywano w okresie od listopada 2011 roku do marca 2012 roku. Dla zobrazowania wpływu warunków okresu letniego wykorzystano wyniki badań służb kopalnianych w tych samych wyrobiskach (jeżeli istniały) w lipcu 2011 roku.

Do pomiarów wytypowano charakterystyczne miejsca w kopalni związane ze stanowiskami pracy załogi. Pomiary wykonano:

- na podszybiach szybów wdechowych i wydechowych (208 punktów pomiarowych),
- w komorach funkcyjnych (58 komór),
- w rejonach eksploatacyjnych (22 ściany),
- w rejonach robót przygotowawczych (61 chodników).

Wymienione rejonu zostały poddane analizie pod kątem komfortu cieplnego pracowników, który ma znaczący wpływ na bezpieczeństwo i wydajność pracy w kopalni. Zależy on od wielu czynników takich jak: parametry mikroklimatu, rodzaj i intensywność pracy, ubiór i aklimatyzacja pracowników. Możliwa jest bezpieczna praca w warunkach dyskomfortu cieplnego pod warunkiem, że nie zostaną przekroczone dopuszczalne parametry fizjologiczne organizmu. Do określenia mikroklimatu w danym środowisku stosuje się wartości podstawowych parametrów powietrza i otoczenia oraz wskaźniki mikroklimatu, które uwzględniają łączny wpływ kilku podstawowych parametrów powietrza.

Najbardziej znanymi wskaźnikami mikroklimatu są: natężenie chłodzenia powietrza K , temperatura efektywna amerykańska ATE , temperatura zastępcza śląska, temperatura zastępcza francuska TFR , temperatura zastępcza klimatu t_{zk} , wskaźnik $WBGTp$, wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ . Środowiska pracy, w zależności od mikroklimatu, dzielimy na środowiska: gorące, ciepłe, umiarkowane, chłodne, zimne. Poważny problem i zagrożenia dla zdrowia w kopalniach podziemnych stanowi środowisko ciepłe i gorące.

Natężenie chłodzenia powietrza

Do pomiarów natężenia chłodzenia ciała, wywołanego wspólnym działaniem temperatury, wilgotności i prędkości powietrza, używa się przyrządu pomiarowego, zwanego katatermometrem. W celu zmierzenia natężenia chłodzenia wiesz się katatermometr w miejscu, w którym chcemy określić panujące warunki klimatyczne i obserwuje się jego ochładzanie przez pomiar czasu opadania słupa alkoholu pomiędzy podziałkami 38,0 i 35,0°C. Natężenie chłodzenia oznaczane przez K jest odwrotnie proporcjonalne do czasu opadania słupa alkoholu pomiędzy podziałkami 38 a 35,0°C, a wprost proporcjonalne do stałej katatermometru. Wielkość chłodzącego działania atmosfery, czyli natężenie chłodzenia K , wyraża stratę ciepła z 1 cm² powierzchni w ciągu 1 sekundy. Określenie warunków klimatycznych na podstawie pomiarów katatermometrem znalazło szerokie zastosowanie w górnictwie, głównie ze względu na łatwość wykonania obserwacji i prostotę samego przyrządu. Sam pomiar powinno się wykonać pięciokrotnie w jednym miejscu, a jako jego wynik przyjmować wartość średniej arytmetycznej. Jak wspomniano wcześniej, w polskich kopalniach podziemnych intensywność chłodzenia mierzona katatermometrem wilgotnym nie może być mniejsza od 11 katastopni wilgotnych.

Amerykańska temperatura efektywna ATE

Amerykańska temperatura efektywna (ATE) jest to temperatura nieruchomego i nasyczonego wilgocią powietrza, o takiej samej zdolności chłodzącej organizm, jaką ma powietrze o danej temperaturze i o wilgotności, przy jego ruchu z odpowiednią prędkością. Na podstawie licznych, sięgających dziesiątków tysięcy, doświadczeń ustalono dla różnych zestawień temperatury, wilgotności i prędkości powietrza odpowiednie temperatury efektywne. Temperatura efektywna amerykańska wykorzystywana jest do określania norm klimatycznych, między innymi w górnictwie amerykańskim i niemieckim. Według normy amerykańskiej praca w ciągu 8 godzin jest dopuszczalna, gdy efektywna temperatura amerykańska jest mniejsza od 28,0°C. Gdy ATE zawiera się w granicach od 28,0 do 32,0°C, praca powinna być skrócona do 6 godzin oraz zmniejszona intensywność pracy lub norma produkcyjna. Powyżej temperatury efektywnej 32,0°C praca jest zabroniona. W górnictwie niemieckim obowiązuje norma, według której, z wyjątkiem kopalń soli, wielkość temperatury efektywnej amerykańskiej 30,0°C (w wyjątkowych wypadkach 32,0°C) stanowi granicę dopuszczalnej pracy górników. Normalna praca powinna odbywać się do 28,0°C temperatury powietrza mierzonego termometrem suchym t_s lub $ATE < 25,0^\circ\text{C}$. W przedziale temperatur $t_s > 28,0^\circ\text{C}$ lub $ATE > 25,0^\circ\text{C}$ oraz $ATE < 30,0^\circ\text{C}$ obowiązują skrócone czasy pracy.

W kopalniach soli, gdy temperatura t_s powietrza jest niższa od 28,0°C, można pracować osiem godzin. Gdy temperatura termometru suchego t_s zawiera się w przedziale od 28,0 do 52,0°C występują skrócone czasy pracy. Powyżej temperatury termometru suchego $t_s > 52,0^\circ\text{C}$ oraz temperatury termometru wilgotnego $t_w > 27,0^\circ\text{C}$ praca jest zabroniona.

Temperatura zastępcza śląska

Temperaturę zastępczą śląską oblicza się wg wzoru:

$$t_s = 0,7 t_w + 0,3 t_s - (1,7 - \phi) \phi w \quad (1)$$

gdzie:

t_w – temperatura termometru wilgotnego, °C;

t_s – temperatura termometru suchego, °C;

ϕ – wilgotność względna powietrza;

w – prędkość przepływu powietrza, m/s.

Temperaturę śląską posiada charakterystykę przebiegu w układzie współrzędnych (t_s , t_w) zbliżoną do charakterystyki efektywnej temperatury amerykańskiej. Może być łatwo obliczana, według powyższego wzoru, na podstawie danych z rutynowo prowadzonych w kopalniach pomiarów parametrów klimatu i przepływu powietrza. Powyższe wskaźniki, czyli dyskomfortu cieplnego i temperatury zastępczej śląskiej, można stosować dla każdego środowiska klimatycznego, w którym przebywają i pracują ludzie.

Belgijska temperatura efektywna BTE

R. Bidlot i P. Ledent, analizując nomogram amerykańskiej temperatury efektywnej, doszli do wniosku, że dla ATE około 36,0°C wpływ na nią mają wyłącznie temperatura i wilgotność powietrza. Uznali więc, że udział temperatury wilgotnej powietrza w określaniu odpowiedniej wartości ATE dla ludzi pozostających w spoczynku można określić na 0,8 wartości ATE. Zaproponowali, aby zależność tę zapisać następująco:

$$BTE = 0,8 t_w + 0,2 t_s \leq 36^\circ\text{C} \quad (2)$$

Wzór ten wyraża graniczną wielkość BTE w funkcji t_w i t_s , i jest słuszny tylko dla określenia tej granicznej wartości BTE. Przy mniejszych BTE udział t_w będzie mniejszy, a prędkość przepływu powietrza nabierze znów większego znaczenia. Niemniej spostrzeżenie to skłoniło autorów belgijskich do przeprowadzenia badań nad ustaleniem nowego sposobu określania warunków klimatycznych, ale już przeprowadzanych na osobach wykonujących określone czynności. Ostatecznie Bidlot zaproponował określenie granicznych warunków klimatycznych na podstawie następującego wzoru:

$$BTE = 0,9 t_w + 0,1 t_s \leq 34^\circ\text{C} \quad (3)$$

W latach 40. ubiegłego stulecia w Belgii przyjęto jako obowiązującą dla górnictwa formułę zaproponowaną przez Bidlota z tą jednak różnicą, że zastosowano pewien margines bezpieczeństwa,

określając temperaturę graniczną na 31,0°C. Zatem, obowiązująca przez znaczny czas norma klimatyczna w kopalniach belgijskich określana była następującym wzorem:

$$BTE = 0,9tw + 0,1ts \leq 31,0^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

a wartości temperatur przeliczanych tym wzorem nazywano belgijską temperaturą efektywną *BTE*.

Wzór ten jednak nie uwzględnia prędkości przepływu powietrza, która ma wciąż znaczenie w kształtowaniu warunków komfortu pracy. Zaproponowana przez Bidlota i Ledenta metoda określania warunków klimatycznych została jednak szeroko rozpowszechniona w Afryce Południowej, Belgii i Holandii.

Francuska temperatura zastępcza *TFR*

We Francji obowiązywała następująca norma, określająca warunki klimatyczne:

$$TFR = 0,7tw + 0,3ts - v, ^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

przy założeniu, że normalne warunki pracy występują przy $TFR \leq 28^{\circ}\text{C}$. Praca w warunkach, gdy *TFR* zawiera się w przedziale od 28,0 do 34,0°C, jest uznawana za szkodliwą dla zdrowia, a przekroczenie przez *TFR* wartości 34,0°C za wręcz niebezpieczne.

Temperatura zastępcza klimatu *tzk*

Pod koniec lat 80. ubiegłego wieku na podstawie przeprowadzonych badań w kopalniach miedzi zaproponowano w zakładzie Badawczo-Projektowym Miedzi „Cuprum” we Wrocławiu wskaźnik mikroklimatu, zwany temperaturą zastępczą klimatu *tzk*. Temperatura zastępcza klimatu jest modyfikacją francuskiej temperatury zastępczej *TFR*, a została określona wzorem:

$$tzk = 0,6tw + 0,4ts - v, ^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

W projekcie oceny warunków klimatycznych przy zastosowaniu temperatury zastępczej klimatu *tzk* przyjmuje się graniczne wartości tej temperatury w zależności od wydatku energetycznego, czyli od stopnia uciążliwości pracy.

Dopuszczalne graniczne wartości temperatury zastępczej klimatu wynoszą:

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| dla pracy lekkiej | - $tzk < 30,0^{\circ}\text{C}$, |
| dla pracy umiarkowanej | - $tzk < 28,0^{\circ}\text{C}$, |
| dla pracy ciężkiej | - $tzk < 26,0^{\circ}\text{C}$, |
| dla pracy bardzo ciężkiej | - $tzk < 25,0^{\circ}\text{C}$. |

Projekt powyższy zakłada, że czas pracy powinien być skrócony, jeżeli temperatura *tzk* jest większa od wartości granicznych oraz praca powinna być zabroniona, gdy $tzk \geq 32,0^{\circ}\text{C}$, z wyjątkiem akcji ratowniczych.

Temperatura zastępcza klimatu została uwzględniona w najnowszych przepisach górniczych i jest stosowana w kopalniach miedzi tam, gdzie używane są maszyny samojezdne.

Wskaźnik *WBGT*

Mikroklimat w pomieszczeniach z wentylacją naturalną, a więc wewnątrz lub na zewnątrz budynków, określa wskaźnik *WBGT*. Wskaźnik ten wyznacza się na podstawie Międzynarodowej Normy ISO 7243-1982, która od 1985 r. obowiązuje również w Polsce pod nazwą PN-85/N-08011: „Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku *WBGT* oraz od 2005 roku jako PN-EN 27243:2005.

Wskaźnik *WBGT* wiąże dwa parametry - temperaturę wilgotną naturalną *tm* i temperaturę poczernionej kuli (temperaturę globalną) *tg*. W pewnych warunkach środowiska, gdy występuje nasłonecznienie, wskaźnik *WBGT* uwzględnia również temperaturę powietrza mierzoną termometrem suchym *ts*.

Relacja między powyższymi parametrami przedstawia się następująco:

- wewnątrz i na zewnątrz budynków bez nasłonecznienia:

$$WBGT = 0,6tnw + 0,3tg, ^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

- na zewnątrz budynków z nasłonecznieniem:

$$WBGT = 0,7tnw + 0,2tg + 0,1ts, ^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

gdzie:

tnw - temperatura wilgotna naturalna, mierzona termometrem wilgotnym stacjonarnym, °C,

t_g - temperatura poczerwionej kuli (temperatura globalna), mierzona termometrem umieszczonym w kuli o średnicy 15 cm o czarnych ściankach (termometr Vernona), °C.

Istnieje również odmiana wskaźnika *WBGT* opracowana w GIG-u, według której przybliżony wskaźnik (określony za pomocą pomiarów psychroaspiratorem) wynosi:

$$WBGT_p = 0,67t_w + 0,33t_s, ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Wskaźnik *WBGT* zależny jest od takich parametrów otoczenia, jak temperatura powietrza, wilgotność, średnia temperatura promieniowania ścian. Nie wchodzi w skład wskaźnika *WBGT* prędkość powietrza, chociaż może mieć wpływ na wskazania termometrów wilgotnego i kulistego. Wartości odniesienia wskaźnika *WBGT* ustalone zostały doświadczalnie przez przyjęcie maksymalnej dopuszczalnej temperatury wewnętrznej człowieka 38,0°C mierzonej u osób narażonych na działanie gorąca. Przekroczenie temperatury rektalnej 38,0°C jest dla organizmu szkodliwe i praca w takich warunkach powinna być przerwana.

Wartości te zamieszczono w normach PN-85/N-08011 oraz PN-EN 27243:2005 i reprezentują one średni wpływ gorąca na człowieka podczas pracy.

Powyższe normy zalecają normowanie czasu pracy i odpoczynku w ciągu godziny w zależności od wielkości przekroczenia wartości odniesienia wskaźnika *WBGT*, gdy wartość *WBGT* w miejscu wypoczynku jest równa lub bardzo bliska wartości *WBGT* na stanowisku pracy.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego

Dyskomfort cieplny w przeciwieństwie do komfortu cieplnego jest to stan niezadowolenia człowieka z warunków cieplnych otoczenia. Rozróżniamy dyskomfort panujący zarówno w środowiskach ciepłych, jak i chłodnych. Ze względu na występujące w kopalniach zagrożenie klimatyczne z powodu wysokich temperatur przez pojęcie dyskomfortu cieplnego należy rozumieć dyskomfort środowisk ciepłych. Komfort oraz dyskomfort cieplny określić można przez parametry fizyczne powietrza i otoczenia oraz wydatek energetyczny pracownika. Jeżeli parametry środowiska nie odpowiadają punktom leżącym na krzywych komfortu cieplnego Fanger'a, to w środowisku tym panują warunki dyskomfortowe.

Dyskomfort cieplny dzieli się na bezpieczny i niebezpieczny dla zdrowia i życia człowieka. Dyskomfort bezpieczny to taki dyskomfort, w którym wskaźniki mikroklimatu *WBGT* i *ATE* nie osiągają wartości odniesienia ustalonych na podstawie oceny wskaźników fizjologicznych organizmu ludzkiego. Warunki klimatyczne, dla których wskaźniki *WBGT* lub *ATE* mikroklimatu przewyższają wartości odniesienia, są już niebezpieczne dla zdrowia, czyli występuje dyskomfort niebezpieczny.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego zależy od parametrów fizycznych mikroklimatu, od wydatku energetycznego pracownika, czyli rodzaju i intensywności pracy, od sposobu ubrania oraz stopnia aklimatyzacji. Określa on liczbowo lub procentowo, jak bardzo warunki klimatyczne panujące w danym środowisku pracy różnią się od warunków klimatycznych komfortu cieplnego oraz od warunków klimatycznych granicznych pod względem bezpieczeństwa cieplnego.

Na podstawie wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego można nie tylko oceniać klimatyczne warunki pracy, lecz również przeprowadzać analizę wpływu poszczególnych parametrów klimatu, ubioru oraz wydatku energetycznego człowieka na poprawę lub pogorszenie się warunków klimatycznych w środowiskach pracy. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracowników jest bardzo dobrym parametrem oceny bezpieczeństwa termicznego człowieka podczas pracy. Jeżeli wskaźnik δ będzie równy lub większy od jedności, praca w danym środowisku powinna być zabroniona ze względu na niebezpieczeństwo stresu lub udaru cieplnego pracownika.

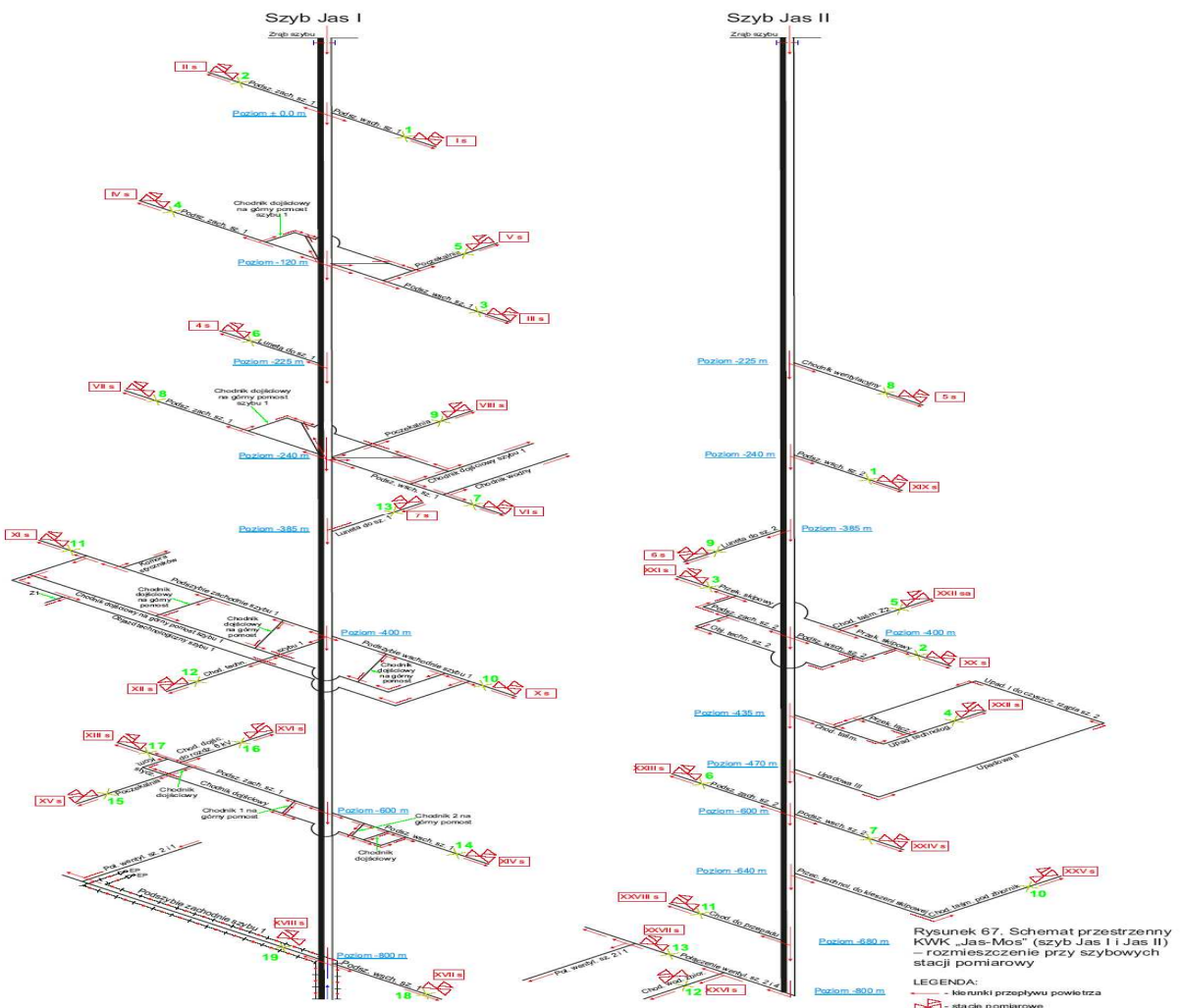
Wyniki pomiarów i ich opracowanie

Pomiary wykonywano na stacjach pomiarowych w wyrobiskach podziemnych. Przykładowe lokalizacje stacji pomiarowych przedstawiają rysunki 1, 2 i 3. Wyniki pomiarów zestawiano w tabelach. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe zestawienie wyników pomiarów wykonanych w rejonie szybu, w tabeli 2 w przykładowym rejonie robót eksploatacyjnych. ***Pełna dokumentacja z wykonanych pomiarów znajduje się w AGH KGP (siedzibie wykonawcy – konsorcjanta).***

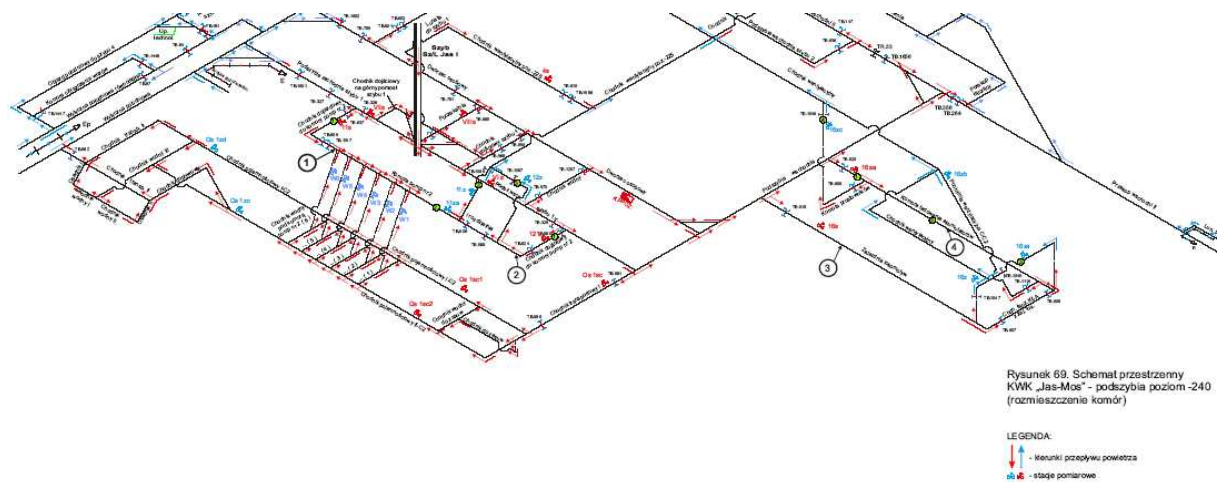
Tabela 1. Przykładowe wyniki pomiarów z przyszybowych stacji pomiarowych

• Szyb Jas I

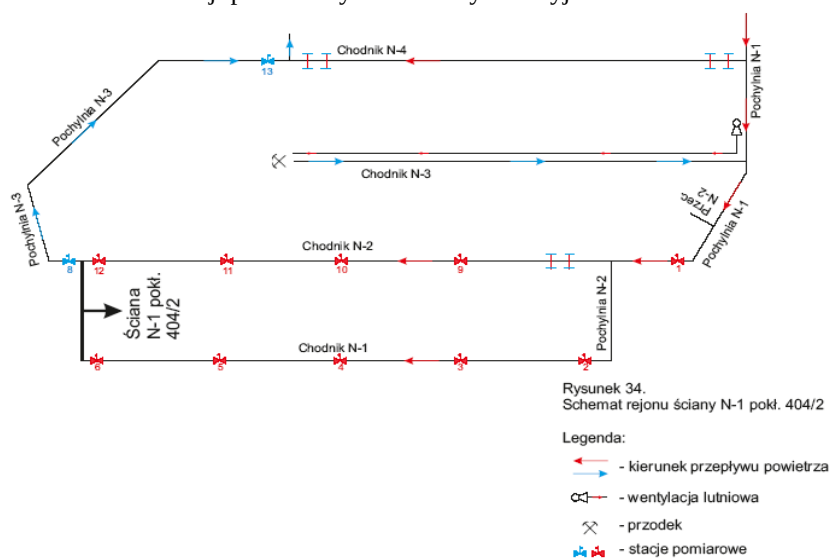
L.P.	Stacja pomiarowa	Strumień objętościowy powietrza	Temperatura powietrza na stacji		Wilgotność względna powietrza	Przekrój poprzeczny wyrobiska	Prędkość powietrza	Strumień objętościowy powietrza	Intensywność chłodzenia	Temperatura pierwotna górotworu	Poziom, głębokość	Liczba pracowników przy obsłudze szybu w chwili pomiaru
		Q	t_a	t_w	φ	F	v	Q	K_w	t_g	H	n
		m ³ /min	°C		%	m ²	m/s	m ³ /s		°C	m	
1	Is	80	13,4	11	75	10,3	0,13	1,33	19,9	-	0	0
2	IIs	770	13,2	10,8	75	10,0	1,28	12,83	33,2	-	0	0
3	IIIs	100	15,4	12	67	12,8	0,13	1,67	19,1	21	-120	0
4	IVs	770	14,6	11,4	68	13,9	0,92	12,83	29,5	21	-120	0
5	Vs	180	14,8	11,8	70	7,0	0,43	3,00	24,5	21	-120	0
6	4s	120	15,6	13	74	7,1	0,28	2,00	21,3	21	-220	0
7	VIIs	1410	14,8	12	72	14,0	1,68	23,50	34,5	21	-240	1
8	VIIIs	780	15,4	12	67	14,0	0,93	13,00	28,9	21	-240	1
9	VIIIIs	730	15,6	12	65	10,0	1,22	12,17	31,2	21	-240	0
10	Xs	860	16,2	12	60	11,9	1,2	14,33	31,1	30,5	-400	1
11	XIs	1070	16,6	13,2	68	13,0	1,37	17,83	30,8	30,5	-400	1
12	XIIIs	1340	16,6	13,4	69	9,0	2,48	22,33	36,7	30,5	-400	1
13	7s	120	16,6	12,4	61	4,0	0,5	2,00	24,7	30,5	-385	0
14	XIVs	1880	17	14	71	14,1	2,23	31,33	34,6	35	-600	1
15	XVs	1610	17,6	14,4	70	13,0	2,07	26,83	33,2	35	-600	1
16	XVIs	700	17,2	13,8	68	10,0	1,17	11,67	28,6	35	-600	1
17	XIIIIs	1030	17,4	14,2	70	16,0	1,07	17,17	27,3	35	-600	1
18	XVIIIs	1080	21	17,6	71	14,1	1,28	18,00	24,4	43	-800	0
19	XVIIIIs	460	20,8	16,8	66	16,0	0,48	7,67	20,0	43	-800	0



Rys. 1. Szyby – przykład lokalizacji stacji pomiarowych



Rys. 2. Przykład rozmieszczenia stacji pomiarowych - komory funkcyjne



Rys. 3. Przykładowy schemat rejonu eksploatacyjnego ze stacjami pomiarowymi

Tabela 2. Przykładowe wyniki pomiarów w rejonach eksploatacyjnych

• Rejon ściany N-1 pokł. 404/2

L.P.	Stacja pomiarowa	Lokalizacja stacji	Temperatura powietrza na stacji		Wilgotność względna powietrza	Przekrój poprzeczny wyrobiska	Prędkość powietrza	Strumień objętościowy powietrza	Intensywność chłodzenia	Temperatura pierwotna górotworu	Poziom, głębokość	Liczba pracowników w chwili pomiaru (na ścianie oraz w pracach pomocniczych)
			t_a	t_w	φ	F	v	Q	K_w	t_g	H	n
			°C		%	m ²	m/s	m ³ /min		°C	m	
1	1	Wlot do rejonu	21,2	20,3	92	6	5,8	2220	33,6	37,2	830	1
2	2	W rejonie + chłodnica powietrza	21,8	19,6	81	10	2,2	1320	25,8			4
3	3	W rejonie	21,3	18,9	79	11	2	1320	26,1			1
4	4	W rejonie + chłodnica powietrza	21	18,2	76	10	2,1	1320	27,6			1
5	5	W rejonie + chłodnica powietrza	20,2	16,2	65	10	2,3	1320	31,5			1
6	6	Wlot 1 do ściany	18,2	14,2	63	9	2,4	1320	35,0			5
7	9	W rejonie (napęd)	23,6	19,8	70	13	1,2	900	21,2			1
8	10	W rejonie + chłodnica powietrza	25,2	23,2	84	10	1,5	900	18,1			1
9	11	W rejonie + chłodnica powietrza	24,2	23	90	12	1,3	900	17,5			1
10	12	Wlot 2 do ściany	26,2	22,3	71	11	1,4	900	18,9			5
11	7	W ścianie	22,6	18,4	66	10	2,2	1320	27,7			16
12	8	Wylot ze ściany	25,2	21,2	69	10	2,3	1320	23,7			4
13	-	Nadścianowy	-	-	-	-	-	-	-			-
14	13	Wylot z rejonu	27,6	24	74	14	2,6	2220	20,1			-

Analiza wyników pomiarów klimatycznych w rejonach szybów i w komorach

Przeprowadzone obliczenia wskaźników mikroklimatu zestawiono w formie tabelarycznej i na wykresach.

Temperatura powietrza

Wartości temperatur mierzone termometrem suchym i wilgotnym w rejonie szybów wdechowych zależała głównie od pory roku (zmiany temperatury na powierzchni ziemi). Natomiast wartości temperatur mierzone termometrem suchym i wilgotnym w rejonie szybów wydechowych zależały od wielu czynników, takich jak:

- wielkość strumienia objętości powietrza,
- wielkość wydobywania,
- porę roku,
- ilość i rodzaj zainstalowanych maszyn i urządzeń w rejonie,
- inne.

Temperatura mierzona na termometrze suchym wahała się od 9,8 do 30,6°C (średnia z wszystkich wyników wynosiła 19,5°C), zaś mierzona na termometrze wilgotnym od 7,0 do 26,8°C (średnio wynosiła 15,6°C). W trzech przypadkach temperatura 28,0°C została przekroczona.

Temperatura w komorach mierzona na termometrze suchym wahała się od 15,2 do 27,8°C (średnio wynosiła 21,6°C), zaś mierzona na termometrze wilgotnym od 9,2 do 22,8°C (średnio wynosiła 16,4°C).

Wilgotność względna powietrza

Wilgotność względna powietrza w badanych wyrobiskach przy szybie była w większości przypadków wysoka. Jej wartości zmieniały się w zakresie od 44,0 do 98,0% (średnio wynosiła 71,3%). Natomiast wartość wilgotności względnej powietrza zmieniała się w zakresie od 44,5 do 87% (średnio wynosiła 65,7%).

Analiza wskaźników mikroklimatu

Wykonane pomiary pozwoliły na obliczenie wskaźników mikroklimatu dla stacji pomiarowych w rejonie szybów i w komorach funkcyjnych. W niniejszym raporcie wyniki obliczeń zmian wskaźników w funkcji temperatury powietrza przedstawiono na rysunkach od 4 do 7. Z obliczonych wskaźników mikroklimatu dla stacji pomiarowych w rejonie szybów wynika, że:

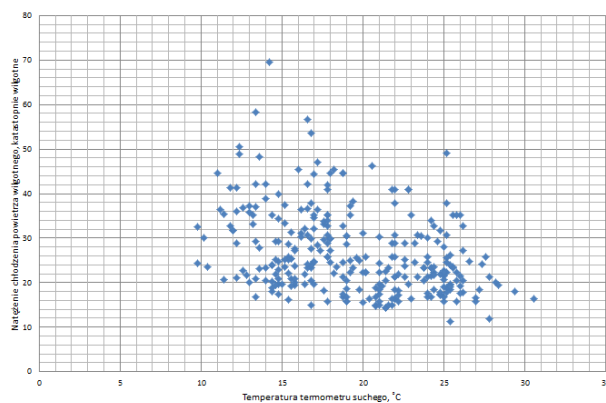
- natężenie chłodzenia powietrza wilgotnego wahało się od 11,2 do 69,6 katastopni wilgotnych (średnio wynosiło 26,5 katastopni wilgotnych),

- temperatura zastępcza francuska zmieniała się w zakresie od $-4,3$ do $25,1^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $14,5^{\circ}\text{C}$),
- temperatura zastępcza klimatu przyjmowała wartości od $-4,2$ do $25,4^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $14,7^{\circ}\text{C}$),
- wskaźnik *WGBTp* osiągał wartości od $8,1$ do $29,3^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosił $17,2^{\circ}\text{C}$),
- temperatura zastępcza śląska zmieniała się w zakresie od $0,7$ do $25,3^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $14,9^{\circ}\text{C}$).

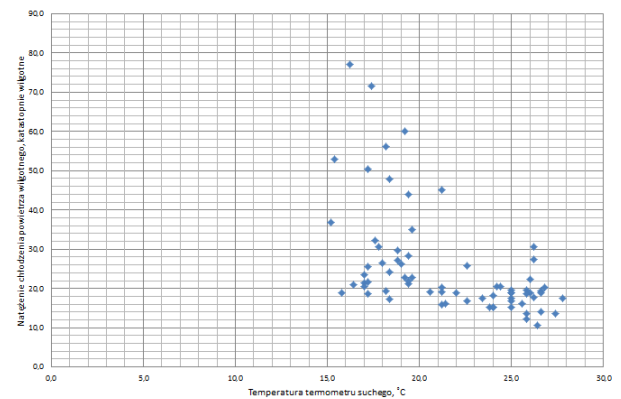
Z obliczonych wskaźników mikroklimatu dla stacji pomiarowych w komorach funkcyjnych wynika, że:

- natężenie chłodzenia powietrza wilgotnego wahało się od $10,6$ do $77,2$ katastopni wilgotnych (średnio wynosiło $25,2$ katastopni wilgotnych),
- temperatura zastępcza francuska zmieniała się w zakresie od -7 do $25,4^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $15,7^{\circ}\text{C}$),
- temperatura zastępcza klimatu przyjmowała wartości od $-6,6$ do $24,8^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $16,1^{\circ}\text{C}$),
- wskaźnik *WGBTp* osiągał wartości od $-6,9$ do $25,2^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosił $15,8^{\circ}\text{C}$),
- temperatura zastępcza śląska zmieniała się w zakresie od $-0,8$ do $25,6^{\circ}\text{C}$ (średnio wynosiła $16,5^{\circ}\text{C}$).

a)

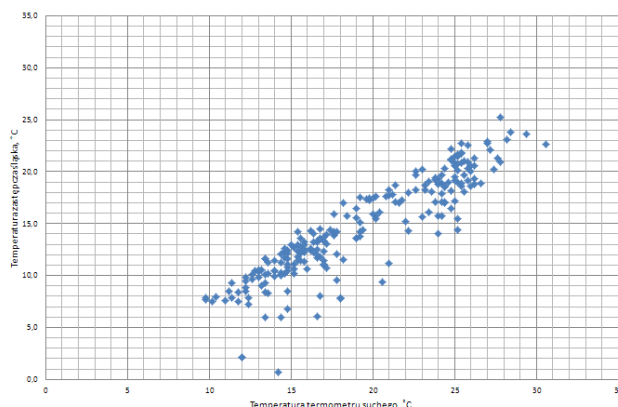


b)

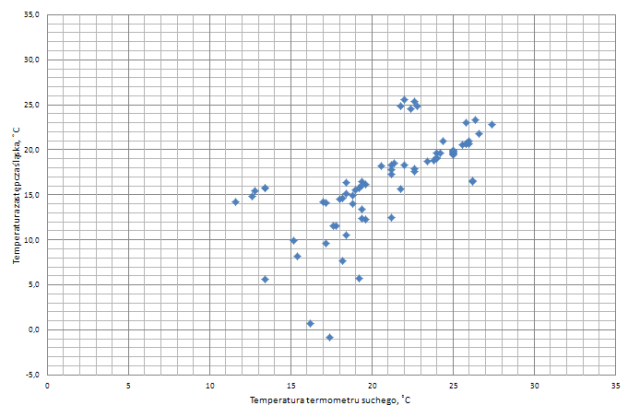


Rys. 4. Zmiany natężenia chłodzenia powietrza wilgotnego w funkcji temperatury powietrza: a) w rejonie szybów, b) na wylocie z komór

a)



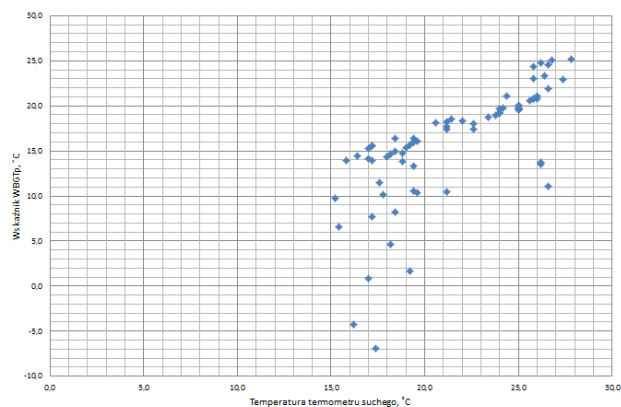
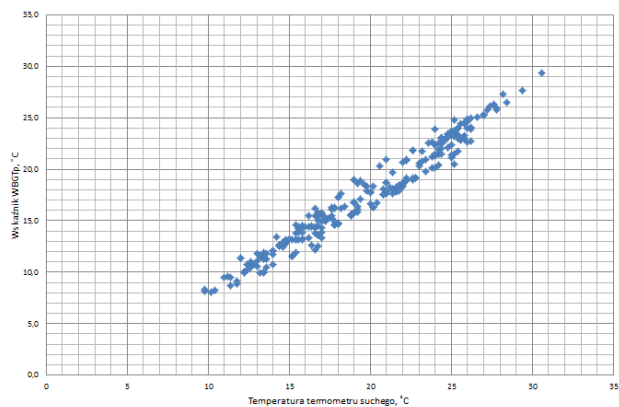
b)



Rys. 5. Zmiany temperatury zastępczej śląskiej w funkcji temperatury powietrza: a) w rejonie szybów, b) na wylocie z komór

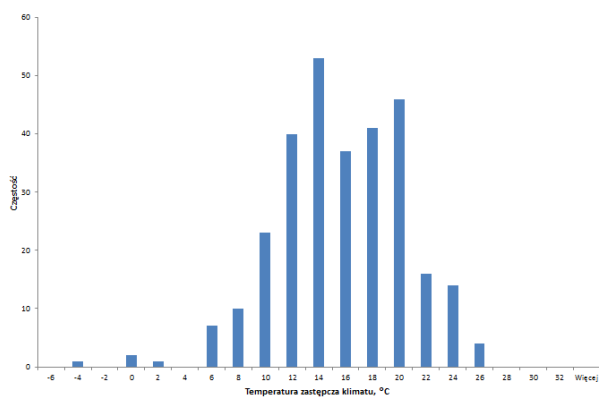
a)

b)

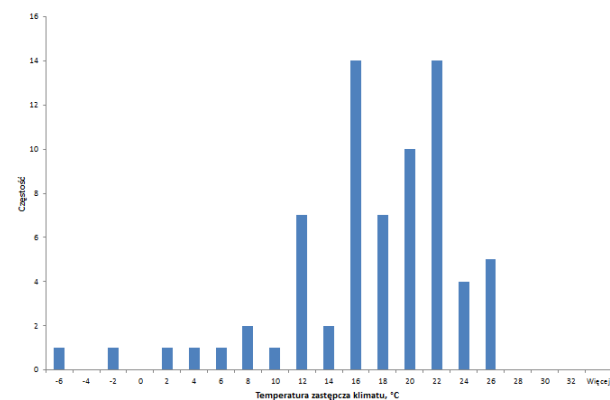


Rys. 6. Zmiany wskaźnika WBGTp w funkcji temperatury powietrza: a) w rejonie szybów, b) na wylocie z komór

a)



b)



Rys. 7. Histogram rozkładu temperatury zastępczej klimatu: a) w rejonie szybów, b) na wylocie z komór

Analiza pomiarów klimatycznych w rejonach eksploatacyjnych na wlocie i wylocie ze ściany

Temperatura powietrza

Wartości temperatur mierzone termometrem suchym i wilgotnym na wlocie do wyrobiska ścianowego i wylocie zależały od wielu czynników, takich jak:

- schładzanie mieszaniny gazów w wyrobiskach, w których płynie do ściany powietrze doprowadzane,
- wielkość strumienia objętości powietrza,
- ilość transportowanego urobku,
- porę roku (temperatura powietrza w szybie i na podszymbiu jest uzależniona od zmian temperatury na powierzchni ziemi),
- ilość i rodzaj zainstalowanych maszyn i urządzeń w rejonie i inne.

Temperatura mierzona na termometrze suchym, na wlocie do ściany, wahała się od 17,4 do 27,8°C, zaś mierzona na termometrze wilgotnym od 14,0 do 26,0°C. Natomiast temperatura mierzona termometrze suchym, na wylocie ze ściany, wahała się od 20,4 do 31,8°C, zaś mierzona na termometrze wilgotnym od 19,0 do 30,6°C. Istotniejsze znaczenie mają natomiast zmiany tych parametrów między wlotem a wylotem ze ściany. Większym zmianom ulegała temperatura mierzona termometrem wilgotnym (głównie ze względu na wzrost wilgotności właściwej). Średnie zmiany temperatury mierzonej termometrem suchym wynosiły 5,2°C, termometrem wilgotnym 4,3°C. W wielu przypadkach, pomimo doprowadzania lutniociągami schłodzonego powietrza oraz stosowania ścianowych chłodziń powietrza, temperatura 28°C została przekroczona. Przekroczenia zostały oznaczone czerwonym kolorem. Na podstawie danych pomiarowych wyznaczono wskaźniki mikroklimatu.

Wilgotność względna powietrza

Wilgotność względna powietrza w badanych wyrobiskach była w większości przypadków wysoka. Jej wartości zmieniały się w zakresie od 52,4 do 86,5% na wlocie do ściany i od 66,2 do 95% na wylocie ze ściany. Najczęściej obserwowano wzrost wilgotności względnej powietrza na wylocie ze ściany (największy zanotowany wzrost wynosił 29,0%). Wysoka wartość tego parametru powietrza może mieć negatywny wpływ głównie na ludzi pracujących w wyrobiskach ścianowych.

Analiza wskaźników mikroklimatu

Wykonane pomiary pozwoliły na wyznaczenie wskaźników mikroklimatu, które przedstawiono na rysunkach od 8 do 14.

Z analizy wskaźników mikroklimatu na wlocie do wyrobisk ścianowych wynika, że:

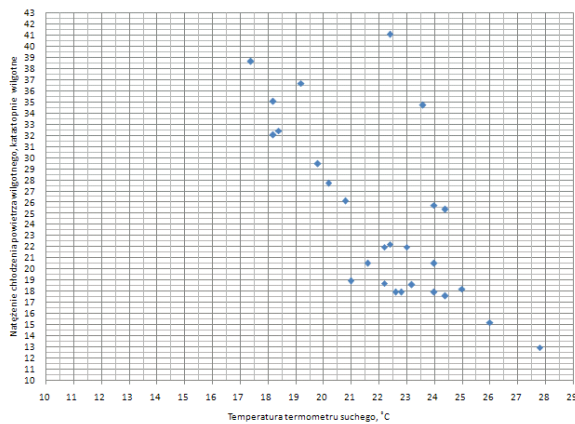
- natężenie chłodzenia powietrza wilgotnego wahało się od 12,9 do 41,1 katastopni wilgotnych,
- temperatura zastępcza francuska zmieniała się w zakresie od 11,8 do 25,5°C,
- temperatura zastępcza klimatu przyjmowała wartości od 12,2 do 26,6°C,
- temperatura zastępcza ślaska zmieniała się w zakresie od 12,8 do 25,8°C,
- amerykańska temperatura efektywna $ATE_{(1\text{ clo})}$ wynosiła od 7,8 do 24,8°C, a $ATE_{(1\text{ clo})}$ – od 4,1 do 23,3°C,
- wskaźnik $WBGT_p$ osiągał wartości od 15,1 do 26,6°C,
- dla ludzi niezaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ wystąpiły w jednym przypadku dla pracy umiarkowanej oraz w 4 przypadkach dla pracy ciężkiej,
- dla ludzi zaaklimatyzowanych o oporze cieplnym odzieży 1 clo niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ nie wystąpiły dla pracy umiarkowanej oraz w jednym przypadku wystąpiły dla pracy ciężkiej.

Z obliczonych wskaźników mikroklimatu dotyczących wylotu ze ściany wynika, że na wylocie z wyrobisk ścianowych:

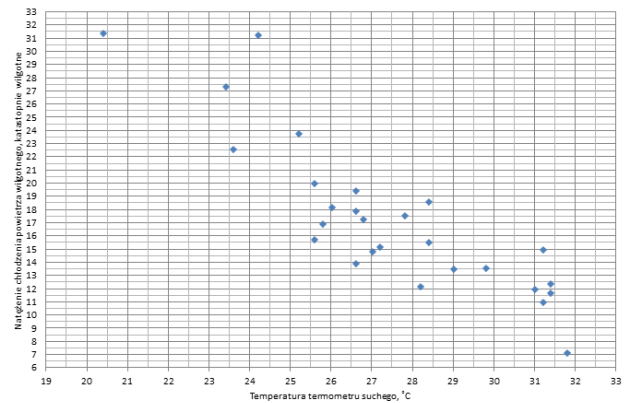
- natężenie chłodzenia powietrza wilgotnego wahało się od 7,1 do 31,4 katastopni wilgotnych,
- temperatura zastępcza francuska zmieniała się w zakresie od 15,8 do 29,9°C,
- temperatura zastępcza klimatu przyjmowała wartości od 15,9 do 30,1°C,

- amerykańska temperatura efektywna $ATE_{(1\text{ clo})}$ wynosiła od 13,2 do 29,2°C, a $ATE_{(0,5\text{ clo})}$ – od 6,6 do 29,0°C,
- temperatura zastępcza ślaska zmieniała się w zakresie od 16,8 do 30,2°C
- wskaźnik $WBGTp$ osiągał wartości od 19,5 do 31,0°C,
- dla ludzi niezaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ wystąpiły w 10 przypadkach dla pracy umiarkowanej oraz w 21 przypadkach wystąpiły dla pracy ciężkiej,
- dla ludzi zaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ wystąpiły w 7 przypadkach dla pracy umiarkowanej oraz w 11 przypadkach wystąpiły dla pracy ciężkiej.

a)

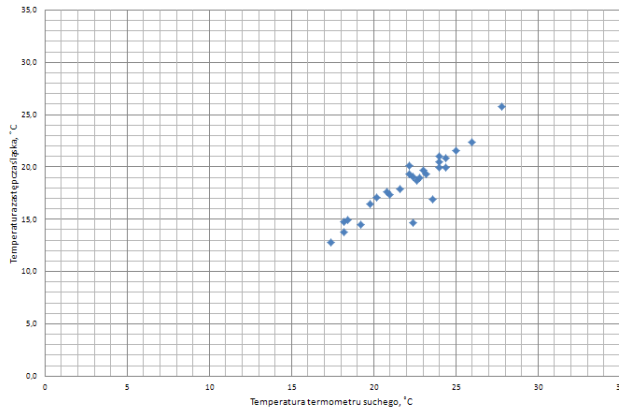


b)

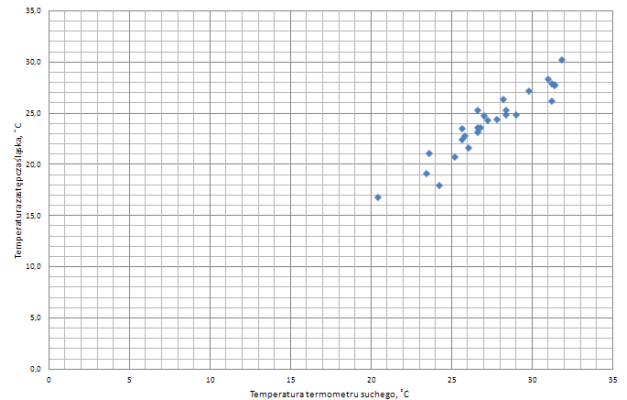


Rys. 8. Zmiany napięcia chłodzenia powietrza wilgotnego w funkcji temperatury powietrza: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych

a)

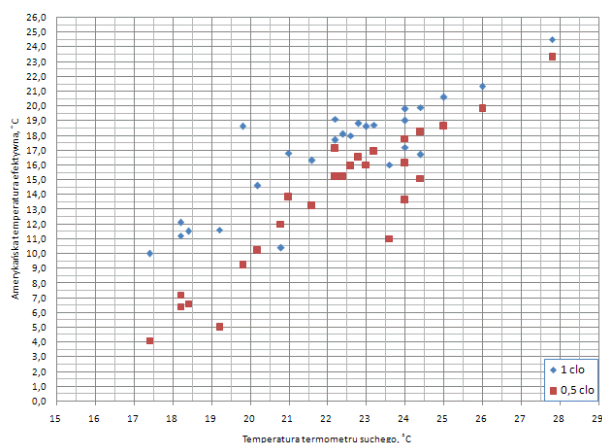


b)

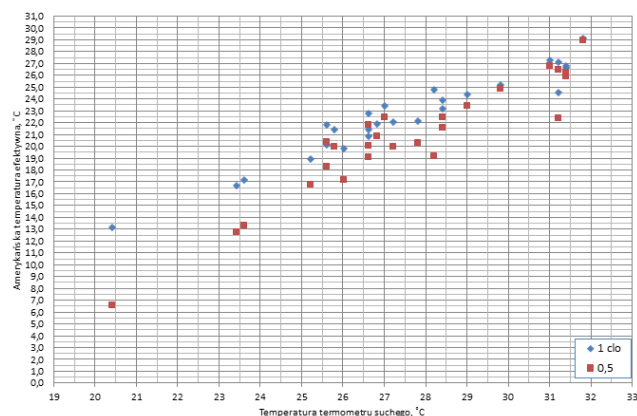


Rys. 9. Zmiany temperatury zastępczej ślaskiej w funkcji temperatury powietrza: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych

a)

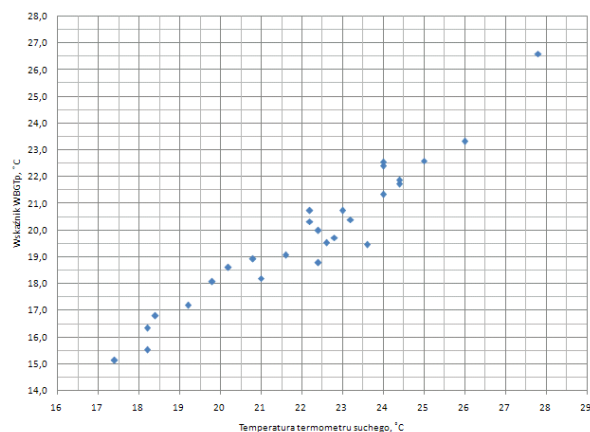


b)

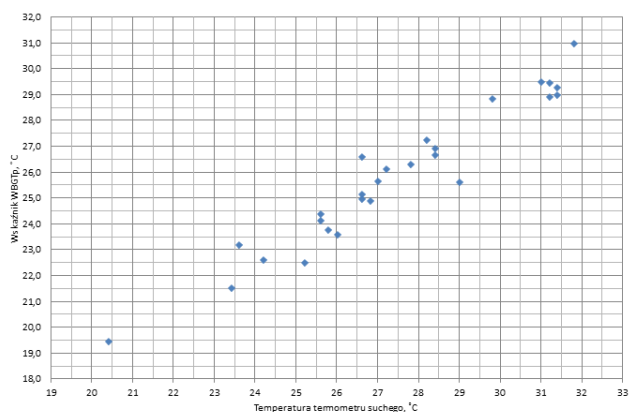


Rys. 10. Zmiany amerykańskiej temperatury efektywnej (wyznaczona dla oporów cieplnych odzieży 0,5 oraz 1,0 clo) w funkcji temperatury powietrza: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych

a)

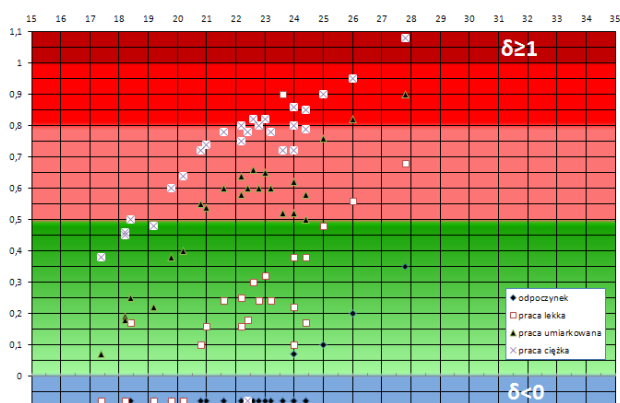


b)

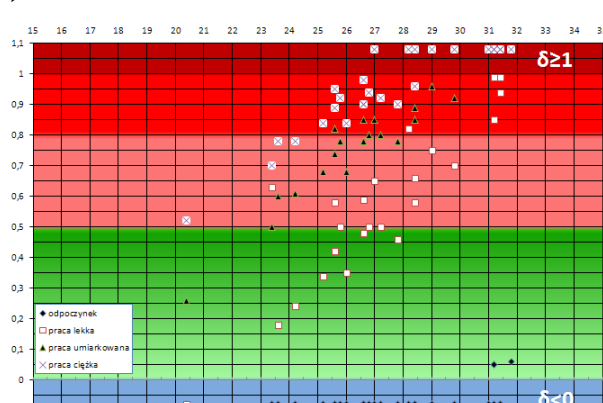


Rys. 11. Zmiany wskaźnika WBGTp w funkcji temperatury powietrza: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych

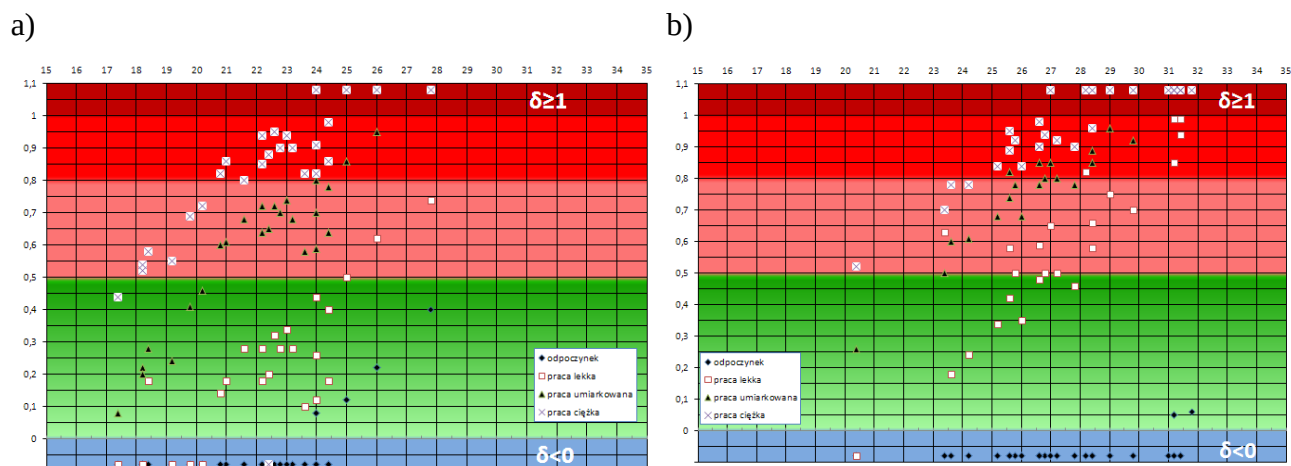
a)



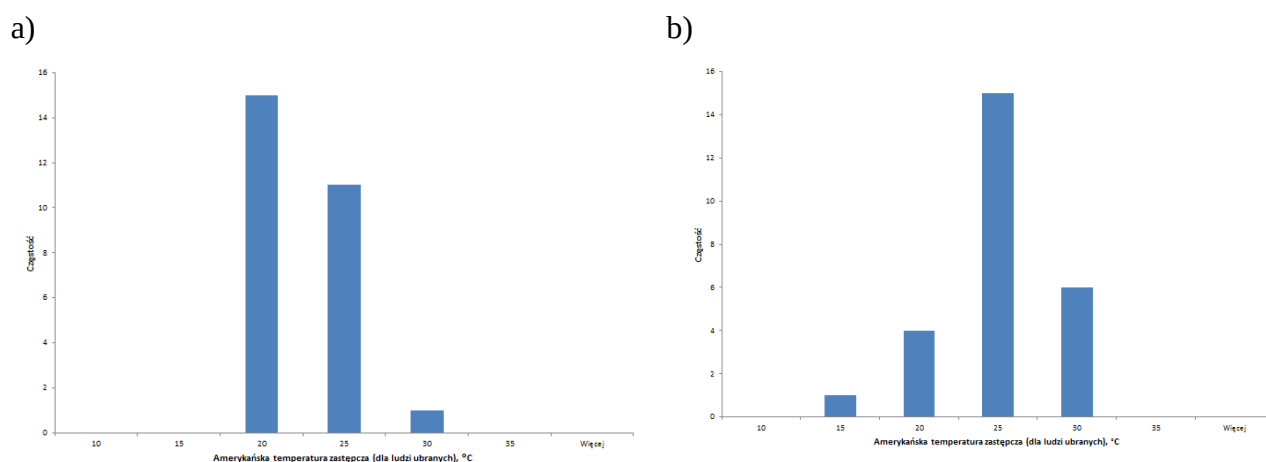
b)



Rys. 12. Zmiany wskaźnika δ w funkcji temperatury powietrza dla ludzi zaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, i zmiennym wydatku energetycznym: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych



Rys. 13. Zmiany wskaźnika δ w funkcji temperatury powietrza dla ludzi niezaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, i zmiennym wydatku energetycznym: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych



Rys. 14. Histogram rozkładu amerykańskiej temperatury zastępczej dla ludzi ubranych: a) na wlocie do wyrobisk ścianowych, b) na wylocie z wyrobisk ścianowych

Analiza pomiarów klimatycznych w rejonach robót przygotowawczych

Analizę przeprowadzono dla dwóch punktów pomiarowych: w odległości 15 m od wlotu oraz w strefie przyprzodkowej wyrobisk ślepych.

Temperatura powietrza

Wartości temperatur mierzone termometrem suchym i wilgotnym w analizowanych punktach zależały od wielu czynników, takich jak:

- schładzanie mieszaniny gazów w wyrobiskach, w których płynie powietrze doprowadzane,
- wielkość strumienia objętości powietrza,
- ilość transportowanego urobku,
- porę roku (temperatura powietrza w szybie i na podszybiu jest uzależniona od zmian temperatury na powierzchni ziemi),
- ilość i rodzaj zainstalowanych maszyn i urządzeń w rejonie,
- inne.

Temperatura mierzona na termometrze suchym, na wlocie do wyrobisk, wahała się od 18,4 do 32,4°C, zaś mierzona na termometrze wilgotnym od 13,8 do 27,4°C. W wielu przypadkach, pomimo doprowadzania lutniociągami schłodzonego powietrza, została przekroczona temperatura 28,0°C.

Wilgotność względna powietrza

Wilgotność względna powietrza w badanych wyrobiskach była w większości przypadków wysoka. Jej wartości zmieniały się w zakresie od 60,7 do 89,5% na wlocie do wyrobisk. Wysoka wartość tego parametru powietrza miała głównie negatywny wpływ na pracujących ludzi w przodkach.

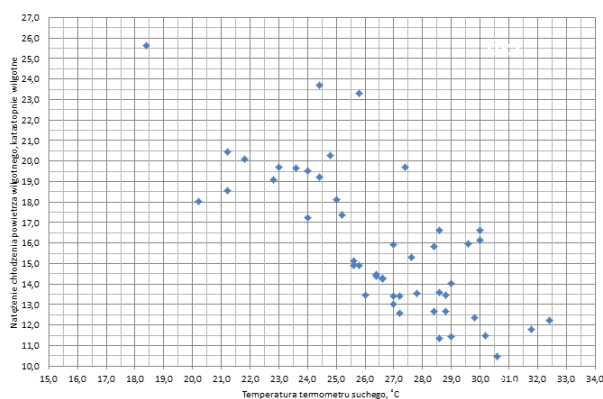
Analiza wskaźników mikroklimatu

Na rysunkach od 15 do 20 przedstawiono w formie graficznej zmianę wartości wskaźników mikroklimatu określonych na podstawie danych pomiarowych. Z zamieszczonych wskaźników wynika, że w punkcie pomiarowym 15 m od wlotu do wyrobiska:

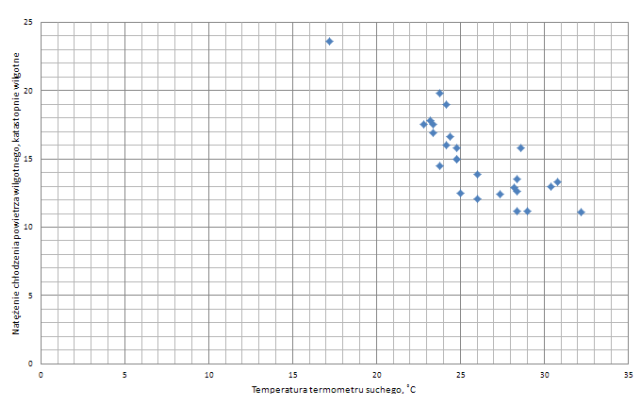
- natężenie chłodzenia powietrza wilgotnego wahało się od 10,5 do 25,6 katastopni wilgotnych (średnio wynosiło 15,9 katastopni wilgotnych),
- temperatura zastępcza francuska zmieniała się w zakresie od 14,4 do 27,5°C (średnio wynosiła 22,7°C),
- temperatura zastępcza klimatu przyjmowała wartości od 14,8 do 28,0°C (średnio wynosiła 23,1°C),
- wskaźnik *WBGT_p* osiągał wartości od 15,3 do 29,1°C (średnio wynosił 23,7°C),
- temperatura zastępcza śląska zmieniała się w zakresie od 14,6 do 27,8°C (średnio wynosiła 23,0°C),
- dla ludzi niezaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym odzieży 1 *clo*, niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ wystąpiły w dwudziestu siedmiu przypadkach dla pracy umiarkowanej oraz w trzydziestu siedmiu przypadkach dla pracy ciężkiej,
- dla ludzi zaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym odzieży 1 *clo*, niebezpieczne warunki klimatyczne określone przez wskaźnik δ wystąpiły w dwunastu przypadkach dla pracy umiarkowanej oraz w dwudziestu siedmiu przypadkach dla pracy ciężkiej.

W strefie przyprzodkowej wskaźniki dyskomfortu są nieznacznie niższe w przypadku wyrobisk, w których realizowane było schładzanie powietrza lub na podobnym poziomie dla wyrobisk bez schładzania.

a)

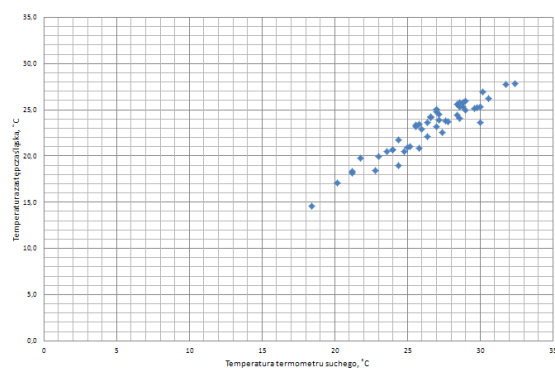


b)

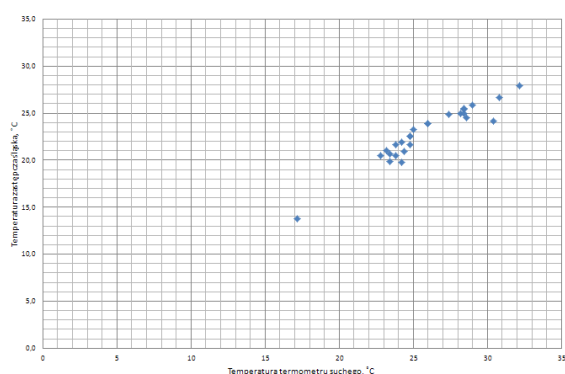


Rys. 15. Zmiany natężenia chłodzenia powietrza wilgotnego w funkcji temperatury powietrza w wyrobiskach ślepych: a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa

a)

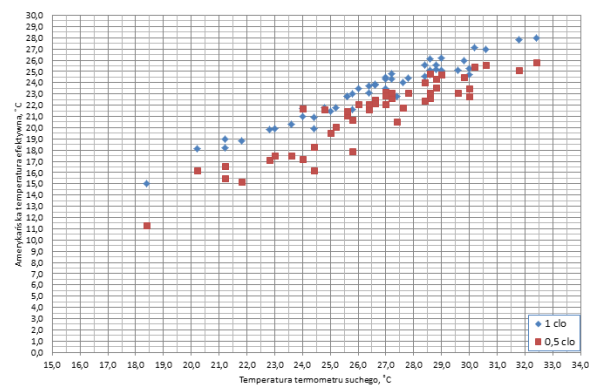


b)

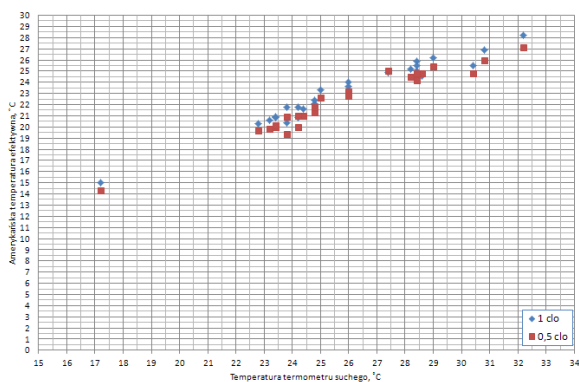


Rys. 16. Zmiany temperatury zastępczej ślaskiej w funkcji temperatury powietrza w wyrobiskach ślepych: a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa

a)

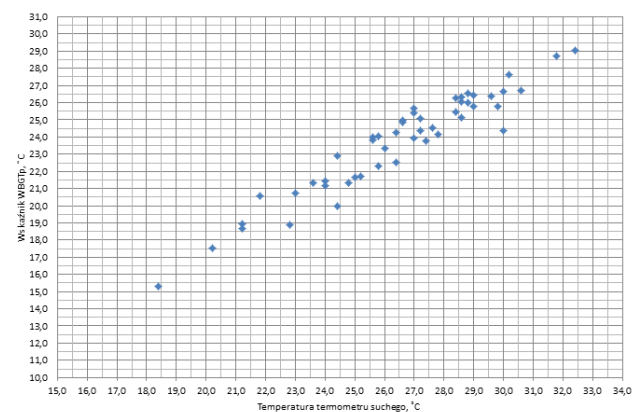


b)

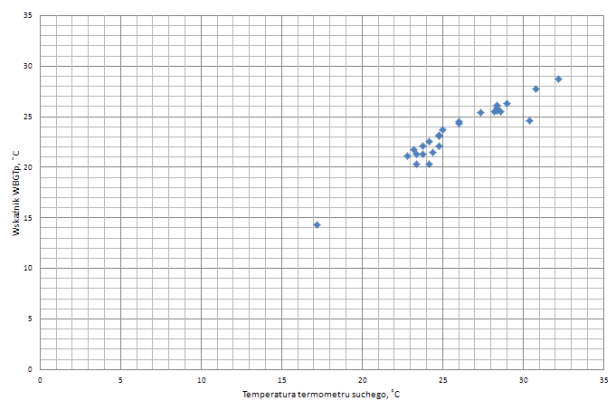


Rys. 17. Zmiany amerykańskiej temperatury efektywnej w funkcji temperatury powietrza w wyrobiskach ślepych (wyznaczona dla oporów cieplnych odzieży 0,5 oraz 1,0 clo): a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa

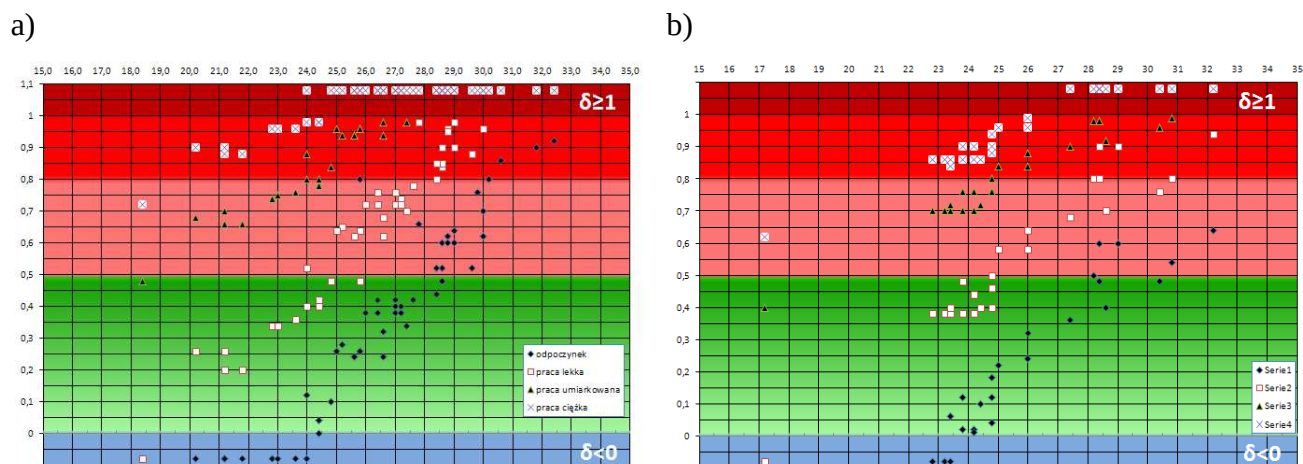
a)



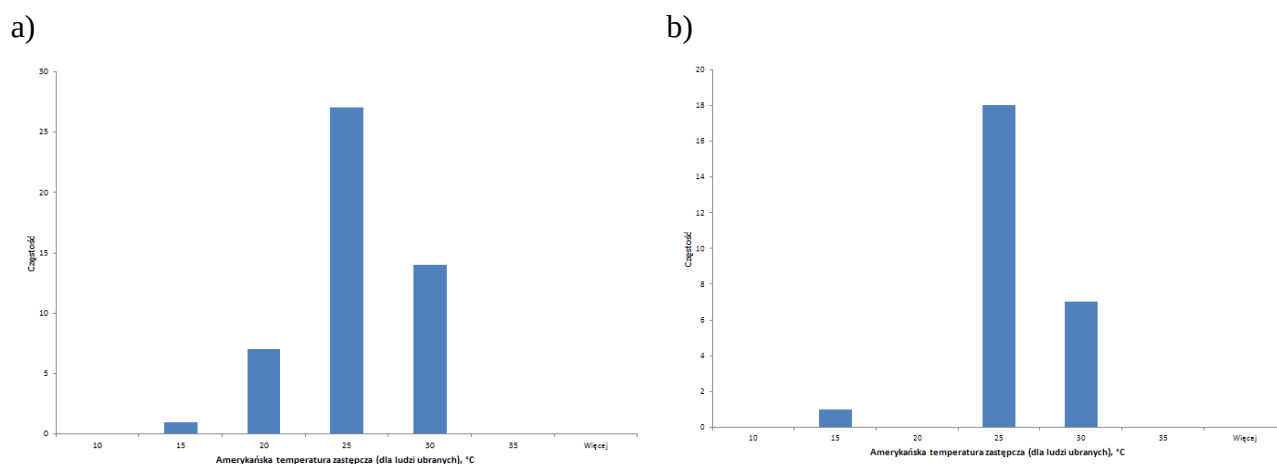
b)



Rys. 18. Zmiany wskaźnika WBGTp w funkcji temperatury powietrza w wyrobiskach ślepych: a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa



Rys. 19. Zmiany wskaźnika δ w funkcji temperatury powietrza w wyrobiskach ślepych dla ludzi zaaklimatyzowanych o oporze cieplnym odzieży 1 clo i zmiennym wydatku energetycznym: a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa



Rys. 20. Histogram rozkładu amerykańskiej temperatury zastępczej (dla ludzi ubranych) w wyrobiskach ślepych: a) 15 m od wlotu, b) strefa przyprzodkowa

Podsumowanie pomiarów mikroklimatu i ich weryfikacji w kopalniach JSW S.A.

W analizowanych kopalniach przede wszystkim mamy do czynienia z dyskomfortem gorącym. Wraz ze schodzeniem eksploatacji na coraz niższe poziomy, wzrostem koncentracji wydobywania i mechanizacji procesów wydobywczych, narastają trudności w utrzymaniu zadowalających warunków cieplnych pracy. W związku z tym stosuje się urządzenia zapewniające intensywne przewietrzanie lub klimatyzację. Termoregulacja behawioralna u człowieka sprowadza się do doboru ubrania roboczego odpowiedniego do natężenia wysiłku i parametrów otoczenia, ogrzewania lub ochładzania w miejscu pracy. Jeśli chodzi o ogrzewanie lub ochładzanie mamy do czynienia z regulacją techniczną. Regulacja fizjologiczna jest uruchamiana w razie niezadowalającej regulacji behawioralnej. W ostatnich dziesięcioleciach w kopalniach skutecznie ograniczono bardzo ciężką i ciężką pracę fizyczną. Większość czynności wykonywanych przez górników stanowi wysiłek umiarkowany.

Na stanowiskach pracy zlokalizowanych w okolicach przyszybowych stacji pomiarowych JSW S.A. przeważa środowisko umiarkowane. W trzech przypadkach została przekroczona temperatura 28,0°C. Dotyczyło to stacji przy szybach wydechowych w okresie letnim. W okolicach wszystkich stacji pomiarowych zlokalizowanych przy szybach dopuszczalna jest ciężka praca bez skracania czasu pracy, gdyż temperatura zastępcza klimatu nie przekracza wartości granicznej dla tego typu pracy.

W komorach funkcyjnych środowisko pracy możemy zaliczyć do umiarkowanego i w niewielkiej części do ciepłego. W ani jednej komorze temperatura nie przekroczyła 28,0°C. W komorach możliwa jest praca ciężka bez skracania czasu pracy.

W rejonach eksploatacyjnych środowisko pracy możemy zaliczyć do gorącego. W wielu przypadkach pomimo stosowania schładzania została przekroczona temperatura 28,0°C. Na wlotach do wyrobisk ścianowych dla ludzi zaaklimatyzowanych, o oporze cieplnym 1 clo, dla pracy umiarkowanej przeważają trudne warunki klimatyczne (63%). W tych środowiskach człowiek może odczuwać wyraźne niezadowolenie z warunków klimatycznych.

Natomiast dla tych samych parametrów (aklimatyzacja, opór cieplny odzieży, praca umiarkowana) na wylotach ze ścian nastąpiło pogorszenie warunków pomimo stosowania klimatyzacji. Przeważają trudne warunki klimatyczne (37%). Bardzo trudne warunki występowały na wylocie z 33% badanych ścian. Dla 26% ścian mógł wystąpić dyskomfort niebezpieczny dla zdrowia.

Środowisko pracy na stanowiskach przy drążeniu wyrobisk przygotowawczych możemy zaliczyć do gorącego. W wielu przypadkach pomimo stosowania schładzania, temperatura 28,0°C była przekroczona. W rejonach robót przygotowawczych dla ludzi zaaklimatyzowanych, w odzieży o oporze cieplnym 1 clo, dla pracy umiarkowanej przeważają bardzo trudne warunki klimatyczne, ale jeszcze bezpieczne dla ludzi.

Wyniki badań zostały wykonane zgodnie z zaplanowanymi celami szczegółowymi i zostały wykorzystane w obliczeniach prowadzonych w ramach etapu 26.

Etap nr 26

Bilans cieplny człowieka- obliczenia numeryczne

Cel i metoda badawcza: Celem tego etapu jest przeprowadzenie obliczeń pozwalających ocenić równowagę cieplną organizmu ludzkiego w określonych warunkach klimatycznych w oparciu o bilans cieplny organizmu. Dla realizacji celu wykorzystana będzie metoda zawarta w normie PN-EN ISO 7933:2005, która opiera się na bilansie cieplnym organizmu i określa metodę analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym. W normie pokazano sposób przewidywania tempa pocenia się oraz kształtowania się temperatury rektalnej, jako odpowiedzi organizmu człowieka na warunki pracy.

Zastosowana w normie metoda została opracowana na podstawie bazy danych składających się z 747 laboratoryjnych eksperymentów oraz 336 eksperymentów polowych od 8 instytucji badawczych. Model numeryczny zawarty w normie nazwano skrótem PHS (Predicted Heat Strain).

W ramach realizacji etapu przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne ujmujące wyniki badań przeprowadzonych w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej tj. KWK „Borynia-Zofiówka”, KWK „Pniówek”, KWK „Jas-Mos”, KWK „Budryk”, KWK „Krupiński”.

Metodyka pomiarów

W tym etapie wykorzystano symulacje komputerowe warunków doznawania stresu cieplnego przez człowieka w wyrobiskach górniczych.

Wyniki badań

Organizm człowieka, aby prawidłowo funkcjonował musi utrzymywać temperaturę wewnętrzną na poziomie bliskim 37°C. Aby uzyskać taką temperaturę zachodzi nieustanna wymiana ciepła między ustrojem człowieka a otoczeniem. Istnieją odpowiednie mechanizmy pozwalające na wytwarzanie przez organizm niezbędnej ilości ciepła oraz gdy jest to konieczne pozwalają na jego odprowadzanie. Wewnątrz ustrojowy system termoregulacji steruje tymi mechanizmami w celu zrównanie zysków i strat ciepła. Gdy straty i zyski ciepła mają takie same wartości ustala się w organizmie stan równowagi cieplnej, czyli tzw. homeotermii. Taki wynik może wystąpić po dłuższym czasie oddziaływania środowiska cieplnego oraz przy niezmiennym poziomie intensywności przemian metabolicznych. Należy zwrócić uwagę, że system termoregulacji pozwala na uzyskanie stanu równowagi cieplnej w szerokim zakresie wartości parametrów otoczenia. Osiągnięcie stanu równowagi cieplnej poprzedza stan przejściowy, w którym organizm dąży do stanu ustalonego regulując parametry takie jak temperatura wewnętrzna ciała, średnia temperatura skóry i jej nawilżenie. Pod terminem termoregulacji rozumie się mechanizmy i procesy utrzymujące prawidłową temperaturę ciała. Wyróżniamy dwa rodzaje termoregulacji tj. fizjologiczną i behawioralną.

Termoregulacja behawioralna u człowieka polega na świadomym wykorzystywaniu dokonań techniki tj. wyborze odpowiedniego ubrania dostosowanego do parametrów otoczenia oraz intensywności pracy a także użycia urządzeń do schładzania lub ogrzewania środowiska. Czasem może się sprowadzać do przyjęcia postawy ograniczającej lub sprzyjającej wymianie ciepła z otoczeniem. W czasie, kiedy termoregulacja behawioralna jest niedostateczna, zostaje uruchomiona termoregulacja fizjologiczna.

Bilans cieplny może być wrażony następującym równaniem:

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

M – gęstość całkowitego strumienia ciepła metabolizmu (wydatek energetyczny), $\frac{W}{m^2}$

W – gęstość strumienia energii związanej z pracą mechaniczną, $\frac{W}{m^2}$

C_{res} – wymiana ciepła w drogach oddechowych przez konwekcję, $\frac{W}{m^2}$

E_{res} – wymiana ciepła w drogach oddechowych przez odparowanie, $\frac{W}{m^2}$

K – gęstość strumienia ciepła wymienianego z otoczeniem drogą przewodnictwa, $\frac{W}{m^2}$

- C – gęstość strumienia ciepła odbieranego z ciała człowieka drogą konwekcji, $\frac{W}{m^2}$
 R – gęstość strumienia ciepła wymienianego drogą promieniowania, $\frac{W}{m^2}$
 E – gęstość strumienia entalpii odbieranej z ciała drogą parowania potu, $\frac{W}{m^2}$
 S – gęstość strumienia ciepła gromadzonego w organizmie człowieka, $\frac{W}{m^2}$

Głównym mechanizmem wytwarzania ciepła w organizmie człowieka jest tzw. metabolizm. Energia cieplna wytwarzana jest w procesach utleniania w ciele ludzkim. Zyski ciepła odnoszą się do 1 m² powierzchni zewnętrznej skóry. Podczas wykonywania pracy fizycznej zyski ciepła w organizmie wzrastają. Mogą wzrosnąć od kilku do kilkunastu razy więcej w porównaniu z poziomem przemian podstawowych odnoszących się do podstawowych procesów życiowych. Energia wytwarzana w procesach metabolicznych niekiedy ulega częściowemu przetworzeniu na energię mechaniczną, lecz przede wszystkim zostaje przetworzona na ciepło wewnętrzne ciała.

Przepływ ciepła z powierzchni ciała ludzkiego lub powierzchni odzieży do powietrza nazywamy konwekcją. Wyróżniamy konwekcję swobodną (naturalną) oraz konwekcję wymuszoną. Gdy ruch cząsteczek powietrza jest spowodowany tylko i wyłącznie różnicą temperatur mamy do czynienia z konwekcją swobodną natomiast, gdy ruch cząsteczek wywołany jest za pomocą pewnego źródła np. wentylatora mamy do czynienia z konwekcją wymuszoną. Człowiek przekazywać może ciepło do otoczenia tylko wtedy, gdy temperatura powierzchni ciała lub powierzchni odzieży ma większą wartość niż temperatura otoczenia. Na wymianę ciepła między ciałem człowieka a otoczeniem ma znaczący wpływ odzież. Stanowi ona izolację na drodze strumienia ciepłego. W czasie ciężkiej pracy w środowisku o wysokiej temperaturze zalecane jest stosowanie lekkiego zestawu odzieży umożliwiającego intensywny obiór ciepła.

Z uwagi na rząd wielkości temperatur występujących w kopalniach podziemnych promieniowanie cieplne występuje pod postacią promieniowania podczerwonego. Gdy temperatura ciała stałego cieczy lub gazu wieloatomowego jest wyższa od zera bezwzględnego emituje ze swojej powierzchni promieniowanie podczerwone. Zdolność do emisji jest ściśle związana ze zdolnością do jego pochłaniania. Powierzchnie błyszczące mają małą zdolność emisji i pochłaniania promieniowania, natomiast powierzchnie czarne odwrotnie mają dużą zdolność do emisji i pochłaniania promieniowania. Wymiana ciepła pomiędzy dwoma powierzchniami za pomocą promieniowania opisuje równanie Stefana-Boltzmana. W wyrobiskach przygotowawczych i eksploatacyjnych temperatury powierzchni stropu spągu i ociosów są zbliżone do temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym. Podwyższone temperatury stanowią wyjątek i mogą się pojawić na powierzchniach urządzeń dużej mocy takich jak kombajny ścianowe i chodnikowe, transformatory, napędy przenośników lub w pobliżu czynnych pól pożarowych. Można zauważyć, że w wyniku wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie temperatura powierzchni ociosów wyrobiska wyrównuje się z temperaturą powietrza oraz z innymi powierzchniami. Do obliczeń można przyjąć założenie, że temperatura promieniowanie jest równa temperaturze mierzonej termometrem suchym.

Jeśli organizm człowieka znajduje się w środowisku w wysokiej temperaturze powierza oraz wykonuje pracę z dużym wydatkiem energetycznym głównym mechanizmem odprowadzania ciepła jest parowanie potu. Wartość intensywności odprowadzania ciepła zależna jest od prędkości powietrza, wilgotności powietrza, ciśnienia powietrza oraz od parametrów odzieży takich jak izolacyjności i przepuszczalności pary wodnej.

Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym.

Aktualnie obowiązująca norma PN-EN ISO 7933:2005 opiera się na bilansie cieplnym organizmu i określa metodę analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym. ***W normie pokazano sposób przewidywania tempa pocenia się oraz kształtowania się temperatury rektalnej, jako odpowiedzi organizmu człowieka na warunki pracy.***

Głównymi celami tego standardu międzynarodowego są następujące zagadnienia:

- a) *ocena stresu cieplnego w warunkach, w których może dochodzić do nadmiernego wzrostu temperatury wewnętrznej lub utraty wody z organizmu z uwagi na określone warunki*
- b) *określenie czasu ekspozycji na warunki mikroklimatu, który z punktu widzenia fizjologów jest do zaakceptowania (oczekiwany brak rzeczywistych uszkodzeń organizmu).*

W związku z tym w trybie predykcji, te czasy ekspozycji są nazywane "Maksymalnymi dopuszczalnymi czasami ekspozycji".

Do obliczenia modelu PHS niezbędne jest:

- Wykonanie pomiarów podstawowych parametrów mikroklimatu tj. temperatura mierzona termometrem suchym, temperatura mierzona termometrem wilgotnym, ciśnienie i prędkość powietrza
- **Określenie z jaką intensywnością człowiek wykonuje swoją pracę**
- **Należy wyznaczyć izolacyjność odzieży pracownika** (na podstawie badań lub z dobrać z dostępnych tabel)
- **Należy określić czy człowiek jest zaaklimatyzowany**
- **Należy określić czy człowiek ma stały dostęp do wody** (uzupełnienie niedoboru wody spowodowane poceniem)
- **Zakładany czas ekspozycji na dane warunki mikroklimatu** (czas pracy)

W celu uszczegółowienie modelu można także podać dodatkowe informacje takie jak:

- waga i wzrost pracownika
- w jakiej pozycji człowiek wykonuje pracę (siedząca, stojąca, kucanie)
- emisyjność odzieży (odzież odbłaskowa)
- szybkość z jaką porusza się człowiek podczas pracy
- kąta zawarty między kierunkiem poruszania się człowieka a przepływem powietrza

W tabeli 3 podano zakresy wartości parametrów, dla których model może być uważany za poprawny. Jeśli jeden lub kilka parametrów przekracza podane zakresy dopuszcza się zastosowanie modelu, a wyniki należy rozpatrywać z ostrożnością oraz należy zwracać szczególną uwagę na ludzi narażonych na ekspozycję takich warunków otoczenia.

Tabela 3. Zakresy wartości parametrów, dla których można zastosować model PHS

Parametry		Minimum	Maksimum
t_a	$^{\circ}C$	15	50
p_a	kPa	0	4,5
$t_r - t_a$	$^{\circ}C$	0	60
v_a	m/s	0	3
M	W	100	450
I_{cl}	clo	0,1	1,0

Wynikami modelowania numerycznego zaproponowanego w normie są:

- **finalna temperatura rektalna po zadanym czasie ekspozycji**
- **ilość utraty wody wyrażona w gramach po zadanym czasie ekspozycji**
- **dopuszczalny czas ekspozycji, w którym temperatura rektalna nie przekracza $38^{\circ}C$**
- **dopuszczalny czas ekspozycji podczas którego nie może dojść do utraty wody w organizmie powyżej 7,5% masy ciała**
- **dopuszczalny czas ekspozycji, podczas którego nie może dojść do utraty wody w organizmie powyżej 5% masy ciała.**

Ogólne zasady obliczania składowych równania bilansu cieplnego organizmu

Wydatek energetyczny M

Wydatek energetyczny jest miarą intensywności pracy. Można wyznaczyć go na podstawie normy PN-EN ISO 8996:2005 Ergonomia środowiska termicznego - Określanie tempa metabolizmu.

Obecnie prowadzone są badania nad obciążeniem pracą na wybranych stanowiskach w górnictwie węgla kamiennego. Polegają one na określeniu wartości tętna w trakcie dniówki roboczej. Stwierdzono, że najwyższe średnie wartości tętna górnika w przodku wynosi $HR = 100/min$. W normie możemy znaleźć sposób wyznaczania wydatku energetycznego na podstawie wartości tętna. Sposób obliczania znajduje się w tabeli 4. Wykonując obliczenia dla pracownika, który ma 30 lat i waży 80 kg wydatek energetyczny wynosiłby $209 W/m^2$, co odpowiada pracy ciężkiej.

Tabela 4. Powiązania wartości wydatku energetycznego (W/m^2) z tętnem (uderzenia na minutę) w zależności od płci, wieku i wagi

Wiek, lata	Waga, kg				
	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg
Kobiety					
20	$2,9 \times HR - 150$	$3,4 \times HR - 181$	$3,8 \times HR - 210$	$4,2 \times HR - 237$	$4,5 \times HR - 263$
30	$2,8 \times HR - 143$	$3,3 \times HR - 173$	$3,7 \times HR - 201$	$4,0 \times HR - 228$	$4,4 \times HR - 254$
40	$2,7 \times HR - 136$	$3,1 \times HR - 165$	$3,5 \times HR - 192$	$3,9 \times HR - 218$	$4,3 \times HR - 244$
50	$2,6 \times HR - 127$	$3,0 \times HR - 155$	$3,4 \times HR - 182$	$3,7 \times HR - 207$	$4,1 \times HR - 232$
60	$2,5 \times HR - 117$	$2,9 \times HR - 145$	$3,2 \times HR - 170$	$3,6 \times HR - 195$	$3,9 \times HR - 219$
Mężczyźni					
20	$3,7 \times HR - 201$	$4,2 \times HR - 238$	$4,7 \times HR - 273$	$5,2 \times HR - 307$	$5,6 \times HR - 339$
30	$3,6 \times HR - 197$	$4,1 \times HR - 233$	$4,6 \times HR - 268$	$5,1 \times HR - 301$	$5,5 \times HR - 333$
40	$3,5 \times HR - 192$	$4,0 \times HR - 228$	$4,5 \times HR - 262$	$5,0 \times HR - 295$	$5,4 \times HR - 326$
50	$3,4 \times HR - 186$	$4,0 \times HR - 222$	$4,4 \times HR - 256$	$4,9 \times HR - 288$	$5,3 \times HR - 319$
60	$3,4 \times HR - 180$	$3,9 \times HR - 215$	$4,5 \times HR - 249$	$4,8 \times HR - 280$	$5,2 \times HR - 311$

Praca mechaniczna W

W większości sytuacjach przemysłowych gęstość strumienia energii związanej z pracą mechaniczną jest mały i może być pominięty.

Wymiana ciepła w drogach oddechowych przez konwekcje C_{res}

Wymiana ciepła w drogach oddechowych przez konwekcje może być wyrażona wzorem:

$$C_{res} = 0,072c_p \times V \times \frac{t_{ex} - t_a}{A_{du}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe powietrza wilgotnego przy stałym ciśnieniu, $\frac{J}{kg \cdot K}$

V - strumień powietrza wdychanego, $\frac{l}{min}$

t_{ex} - temperatura powietrza wydychanego, $^{\circ}C$

t_a - temperatura mierzona termometrem suchym, $^{\circ}C$

A_{du} - pole powierzchni całego ciała, m^2

Wymiana ciepła w drogach oddechowych przez parowanie E_{res}

Wymiana ciepła w drogach oddechowych przez parowanie może być wyrażona wzorem:

$$E_{res} = 0,072c_e \times V \times \frac{W_{ex} - W_a}{A_{du}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

c_e - ciepło utajone parowania wody, $\frac{J}{kg}$

V - strumień powietrza wdychanego, $[\frac{l}{min}]$

W_{ex} - wilgotność właściwa powietrza wydychanego, $\frac{kg \text{ pary wodnej}}{kg \text{ powietrza suchego}}$

W_a - wilgotność właściwa, $\frac{kg \text{ pary wodnej}}{kg \text{ powietrza suchego}}$

A_{du} - pole powierzchni całego ciała, m^2

Przewodnictwo K

Gęstość strumienia ciepła wymienianego z otoczeniem drogą przewodnictwa z uwagi na charakter opracowania nie jest brany bezpośrednio pod uwagę.

Konwekcja C

Wymiana ciepła drogą konwekcji pomiędzy ciałem człowieka o otoczeniem może być wyrażona wzorem:

$$C = h_{cdyn} \times f_{cl} \times (t_{sk} - t_a), \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

h_{cdyn} - dynamiczny współczynnik przenikania ciepła konwekcyjnego, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

f_{cl} - współczynnik uwzględniający wpływ ubrania na wielkość powierzchni wymiany ciepła,

t_{sk} - średnia temperatura ciała człowieka, $^{\circ}C$

t_a - temperatura mierzona termometrem suchym, $^{\circ}C$

Promieniowanie R

Strumień ciepła wymienianego drogą promieniowania można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$R = h_r \times f_{cl} \times (t_{sk} - t_r), \quad \frac{W}{m^2}$$

h_r - radiacyjny współczynnik przenikania ciepła pomiędzy odzieżą a powietrzem, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

f_{cl} - współczynnik uwzględniający wpływ ubrania na wielkość powierzchni wymiany ciepła,

t_{sk} - średnia temperatura ciała człowieka, $^{\circ}C$

t_r - temperatura promieniowania, $^{\circ}C$

Parowanie potu E

W hipotetycznym przypadku, gdy skóra jest całkowicie zwilżona maksymalny przepływ ciepła parowania na powierzchni skóry E_{max} może być wyrażony równaniem:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{tdyn}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

$p_{sk,s}$ - nasycone ciśnienie pary wodnej w temperaturze skóry, kPa

p_a - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, kPa

R_{tdyn} - całkowity dynamiczny opór przenikania przez odzież pary wodnej do przygranicznej warstwy powietrza

W przypadku częściowo zwilżonej skóry przepływ ciepła parowania E może być wyrażony równaniem:

$$E = w \times E_{max}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

E_{max} - maksymalny przepływ ciepła drogą parowania, $\frac{W}{m^2}$

w - współczynnik zwilżenia skóry,

Gromadzenie ciepła S

Strumień ciepła gromadzonego w organizmie jest sumą pozostałych wcześniej opisanych składowych równania. Do gromadzenia ciepła dochodzi, gdy organizm więcej wytwarza ciepła niż go oddaje.

Obliczanie wymaganego przepływu ciepła drogą parowania, wymaganego zwilżenia skóry oraz wymaganego strumienia potu

Biorąc pod uwagę założenie odnośnie przepływu ciepła przez przewodzenie, ogólne równanie bilansu cieplnego można zapisać następująco:

$$E + S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R, \quad \frac{W}{m^2}$$

Wymagana ilość ciepła drogą parowania E_{req} to przepływ ciepła potrzebny do utrzymania równowagi termicznej ciała. Jeśli występuje równowaga termiczna nie dochodzi do gromadzenia ciepła w organizmie. Na tej podstawie równanie możemy zapisać w takiej postaci:

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - dS_{eq}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

E_{req} - wymagany przepływ ciepła drogą parowania, $\frac{W}{m^2}$

dS_{eq} - szybkość akumulacji ciepła w organizmie z uwagi na temperaturę wewnętrzną organizmu związaną z przemianami metabolicznymi, $\frac{W}{m^2}$

Wymagane zwilżenie skóry w_{req} możemy wyrazić stosunkiem wymaganego przepływu ciepła drogą parowania E_{req} i maksymalnego przepływu ciepła drogą parowania na powierzchni skóry E_{max} :

$$w_{req} = \frac{E_{req}}{E_{max}}$$

gdzie:

w_{req} - wymagane zwilżenie skóry,

Obliczenie wymaganego strumienia potu są wykonywane na podstawie wymaganego przepływu ciepła drogą parowania. Biorąc pod uwagę zróżnicowanie warunków odbierania potu przez otoczenie oraz nierównomierne wydzielanie potu na powierzchni skóry wymagany strumień potu możemy wyrazić w następujący sposób:

$$Sw_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

Sw_{req} - wymagany strumień potu, $\frac{W}{m^2}$

r_{req} - wymagana wydajność parowania przez pocenie,

Strumień potu wyrażony jest w watach na metr kwadratowy. Jeden $\frac{W}{m^2}$ odpowiada przepływowi $1,47 \frac{g}{m^2 \cdot h}$ lub $2,67 \frac{g}{h}$ dla domyślnych założeń (powierzchnia ciała $1,8 m^2$)

Interpretacja wymaganego strumienia potu

Podstawa sposobu interpretacji

Interpretacja wartości obliczonych według zalecanej metody analitycznej jest oparta na dwóch kryteriach oceny stresu cieplnego:

- maksymalne zwilżenie skóry w_{max} ,
- maksymalny strumień potu Sw_{max} .

oraz na dwóch kryteriach oceny obciążenia cieplnego:

- maksymalna temperatura rektalna $t_{re max}$
- maksymalna utrata wody D_{max}

Wymagany strumień potu Sw_{req} nie może przekroczyć maksymalnego strumienia potu Sw_{max} osiąganego przez człowieka oraz wymagane zwilżenie skóry w_{req} nie może przekroczyć maksymalnego zwilżenia skóry w_{max} osiąganego przez człowieka. Te dwie wartości maksymalne tworzą funkcję aklimatyzacji człowieka. W przypadku braku równowagi bilansu cieplnego wzrasta temperatura rektalna. Temperatura rektalna musi być ograniczona do maksymalnej wartości $t_{re max} = 38^\circ C$, aby nie doszło do uszkodzeń organizmu człowieka. Bez względu na bilans cieplny utrata wody powinna być ograniczona do wartości D_{max} zgodny ze zdolnością człowieka do utrzymania równowagi hydrologicznej organizmu.

Analiza sytuacji w pracy

Wymiana ciepła jest obliczana w czasie t_i , odnosząc się do kondycji ciała będącego w poprzednim czasie obliczeń oraz jest funkcją warunków klimatycznych i przemian metabolicznych w jednostce czasu. Najpierw obliczane są: wymagany przepływ ciepła drogą parowania E_{req} , wymagane zwilżenie skóry w_{req} oraz wymagany strumień potu Sw_{req} . Następnie obliczane są: przewidywany przepływ ciepła drogą parowania E_p , przewidywane zwilżenie skóry w_p oraz przewidywany strumień potu Sw_p biorąc pod uwagę ograniczenia ciała (w_{max} i Sw_{max}) oraz gwałtowną reakcję systemu termoregulacji poprzez wymianę ciepła drogą parowania potu. Akumulacji ciepła w organizmie szacowana jest na podstawie różnicy pomiędzy wymaganym i przewidywanym przepływie ciepła drogą parowania. Ciepło to przyczynia się do zwiększania lub zmniejszania temperatury skóry i ciała. Na podstawie tych wartości jest określana wymiana ciepła w następnym kroku czasowym. W ten

sposób zmiany przewidywanego strumienia potu S_{wp} i temperatury rektalnej t_{re} są określane iteracyjnie. Przez to można brać pod uwagę nie tylko stałe warunki pracy, lecz także zmienne warunki mikroklimatu lub różne obciążenia pracą w różnym okresie czasu.

Określenie maksymalnego dopuszczalnego czasu ekspozycji D_{lim}

Maksymalny dopuszczalny czas ekspozycji D_{lim} zostanie osiągnięty, gdy temperatura rektalna przekroczy wartość graniczną lub dojdzie do utraty wody z organizmu przekraczając odpowiednie wartości maksymalne. W sytuacjach, w których maksymalny przepływ ciepła parowania na powierzchni skóry E_{max} jest ujemny, dochodzi do kondensacji pary wodnej na skórze oraz szacunkowy dopuszczalny czas ekspozycji na dane warunki mikroklimatu może wynosić mniej niż 30 minut. Zjawisko pocenia w takiej sytuacji odgrywa ważną rolę w szacowaniu wymiany ciepła drogą parowania. Należy podjąć specjalne środki ostrożności i indywidualny fizjologiczny nadzór nad pracownikiem, który znalazł się w takich warunkach mikroklimatu.

Organizacja pracy w środowisku gorącym

Norma umożliwia wprowadzenie różnych sposobów organizacji pracy i planowania okresów przerw, jeśli jest to konieczne. Modelowanie numeryczne zawarte w normie [4] pozwala na obliczenia i interpretacje warunków mikroklimatu, gdzie znane jest tempo metabolizmu, izolacyjność termiczna odzieży oraz parametry środowiska.

Niezbędne dane do obliczenia bilansu cieplnego organizmu

Określenie przepływu ciepła w drogach oddechowych przez konwekcję C_{res}

Przepływ ciepła w drogach oddechowych przez konwekcję można oszacować według następującego empirycznego wzoru:

$$C_{res} = 0,00152M \times (28,56 + 0,885t_a + 0,641p_a), \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

M - wydatek energetyczny, $\frac{W}{m^2}$

t_a - temperatura mierzona termometrem suchym, $^{\circ}C$

p_a - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, kPa

Określenie przepływu ciepła w drogach oddechowych przez parowanie E_{res}

Przepływ ciepła w drogach oddechowych przez parowanie można oszacować wg następującego empirycznego wzoru:

$$E_{res} = 0,00127M \times (59,34 + 0,53t_a + 11,61p_a), \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

M - wydatek energetyczny, $\frac{W}{m^2}$

t_a - temperatura mierzona termometrem suchym, $^{\circ}C$

p_a - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, kPa

Określenie temperatury skóry w stanie równowagi termicznej organizmu

W warunkach klimatycznych, dla których stosujemy model zawarty w normie [4], średnia temperatura skóry człowieka może być określona w zależności od parametrów sytuacji roboczej, stosując następujące empiryczne wyrażenia:

Dla ludzi nieubranych ($I_{cl} \leq 0,2$)		Dla ludzi ubranych ($I_{cl} \geq 0,6$)	
$t_{sk,eq nu} = 7,19$	$+ 0,064 t_a$	$t_{sk,eq cl} = 12,17$	$+ 0,020 t_a$
	$+ 0,061 t_r$		$+ 0,044 t_r$
	$- 0,348 v_a$		$- 0,253 v_a$
	$+ 0,198 p_a$		$+ 0,194 p_a$

$$+ 0,000 M$$

$$+ 0,616 t_{re}$$

$$+ 0,005346 M$$

$$+ 0,51274 t_{re}$$

gdzie:

I_{cl} – izolacyjność termiczna odzieży, clo

$t_{sk,eq nu}$ – średnia temperatura skóry człowieka dotycząca ludzi nie ubranych, $^{\circ}C$

$t_{sk,eq cl}$ – średnia temperatura skóry człowieka dotycząca ludzi ubranych, $^{\circ}C$

t_a – temperatura mierzona termometrem suchym, $^{\circ}C$

t_r – temperatura promieniowania, $^{\circ}C$

v_a – prędkość powietrza, $\frac{m}{s}$

p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, kPa

Dla izolacyjności odzieży I_{cl} o wartości pomiędzy 0,2 a 0,6 clo , aby wyznaczyć średnią temperaturę skóry człowieka można ekstrapolować między tymi dwoma wartościami przy użyciu wzoru:

$$t_{sk,eq} = t_{sk,eq nu} + 2,5 \times (t_{sk,eq cl} - t_{sk,eq nu}) \times (I_{cl} - 0,2), \quad ^{\circ}C$$

Określanie wartości chwilowej temperatury skóry

Średnia temperatura skóry t_{sk} , w czasie t_i może być określona:

- od średniej temperatury skóry $t_{sk,i-1}$ w czasie t_{i-1}
- od średniej temperatury skóry człowieka $t_{sk,eq}$ którą można przewidzieć na podstawie warunków panujących w czasie ostatniego przyrostu czasu przez równanie zamieszczone poniżej.

Jeśli stała czasu reakcji dotycząca temperatury skóry jest równa 3 min, możemy użyć następujący wzór:

$$t_{sk,i} = 0,7165 t_{sk,i-1} + 0,2835 t_{sk,eq}, \quad ^{\circ}C$$

gdzie:

$t_{sk,i}$ – średnia temperatura skóry po czasie t_i , $^{\circ}C$

Określenie akumulacji ciepła ciała do wzrostu temperatury wewnętrznej związanej z tempem metabolizmu S_{eq}

W środowisku neutralnym temperatura wewnętrzna organizmu wzrasta z czasem wykonywania pracy i jest zależna od szybkości metabolizmu związanego z indywidualnymi czynnikami takimi jak moc tlenowa. W przypadku przeciętnego organizmu można założyć, że temperatura wewnętrzna rośnie w zależności od tempa metabolizmu, zgodnie z następującym wzorem:

$$t_{cr,eq} = 0,0036 \times (M - 55) + 36,8 \quad ^{\circ}C$$

gdzie:

$t_{cr,eq}$ – temperatura wewnętrzna w zależności od tempa metabolizmu

Temperatura wewnętrzna organizmu osiągnie temperaturę wewnętrzną związaną z tempem metabolizmu przy zakładanej reakcji organizmu 10 minut:

$$t_{cr} = 36,8 + (t_{cr,eq} - 36,8) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{10}\right)\right), \quad ^{\circ}C$$

To wyrażenie można zapisać w inny sposób:

$$t_{cr,eq i} = t_{cr,eq i-1} \times k + t_{cr,eq} \times (1 - k), \quad ^{\circ}C$$

gdzie:

$t_{cr,eq i}$ – temperatura wewnętrzna w zależności od tempa metabolizmu po czasie t_i , $^{\circ}C$

$t_{cr,eq i-1}$ – temperatura wewnętrzna w zależności od tempa metabolizmu po czasie t_{i-1} , $^{\circ}C$

$$k = \exp\left(\frac{-incr}{10}\right),$$

$incr$ – przyrost czasu od czasu t_{i-1} do czasu t_i , $[min]$

Na podstawie tego akumulacja ciepła może być wyrażona wzorem:

$$dS_{eq} = c_{sp} \times (t_{cr,eq i} - t_{cr,eq i-1}) \times (1 - \alpha), \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

c_{sp} - ciepło właściwe ciała, $\frac{W}{m_2 \cdot K}$

α - część masy ciała w temperaturze skóry,

Określenie statycznej izolacji odzieży

Dla ludzi nie ubranych w warunkach statycznych bez zmian ruchu powietrza lub człowieka, wymiana ciepła jawnego (C + R) może być określona przez następujący wzór:

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_a}{I_{tot\ st}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

$I_{tot\ st}$ - całkowita statyczna izolacyjność odzieży (dla ludzi nie ubranych może wynosić $0,111 \frac{m_2 \times K}{W}$)

Dla ludzi ubranych statyczną izolacyjność odzieży możemy wyznaczyć na podstawie następującego wzoru:

$$I_{tot\ st} = I_{cl\ st} + \frac{I_{a\ st}}{f_{cl}}, \quad \frac{m_2 \times K}{W}$$

gdzie:

$I_{cl\ st}$ - statyczna izolacyjność odzieży, $\frac{m_2 \times K}{W}$

$I_{a\ st}$ - statyczna izolacyjność warstwy powietrza, $\frac{m_2 \times K}{W}$

f_{cl} - współczynnik uwzględniający wpływ ubrania na wielkość powierzchni wymiany ciepła,

Współczynnik uwzględniający wpływ ubrania na wielkość powierzchni wymiany ciepła obliczamy za wzoru:

$$f_{cl} = 1 + 1,97 * I_{cl\ st},$$

Określenie dynamicznej izolacji odzieży

Aktywność ruchowa człowieka i wentylacja stanowisk pracy może modyfikować wartości izolacyjności odzieży i parametrów dotyczących sąsiadujących warstw powietrza. Przepływ powietrza i poruszanie się zmniejszają izolacyjność odzieży i dlatego należy wprowadzić współczynnik korekcyjny dla izolacyjności statycznej odzieży i izolacyjności zewnętrznej warstwy powietrza:

$$I_{tot\ dyn} = C_{orr,tot} \times I_{tot\ st}, \quad \frac{m_2 \times K}{W}$$

$$I_{a\ dyn} = C_{orr,la} \times I_{a\ st}, \quad \frac{m_2 \times K}{W}$$

$$C_{orr,tot} = C_{orr,cl} = e^{(0,043 - 0,398v_{ar} + 0,066v_{ar}^2 - 0,378v_w + 0,094v_w^2)},$$

gdzie:

$I_{tot\ dyn}$ - całkowita dynamiczna izolacyjność odzieży, $\frac{m_2 \times K}{W}$

$C_{orr,tot}$ - współczynnik korekcji dynamicznej izolacyjności odzieży w zależności od rzeczywistej izolacyjności odzieży,

$I_{a\ dyn}$ - dynamiczna izolacyjność warstwy powietrza, $\frac{m_2 \times K}{W}$

$C_{orr,la}$ - współczynnik korekcji dynamicznej izolacyjności suchej odzieży ($I_{cl} = 0\ clo$),

$C_{orr,cl}$ - współczynnik korekcji dynamicznej izolacyjności suchej odzieży ($I_{cl} \geq 0,6\ clo$),

v_{ar} - prędkość względna powietrza, $\frac{m}{s}$

v_w - prędkość poruszania się człowieka, $\frac{m}{s}$

Dla $I_{cl} \geq 0,6\ clo$ stosujemy wzór:

$$C_{orr,tot} = C_{orr,la} = e^{(-0,472v_{ar} + 0,047v_{ar}^2 - 0,342v_w + 0,117v_w^2)},$$

Dla $0 \leq I_{cl} \leq 0,6\ clo$ stosujemy wzór:

$$C_{orr,tot} = (0,6 - I_{cl}) \times C_{orr,la} + I_{cl} \times C_{orr,cl},$$

gdzie:

I_{cl} - izolacyjność odzieży, clo

Z tym, że limitowana jest prędkość względna powietrza $v_{ar} \leq 3 \frac{m}{s}$ i prędkość poruszania się człowieka $v_w \leq 1,5 \frac{m}{s}$

Gdy prędkość chodzenia jest niezdefiniowana lub osoba stoi wartość v_w można obliczyć za pomocą wzoru:

$$v_w = 0,0052 \times (M - 58), \quad \frac{m}{s}$$

z warunkiem, aby:

$$v_w \leq 0,7 \frac{m}{s}$$

Finalnie dynamiczną izolacyjność odzieży można obliczyć ze wzoru:

$$I_{cl\ dyn} = I_{tot\ dyn} - \frac{I_{a\ dyn}}{f_{cl}}, \quad \frac{m_2 \times K}{W}$$

gdzie:

$I_{cl\ dyn}$ - dynamiczna izolacyjność odzieży, $\frac{m_2 \times K}{W}$

Określanie wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie

Wymiana ciepła może być określona za pomocą następujących równań:

$$C + R = f_{cl} \times [h_{cdyn} \times (t_{cl} - t_a) + h_r \times (t_{cl} - t_r)], \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży, °C

h_{cdyn} - dynamiczny współczynnik przenikania ciepła konwekcyjnego, $\frac{W}{m^2 \times K}$

h_r - radiacyjny współczynnik przenikania ciepła, $\frac{W}{m^2 \times K}$

wzór ten opisuje wymianę ciepła między odzieżą i środowiskiem, oraz

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl\ dyn}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

wzór ten opisuje wymianę ciepła pomiędzy skórą a powierzchnią odzieży.

Dynamiczny współczynnik przenikania ciepła konwekcyjnego h_{cdyn} może być określony, jako największa wartość z:

$$\begin{aligned} &2,38 \times |t_{sk} - t_a|^{0,25} \\ &3,5 + 5,2v_{ar} \\ &8,7v_{ar}^{0,6} \end{aligned}$$

Radiacyjny współczynnik przenikania ciepła h_r można określić za pomocą wzoru:

$$h_r = 5,6710^{-8} \varepsilon \times \frac{A_r}{A_{du}} \times \frac{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4}{t_{cl} - t_r}, \quad \frac{W}{m^2 \times K}$$

gdzie:

ε - emisyjność,

Część powierzchni skóry, która bierze udział w wymianie ciepła przez promieniowanie $\frac{A_r}{A_{du}}$ jest równa: 0,67 dla postawy kucającej, 0,70 dla postawy siedzącej, dla postawy stojącej 0,77

Kiedy pracownik nosi odzież odbłaskową należy skorygować współczynnik h_r przez $F_{cl,R}$ wynoszący:

$$F_{cl,R} = (1 - A_p) \times 0,97 + A_p \times F_r,$$

$F_{cl,R}$ - współczynnik redukcji dla wymiany ciepła promieniowania z powodu noszenia ubrań odbłaskowych,

A_p - część powierzchni ciała objętego odzieżą odbłaskową,

F_r - emisyjność odzieży odbłaskowej,

Oba wyrażenia określające wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie ($C + R$) muszą być rozwiązane iteracyjnie w celu uzyskania t_{cl} .

Określanie maksymalnego przepływu ciepła parowania na powierzchni skóry E_{max}

Maksymalny przepływ ciepła drogą parowania na powierzchni skóry może być wyrażony równaniem:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{tdyn}}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

$p_{sk,s}$ - nasycone ciśnienie pary wodnej w temperaturze skóry, kPa

p_a - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, kPa

R_{tdyn} – całkowity dynamiczny opór przenikania przez odzież pary wodnej do przygranicznej warstwy powietrza, $\frac{m^2 \times kPa}{W}$

Całkowity dynamiczny opór przenikania przez odzież pary wodnej do przygranicznej warstwy powietrza R_{tdyn} określa się na podstawie następującego wzoru:

$$R_{tdyn} = \frac{I_{tot\ dyn}}{\frac{i_{mdyn}}{16,7}}, \quad \frac{m^2 \times kPa}{W}$$

gdzie:

i_{mdyn} - dynamiczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci,

Dynamiczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci obliczamy ze wzoru:

$$i_{mdyn} = i_{mst} \times C_{orr,E}$$

gdzie:

$C_{orr,E}$ - korekta do dynamicznego wskaźnika przepuszczalności,

i_{mst} - statyczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci,

Stacyjny wskaźnik przepuszczalności wilgoci w tym wzorze ograniczony jest do wartości:

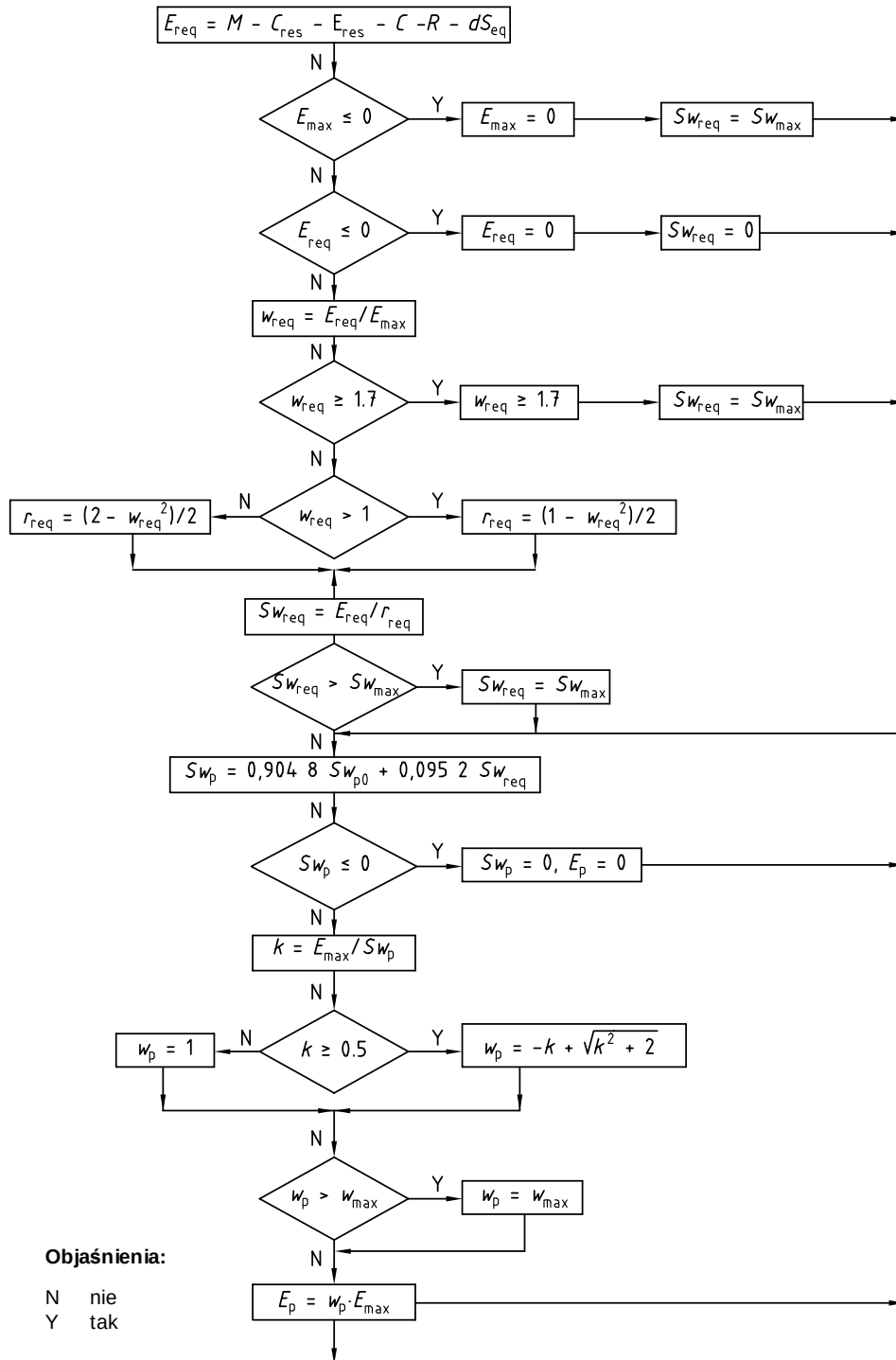
$$i_{mdyn} \leq 0,9$$

Korektę do dynamicznego wskaźnika przepuszczalności obliczamy według następującego wzoru:

$$C_{orr,E} = 2,6C_{orr,tot}^2 - 6,5C_{orr,tot} + 4,9$$

Określenie przewidywanego strumienia potu S_{wp} i przewidywanego przepływu ciepła drogą parowania E_p

W jaki sposób przewiduje się strumień potu S_{wp} i przepływ ciepła drogą parowania E_p pokazuje schemat blokowy na rysunku 21.



Rys. 21. Schemat dla określenia przewidywanego strumienia potu S_{wp} oraz przewidywanego przepływu ciepła drogą parowania E_p

Gdy wymagany przepływ ciepła drogą parowania E_{req} jest większy od maksymalnego przepływu ciepła drogą parowania następuje pełne zwilżenie skóry ($w_{req} > 1$). Wtedy w_{req} oznacza grubość warstwy wody na powierzchni skóry, zamiast równoważnej części skóry pokrytej potem. Teoretycznie, jeśli $w_{req} > 1$ wydajność parowania powinna stać się mniejsza.

dla $w_{req} \leq 1$ wymagana wydajność parowania przez pocenie wynosi: $r_{req} = \frac{1 - w_{req}^2}{2}$

dla $w_{req} \geq 1$ wymagana wydajność parowania przez pocenie wynosi: $r_{req} = \frac{2 - w_{req}^2}{2}$

Odpowiedź organizmu człowieka na określone warunki poprzez wywołanie strumienia potu wynosi 10 min, dlatego przewidywany strumień potu w czasie t_i wynosi:

$$S_{wp} = S_{wp} \times k_{sw} + S_{w req} \times (1 - k_{sw}), \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

$$k_{sw} = \exp\left(\frac{-\text{incr}}{10}\right)$$

Jak wspomniano powyżej, wymagane zwilżenie skóry może być teoretycznie większe niż 1 dla obliczania przewidywanego strumienia potu. Z uwagi na to, że przepływ ciepła drogą parowania ogranicza się do powierzchni warstwy wodnej znajdującej się na powierzchni ciała, przewidywane zwilżenie skóry nie może być większe niż 1. Dzieje się tak, dlatego że przewidywany strumień potu jest więcej niż dwa razy większy niż maksymalny przepływ ciepła drogą parowania.

Określanie temperatury rektalnej

Akumulacja ciepła w ostatnim czasie przyrostu czasu t_i jest wyrażona równaniem:

$$S = E_{req} - E_p + S_{eq}, \quad \frac{W}{m^2}$$

gdzie:

E_p - przewidywany przepływ ciepła drogą parowania, $\frac{W}{m^2}$

Omawiana akumulacja ciepła prowadzi do wzrostu temperatury wewnętrznej, uwzględniając wzrost temperatury skóry. Część masy ciała o temperaturze średniej temperatury wewnętrznej ciała jest wyrażona równaniem:

$$(1 - \alpha) = 0,7 + 0,09 \times (t_{cr} - 36,8)$$

gdzie:

α - część masy ciała w temperaturze skóry, [bezwymiarowy]

t_{cr} - temperatura wewnętrzna ciała, $^{\circ}C$

jest limitowana do:

$$\begin{aligned} 0,7 \text{ dla } t_{cr} < 36,8^{\circ}C \\ 0,9 \text{ dla } t_{cr} < 36,8^{\circ}C \end{aligned}$$

Rysunek 22 przedstawia rozkład temperatury w organizmie w czasie t_{i-1} i czasie t_i . Na podstawie tego możemy obliczyć temperaturę wewnętrzną ciała $t_{cr,i}$:

$$t_{cr,i} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{2}} \times \left[\frac{dS_i}{C_p \times W_b} + t_{cr,i-1} - \frac{t_{cr,i-1} - t_{sk,i-1}}{2} \times \alpha_{i-1} - t_{sk,i} \times \frac{\alpha_i}{2} \right], \quad ^{\circ}C$$

gdzie:

W_b - masa ciała, kg

dS_i - akumulacja ciepła w organizmie w czasie t_i , $\frac{W}{m^2}$

$t_{cr,i-1}$ - temperatura wewnętrzna po czasie t_{i-1} , $^{\circ}C$

$t_{sk,i-1}$ - średnia temperatura skóry po czasie t_{i-1} , $^{\circ}C$

$t_{sk,i}$ - średnia temperatura skóry po czasie t_i , $^{\circ}C$

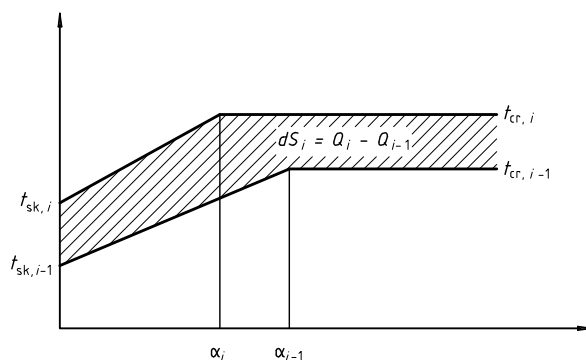
Temperaturę rektalną określa się według następującego wzoru:

$$t_{re,i} = t_{re,i-1} \times \frac{2t_{cr,i} - 1,962t_{re,i-1} - 1,31}{9}, \quad ^{\circ}C$$

gdzie:

$t_{cr,i}$ - temperatura wewnętrzna po czasie t_i , $^{\circ}C$

$t_{cr,i-1}$ - temperatura rektalna po czasie t_{i-1} , $^{\circ}C$



Rys. 12. Rozkład magazynowania ciepła w organizmie w czasie t_{i-1} i t_i

Kryteria oceny dopuszczalnego czasu ekspozycji w trudnych warunkach mikroklimatu

W celu określenie maksymalnego dopuszczalnego czasu ekspozycji stosuje się następujące kryteria:

- aklimatyzacja organizmu;
- maksymalne zawilgocenie skóry w_{max} ;
- maksymalny strumień potu S_{wmax} ;
- uwzględnienie wyników badań na zachowaniu ludzi czynnych zawodowo w określonych warunkach;
- maksymalna utrata wody D_{max}
- maksymalna temperatura rektalna t_{re}

Stopień aklimatyzacji

Zaaklimatyzowani pracownicy są w stanie pocić się obficie oraz rozkład pocenia jest bardziej równomierny w stosunku do osób niezaaklimatyzowanych. W danej sytuacji w pracy powoduje to, że organizm mniej magazynuje ciepła (niższa temperatura wewnętrzna) i charakteryzuje się niższym ograniczeniem układu sercowo-naczyniowego (niższe tętno). Ponadto stwierdzono, że tacy pracownicy tracą mniej soli mineralnych przez pocenie się i w związku z tym mogą być w stanie wytrzymać większą utratę wody z organizmu. To rozróżnienie między zaaklimatyzowanymi i niezaaklimatyzowanymi jest zatem niezbędne z uwagi na to że dotyczy to bezpośrednio maksymalnego zawilgocenie skóry w_{max} oraz maksymalnego strumienia potu S_{wmax} .

Maksymalne zawilgocenie skóry w_{max}

Maksymalne zawilgocenie skóry dla osób niezaaklimatyzowanych wynosi 0,85, a dla osób zaaklimatyzowanych 1,0.

Maksymalny strumień potu S_{wmax}

Maksymalny strumień potu można określić za pomocą wzoru:

$$S_{wmax} = 2,6 \times (M - 32) \times A_{du}, \quad \frac{g}{h} \text{ w zakresie od } 650 \frac{g}{h} \text{ do } 1000 \frac{g}{h}$$

albo

$$S_{wmax} = (M - 32) \times A_{du}, \quad \frac{W}{m^2} \text{ w zakresie od } 250 \frac{W}{m^2} \text{ do } 400 \frac{W}{m^2}$$

Dla osób zaaklimatyzowanych maksymalny strumień potu jest większy o 25 % niż dla ludzi niezaaklimatyzowanych.

Maksymalne odwodnienie i utrata wody

Odwodnienie rzędu 3% masy ciała powoduje zwiększenie szybkości tętna i załamanie wrażliwość pocenia się i jest przyjęte, jako maksymalne dopuszczalne odwodnienie w przemyśle. W przypadku ekspozycji na zadane warunki, trwającej między 4 a 8 godzin, stopa rehydratacji wynosi 60% dla 50 % badanej populacji ludzi czynnych zawodowo, a dla 95% badanych przypadków stopa rehydratacji jest większa niż 40 % niezależnie od całkowitej ilości wytworzonego potu, Na podstawie tych danych maksymalna utrata wody jest określona na:

- 7,5% masy ciała dla przeciętnego pracownika D_{max50} lub
- 5% masy ciała dla 95% ludności czynnej zawodowo D_{max95} .

W zakładach pracy, w skład których wchodzi również kopalnie, pracownicy zostają dopuszczeni do pracy na podstawie podstawowych badań lekarskich. Jeśli pracownik nie ma dostępu do wody w celu uzupełniania płynów, to całkowita dopuszczalna utrata wody powinna być ograniczona do 3% masy ciała. Natomiast, gdy pracownik ma stały dostęp do wody i może pić swobodnie można wartość zwiększyć. Warunek dopuszczalnej utraty wody wynoszący 7,5% masy ciała dotyczy przeciętnego pracownika. W związku z tym, że warunkiem zatrudnienia w zakładach pracy jest pozytywne przejście podstawowych badań lekarskich, stan zdrowia pracownika może odbiegać od przeciętnego na korzyść lub niekorzyść. W takim wypadku w celu ochrony 95% populacji ludzi pracujących stosujemy warunek dopuszczalnej utraty wody z organizmu 5% masy ciała. Jeśli pracownik przejdzie pozytywnie specjalistyczne badania, dzięki którym zostanie potwierdzona sprawność układu termoregulacyjnego warunek dopuszczalnej utraty wody można zwiększyć do 7,5% masy ciała.

Maksymalna wartość temperatury rektalnej

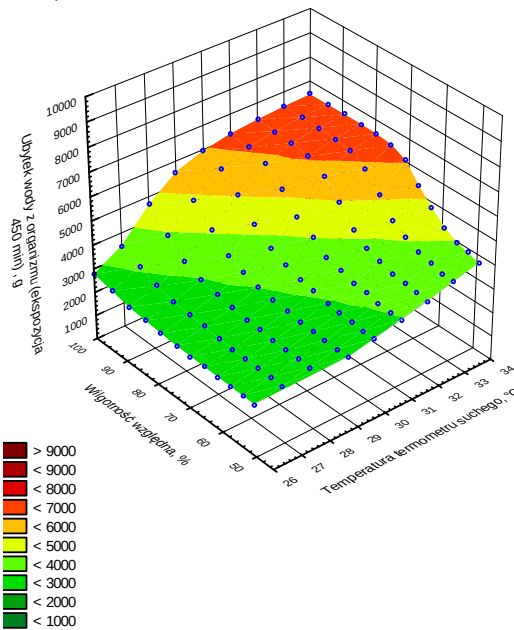
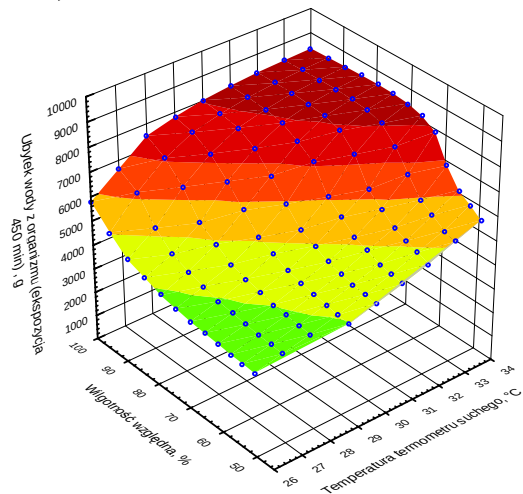
Zgodnie z raportem WHO, kiedy grupa pracowników znajdzie się w określonych warunkach, a średnia temperatura rektalna jest równa 38°C można oszacować, że prawdopodobieństwo osiągnięcia wyższej temperatury rektalnej przez daną osobę dla następujących wartości temperatury rektalnej:

- $t_{re} = 42,0^{\circ}\text{C}$ z prawdopodobieństwem mniejszym od 10^{-7} (mniej niż jedna osoba na 40 lat wśród 1 000 pracowników przy założeniu 250 dni roboczych w roku);
- $t_{re} = 39,2^{\circ}\text{C}$ z prawdopodobieństwem mniejszym od 10^{-4} (mniej niż jedna osoba narażona na ryzyko wśród 10 000 zmian).

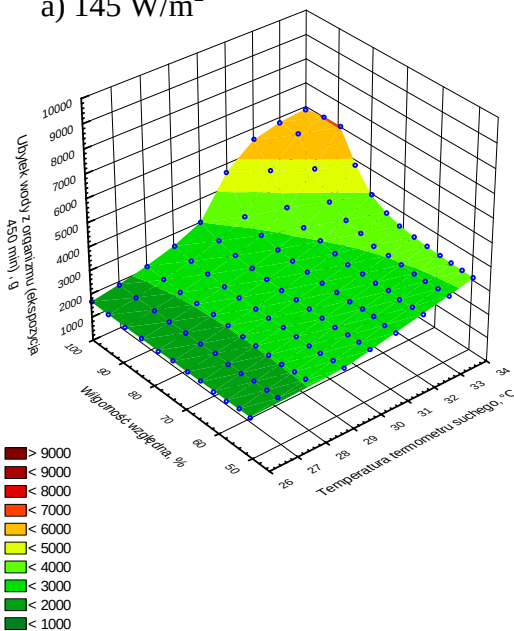
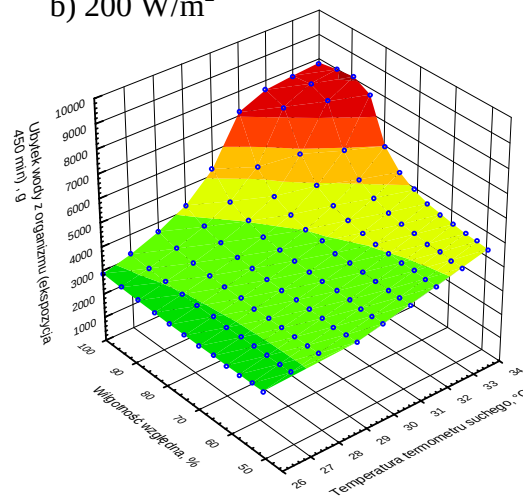
Analiza modelu PHS

Wykonano analizę modelu PHS pod kątem uzyskiwanych wyników modelowania numerycznego czyli wielkości fizjologicznych określających obciążenie cieplne (odwodnienie i temperatura rektalna) w zależności od parametrów powietrza, izolacyjności odzieży oraz wydatku energetycznego. Wyniki analizy przedstawiono na wykresach na rysunkach 23-32.

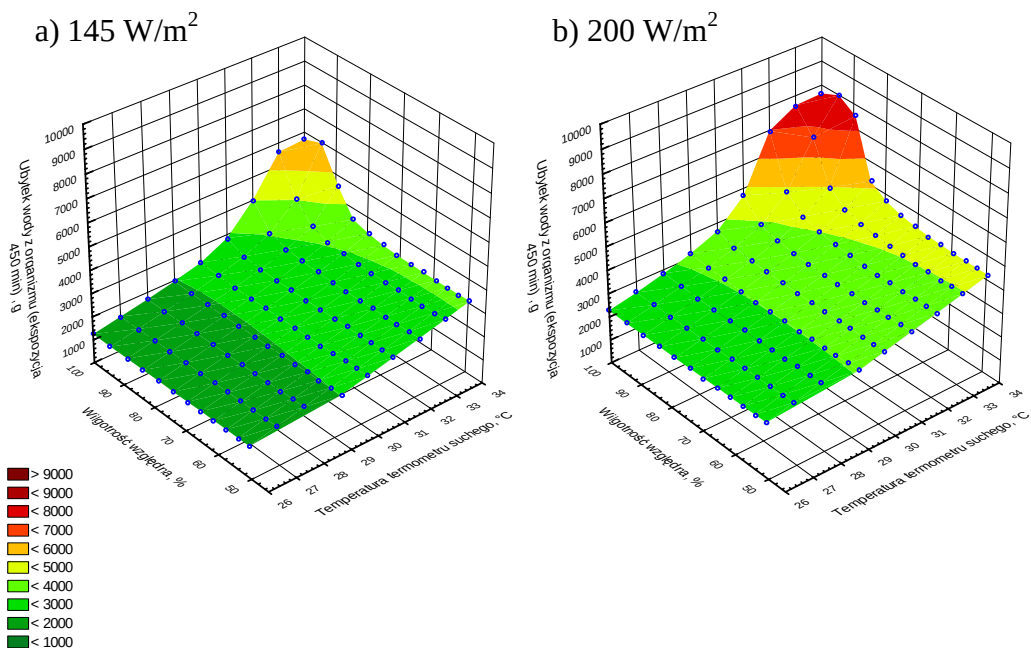
Na rysunkach 23-28 znajdują się wykresy 3D przedstawiające zmiany obliczonego ubytku wody z organizmu człowieka w zależności od zmiennej temperatury otoczenia (26-34°C) oraz wilgotności względnej powietrza (50-100%) dla różnych prędkości powietrza (0,1 m/s, 1 m/s, 3 m/s), izolacyjności odzieży (0,5 clo, 1 clo) oraz wydatku energetycznego (145 W/m², 200 W/m²). Płaszczyzna uzyskana przy tworzeniu wykresu 3D ilustruje w jaki sposób poddane analizie parametry wpływają na uzyskany wynik modelowania numerycznego.

a) 145 W/m^2 b) 200 W/m^2 

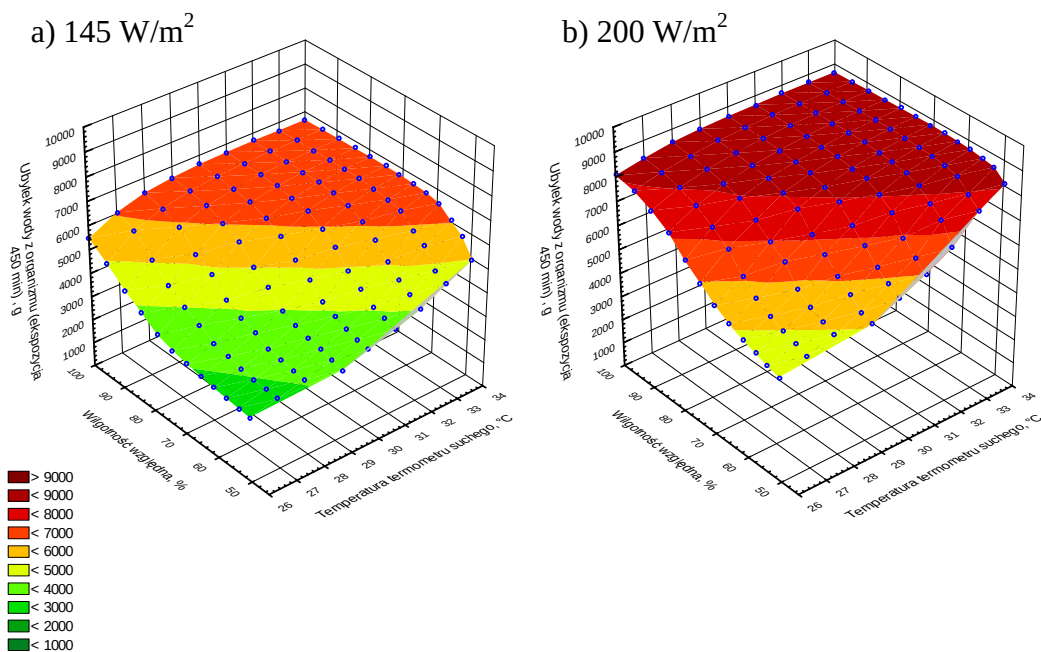
Rys. 23. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

a) 145 W/m^2 b) 200 W/m^2 

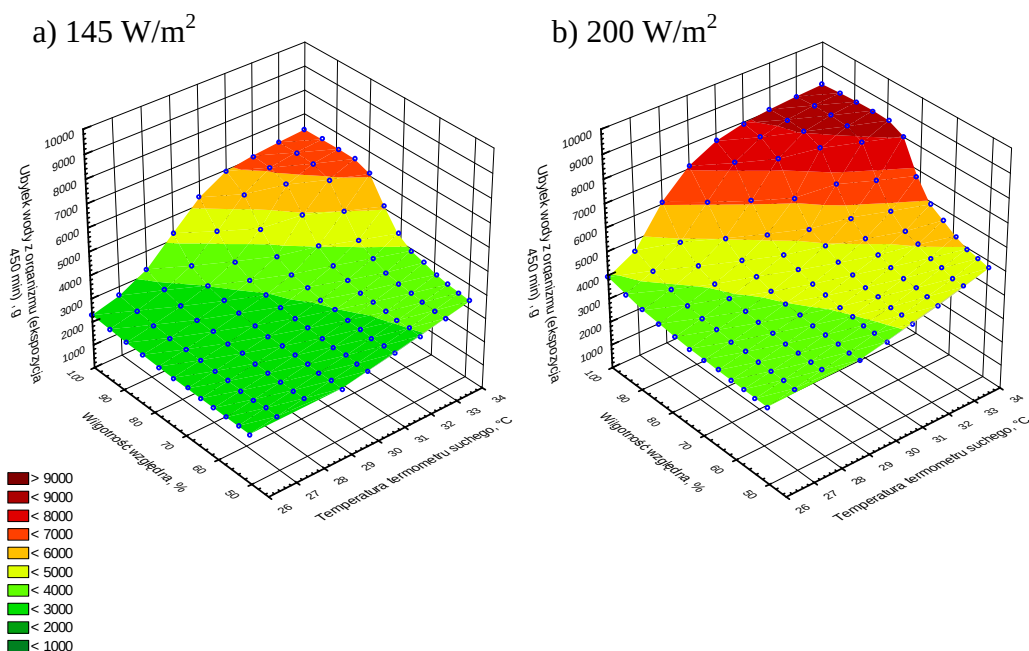
Rys. 24. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



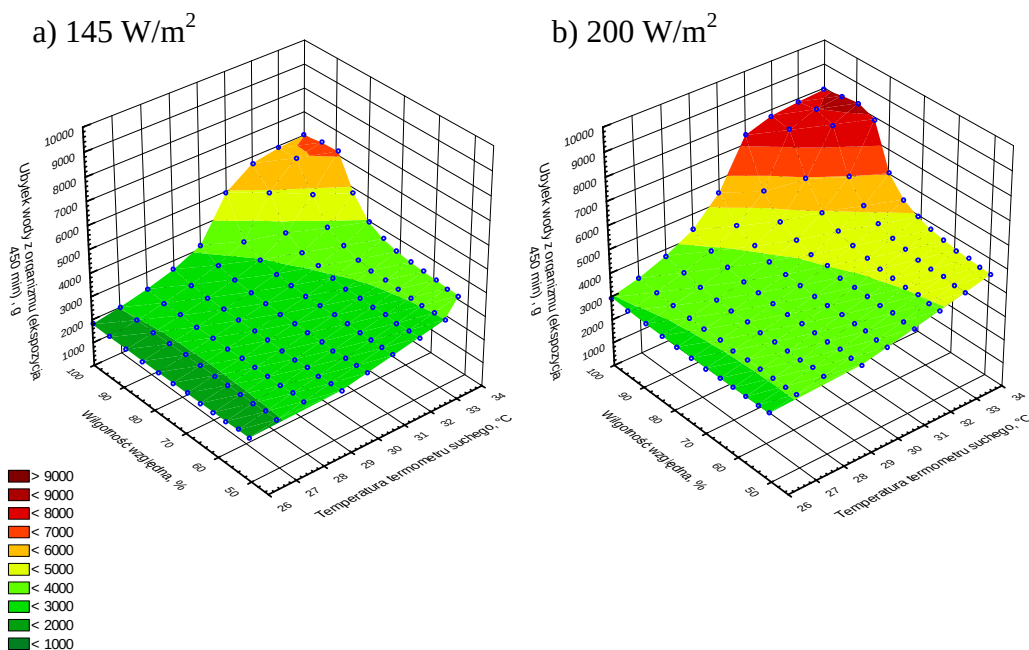
Rys. 25. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży $0,5 \text{ clo}$, wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Rys. 26. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

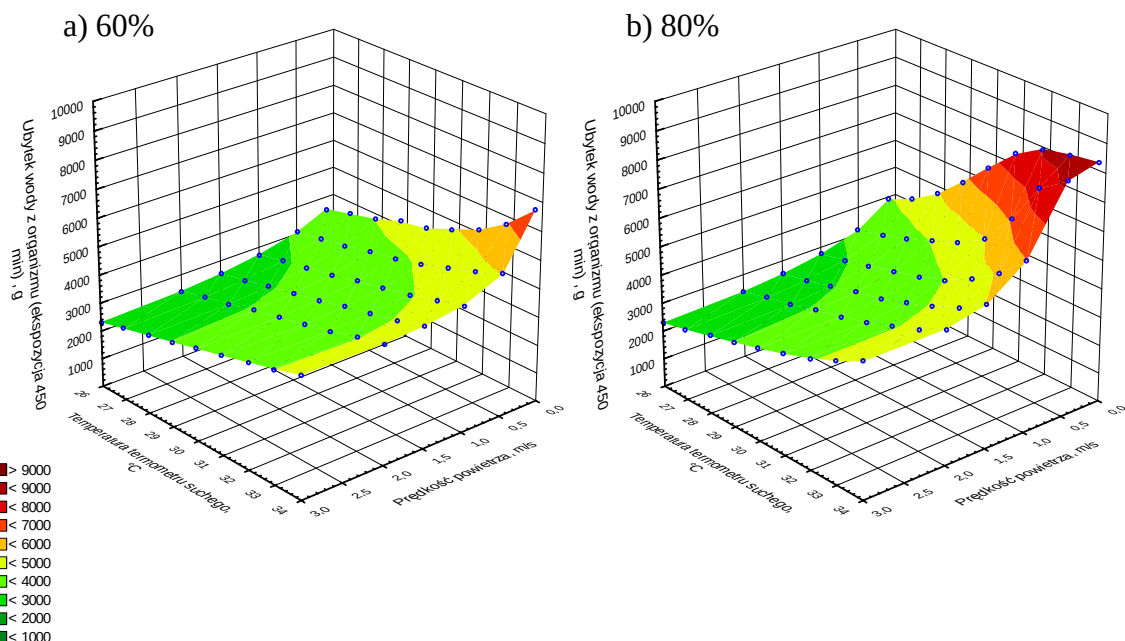


Rys. 27. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

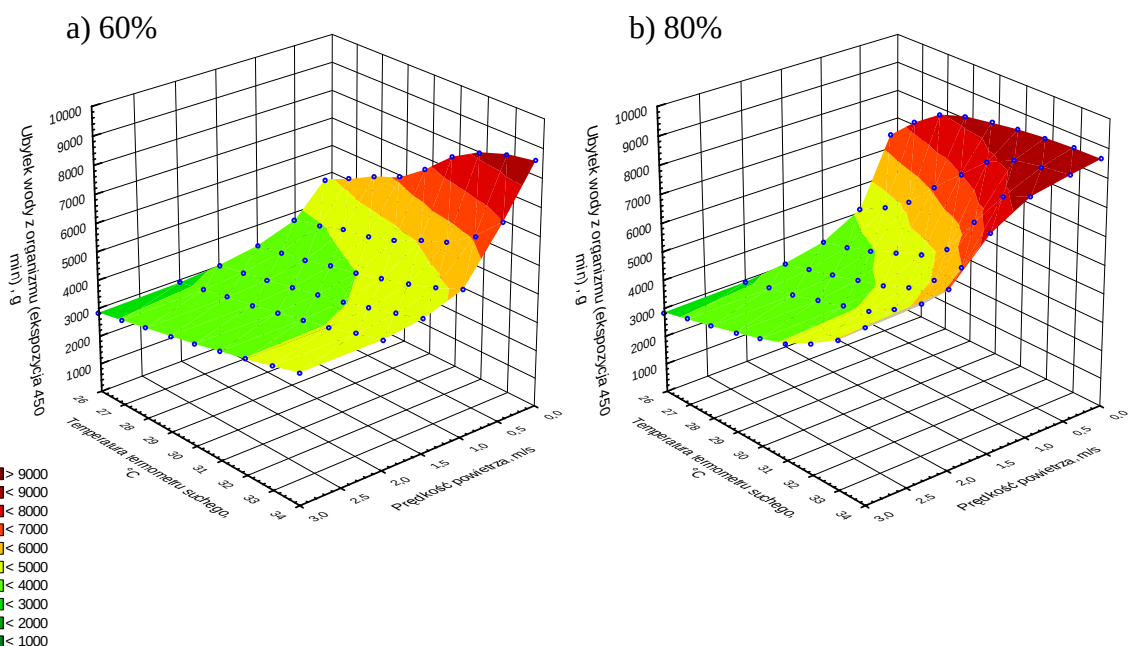


Rys. 28. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i wilgotności względnej dla: a) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $145 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, b) izolacyjności odzieży 1 clo , wydatku energetycznego $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ oraz prędkości powietrza $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Na rysunkach 29 i 30 zilustrowano w jaki sposób wpływa zmiana prędkości powietrza, przy stałym wydatku energetycznym 200 W/m^2 , na wartość obliczanego ubytku wody z organizmu dla zadanych parametrów: temperatura otoczenia ($26\text{--}34^\circ\text{C}$), izolacyjność odzieży ($0,5 \text{ clo}$, 1 clo) oraz wilgotności (60% i 80%)



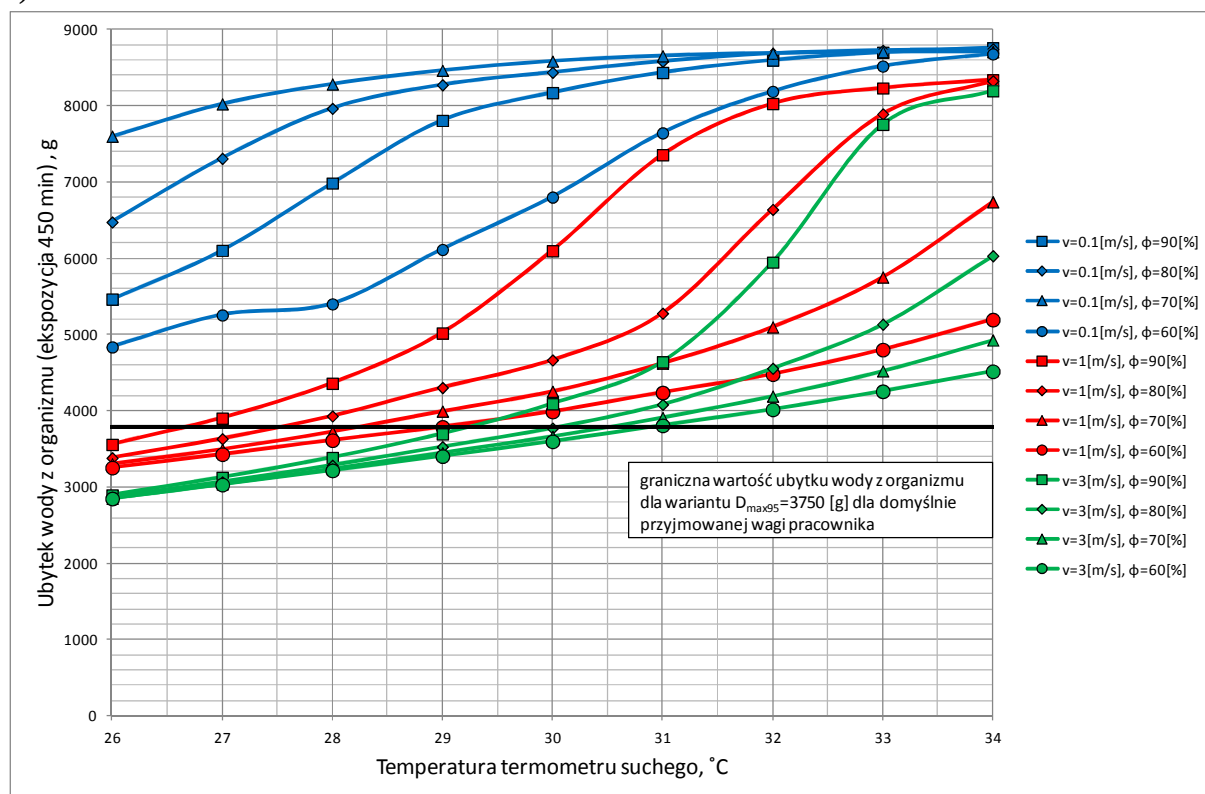
Rys. 29. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i prędkości powietrza dla: a) izolacyjności odzieży 0,5 *clo*, wydatku energetycznego $200 \frac{W}{m^2}$ oraz wilgotności względnej 60%, b) izolacyjności odzieży 0,5 *clo*, wydatku energetycznego $200 \frac{W}{m^2}$ oraz wilgotności względnej 80%.



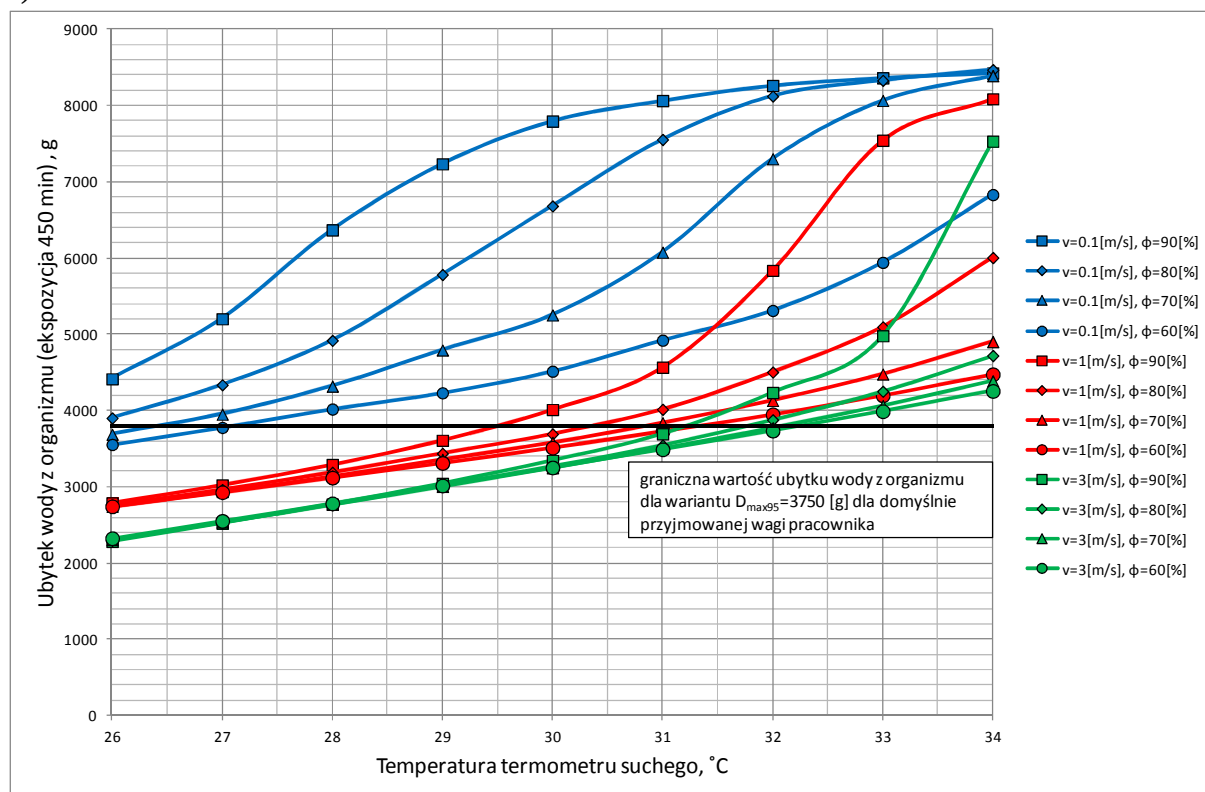
Rys. 30. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w zależności od temperatury powietrza i prędkości powietrza dla: a) izolacyjności odzieży 1 *clo*, wydatku energetycznego $200 \frac{W}{m^2}$ oraz wilgotności względnej 60%, b) izolacyjności odzieży 1 *clo*, wydatku energetycznego $200 \frac{W}{m^2}$ oraz wilgotności względnej 80%.

Na rysunkach 31 i 32 przedstawiono wykresy 2D ilustrujące zmianę parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne organizmu, takich jak ubytek wody z organizmu (rysunek 31) oraz temperatura rektalna (rysunek 32) w zależności od określonych parametrów otoczenia oraz parametrów dotyczących człowieka. Następujące parametry były brane pod uwagę: temperatura otoczenia (26-34°C), wilgotność względna (60%, 70%, 80%, 90%), prędkość powietrza (0,1 m/s, 1 m/s, 3 m/s), wydatek energetyczny $200 \frac{W}{m^2}$

a)

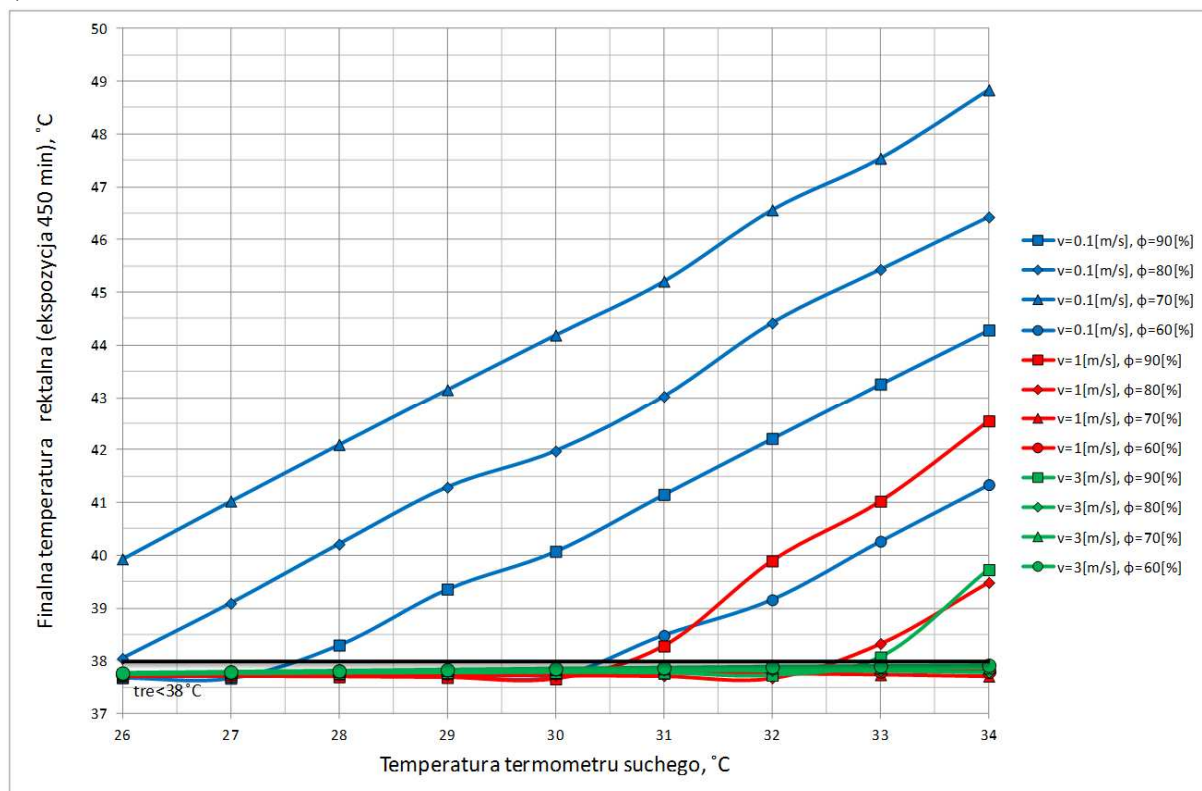


b)

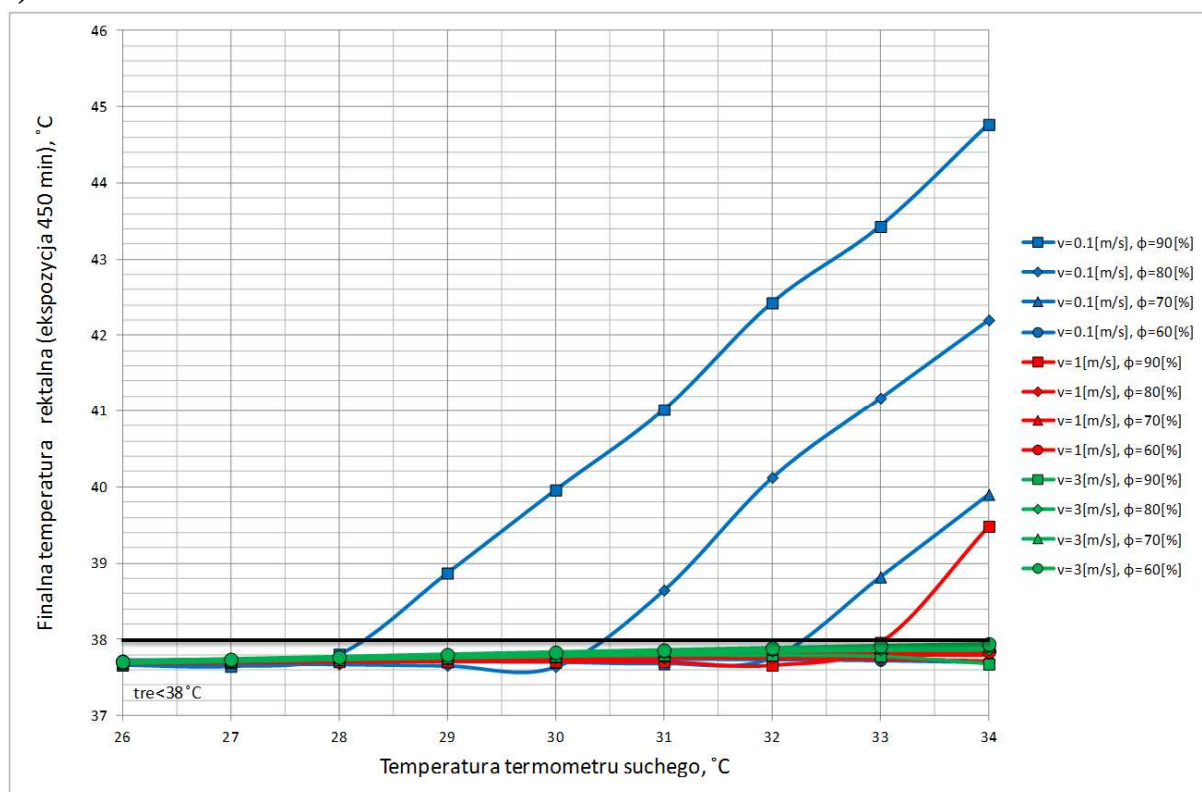


Rys. 31. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury powietrza dla: a) izolacyjność odzieży 1 clo, wydatku energetycznego 200 W/m^2 oraz dla zmiennych prędkości powietrza i wilgotności względnych b) izolacyjność odzieży 0,5 clo, wydatku energetycznego 200 W/m^2 oraz dla zmiennych prędkości powietrza i wilgotności względnych

a)



b)



Rys. 32. . Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury powietrza dla: a) izolacyjność odzieży 1 clo, wydatku energetycznego 200 W/m² oraz dla zmiennych prędkości powietrza i wilgotności względnych b) izolacyjność odzieży 0,5 clo, wydatku energetycznego 200 W/m² oraz dla zmiennych prędkości powietrza i wilgotności względnych

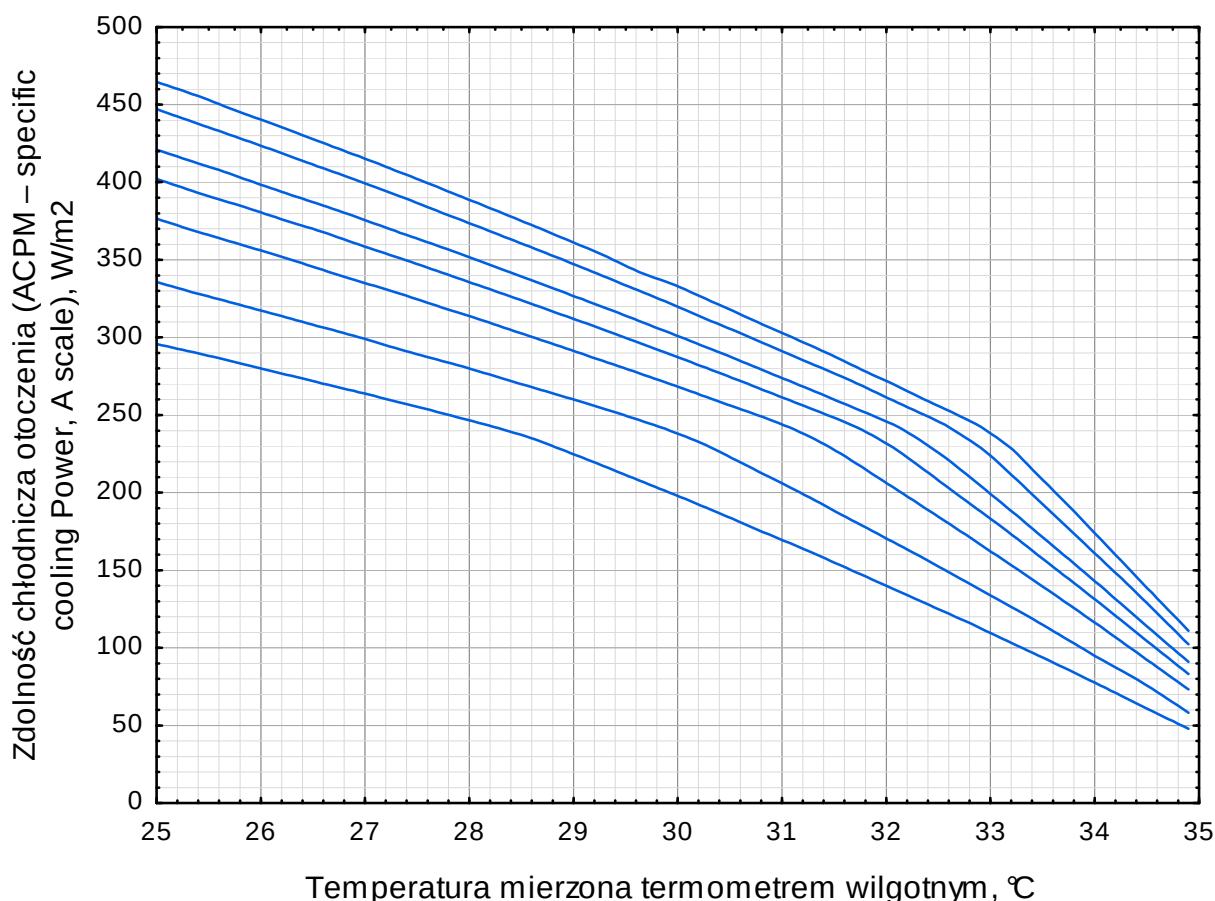
Zdolność chłodnicza otoczenia

Specific cooling power, A scale - ACPA

Pierwotna koncepcja zdolności chłodniczej otoczenia powstała na podstawie pionierskich prac naukowych prowadzonych w ośrodku badawczym Chamber of Mines Research Organization of South Africa (Mitchell i Whillier, 1972; Wyndham, 1974; Stewart i Whillier, 1979; Stewart, 1982). Opracowanie wskaźnika wymagało szczegółowych badań analitycznych, których przedmiotem było wykonanie tysięcy testów w tunelu aerodynamicznym, który posiadał urządzenia do wytworzenia określonych parametrów środowiska. Model termoregulacji został opracowany na podstawie teorii bilansu cieplnego organizmu i został ograniczony do gorących i wilgotnych warunków panujących w głębokich południowo afrykańskich kopalniach złota. W tych warunkach wymiana ciepła w drogach oddechowych jest stosunkowo niewielka i została pominięta. Wykonano także dalsze ograniczenia dla szczególnych warunków mikroklimatu, w których pracownik miał całkowicie zwilżoną skórę od potu oraz nie posiadał ubrania. Model ten także nie przewiduje wpływu wymiany ciepła drogą promieniowania i posiada uproszczenia odnośnie stałej wartości temperatury skóry. Obliczenia wykonywano dla następujących warunków:

- $t_s = t_r = t_w + 2^\circ\text{C}$
- $P = 100 \text{ kPa}$
- temperatura mierzona termometrem wilgotnym w zakresie $25 \div 35^\circ\text{C}$

Zdolność chłodnicza otoczenia opracowana była dla ludzi zaaklimatyzowanych (skala A) i dla ludzi niezaaklimatyzowanych (skala B). Wartości zdolności chłodzenia środowiska ACPA wyznacza się na podstawie nomogramu, który znajduje się na rysunku 33.



Rys. 33. Nomogram do wyznaczania zdolności chłodzenia środowiska (specific cooling power, A scale – ACPA)

Znając temperaturę mierzoną termometrem wilgotnym i prędkość powietrza możemy wyznaczyć zdolność chłodniczą otoczenia ACPA. Zdolność chłodnicza otoczenia wskazuje, jaki strumień ciepła może być odebrany od organizmu ludzkiego przez środowisko o określonych parametrach. Jeśli

wartość zdolności chłodniczej jest większa od wartości ciepła produkowanego w organizmie człowieka w wyniku przemian metabolicznych to istnieje możliwość osiągnięcia równowagi cieplnej. W takim stanie nie dochodzi do akumulacji ciepła w organizmie i nie ma ryzyka przegrzania. Gdy zdolności chłodnicza otoczenia będzie równa wydatkowi energetycznemu to istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego przekroczenia parametrów charakteryzujących obciążenie cieplne organizmu. Niebezpieczeństwo wystąpienia stanu niebezpiecznego oraz przegrzania organizmu może wystąpić, gdy zdolność chłodnicza będzie mniejsza od wartości wytworzonego ciepła w wyniku przemian metabolicznych.

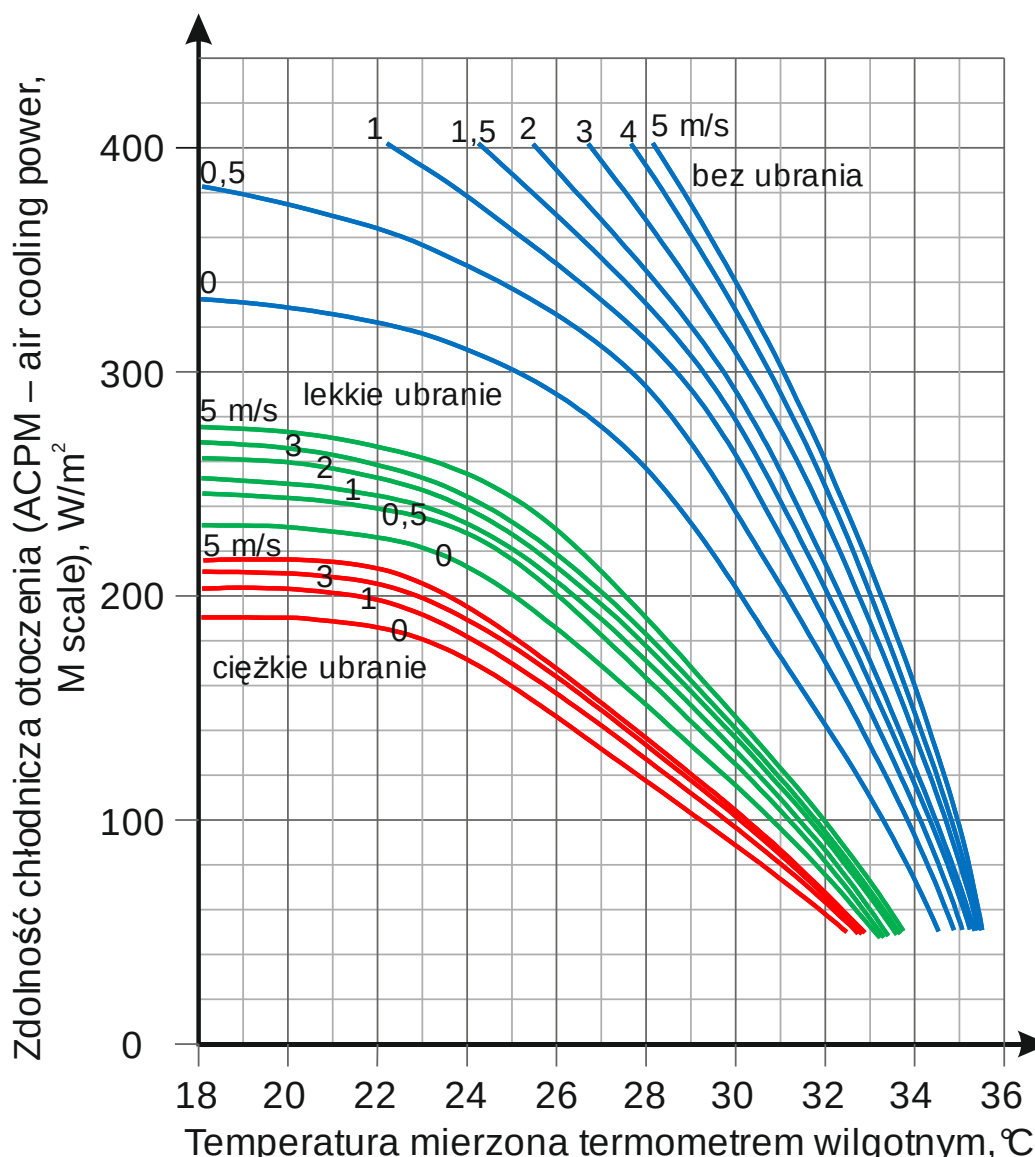
Air cooling power, M scale – ACPM

Zdolność chłodzenia otoczenia ACPM została opracowana przez McPherson'a głównie na podstawie danych z poprzedniej wersji zdolności chłodniczej otoczenia ACPA. Obejmuje ona szerszy zakres parametrów powietrza niż w ACPA, a więc można ją stosować nie tylko w środowiskach gorących. Wskaźnik ten opiera się o teorie bilansu cieplnego organizmu, a obliczenia były wykonywane dla stanu równowagi cieplnej organizmu. W celu opracowania modelu założono, że ciśnienie barometryczne powietrza wynosi 100 kPa, temperatura promieniowania jest równa temperaturze mierzonej termometrem suchym, a temperatura mierzona termometrem wilgotnym jest niższa o 5°C ($t_s = t_r = t_w + 5, ^\circ\text{C}$). Obliczenia wykonano dla różnych prędkości powietrza oraz dla trzech zestawów odzieży. Opis parametrów odzieży znajduje się w tabeli 3.

Tabela 1. Parametry odzieży

	Nie ubrany	Lekka odzież	Ciężka odzież
Opór cieplny odzieży $R_{cl}, m^2 \times ^\circ\text{C}/W$	0	0,085	0,143
Współczynnik uwzględniający wpływ ubrania na wielkość powierzchni wymiany ciepła, f_{cl}	1	1,14	1,28
Efektywność przenikania pary wodnej przez odzież	1	0,45	0,45

Model obliczeniowy opiera się o ograniczenie wartości średniej temperatury w zależności od wartości wytwarzanego ciepła metabolicznego przez człowieka. Ograniczenie to określa że prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury wewnętrznej organizmu $t_c = 40 ^\circ\text{C}$ wynosi jedna milionową. Zdolność chłodniczą otoczenia ACPM można wyznaczyć za pomocą nomogramu który znajduje się na rysunku 34. Do wyznaczenia wskaźnika ACPM potrzeba wyznaczyć wartość temperatury mierzonej termometrem wilgotnym, prędkości powietrza oraz parametry odzieży.



Rys. 34. Nomogram do wyznaczania zdolności chłodzenia środowiska (air cooling power, M scale – ACPM)

Przykłady obliczeniowe na podstawie danych z rzeczywistych wyrobisk

Wyrobiska przygotowawcze

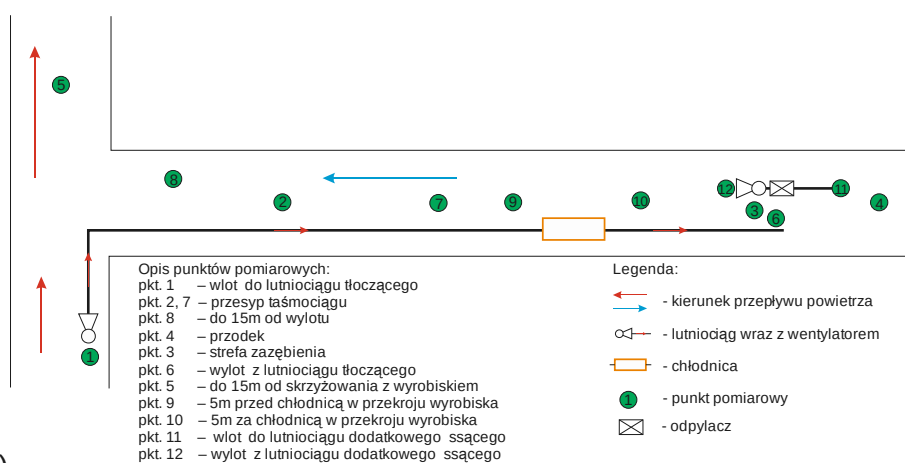
W górnictwie podziemnym najistotniejszymi parametrami powietrza są: temperatura mierzona termometrem suchym (t_s), temperatura mierzona termometrem wilgotnym (t_m), wilgotność względna (φ) oraz prędkość przepływu powietrza (v). Pomiary wykonywano w stacjach pomiarowych w wyrobiskach podziemnych, w 5 kopalniach węgla kamiennego, w 60 chodnikach. Przdki prowadzone były na głębokościach od 425 do 1120 m. Drążone wyrobiska przewietrzane były za pomocą wentylacji kombinowanej (38 wyrobisk), tłoczącej (15 wyrobisk) i ssącej (7 wyrobisk). Na rysunku 35 przedstawiono schemat pomiarowy parametrów powietrza. Wyniki zostały przedstawione etapie nr 9 niniejszego zadania badawczego. Do dalszej analizy wykorzystano wyniki pomiarów ze strefy przodkowej, gdzie występują stanowiska pracy o najtrudniejszych warunkach klimatycznych.

Wyrobiska eksploatacyjne

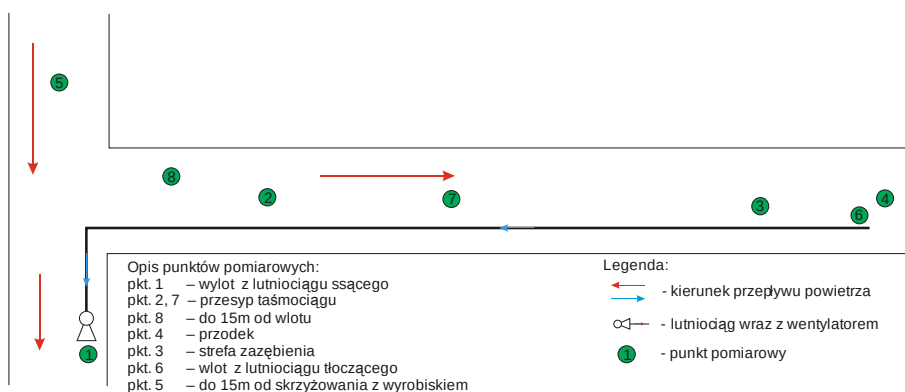
Opracowanie prawidłowej metodyki badań ma kluczowe znaczenie w dokonaniu rzetelnej analizy, opartej na faktycznych zmianach warunków mikroklimatu w wyrobisku ścianowym. W tym celu konieczne było przeprowadzenie pomiarów parametrów klimatycznych na wlocie i wylocie

z wyrobiska ścianowego. Pomiary wykonywano w stacjach pomiarowych w wyrobiskach podziemnych w 5 kopalniach węgla kamiennego w 22 ścianach. Ściany prowadzone były na głębokościach od 650 do 1070 m. W badanych ścianach stosowano systemy przewietrzania „U” i „Y”. Rysunek 36 przedstawia schematy pomiarowe parametrów powietrza. System przewietrzania „U” jest najczęściej spotykany w polskich kopalniach węgla kamiennego, wadą tego rozwiązania jest problem niekorzystnych warunków mikroklimatu. W ścianach przewietrzanych na „U” pomiary wykonywano w chodniku podścianowym, ok 10 m przed wlotem do ściany oraz w chodniku nadścianowym, nie więcej niż 10 m za ścianą (rys. 36a). W systemie przewietrzania „Y” pomiary wykonywano w chodniku podścianowym ok. 10 m przed wlotem do ściany oraz w chodniku odprowadzającym powietrze wzdłuż zrobów za ścianą do 10 m za wylotem ze ściany (rys. 36b) z doświeżaniem chodnikiem nadścianowym. System ten jest korzystniejszy przy zagrożeniu temperaturowym. Stacje pomiarowe odzwierciedlają stanowiska pracy przy skrzyżowaniu ściany z chodnikiem doprowadzającym powietrze oraz przy skrzyżowaniu ściany z chodnikiem wentylacyjnym.

a)

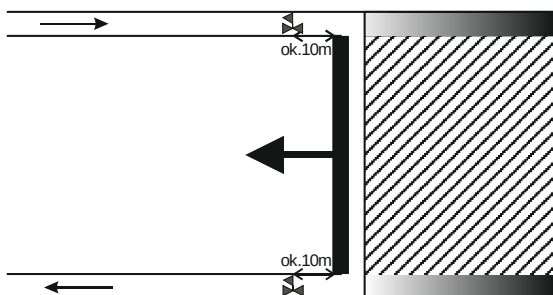


b)

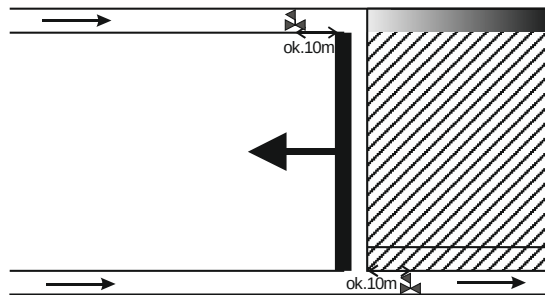


Rys. 35. Schemat rozmieszczenia stacji pomiarowych w wyrobisku: a) wentylacja kombinowana, b) wentylacja ssąca

a)



b)



Rys. 36. Schemat ideowy przewietrzania rejonu eksploatacyjnego systemem a) „U”, b) „Y”

Wykonanie obliczeń modelu PHS

Z uwagi na brak rejestrowanych danych dotyczących pracowników zatrudnionych w analizowanych wyrobiskach, przyjęto założenia odnośnie standardowych parametrów zatrudnionego pracownika. W celu obliczenia pola powierzchni całkowitej skóry zakładamy, że badany pracownik ma 1,8 m wzrostu i waży 75 kg, co odpowiada BMI równego 23,1. Oznacza to prawidłowy stosunek wagi do wzrostu. Na podstawie tak przyjętych danych określa się powierzchnię skóry $A_{du} = 1,94 \text{ m}^2$ i maksymalny ubytek wody $D_{max95} = 3750 \text{ g}$. Wartość maksymalnego ubytku wody odnosi się do warunku odwodnienia o wartości 5% masy ciała. Zakłada się, że pracownik jest zaaklimatyzowany i ma stały dostęp do wody w celu uzupełniania płynów.

Temperatura mierzona termometrem suchym opowiada temperaturze promieniowania otoczenia. Praca wykonywana jest w miejscu, w pozycji stojącej, czyli część powierzchni skóry, która bierze udział w wymianie ciepła przez promieniowanie wynosi $Ar/A_{du} = 0,77$. Dla statycznego wskaźnika przepuszczalności wilgoci przyjmuje się domyślnie wartość $i_{mst} = 0,38$. Z uwagi na to, że w modelu numerycznym bierze się pod uwagę emisyjność ubrania, zakłada się domyślnie wartości współczynników dla człowieka nieposiadającego tego typu odzieży. Wartość współczynnika zakrycia ciała wynosi $A_p = 0,54$, a współczynnik emisyjności odzieży wynosi $F_r = 0,97$ (znikoma emisyjność). Współczynnik charakteryzujący część masy ciała w temperaturze skóry wynosi $\alpha = 0,3$. Czas ekspozycji na warunki klimatu wynosi 450 min z uwagi na przepisy obowiązujące w polskim górnictwie podziemnym [6].

Na podstawie badań wykazano, że temperatura rektalna osoby w stanie spoczynku wynosi $t_{re} = 36,8^\circ\text{C}$. Temperaturę średnią skóry domyślnie zakładamy $t_{sk} = 34,1^\circ\text{C}$. Od tych wartości wejściowych temperatur rozpoczyna się modelowanie numeryczne.

Do głównych parametrów warunkujących obciążenie cieplne należą wydatek energetyczny oraz izolacyjność odzieży. Dla zobrazowania jaki wpływ mają te parametry na obciążenie cieplne człowieka wykonano obliczenia dla dwóch różnych wartości izolacyjności odzieży tj. 0,5 clo i 1 clo oraz dla czterech wartości wydatków energetycznych tj. 115, 145, 175, 200 W/m². Wartości wydatków energetycznych odpowiadają kolejno klasie aktywności: lekka, umiarkowana, umiarkowanie ciężka i ciężka.

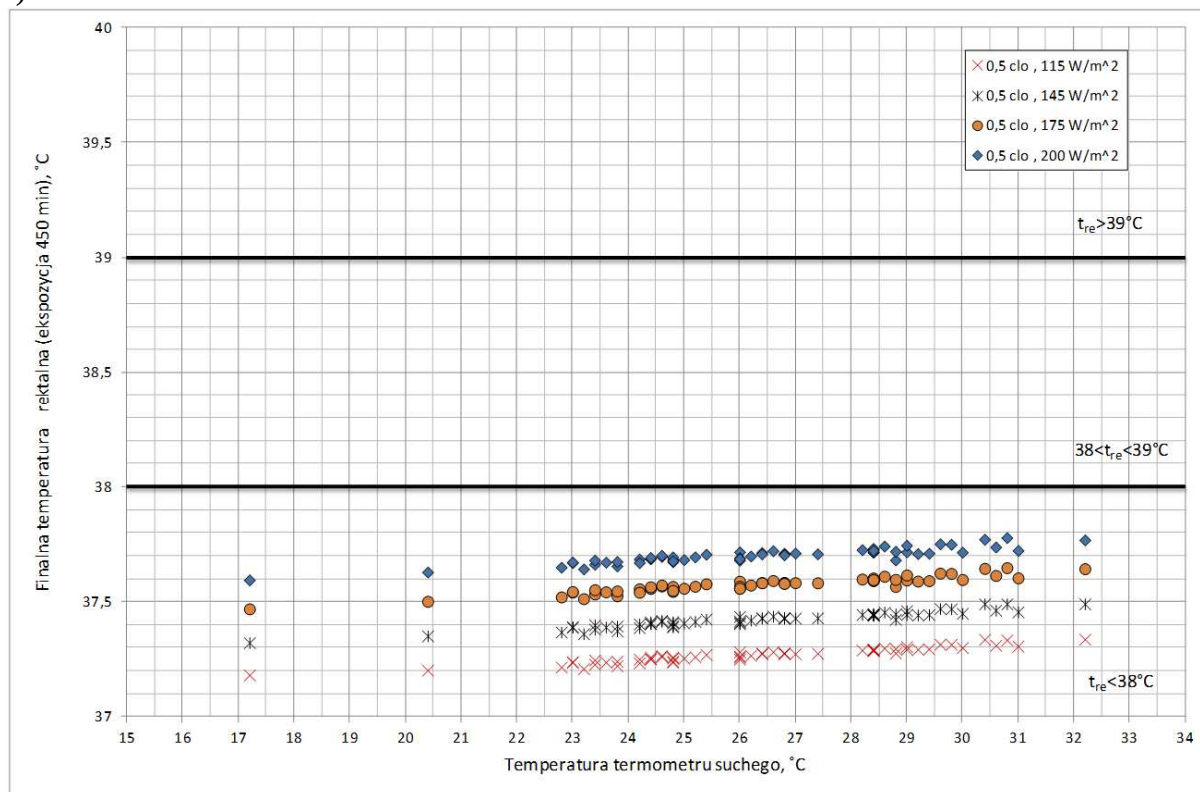
Poniżej pokazano wyniki obliczeń dla wyrobisk przygotowawczych i eksploatacyjnych w postaci wykresów (rys. 37 ÷ 40), które obrazują obciążenie cieplne organizmu podczas 450 minutowej ekspozycji na zadane warunki mikroklimatu. Miarą tego obciążenia cieplnego jest ilość utraty wody z organizmu oraz końcowa temperatura rektalna. Każdy wykres składa się z dwóch rysunków przedstawiających wyniki modelowania numerycznego w strefie przodkowej (rys. 37a ÷ 40a) oraz na wylocie ze ściany (rys. 37b ÷ 40b).

Temperatura rektalna według założeń normy nie powinna przekroczyć 38°C. Dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz różnych wydatków energetycznych pracowników w badanych wyrobiskach warunek ten został spełniony. Na rysunkach 37 i 38 możemy zaobserwować stały, niewielki wzrost temperatury rektalnej w zależności od wartości temperatury mierzonej termometrem suchym. Jeśli człowiek w takich warunkach posiadałby odzież o izolacyjności 1 clo i wykonywał umiarkowanie

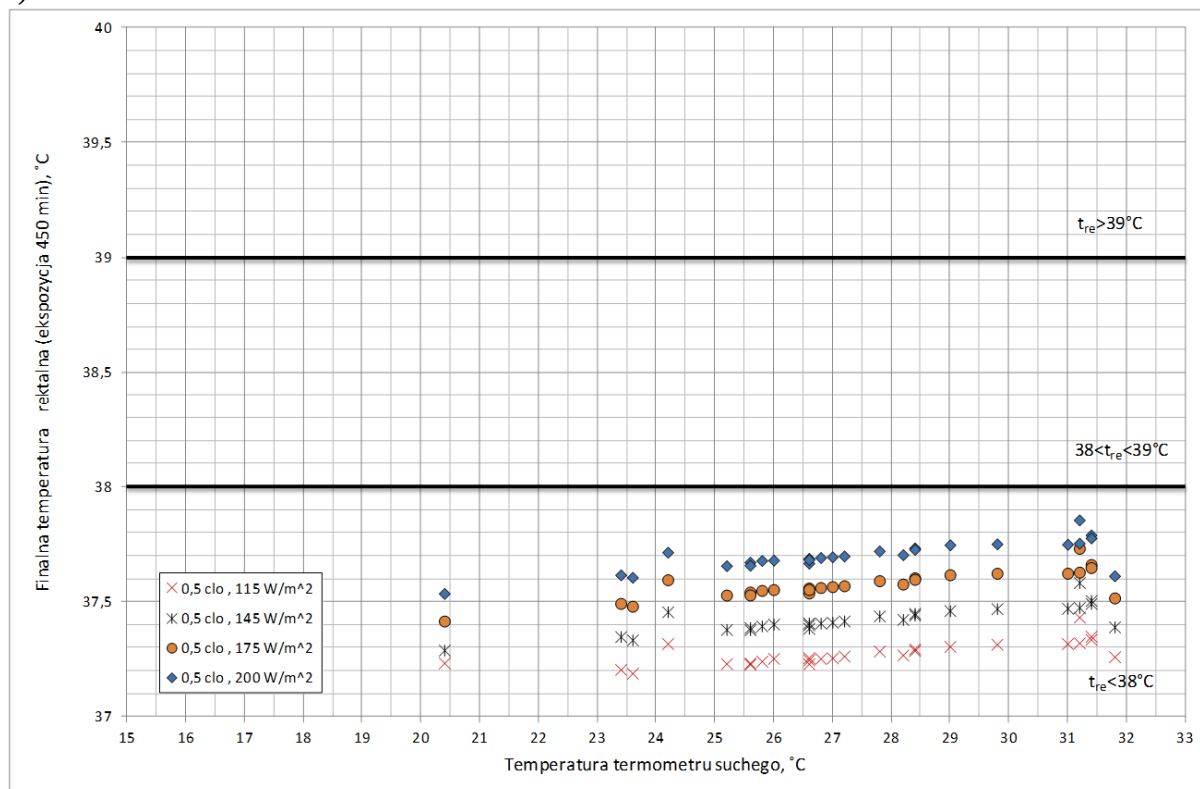
ciężką lub ciężką pracą może dojść do przekroczenia granicznej wartości 38°C . Taki stan może wystąpić w środowisku o wysokiej wilgotności oraz małym przepływie powietrza. Według danych literaturowych, jeśli spełni się dodatkowe wymagania dopuszcza się pracę w zakresie $38 < t_{re} < 39^{\circ}\text{C}$, ale pracownik musi być zaaklimatyzowany i posiadać pełną sprawność układu termoregulacji.

Drugim parametrem określającym obciążenie cieplne jest ilość utraty wody z organizmu. Na rysunkach 39 ÷ 40 pokazano wyniki obliczeń dla analizowanych warunków mikroklimatu w wyrobiskach przygotowawczych i eksploatacyjnych (wyloty ze ścian). W warunkach o wysokiej wilgotności oraz wysokiej temperaturze powietrza odzież stanowi barierę na drodze wymiany ciepła między ciałem człowieka a otoczeniem. Człowiek wykonujący pracę z dużym wydatkiem energetycznym utraci więcej wody z organizmu w środowisku o bardzo trudnych warunkach mikroklimatu niż człowiek, który pracowałby w łagodniejszym mikroklimacie. Taką zależność możemy zaobserwować w formie bardziej rozproszonych punktów w porównaniu do niższej izolacyjności odzieży (rysunki 39 i 40). Obliczenia wykazały, że dla wydatku energetycznego pracowników 200 W/m^2 w niektórych wyrobiskach mogłaby być przekroczona granica $D_{max95} = 3750 \text{ g}$ ubytku wody jeśli pracownik posiadałby odzież o izolacyjności $0,5 \text{ clo}$ (rysunek 39). Wraz ze wzrostem izolacyjności odzieży zwiększa się liczba analizowanych wyrobisk, w których mogłoby dojść do przekroczenia granicznej wartości ubytku wody z organizmu przy różnej ciężkości pracy (rysunek 40).

a)

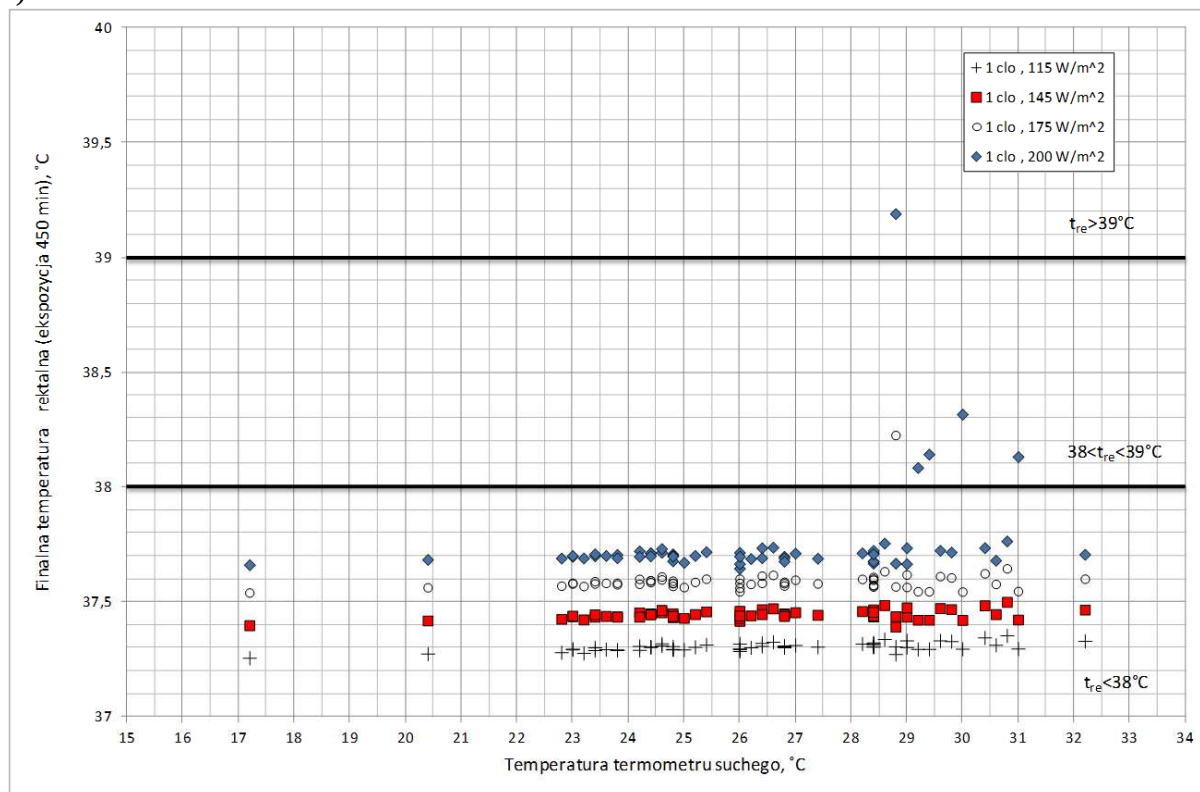


b)

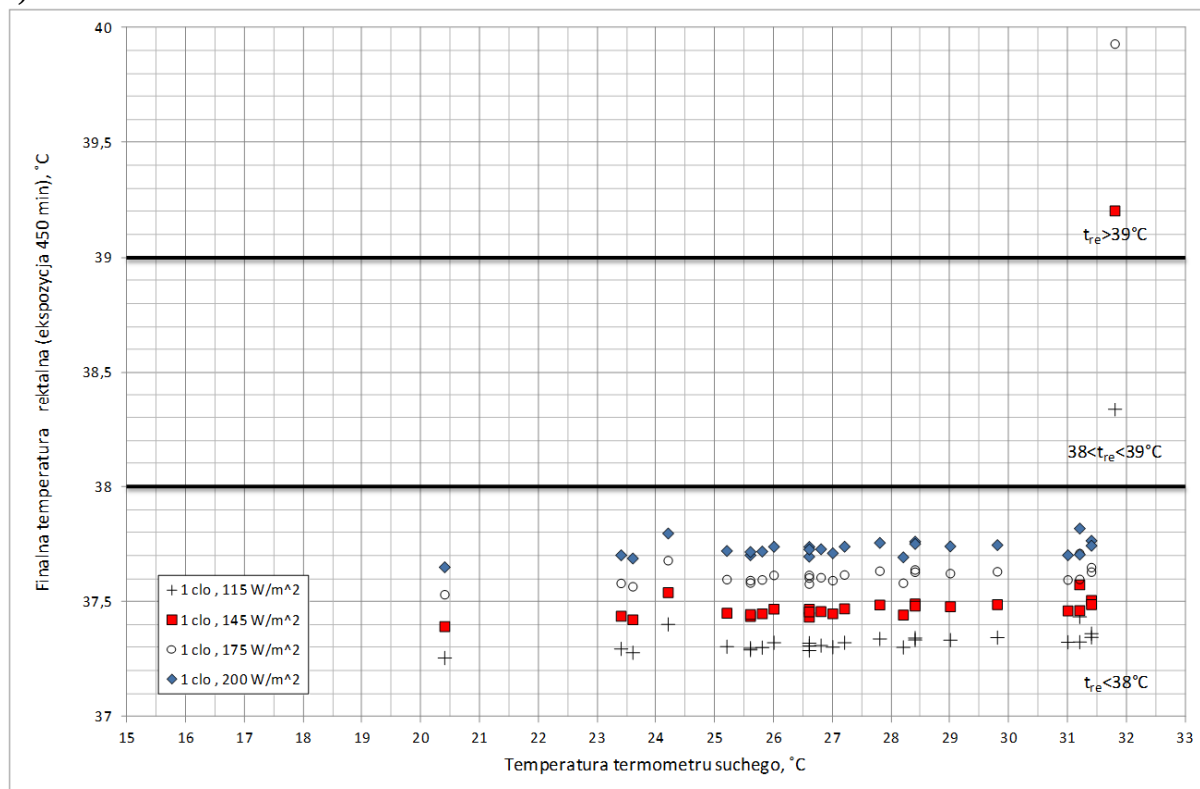


Rys. 37. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

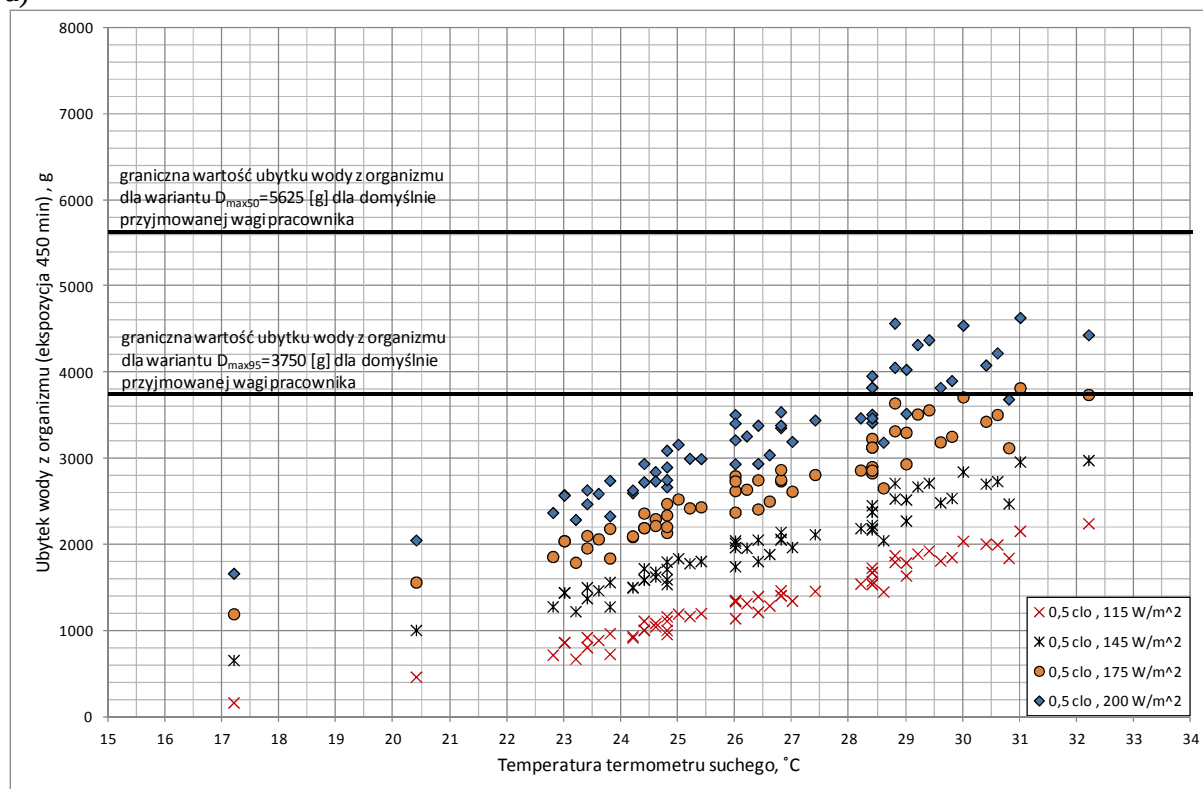


b)

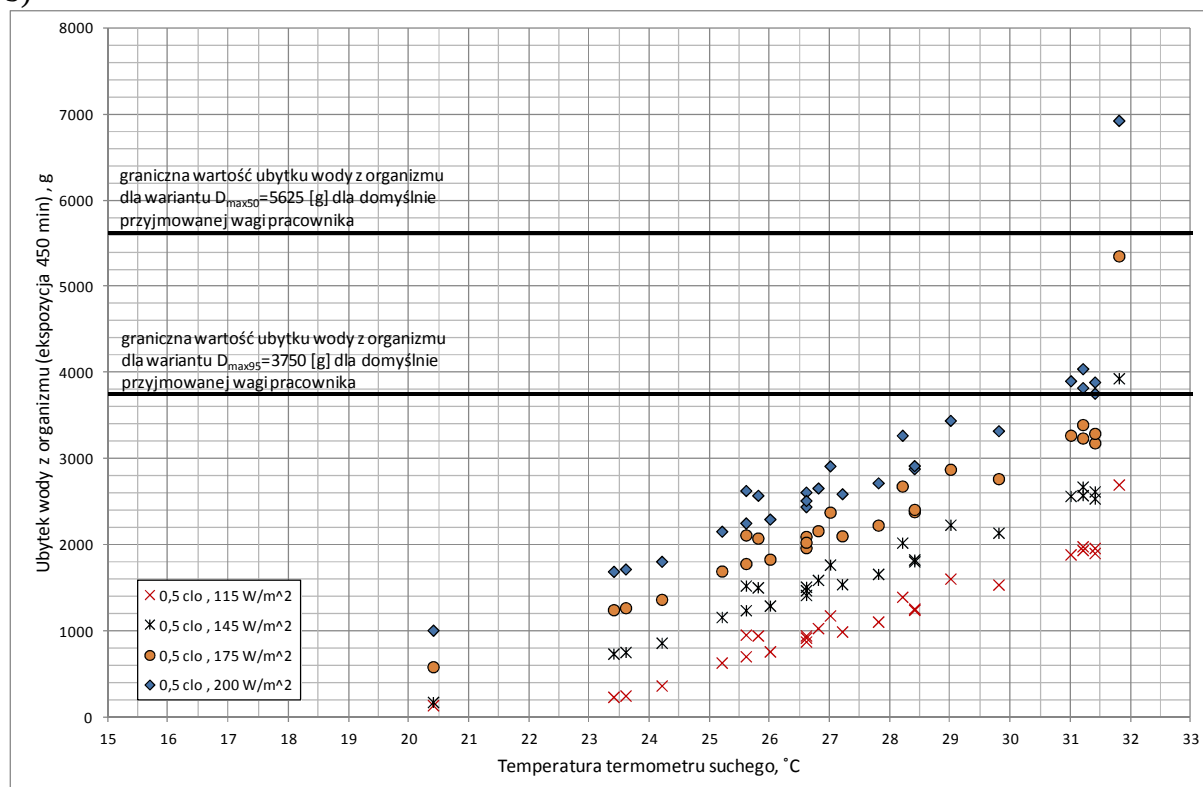


Rys. 38. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

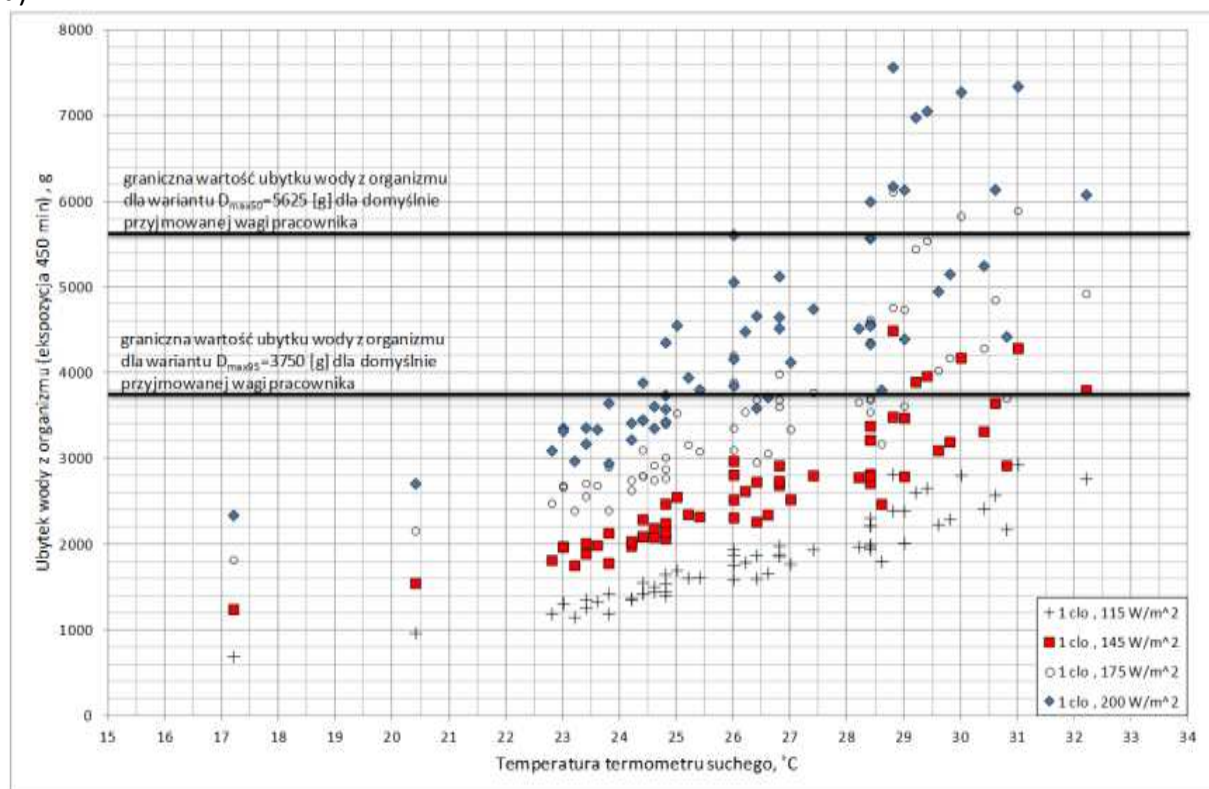


b)

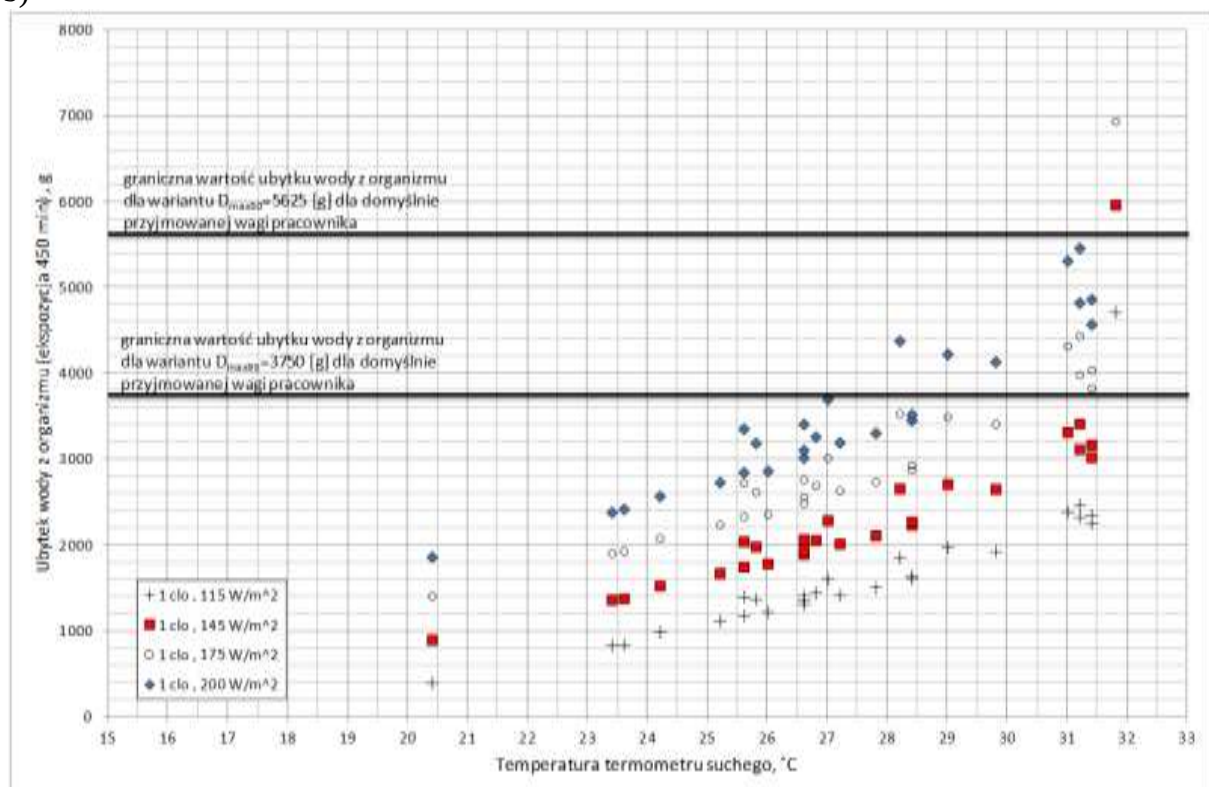


Rys. 39. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)



b)

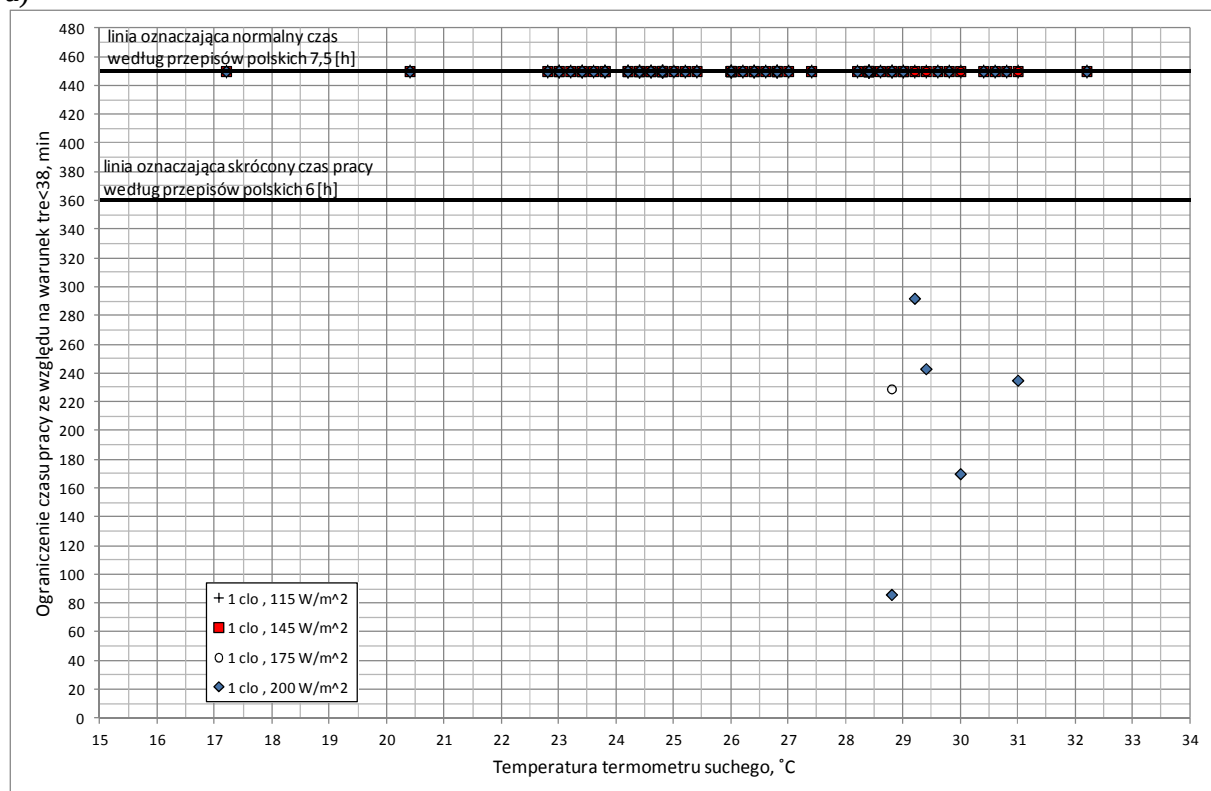


Rys. 40. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

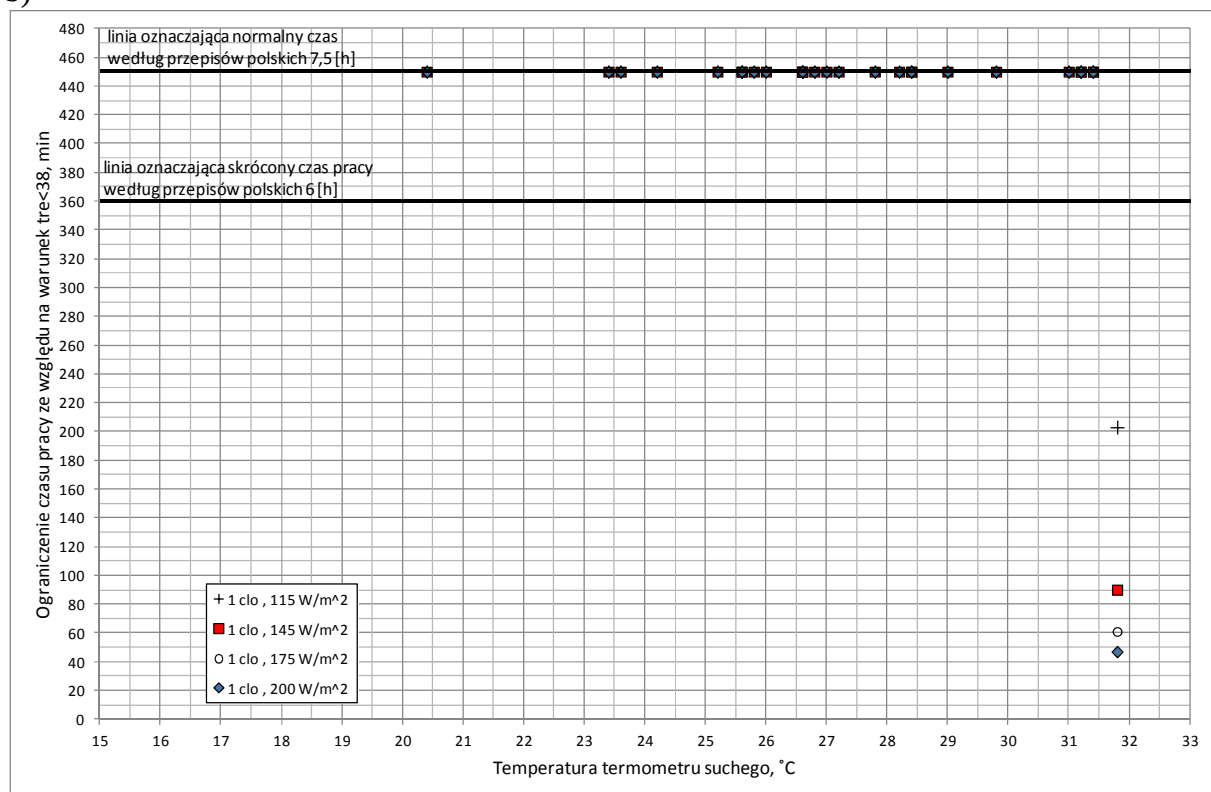
Modelowanie numeryczne pozwala na określenie maksymalnego czasu ekspozycji pracownika na zadane parametry środowiska w zależności od ustalonych warunków. Zakłada się, że temperatura wewnętrzna pracownika nie powinna przekraczać 38°C. W wyniku przeprowadzonych obliczeń okazuje się, że w przypadku, gdy izolacyjność odzieży wynosiłaby 1 clo a wydatek energetyczny wynosi 200 W/m² to w kilku analizowanych wyrobiskach czas pracy powinien ulec skróceniu (rys. 41).

Następnym warunkiem jest ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu odpowiadający maksymalnej utracie masy ciała 7,5%. Warunek ten stosuje się dla pracowników zaaklimatyzowanych o sprawnym układzie termoregulacyjnym, który potwierdzony jest dodatkowymi badaniami lekarskimi. Jeżeli pracownik posiadałby izolacyjność odzieży 1 clo to tylko w jednym przypadku analizowanych wyrobisk utrata masy ciała byłaby większa od 7,5% (rys. 42b). Na rysunku 43 pokazano wykres obrazujący przypadek, gdy mamy do czynienia z pracownikiem o izolacyjności odzieży 1 clo wykonującym pracę o różnych wydatkach energetycznych w analizowanych wyrobiskach (warunkach mikroklimatu). Z rysunku 43 wynika, że skrócenie czasu pracy wystąpiłoby w trzech przypadkach dla pracy o wydatku energetycznym 175 W/m² i w kilkunastu przypadkach dla pracy o wydatku energetycznym wynoszącym 200 W/m²). W przypadku izolacyjności odzieży poniżej 0,5 clo mogło by dojść do skrócenia tylko w jednym wyrobisku na wylocie ze ścian.

a)

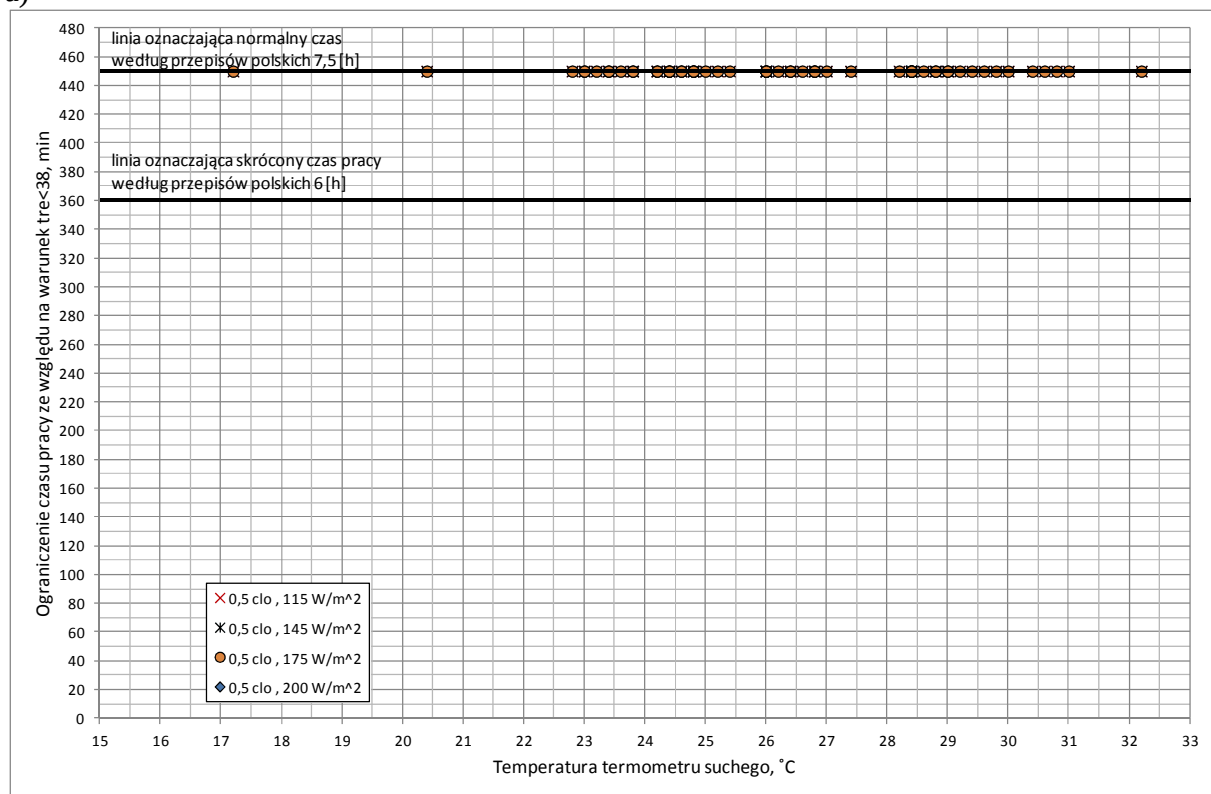


b)

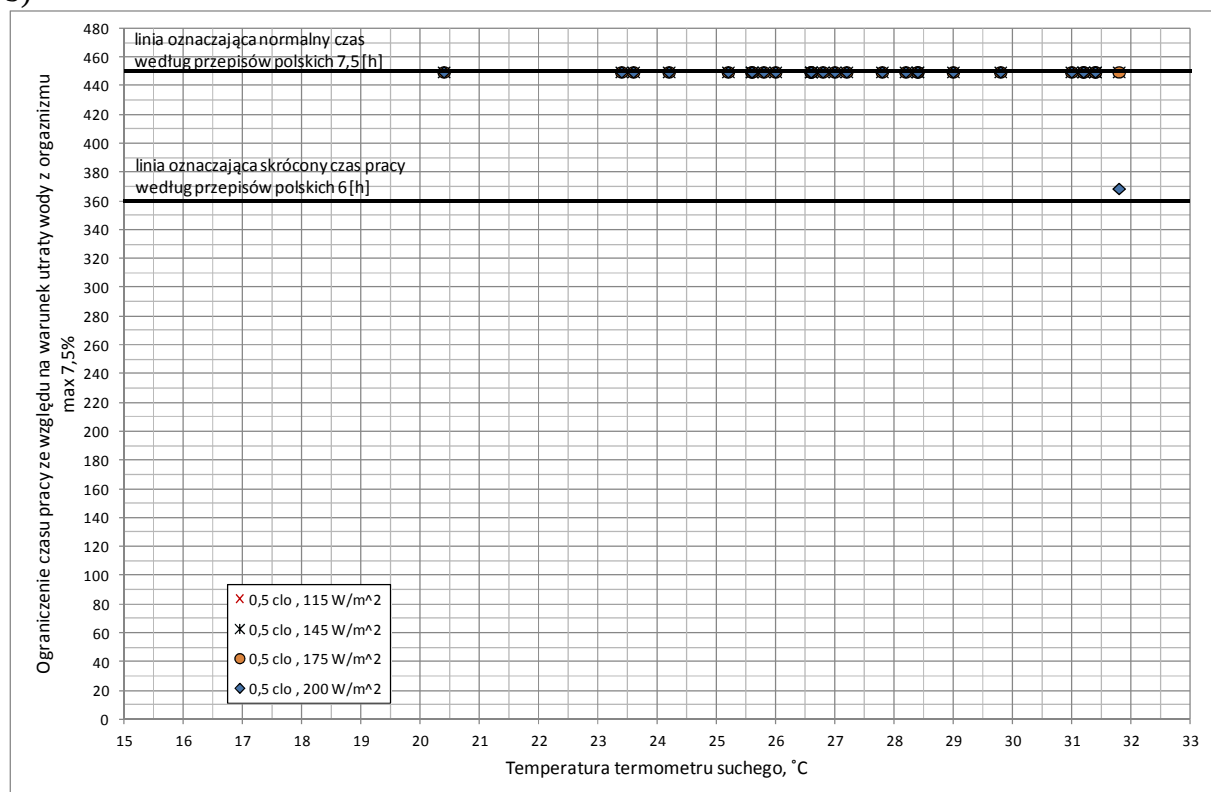


Rys. 41. Ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek $T_{re} < 38$ w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

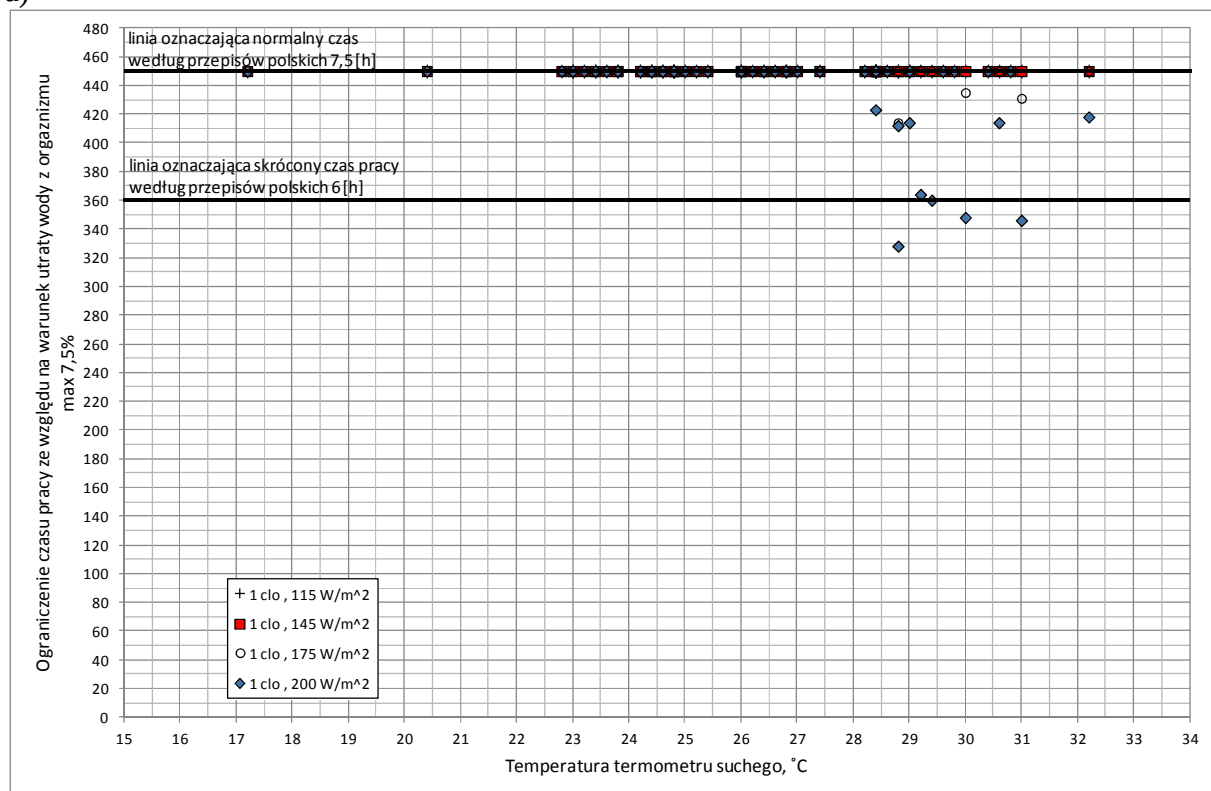


b)

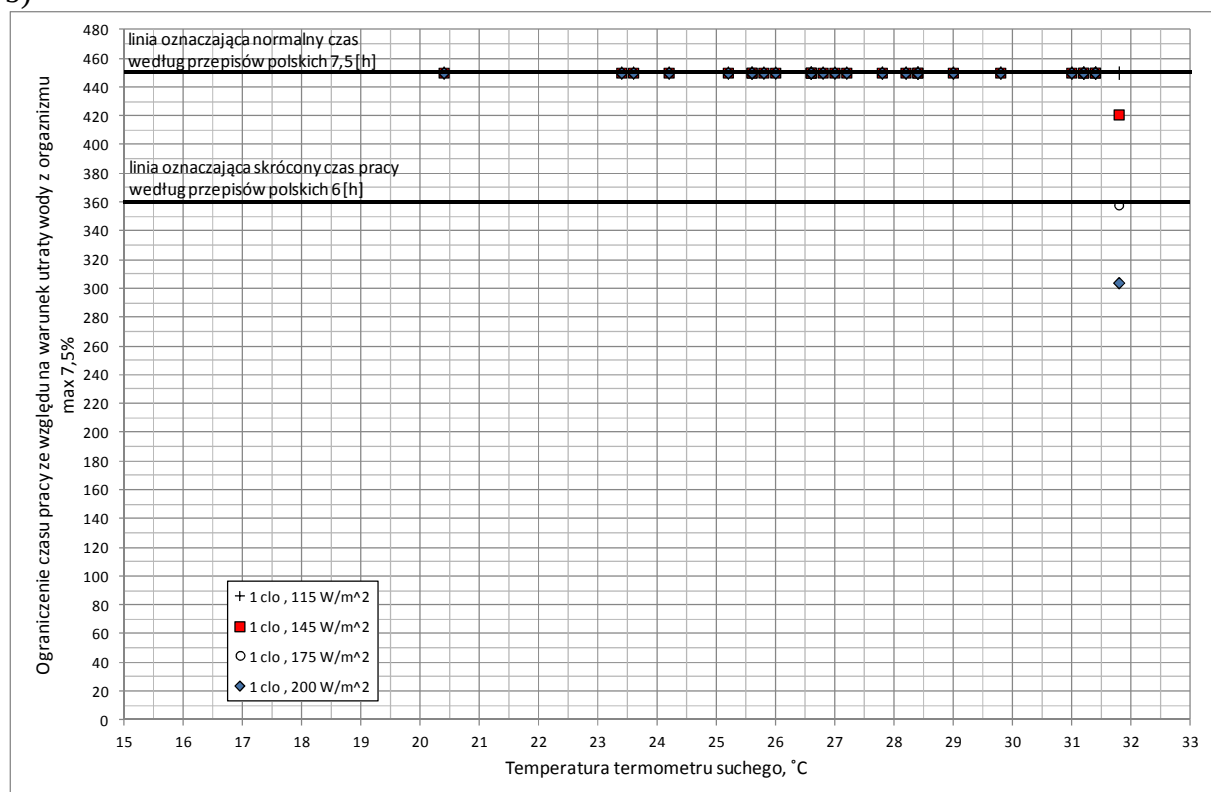


Rys. 42. Ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu maks. 7,5% masy ciała w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)



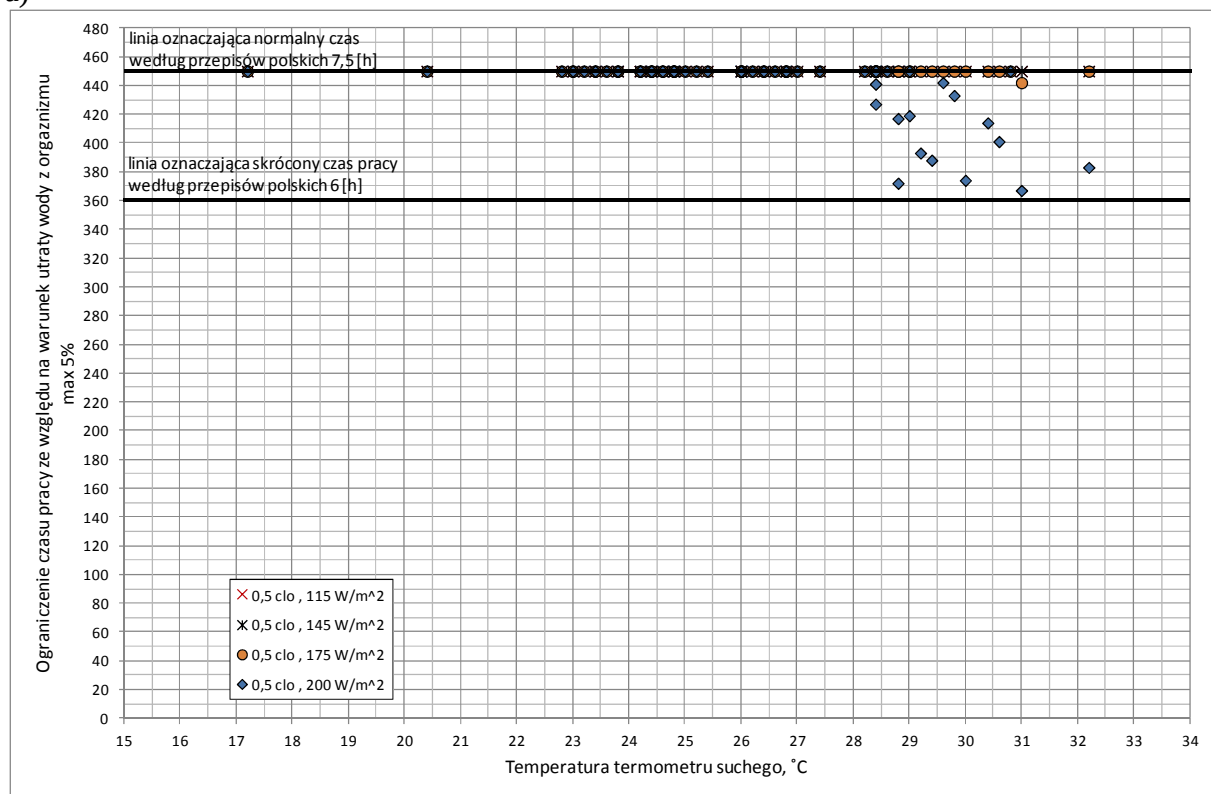
b)



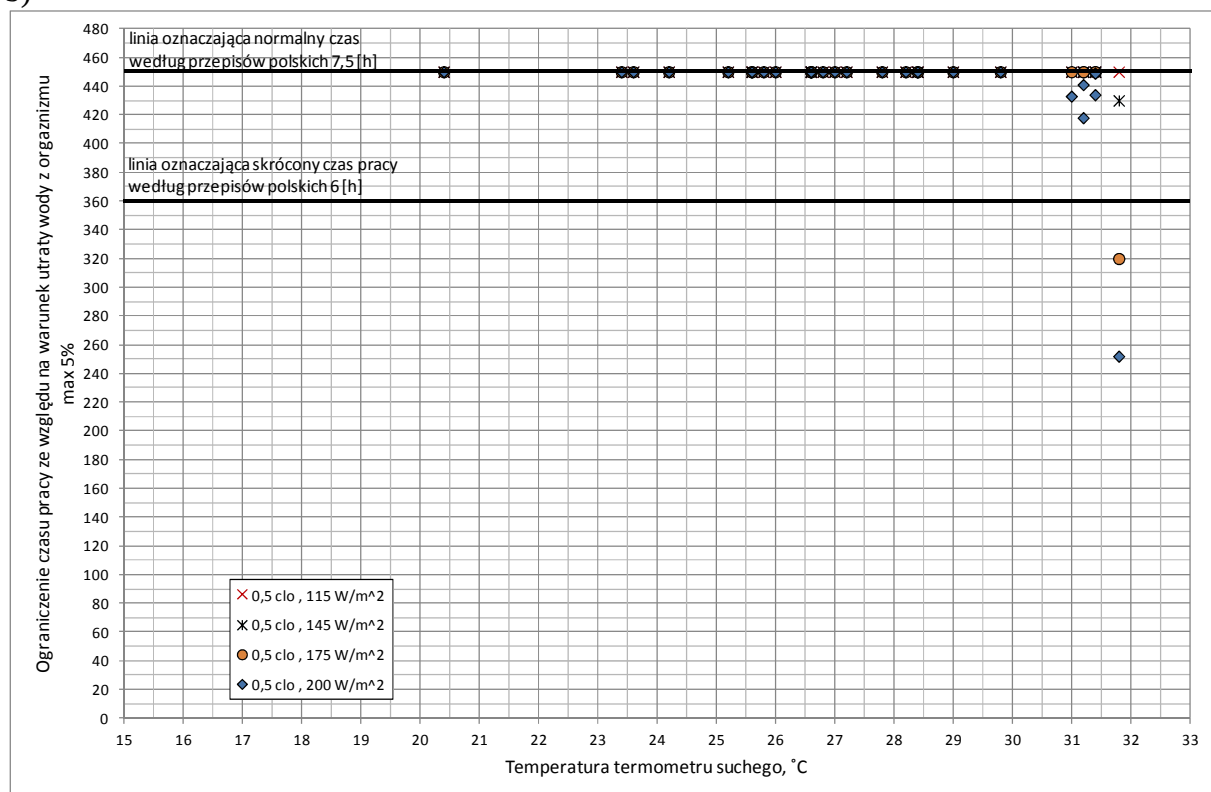
Rys. 43. Ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu maks. 7,5% masy ciała w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

Następnym warunkiem jest ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu (maks. 5% masy ciała). Warunek ten stosujemy, jeśli pracownik przeszedł podstawowe badania i jest zaaklimatyzowany. Poniżej znajdują się rysunki przedstawiające ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu odpowiadający utracie maksymalnie 5% masy ciała w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 0,5 clo (rys. 44) i 1 clo (rys. 45) oraz zmiennego wydatku energetycznego. Z rysunku 44 wynika, że dla izolacyjności odzieży 0,5 clo doszłoby do konieczności skrócenia czasu pracy w kilkunastu przypadkach dla ludzi wykonujących pracę o wydatku energetycznym 200 W/m^2 . Odnośnie warunku izolacyjności odzieży 1 clo (rys. 45), to zwiększa się znacząco liczba wyrobisk zaliczonych do skróconego czasu dla różnych wydatków energetycznych. W ponad połowie analizowanych wyrobisk, dla warunku wydatku energetycznego 200 W/m^2 , powinien wtedy obowiązywać skrócony czas pracy.

a)

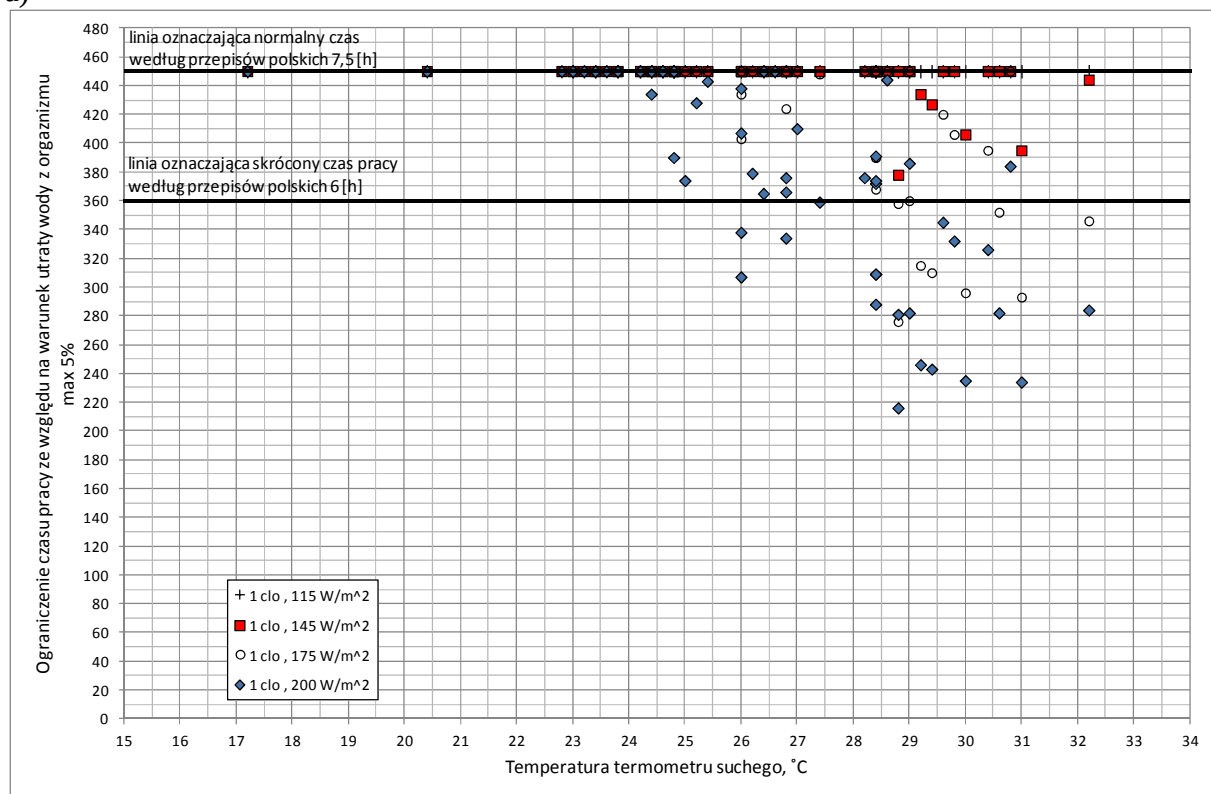


b)

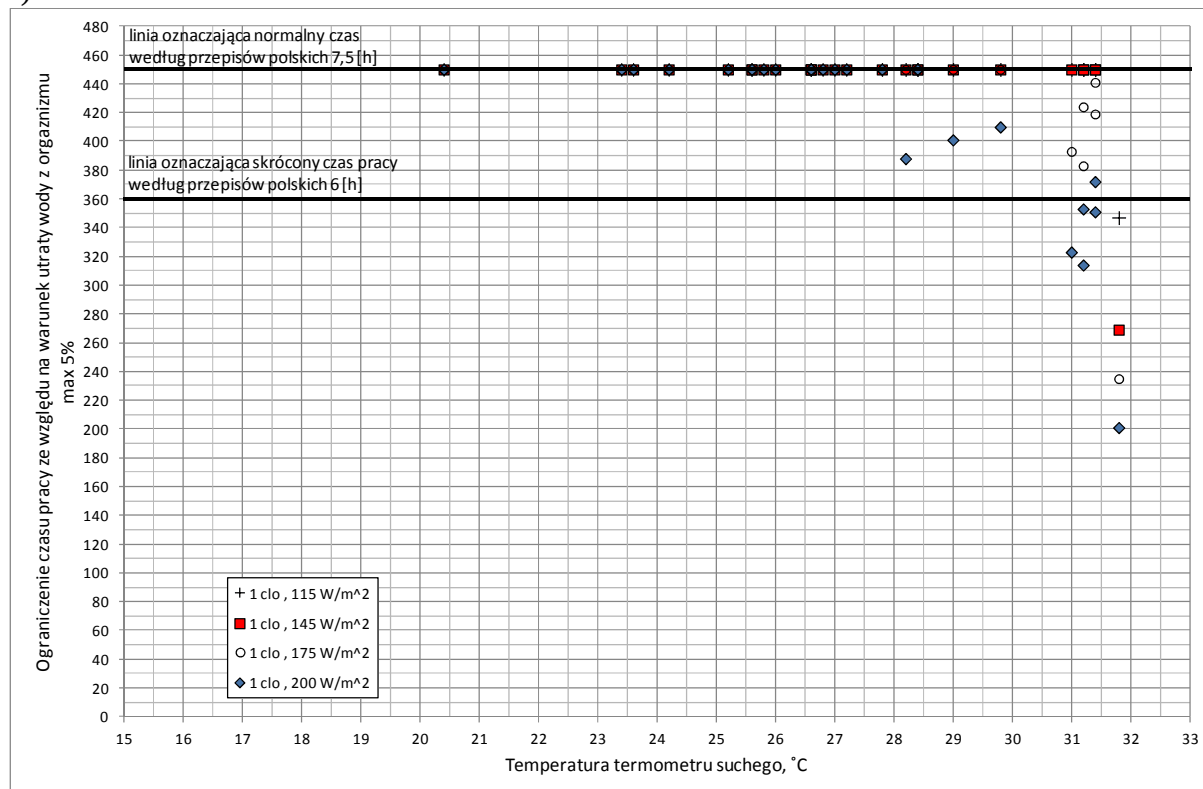


Rys. 44. Ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu maks. 5% masy ciała w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)



b)



Rys. 45. Ograniczenie czasu pracy ze względu na warunek utraty wody z organizmu maks. 5% masy ciała w funkcji temperatury powietrza dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

Porównanie wybranych wskaźników mikroklimatu z modelem PHS

Ocenę cieplnych warunków pracy w kopalniach podziemnych można realizować w oparciu o wskaźniki mikroklimatu, które uwzględniają łączny wpływ kilku podstawowych parametrów powietrza. Najbardziej znanymi wskaźnikami mikroklimatu są: natężenie chłodzenia powietrza K_w , temperatura zastępcza klimatu, temperatura zastępcza ślaska, wskaźnik dyskomfortu cieplnego, wskaźnik *WGBT*, amerykańska temperatura efektywna. Wskaźniki te posiadają kryteria określające warunki graniczne skróconego czasu pracy. Kryteria te można porównać z kryteriami obliczeń wg modelu numerycznego PHS.

W celu wykonania obliczeń numerycznych założono standardowe parametry pracownika. Obliczenia wykonano dla następujących warunków:

- trzech izolacyjności odzieży: 0,1 clo, 0,5 clo i 1 clo,
- trzech ciężkości pracy: praca lekka ($M_{sr}=100 \text{ W/m}^2$), praca umiarkowana ($M_{sr}=165 \text{ W/m}^2$), praca ciężka ($M_{sr}=230 \text{ W/m}^2$),
- trzech prędkości powietrza: 0,5 i 3 m/s,
- trzech wilgotności względnej powietrza: 100%, 80%, 60%,
- zmiennej temperatury powietrza wg termometru suchego.

W modelowaniu numerycznym wykorzystano standardowe parametry pracownika omawiane przy wcześniejszej analizie modelu PHS. Wyniki modelowania numerycznego porównano ze wskaźnikami mikroklimatu: temperaturą zastępczą klimatu, temperaturą zastępczą ślaską oraz ze wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego. Porównanie przeprowadzono zarówno dla kryterium prognozowanego ubytku wody z organizmu jak również dla prognozowanej temperatury wewnętrznej organizmu.

Kryterium przekroczenia dopuszczalnego ubytku wody

Wyniki porównania obliczeń wskaźników z wynikami obliczeń utraty wody w organizmie przedstawiono w formie graficznej (rys. 46 ÷ 63). Na wykresach temperatury zastępczej ślaskiej zaznaczono kryteria stosowania skróconej i zabronionej pracy tego wskaźnika. Obliczenia wykonano dla czasu ekspozycji pracownika 450 i 360 min.

Jeżeli chodzi o graniczny ubytek wody z organizmu to kryteria skróconego czasu i zabronionej pracy nie odpowiadają dopuszczalnemu ubytkowi wody z organizmu dla wydatku energetycznego 230 W/m^2 dla izolacyjności odzieży wynoszącej 0,1 clo (rys. 50 i 51). Natomiast przy wzroście izolacyjności odzieży do 0,5 clo i 1,0 clo już przy wydatku energetycznym 165 i 230 W/m^2 kryteria skróconego czasu i zabronionej pracy nie odpowiadają dopuszczalnemu ubytkowi wody z organizmu (rys. 54-57 i 60 do 63). Dla każdej wilgotności względnej i prędkości powietrza przy takim wydatku energetycznym występuje zbyt duży ubytek wody. Jeśli człowiek w analizowanych warunkach wykonywał pracę o niższym wydatku energetycznym możemy uznać, że kryteria te są do przyjęcia (rys. 52, 53, 58 i 59).

Natomiast na rysunkach (rys. 82-99) gdzie występuje temperatura zastępcza klimatu zaznaczono charakterystyczne dla wskaźnika przedziały wartości, które klasyfikują stopnie zagrożenia klimatycznego. Również i w tym przypadku, jeśli wydatek energetyczny wzrasta to kryteria skróconego czasu i zabronionej pracy nie odpowiadają dopuszczalnemu ubytkowi wody z organizmu.

Jeżeli chodzi o temperaturę zastępczą klimatu to jej kryteria dla ubioru 0,1, 0,5 i 1 clo są poprawne tylko dla wydatku energetycznego 100 W/m^2 (rys. 82, 83, 88, 89, 94, 95). Natomiast od wydatku energetycznego rzędu 165 W/m^2 i izolacyjności 0,1 0,5 i 1 clo kryteria skróconego czasu i zabronionej pracy nie odpowiadają dopuszczalnemu ubytkowi wody z organizmu. Wskaźnik ten słabo odwzorowuje ubytek wody z organizmu.

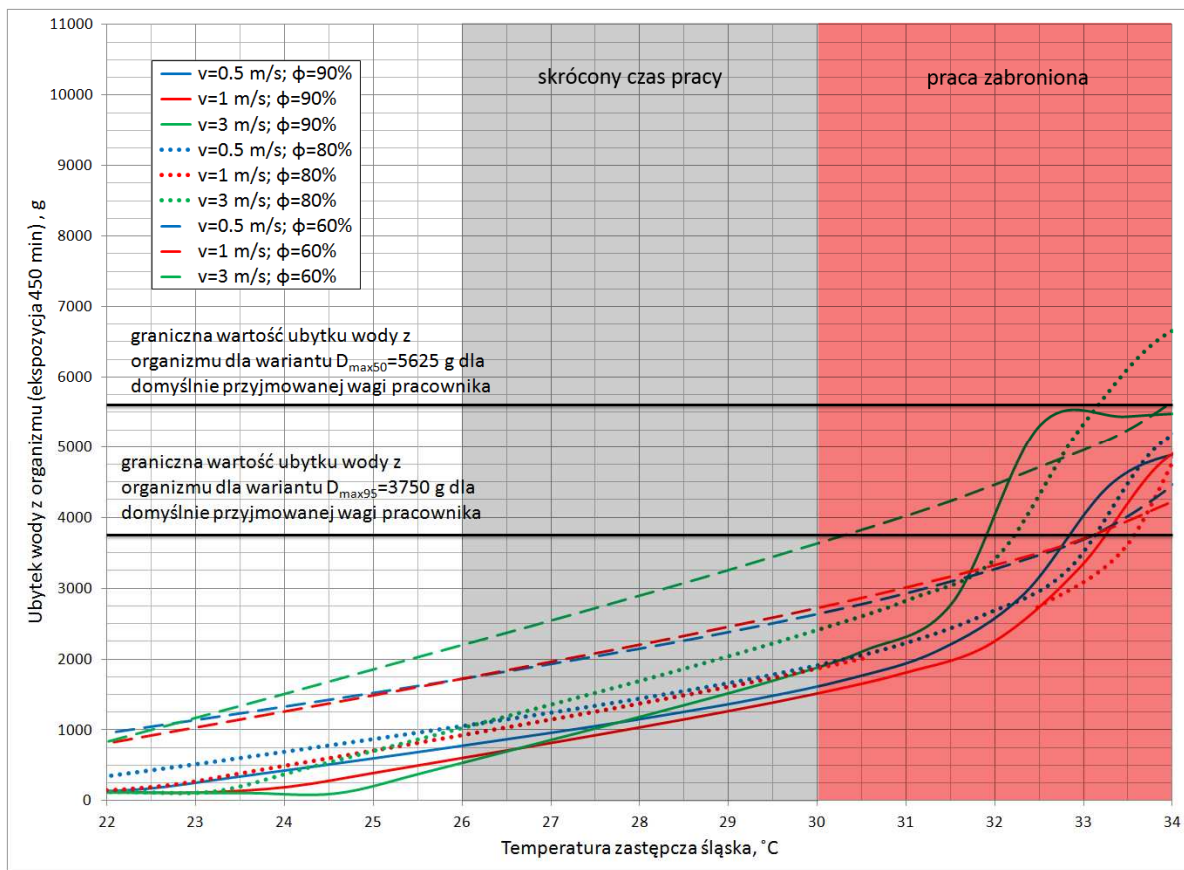
Prognozowany ubytek wody z organizmu w zależności od wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ przedstawiono na rysunku 118. W obliczeniach posłużono się nomogramem do wyznaczania wskaźnika δ . Nomogramy sporządzone zostały dla ludzi nie ubranych i ludzi ubranych (koszula flanelowa, długie spodnie, bluza robocza) oraz dla wilgotności względnych powietrza od 20% do 100% o skoku 20%. Na stanowiskach pracy w kopalniach standardowy ubiór roboczy posiada izolacyjność 1 clo. Analizę wykonano dla izolacyjności odzieży 1 clo, wilgotności względnej 80 % oraz

prędkości 0,5 m/s. Zakres obliczeń obejmował temperatury od 24 do 34°C. Z uwagi na trudność wyznaczania wskaźnika dyskomfortu cieplnego z nomogramów, które można znaleźć w literaturze, dokładność porównania ubytku wody z wartością wskaźnika może być mniejsza. Wynika to z dokładności odczytu wskaźnika przy wyższych wartościach temperatury i prędkości. Nomogramy do wyznaczania dyskomfortu cieplnego ograniczone są do $\delta=1$, aby uzyskać większe wartości należy aproksymować izolinie dyskomfortu cieplnego. Linie obrazujące wyniki obliczeń dla trzech wydatków energetycznych na rysunku 90 są względem siebie przesunięte, co spowodowane jest złożonością obliczeń omawianych metod określania obciążenia cieplnego zależnych od parametrów powietrza, izolacyjności odzieży oraz wydatku energetycznego. Analizując wyniki uzyskanych obliczeń można stwierdzić, że przekroczenia granicznego ubytku wody z organizmu 5% masy ciała znajduje się w przedziale wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego $0,8 \leq \delta < 1$ (bardzo trudne warunki klimatyczne) oraz $\delta \geq 1$ (dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia). Wskaźnik dyskomfortu cieplnego przy pracy lekkiej i umiarkowanej dobrze oddaje kryteria ($\delta < 1$) w stosunku do prognozowanego ubytku wody (rys. 119).

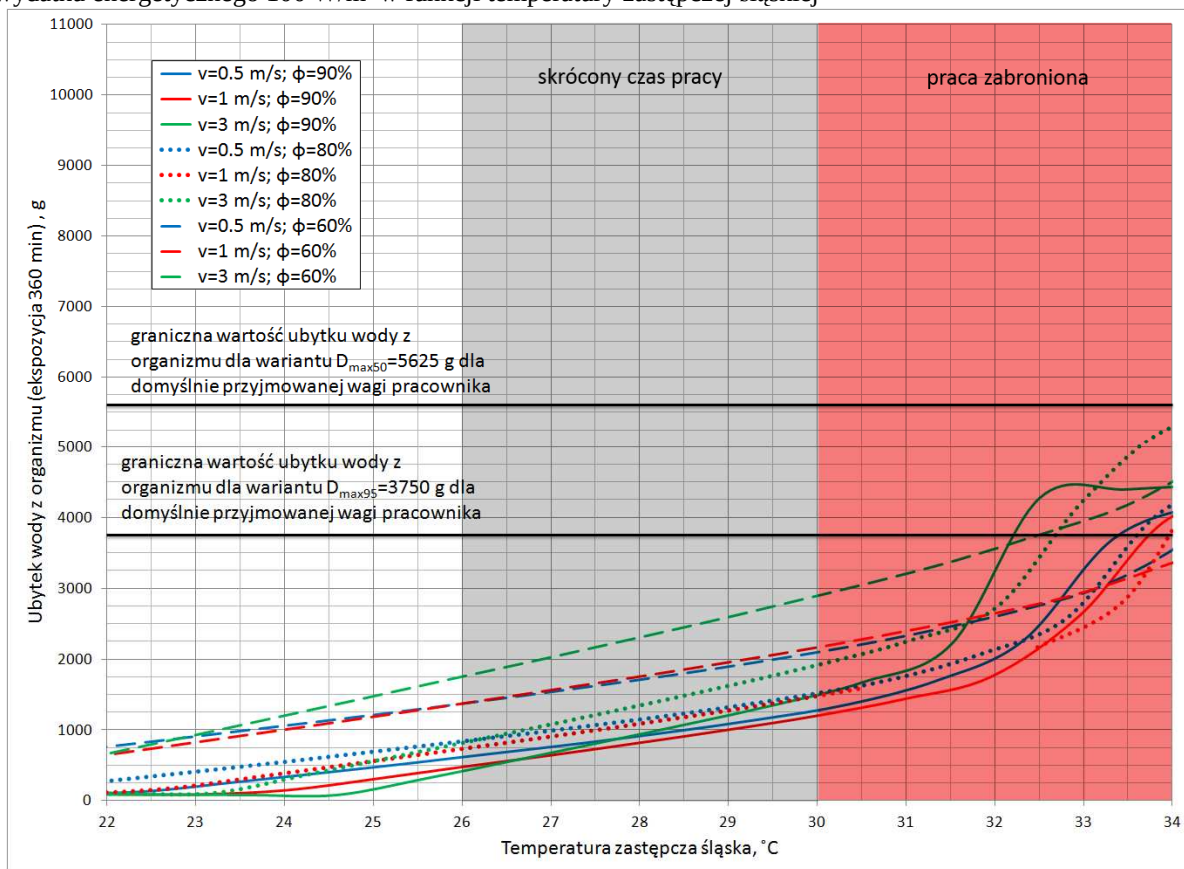
Kryterium przekroczenia dopuszczalnej temperatury wewnętrznej

Na rysunkach 64 ÷ 81 przedstawiono prognozowany przyrost temperatury wewnętrznej organizmu w funkcji temperatury zastępczej śląskiej i temperatury zastępczej klimatu (rys. 100 ÷ 117). Dla ubioru 0,5 clo temperatura przekracza 38°C już od wartości $t_{zs}=28^\circ\text{C}$ (wydatek energetyczny 230 W/m²) (rys. 111). Dla ubioru 1 clo temperatura przekracza 38°C już od wartości $t_{zs}=28^\circ\text{C}$ (wydatek energetyczny 100 W/m²) (rys. 113) i od 27°C przy wydatku energetycznym 165 W/m² (rys. 115), a przy wydatku energetycznym 230 W/m² od temperatury 24,5°C (rys. 117). Potwierdza się fakt, że kryteria tego wskaźnika są źle dobrane dla izolacyjności 1clo i wydatku energetycznym rzędu 200 W/m². Jeżeli chodzi o temperaturę zastępczą klimatu to występują prawie identyczne przebiegi przyrostu temperatury wewnętrznej co dla temperatury zastępczej śląskiej przy ubiorze 1 clo (rys. 115 i 117). Dla ubioru 0,5 clo kryteria tego wskaźnika są gorsze niż dla temperatury zastępczej śląskiej (rys. 109 i 111).

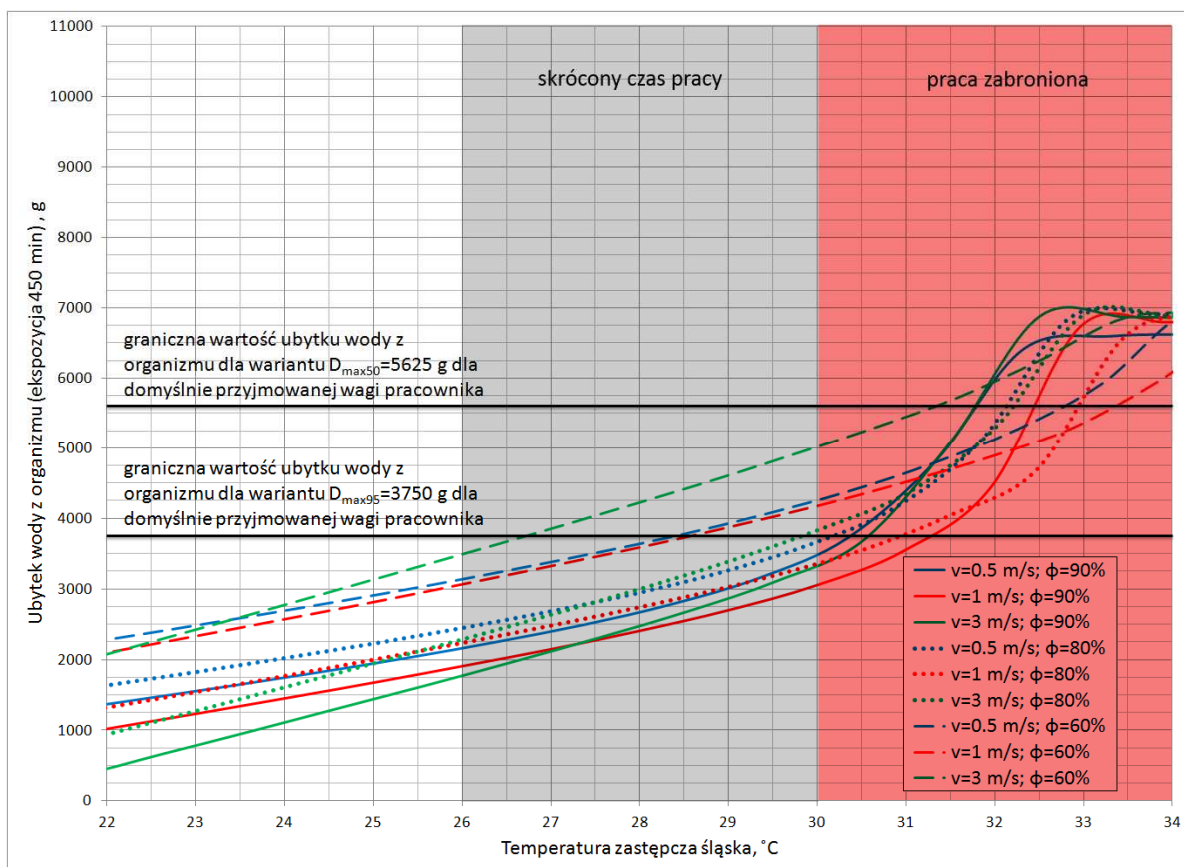
Analiza prognozowanej temperatury wewnętrznej organizmu w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego wykazała, że przekroczenie granicznej temperatury rektalnej wystąpiło tylko w przedziale wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego $\delta \geq 1$ (rys. 118). W analizowanych warunkach środowiska możemy stwierdzić że graniczna wartość parametru fizjologicznego jakim jest temperatura rektalna została odpowiednio zaklasyfikowana przez wskaźnik dyskomfortu cieplnego tj. do warunków niebezpiecznych dla zdrowia.



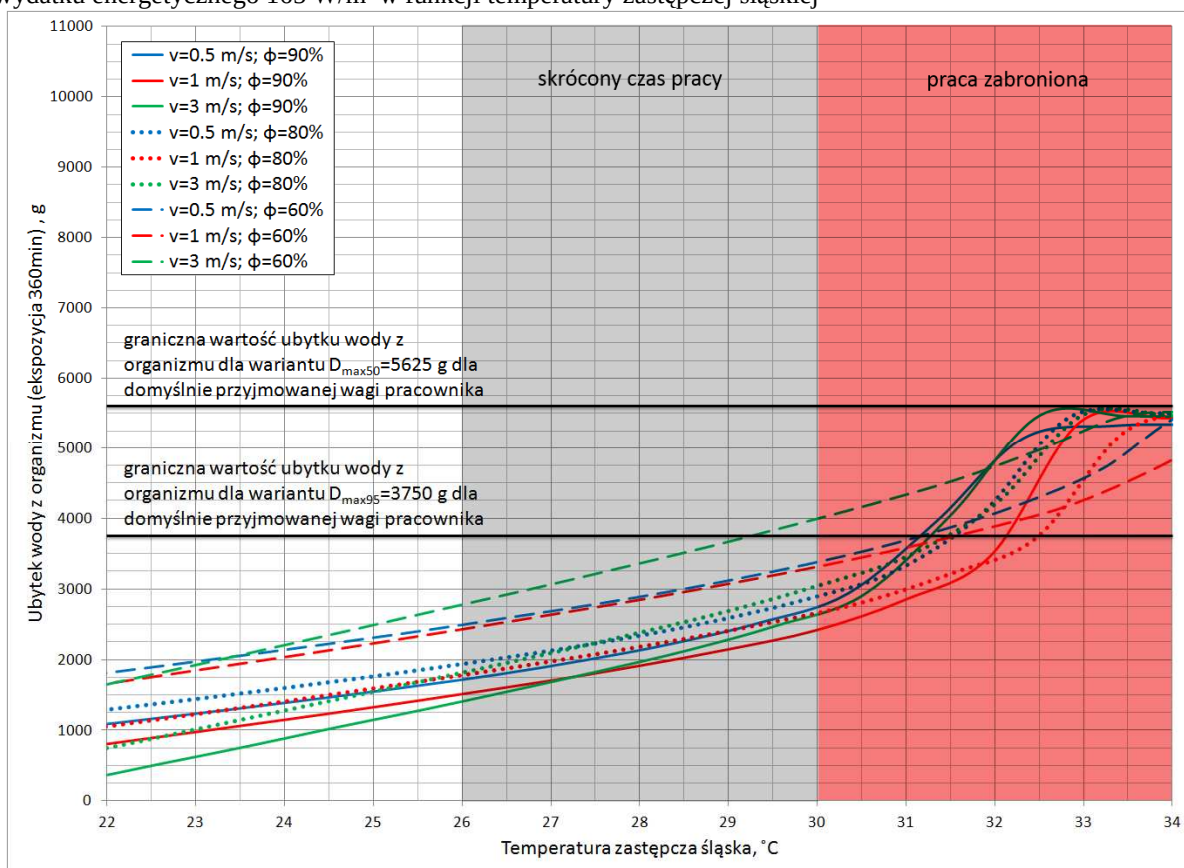
Rys. 46. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



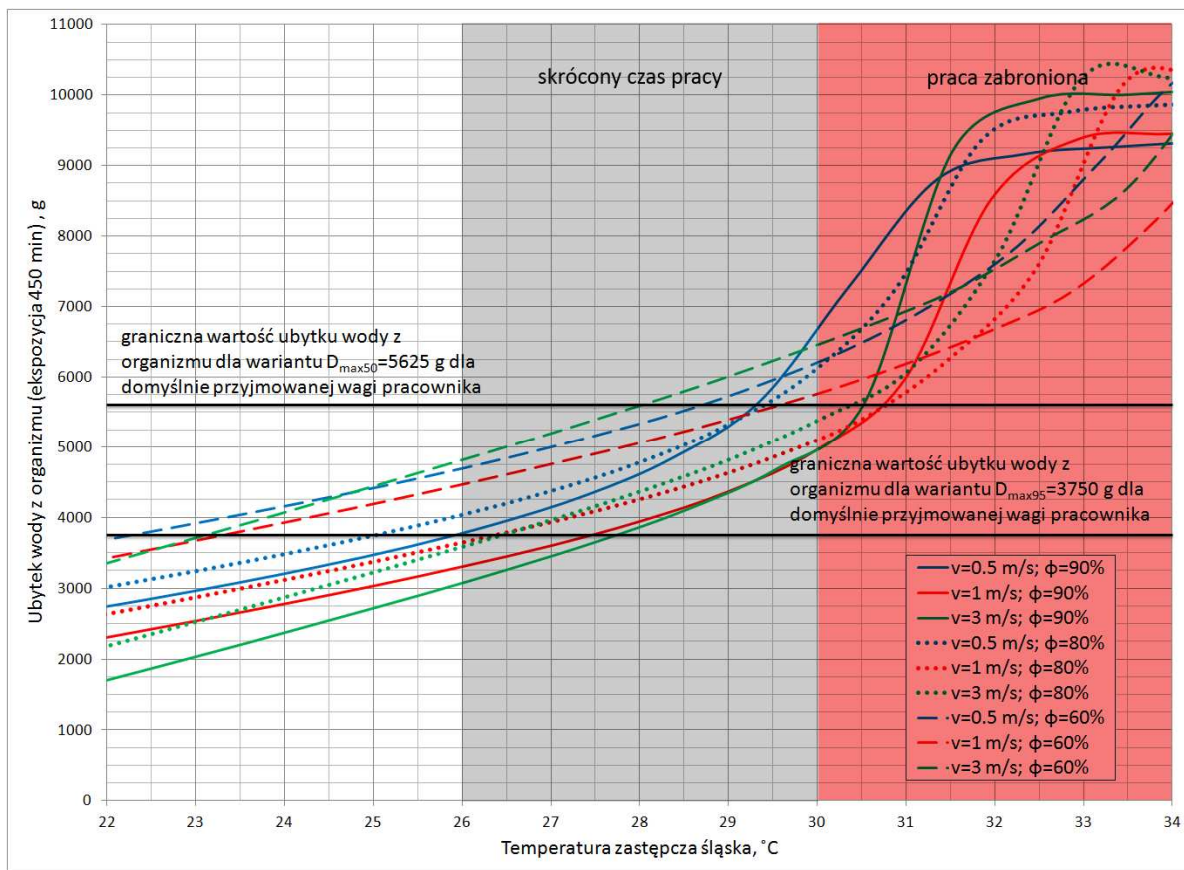
Rys. 47. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



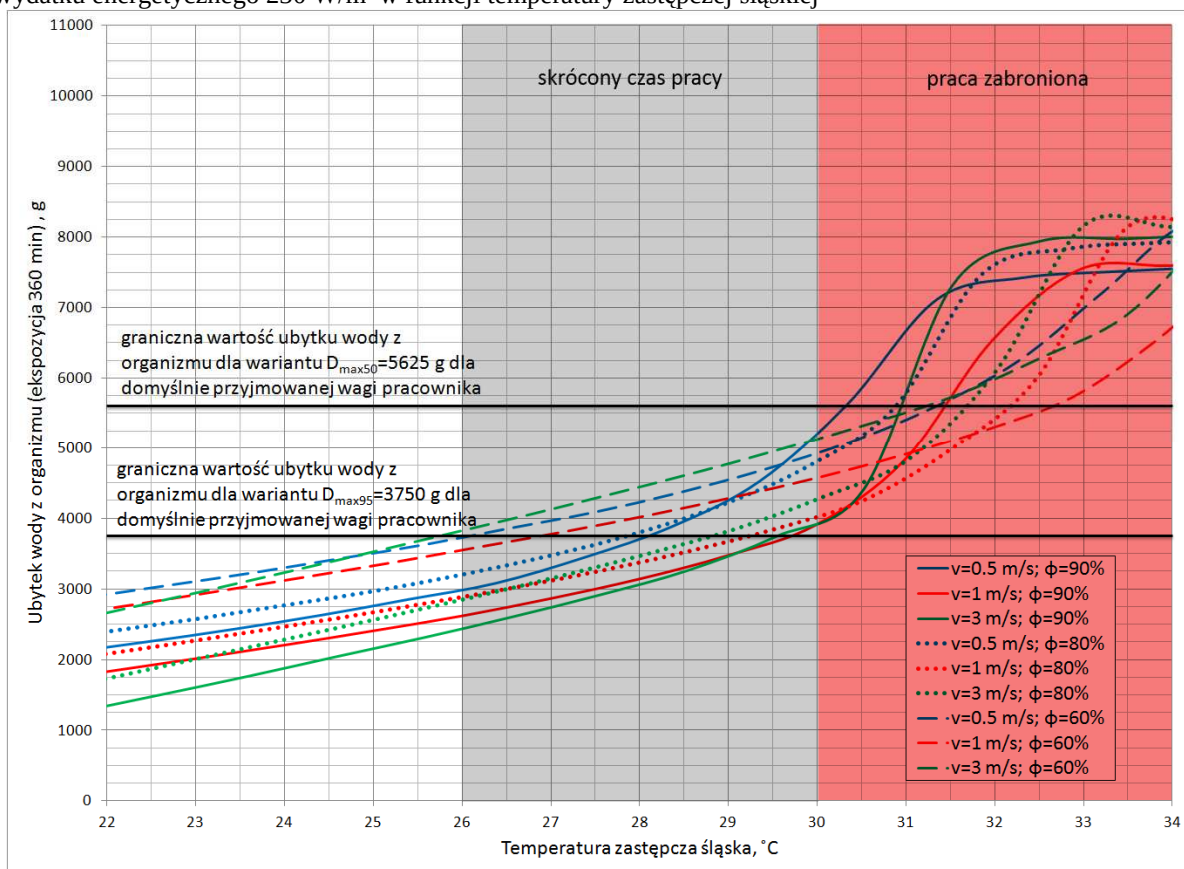
Rys. 48. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



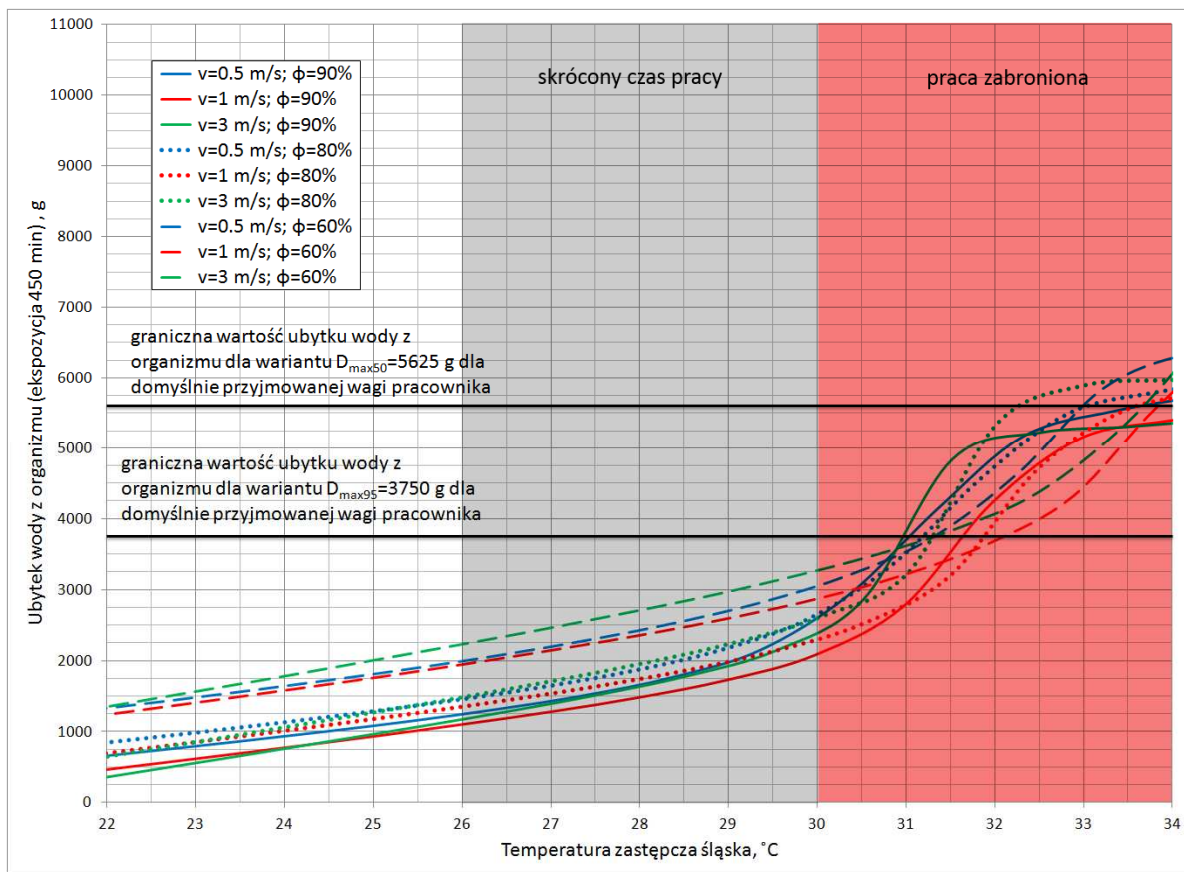
Rys. 49. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



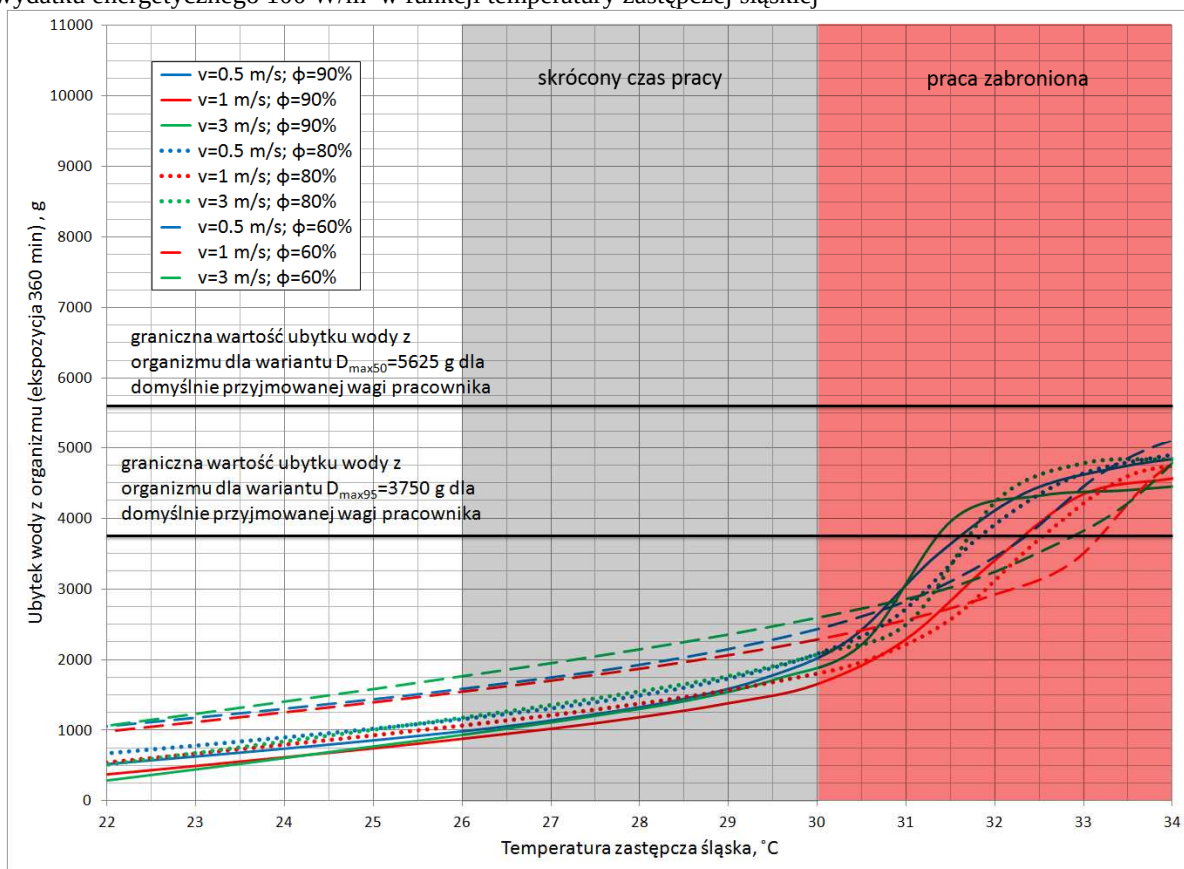
Rys. 50. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



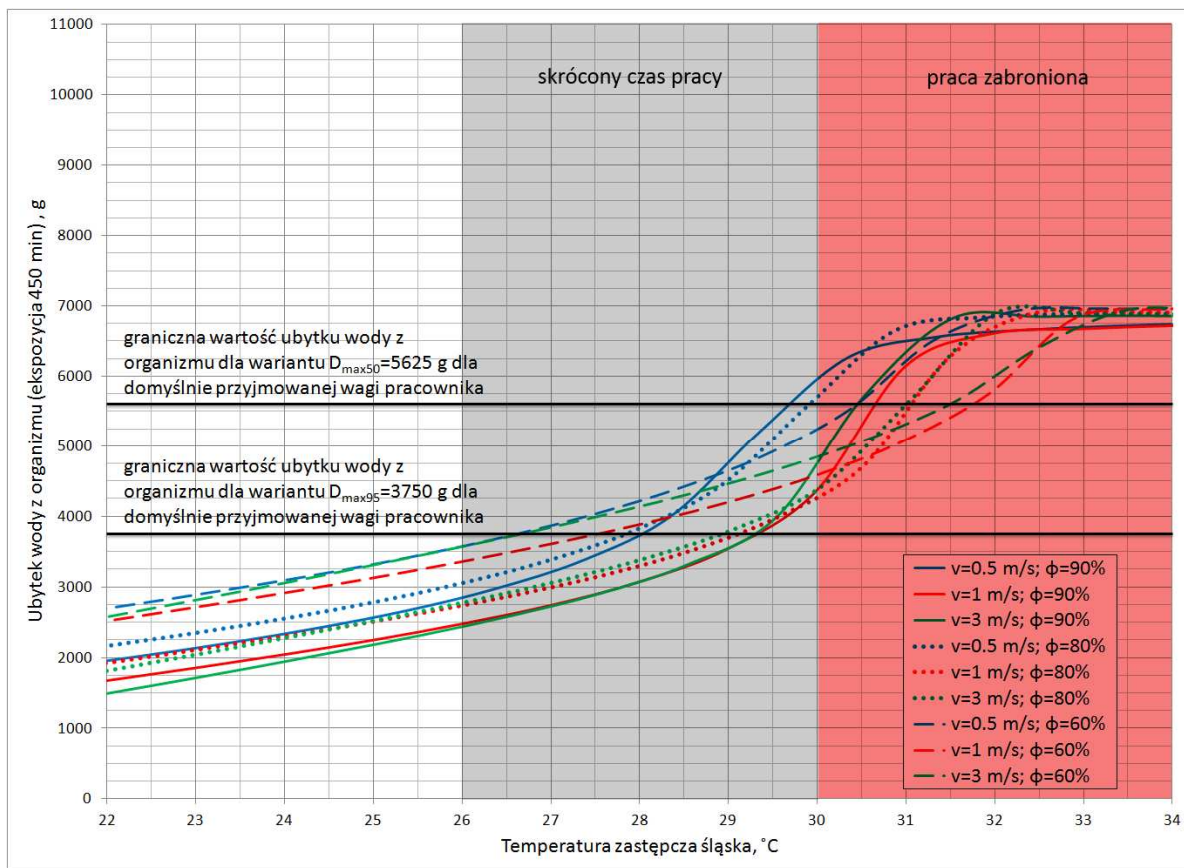
Rys. 51. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



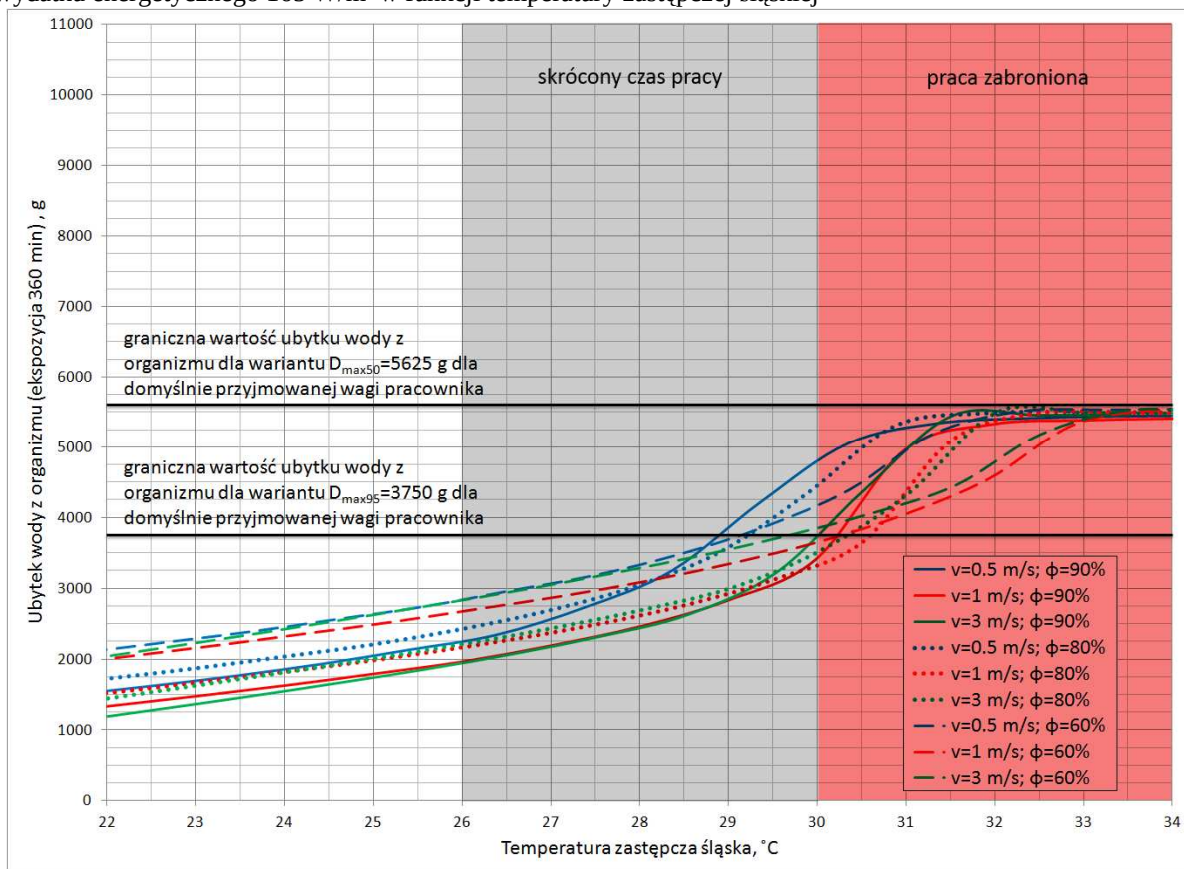
Rys. 52. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



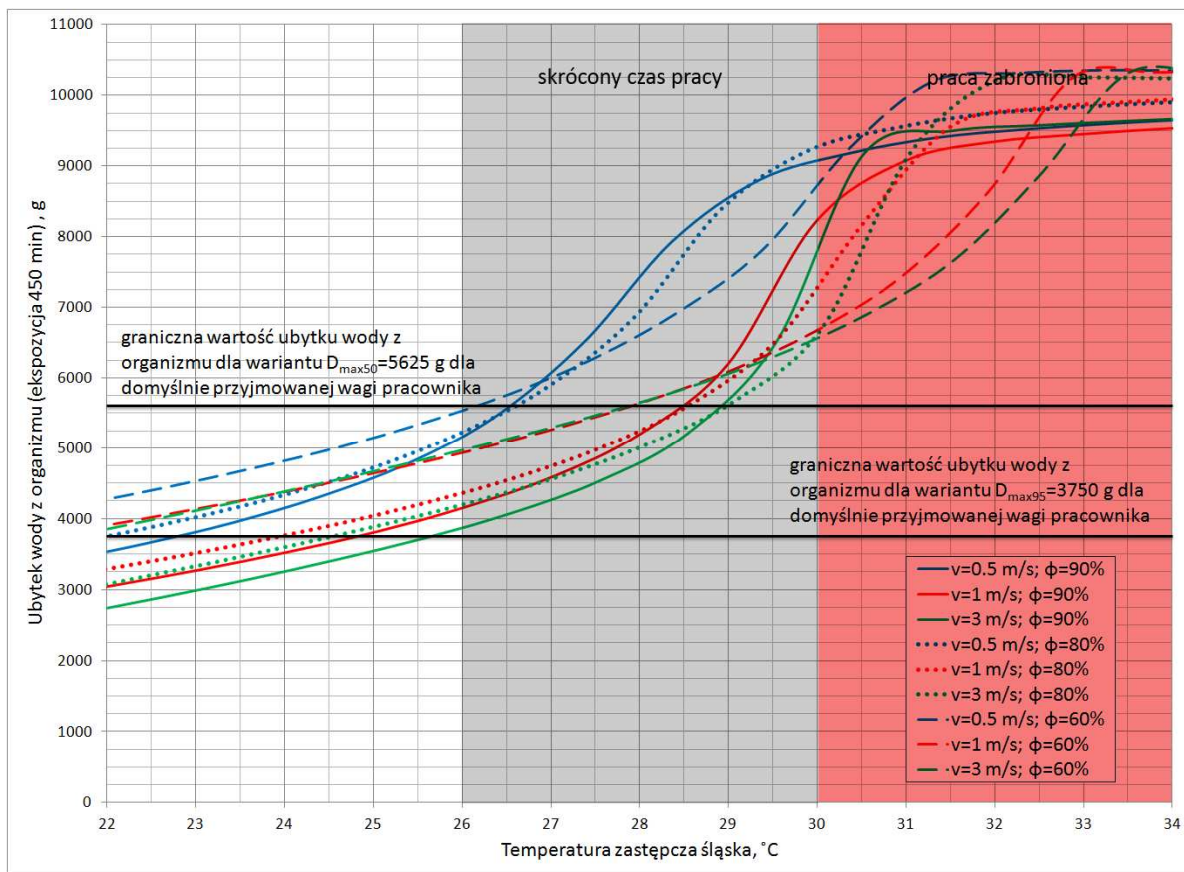
Rys. 53. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



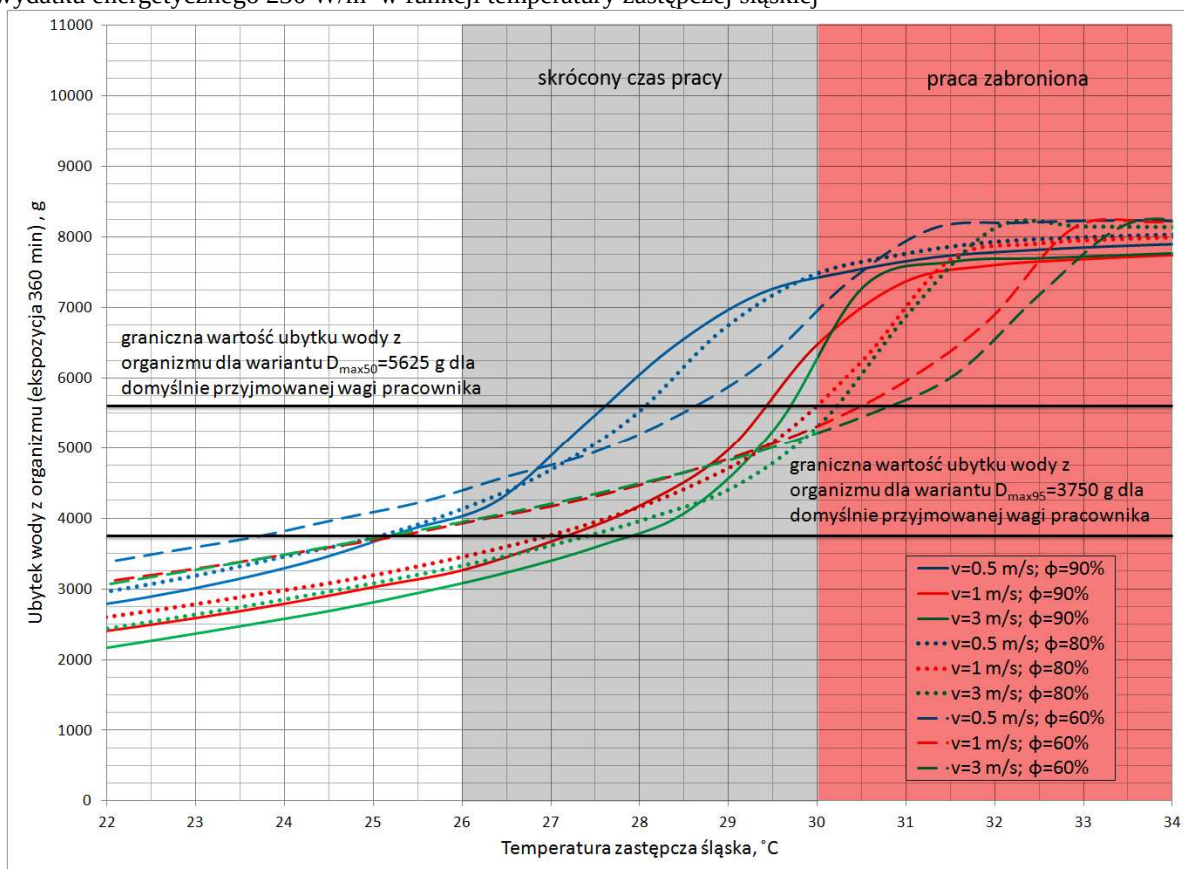
Rys. 54. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



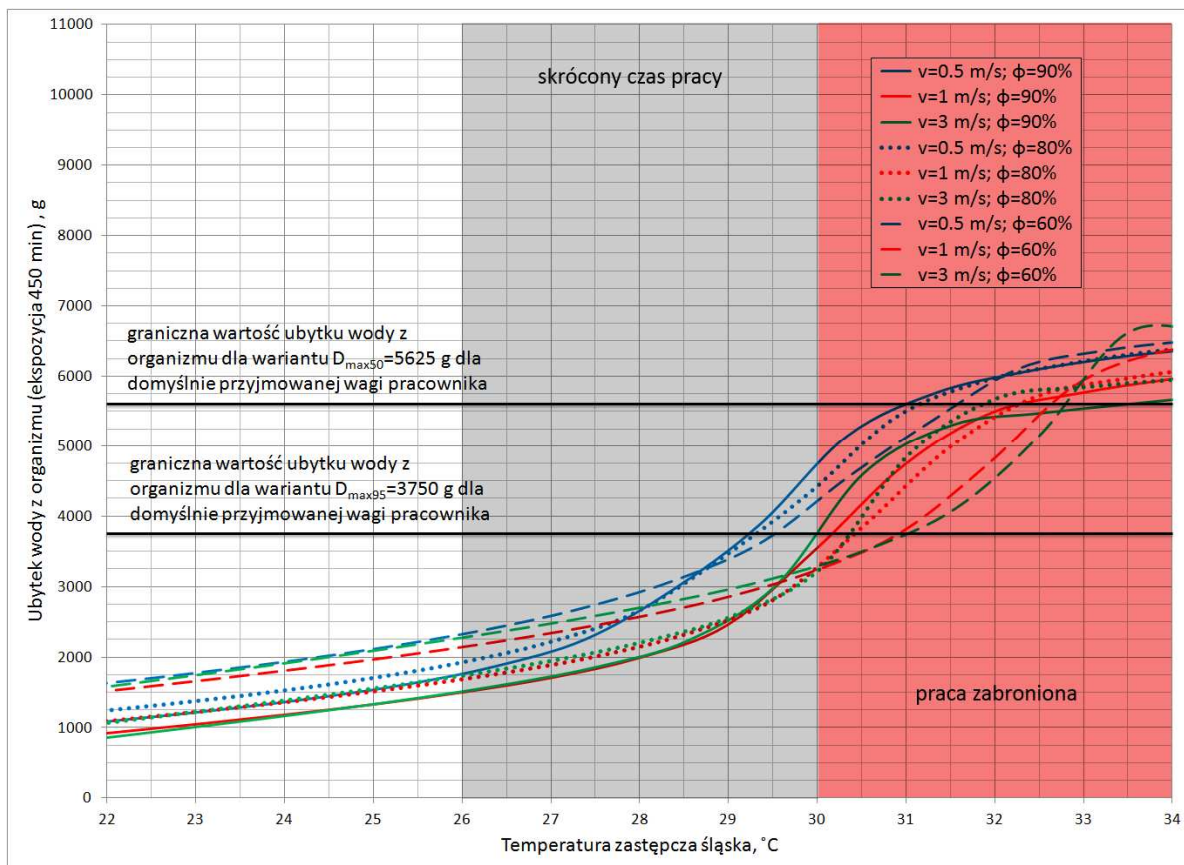
Rys. 55. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



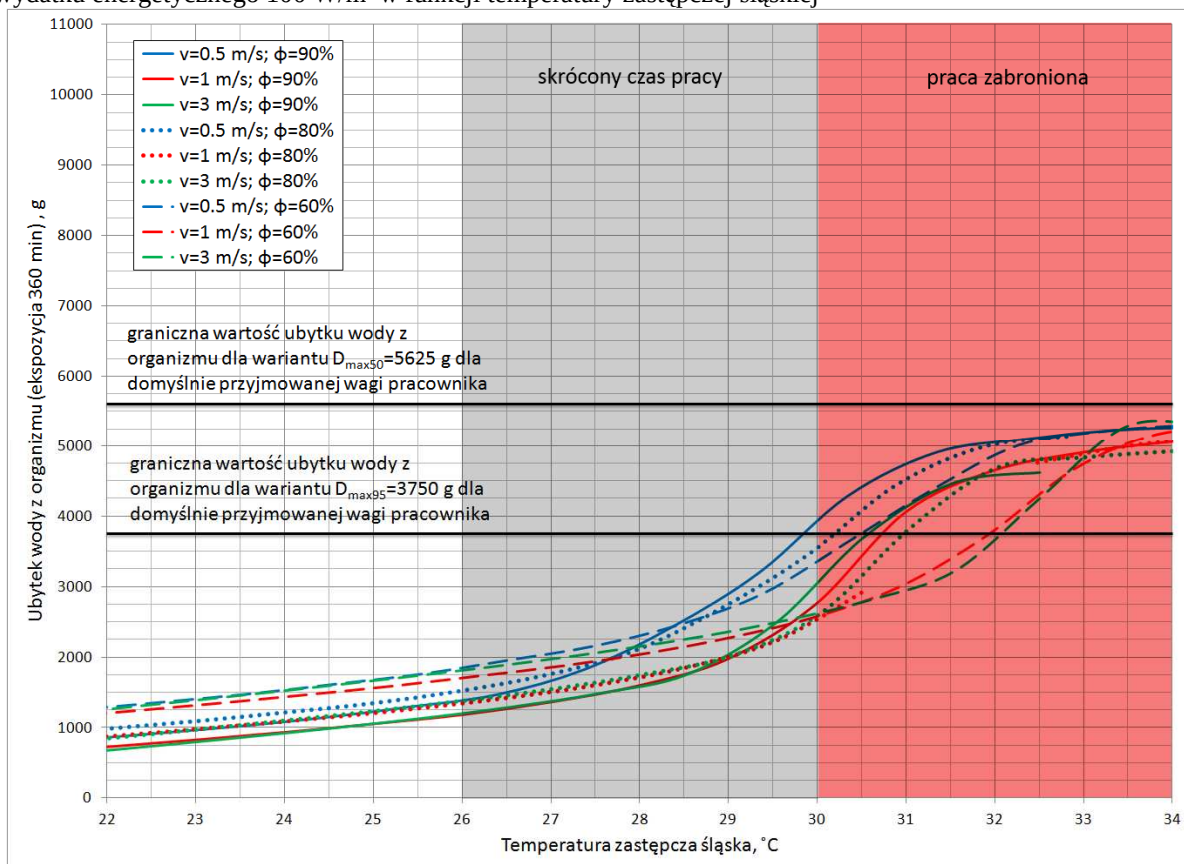
Rys. 56. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



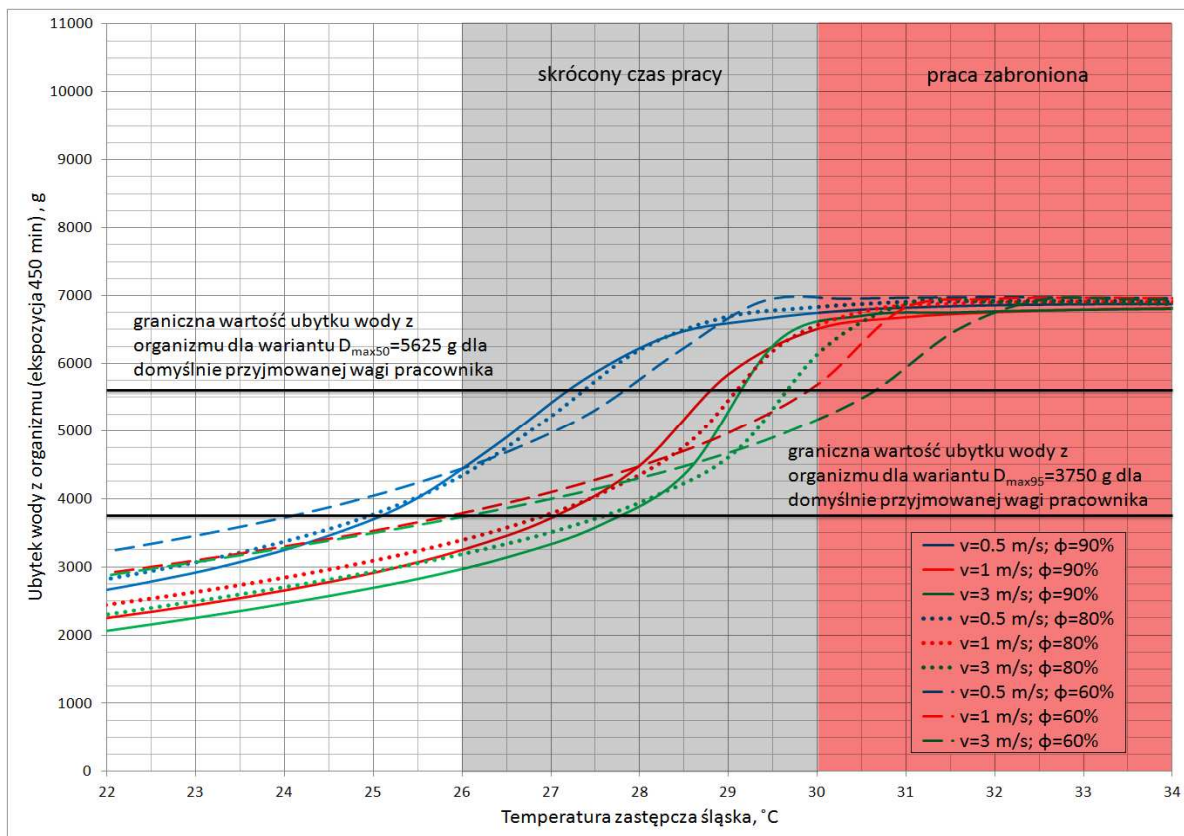
Rys. 57. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



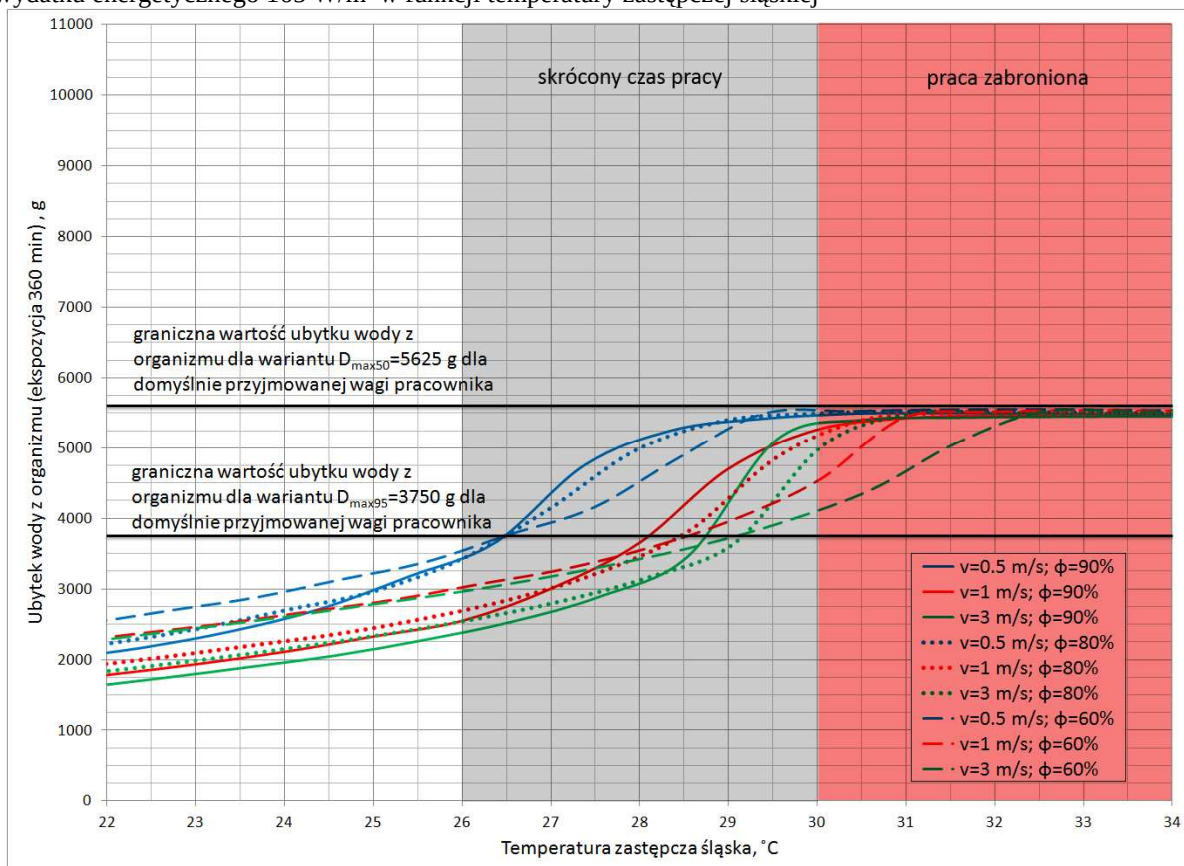
Rys. 58. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



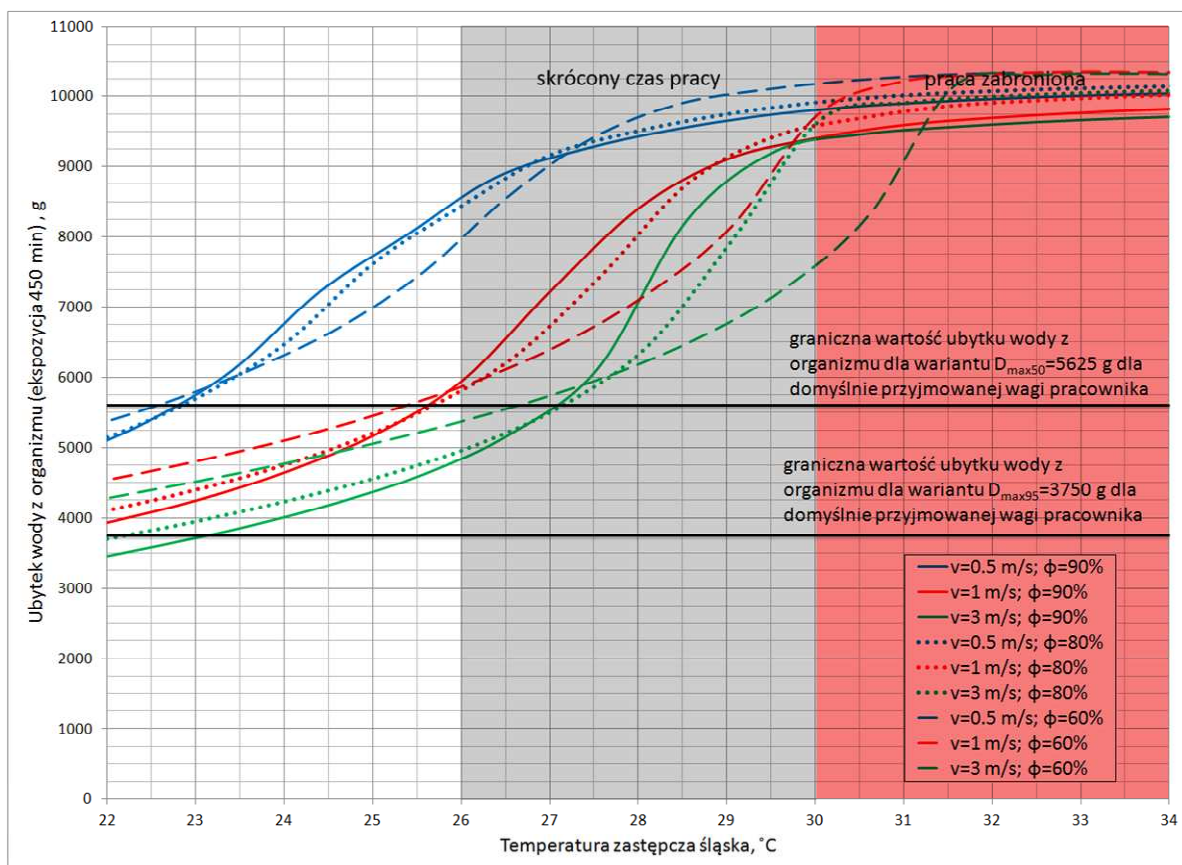
Rys. 59. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



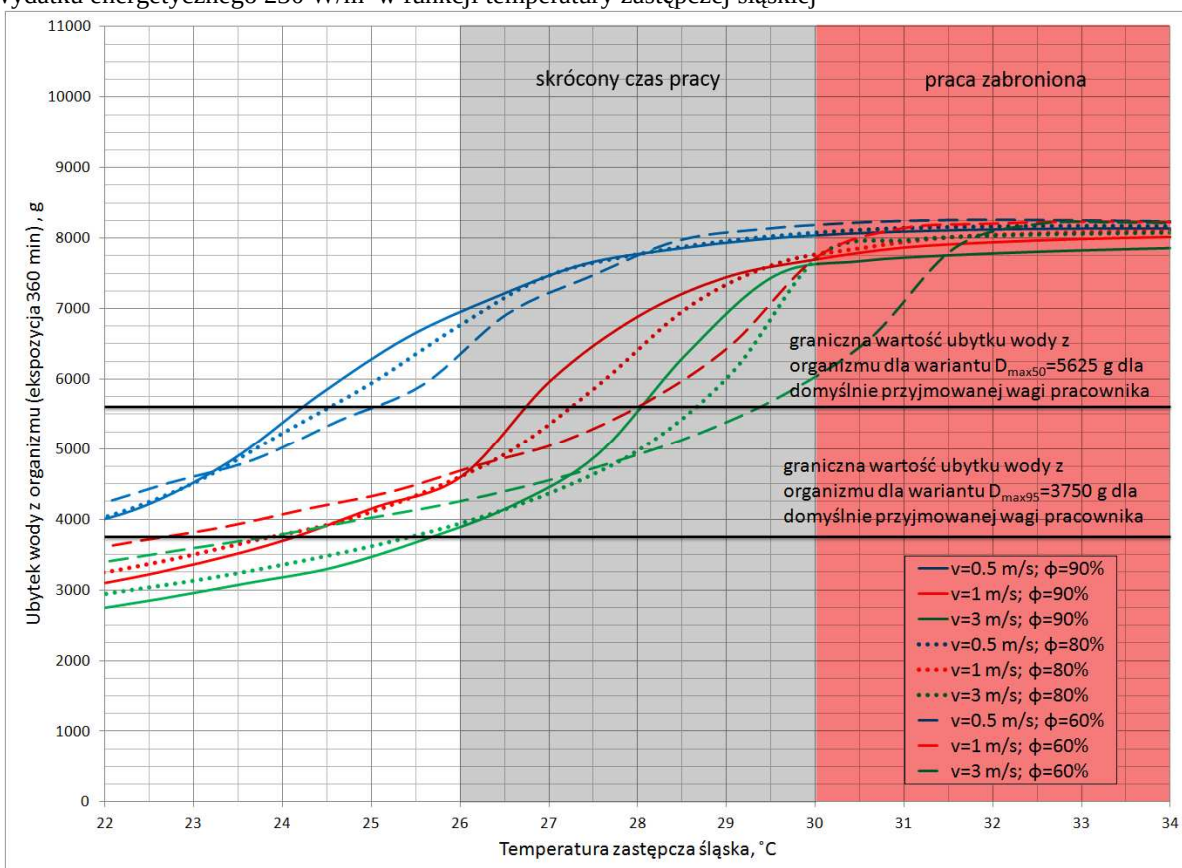
Rys. 60. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



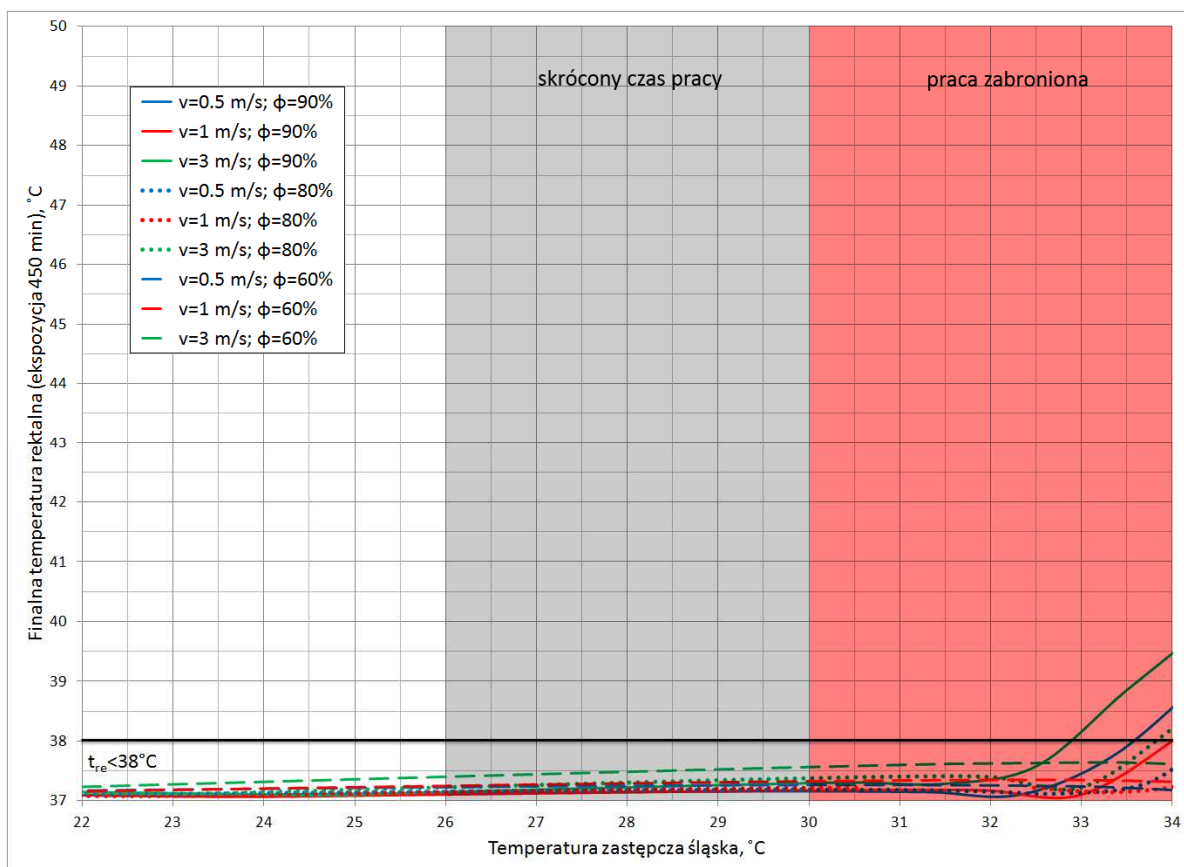
Rys. 61. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



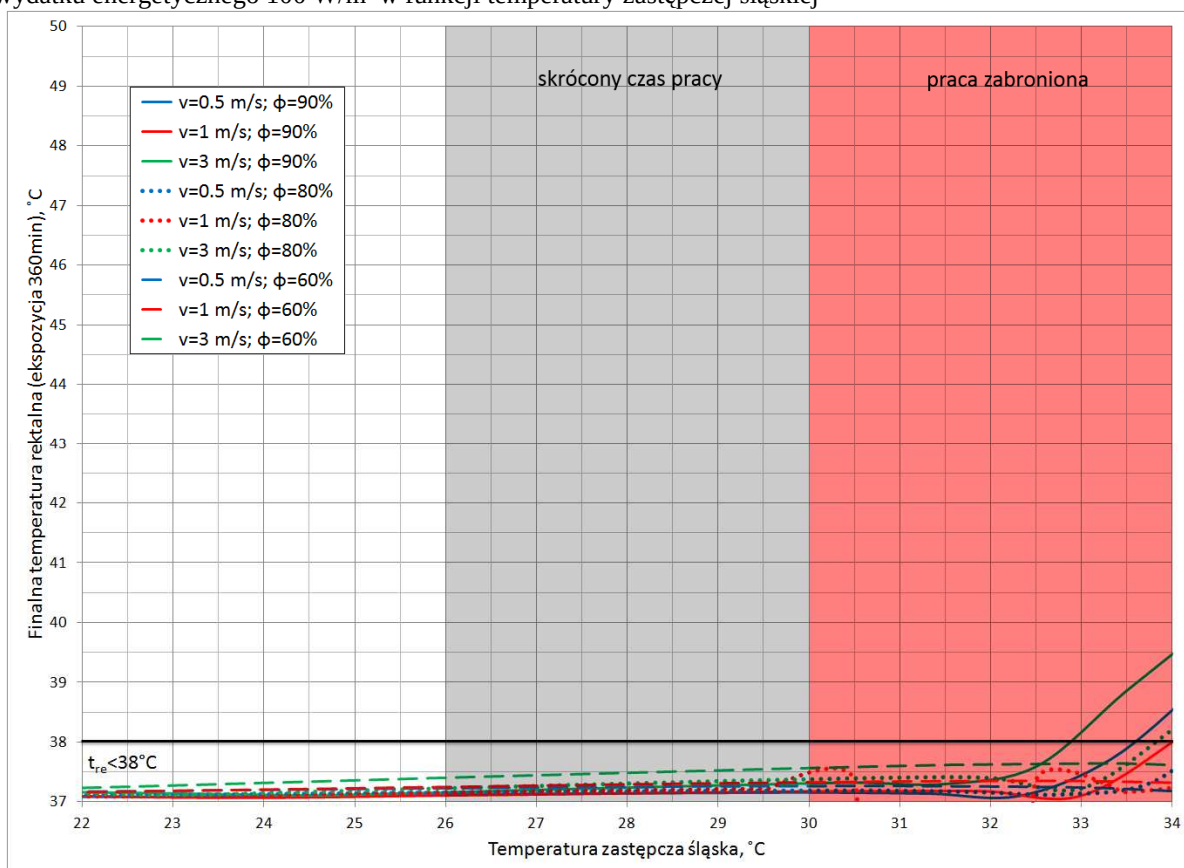
Rys. 62. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



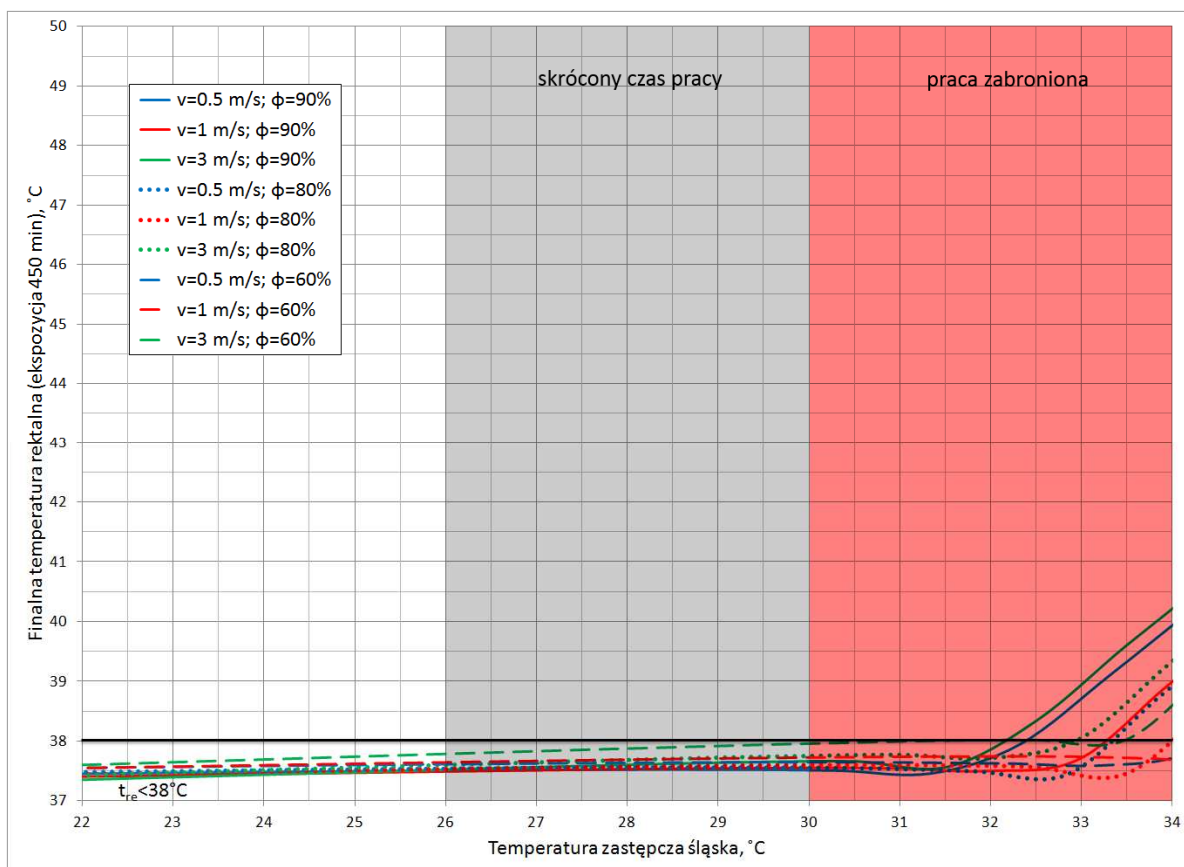
Rys. 63. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



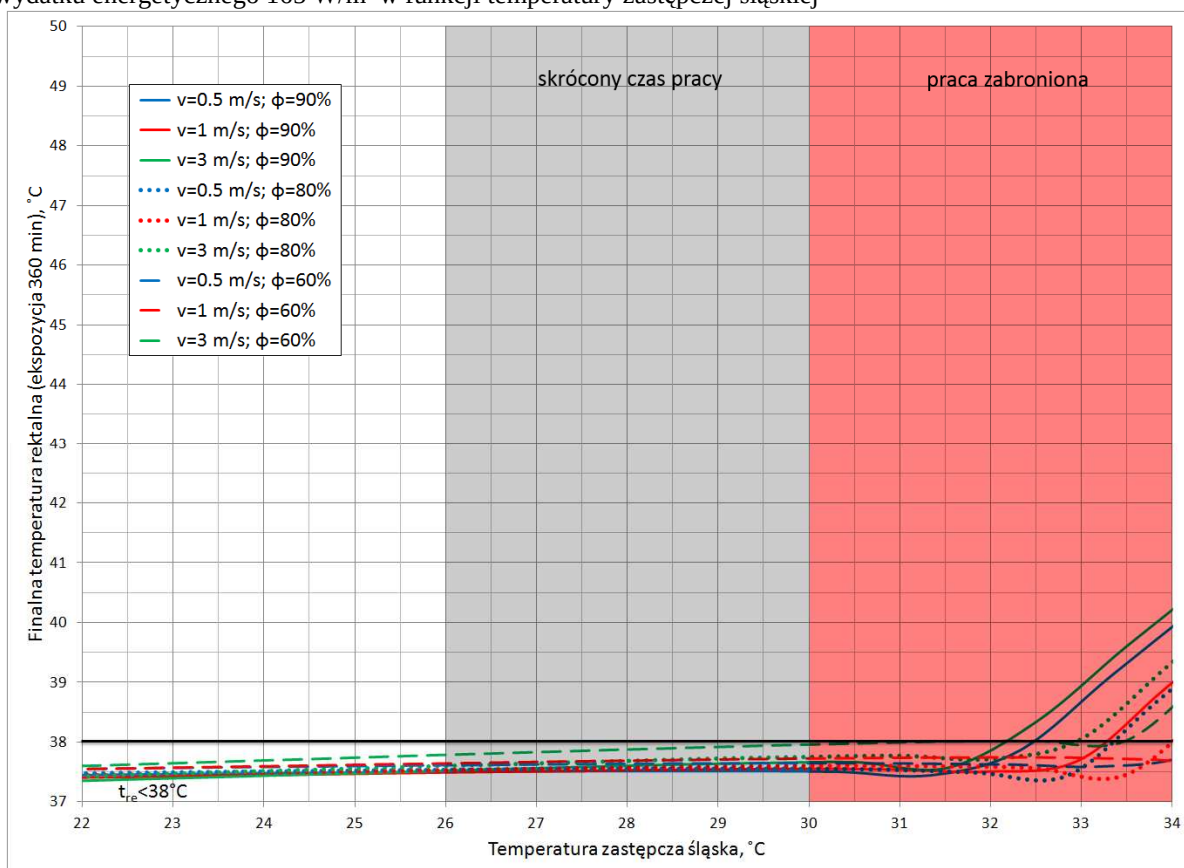
Rys. 64. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



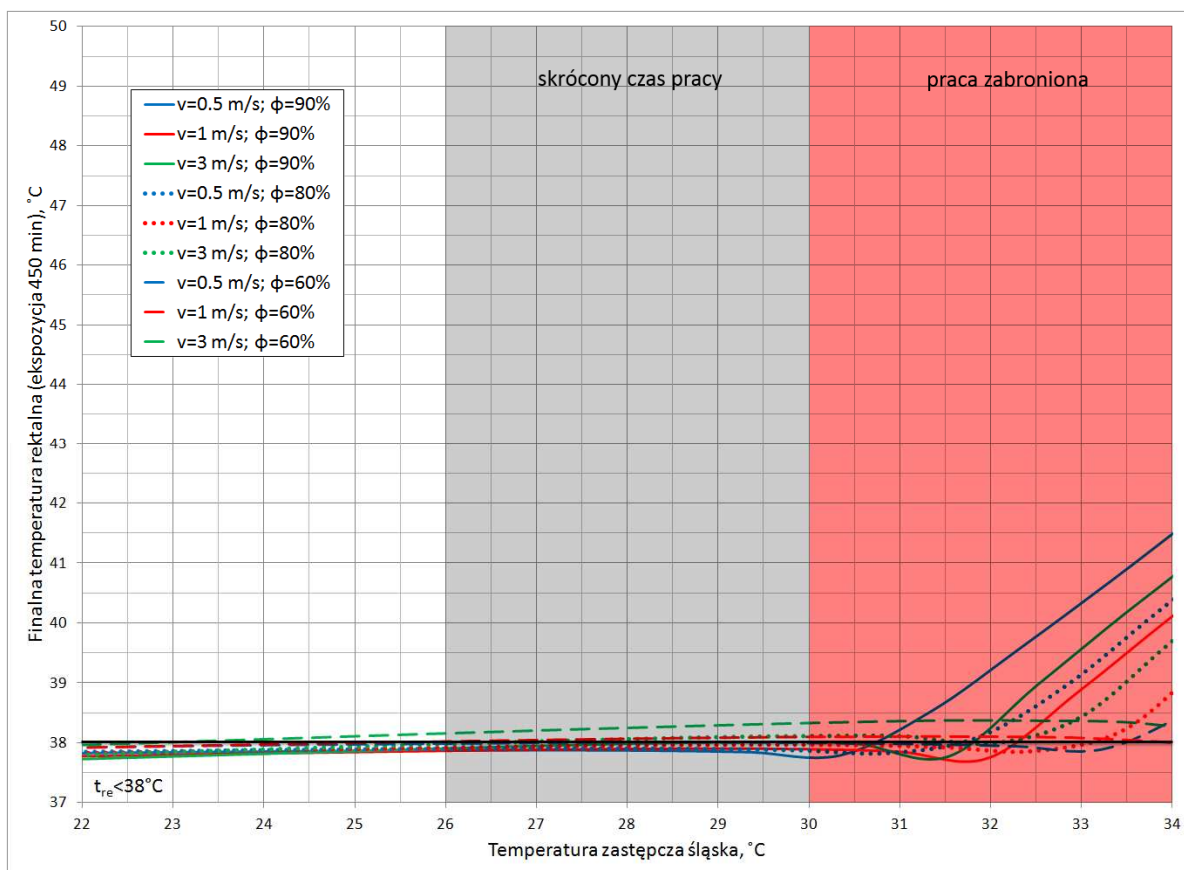
Rys. 65. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



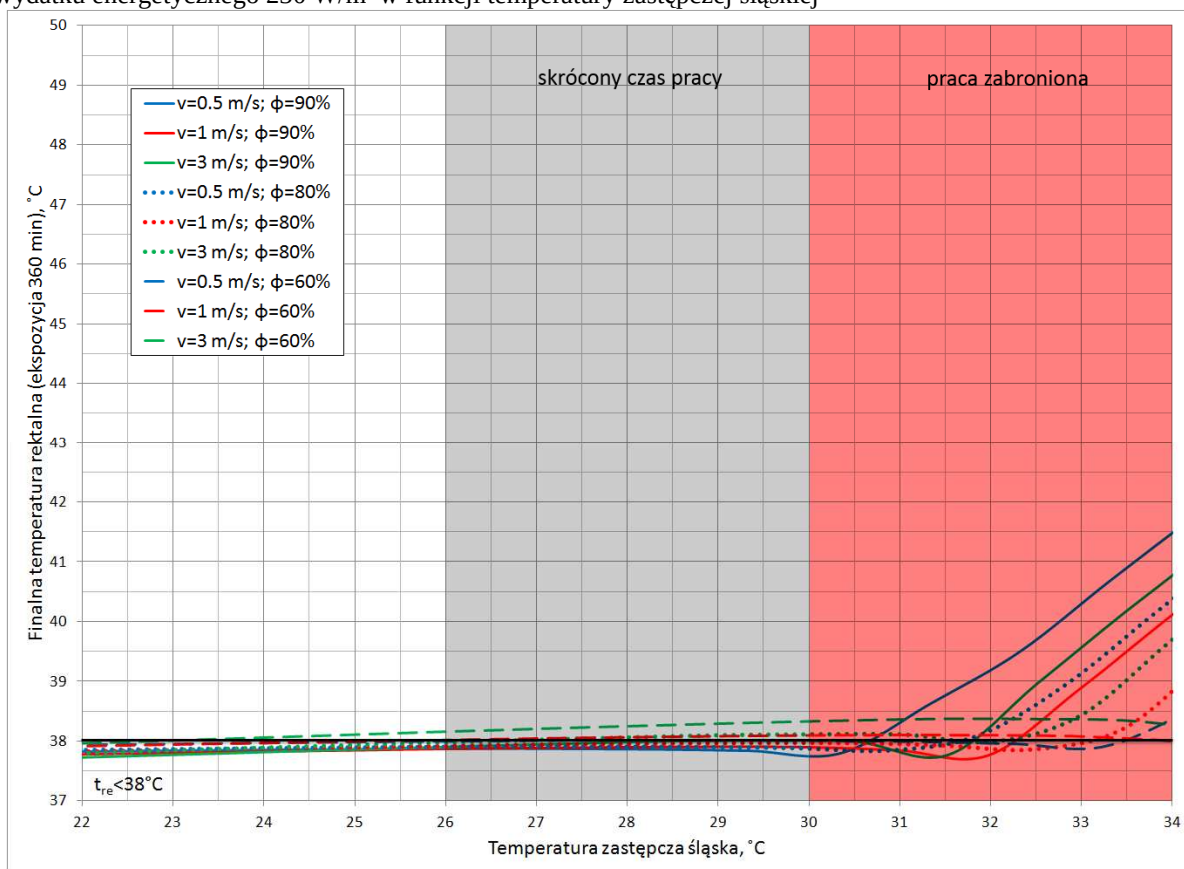
Rys. 66. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



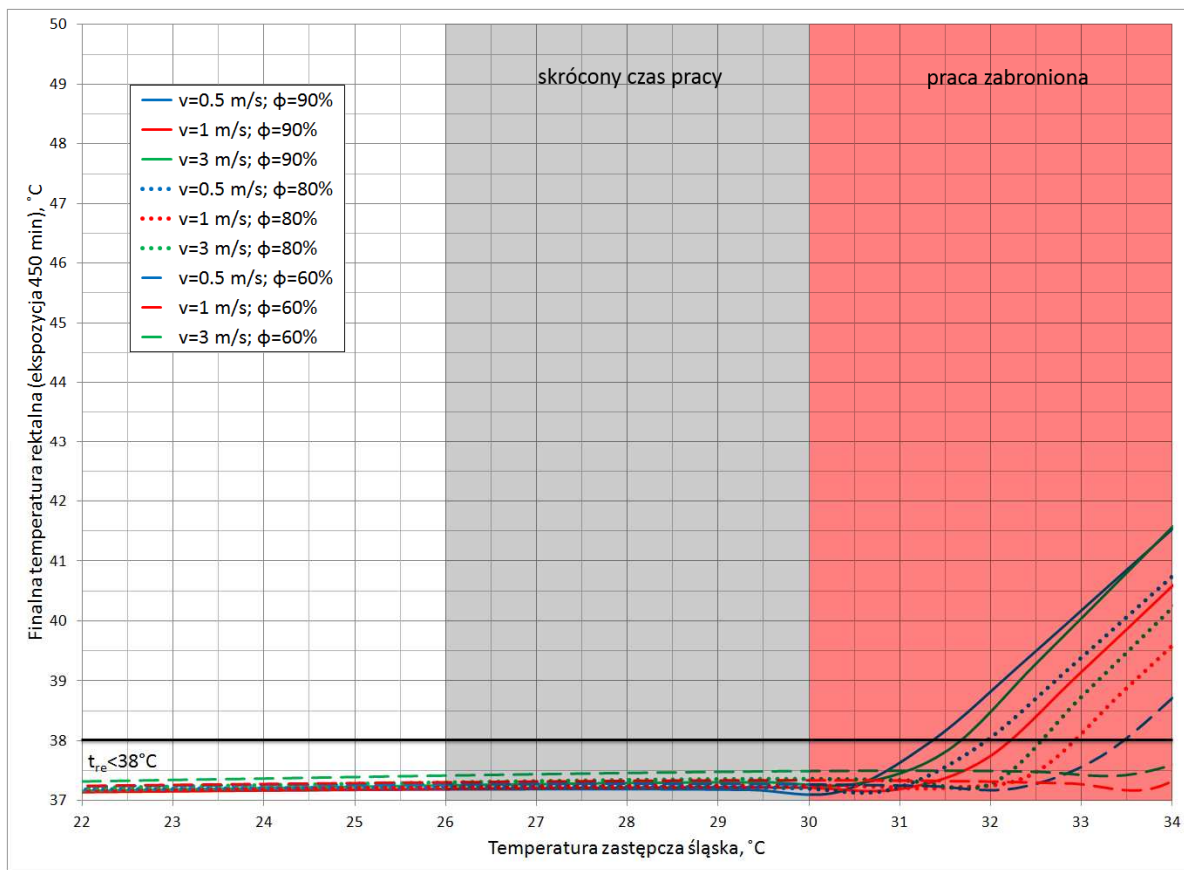
Rys. 67. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



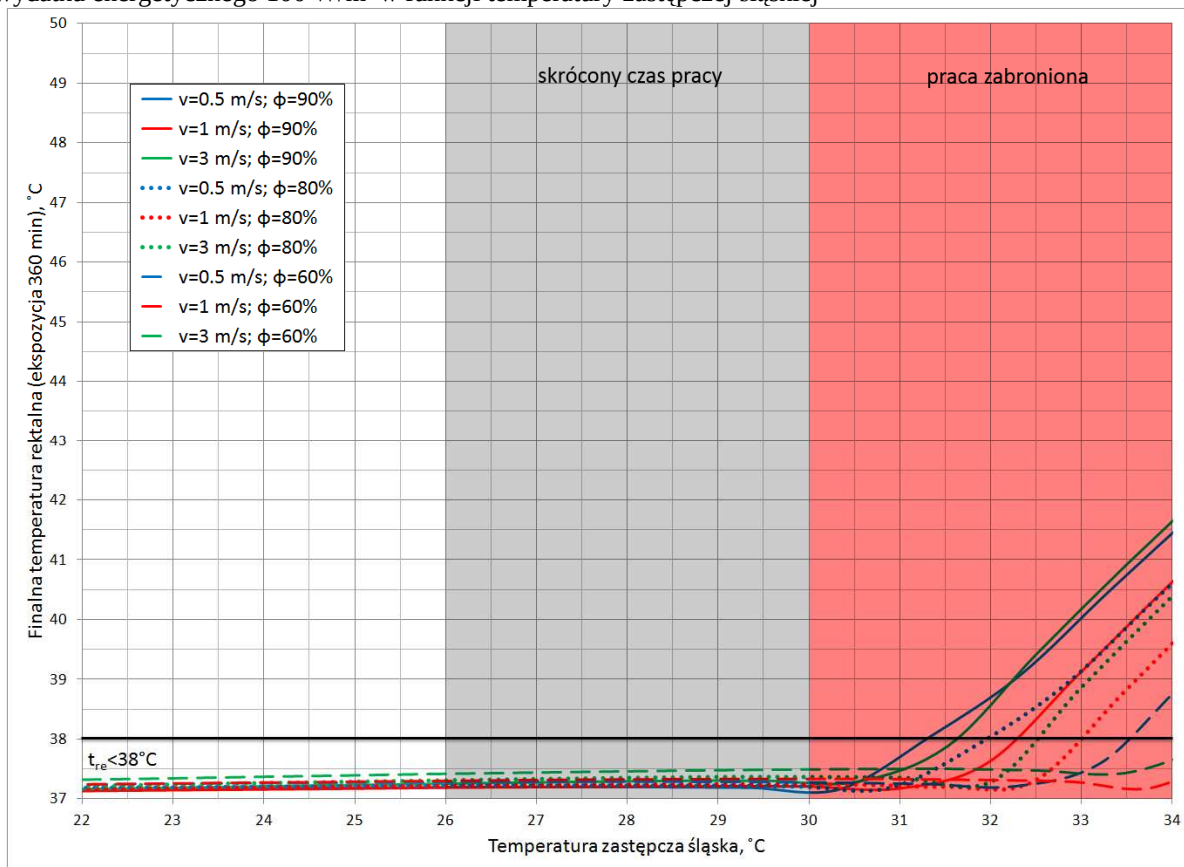
Rys. 68. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



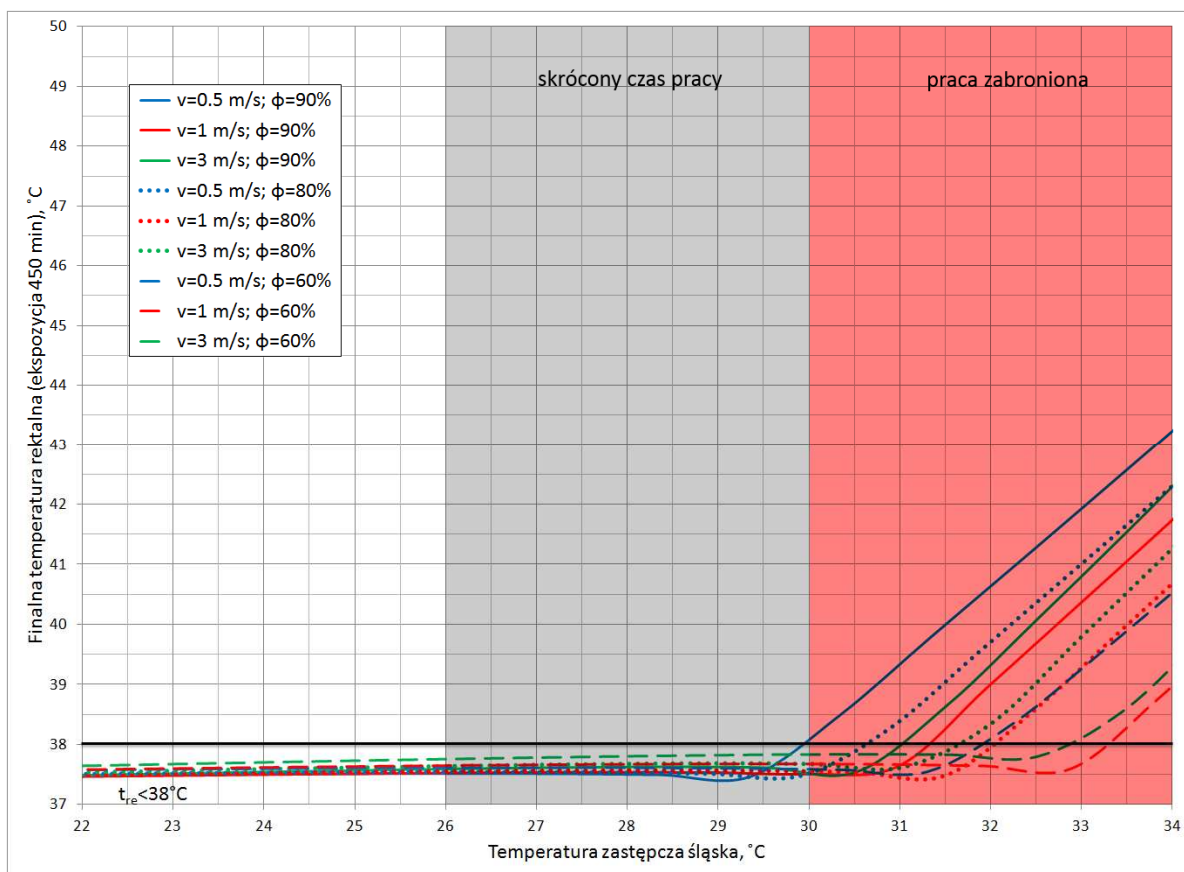
Rys. 69. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



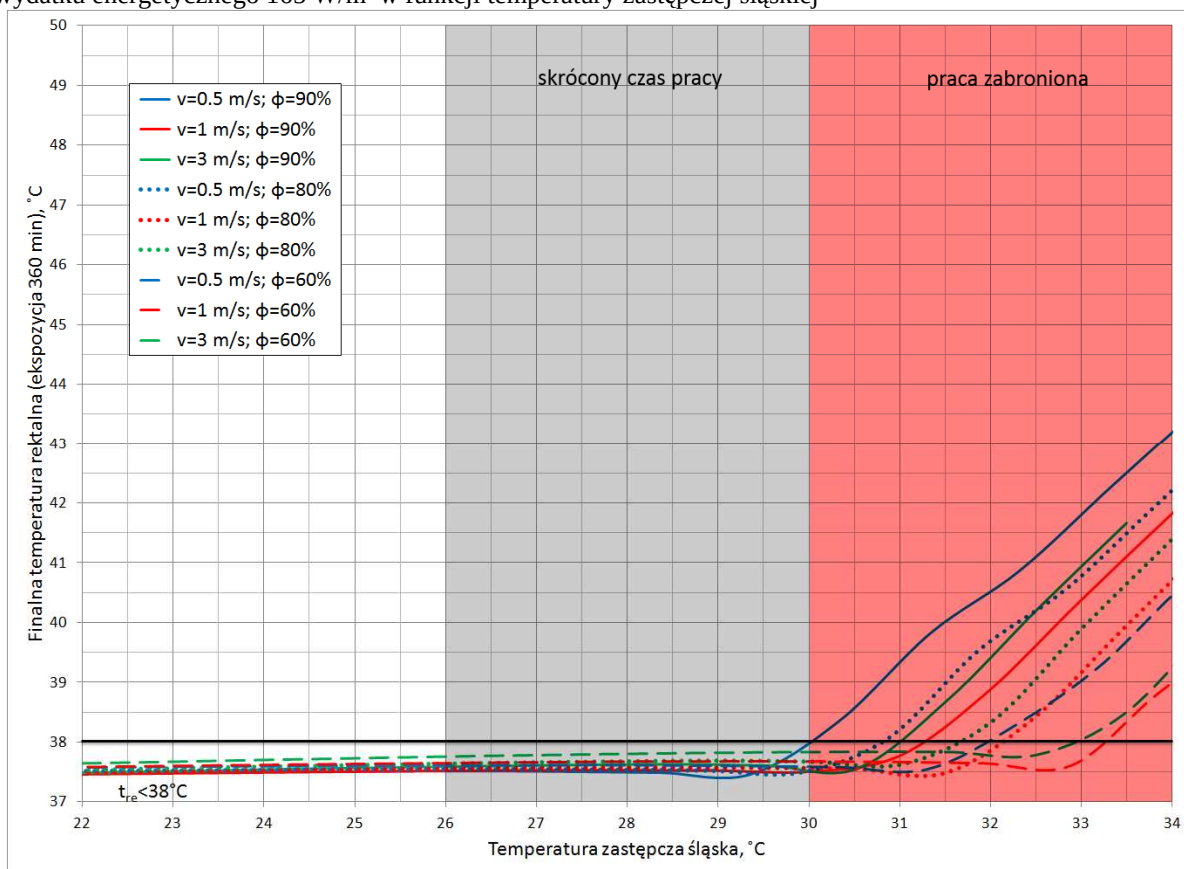
Rys. 70. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



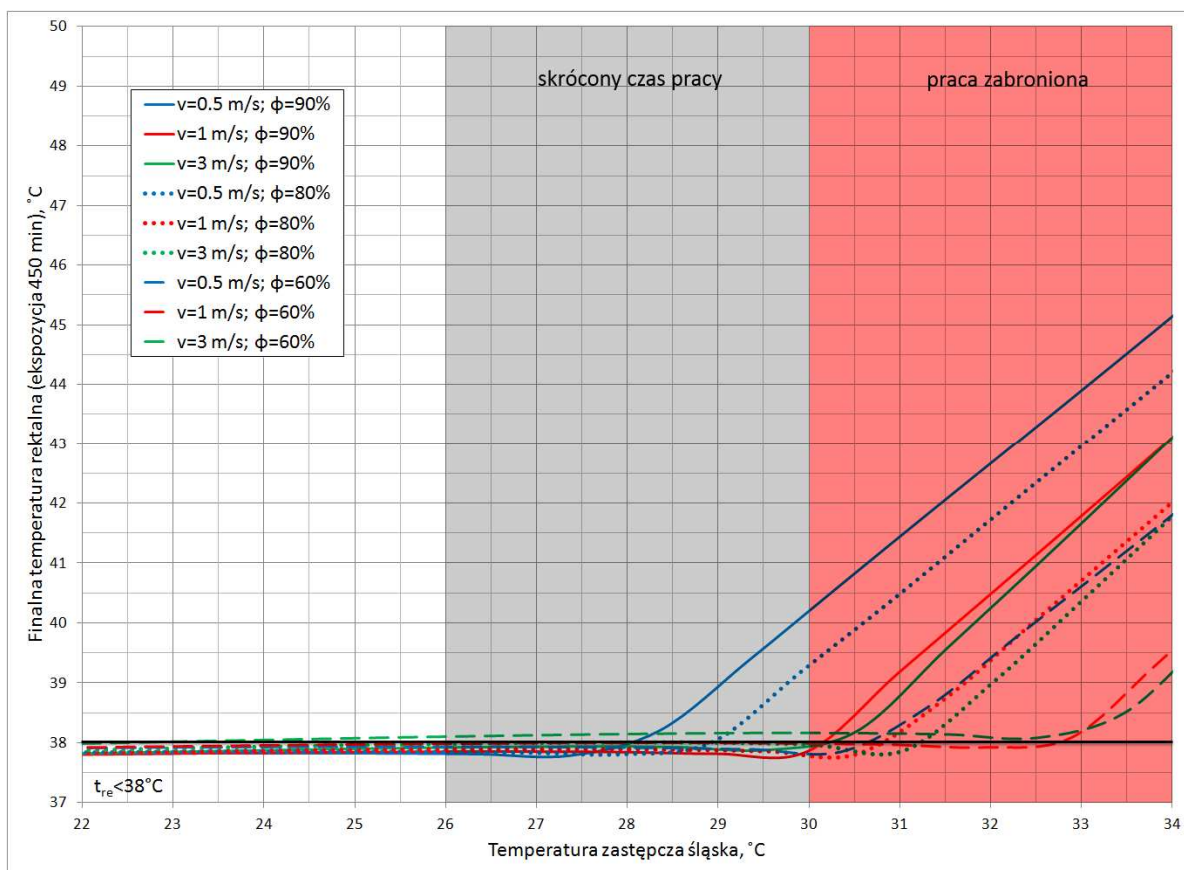
Rys. 71. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



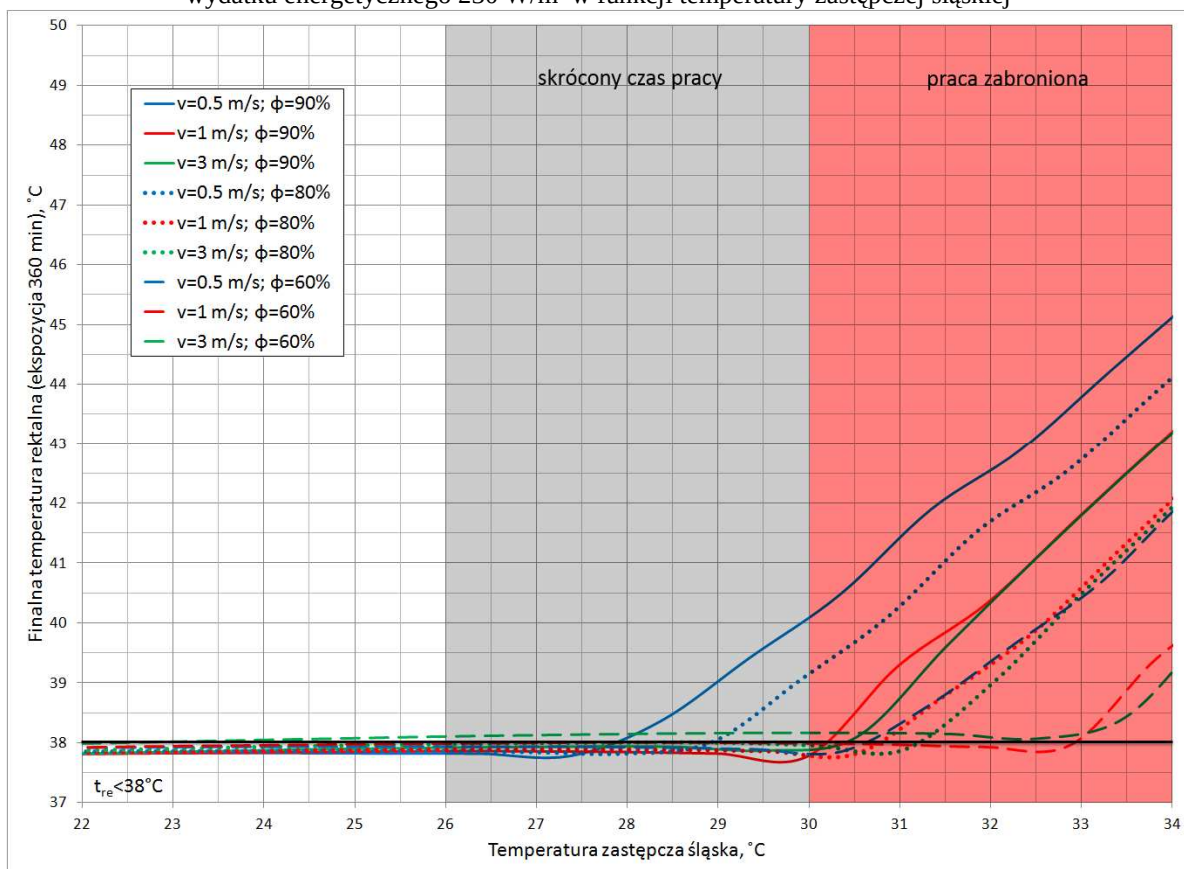
Rys. 72. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



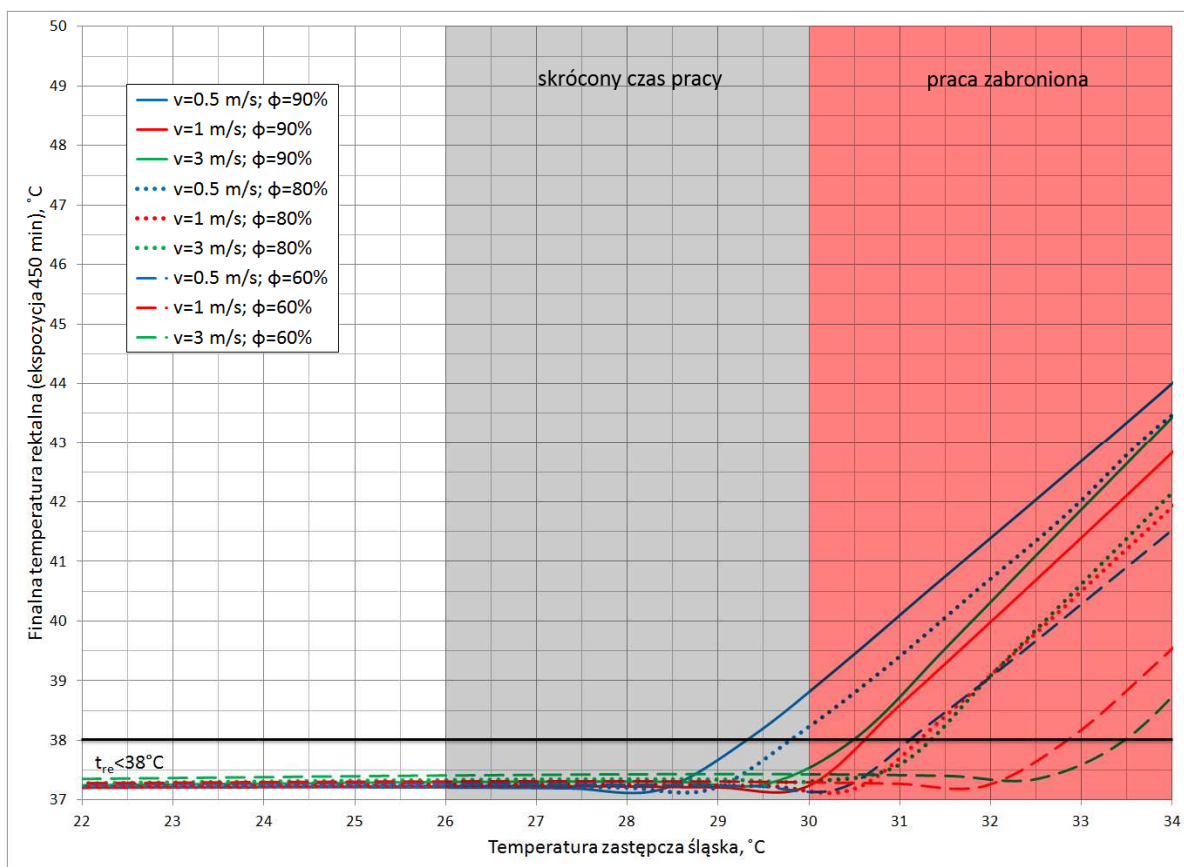
Rys. 73. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



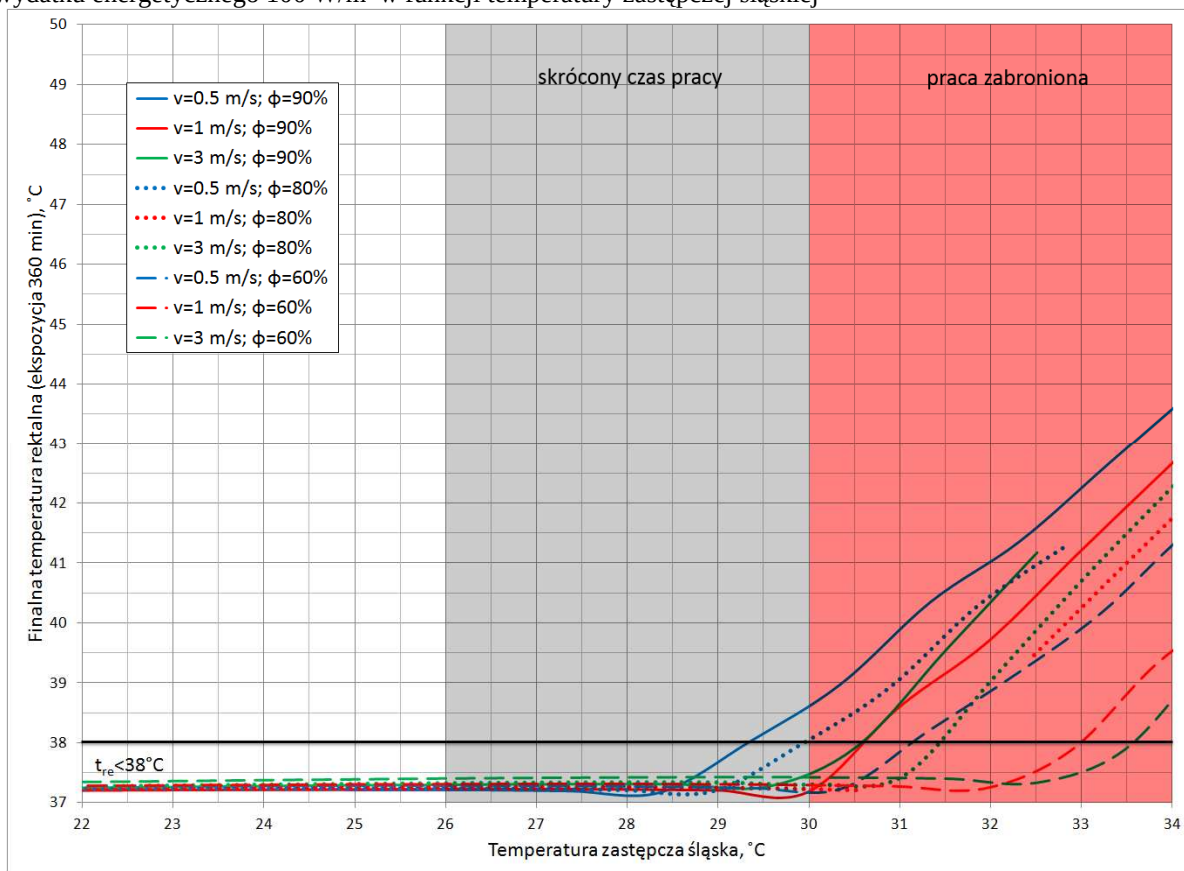
Rys. 74. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



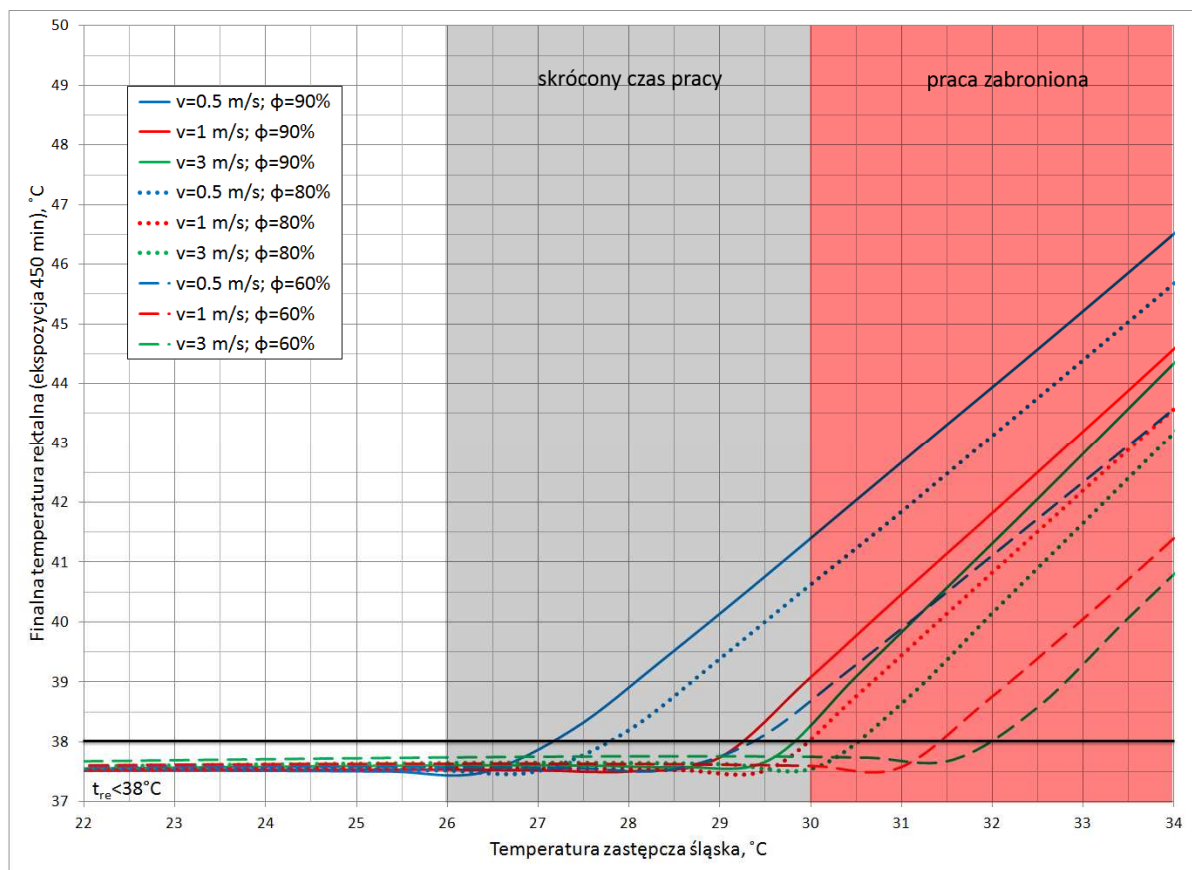
Rys. 75. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



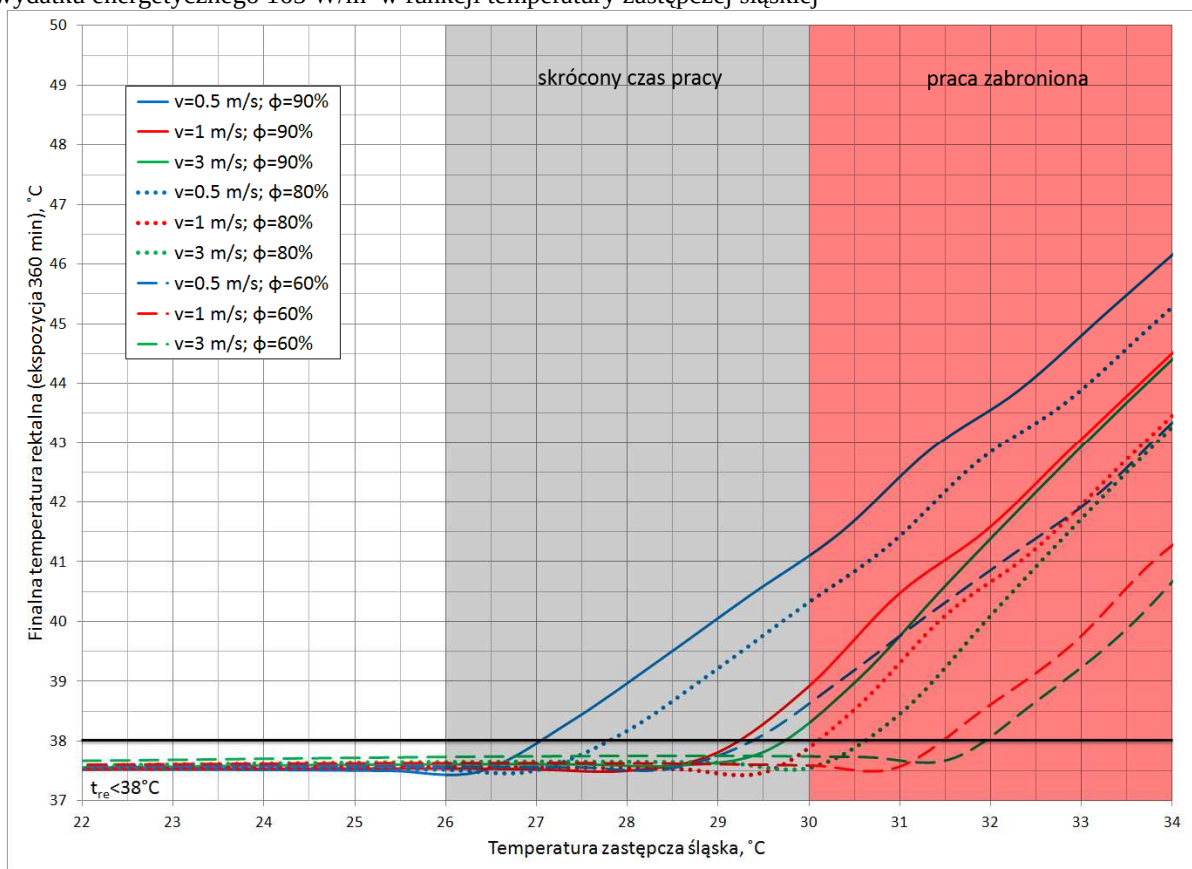
Rys. 76. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



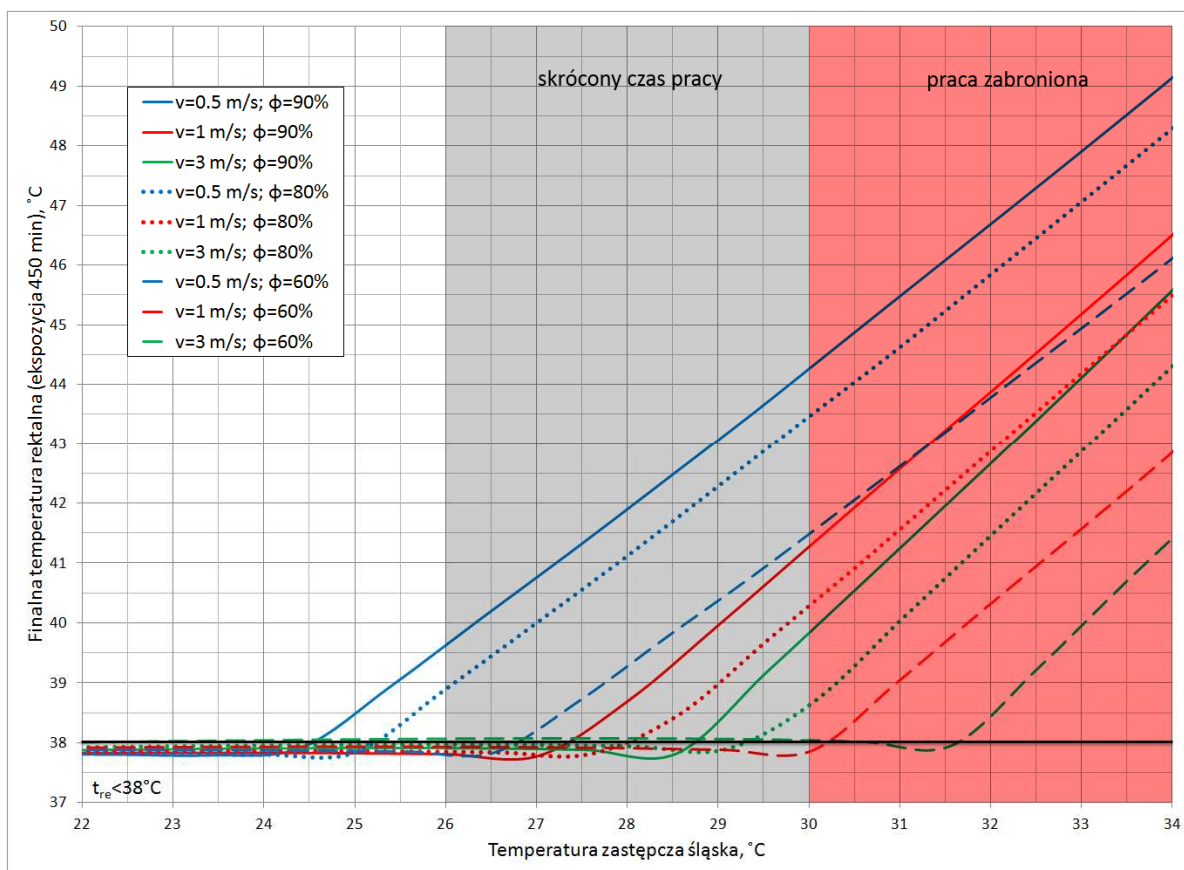
Rys. 77. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



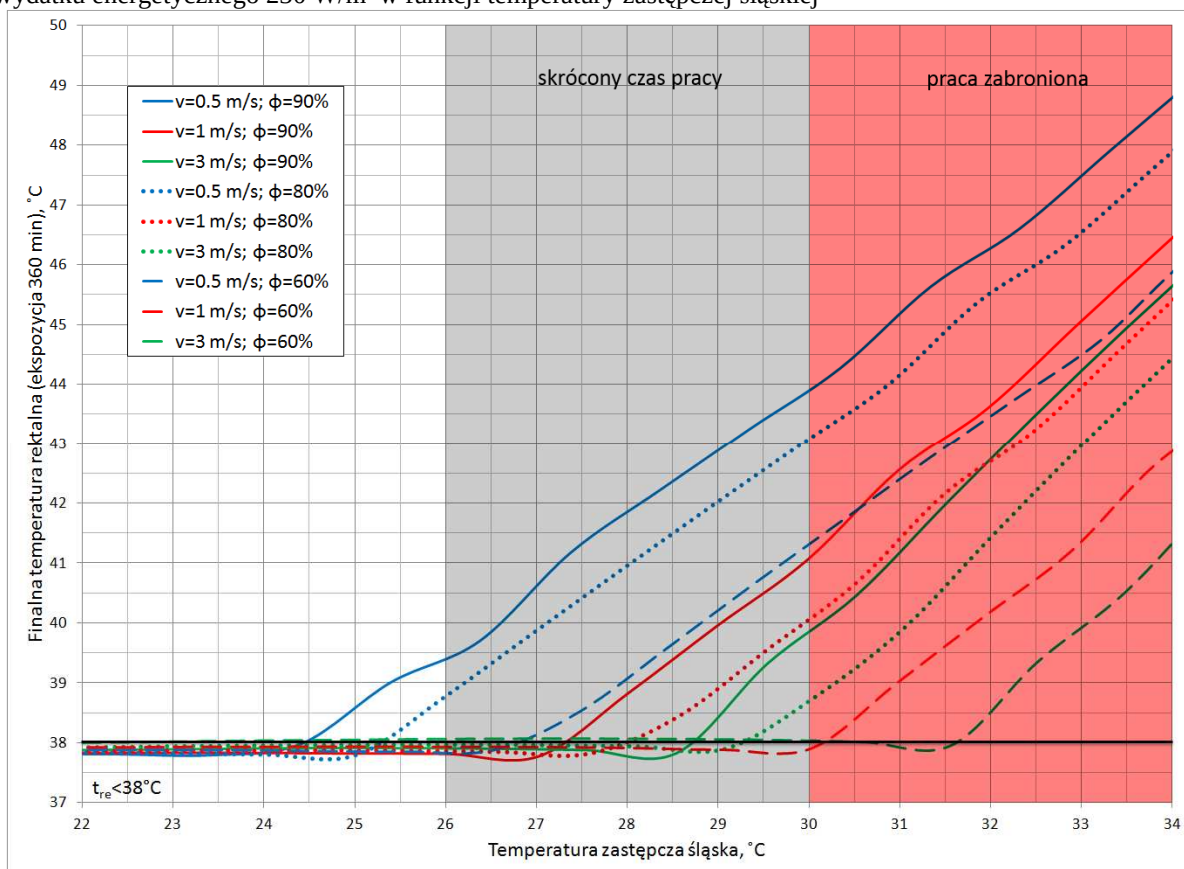
Rys. 78. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



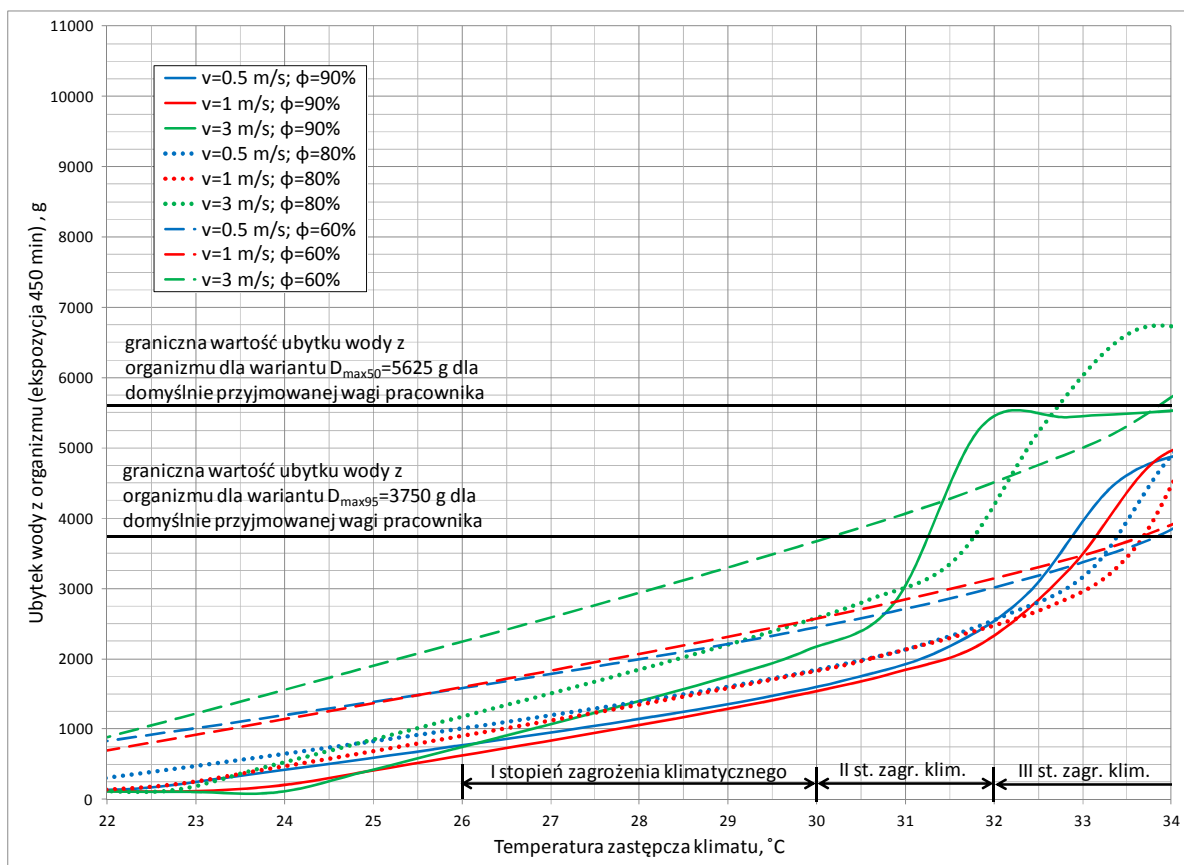
Rys. 79. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



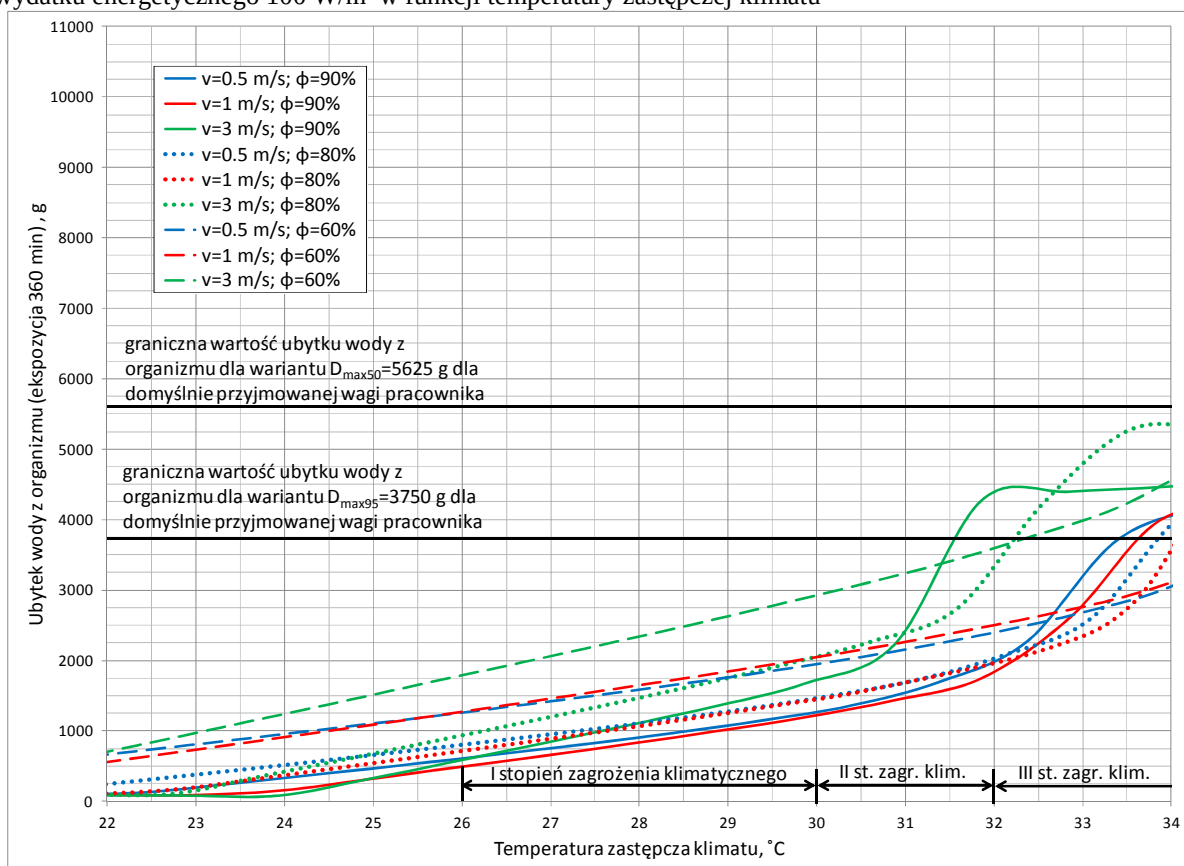
Rys. 80. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



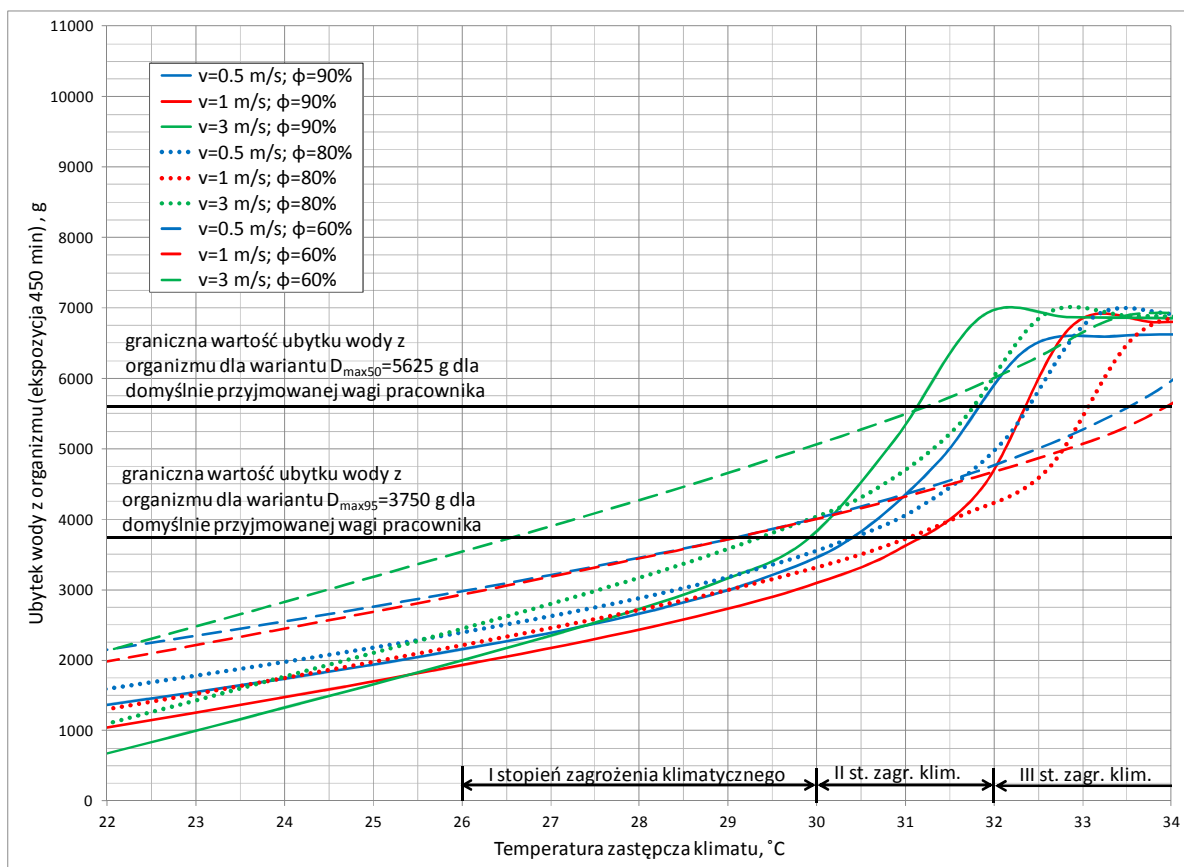
Rys. 81. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaskiej



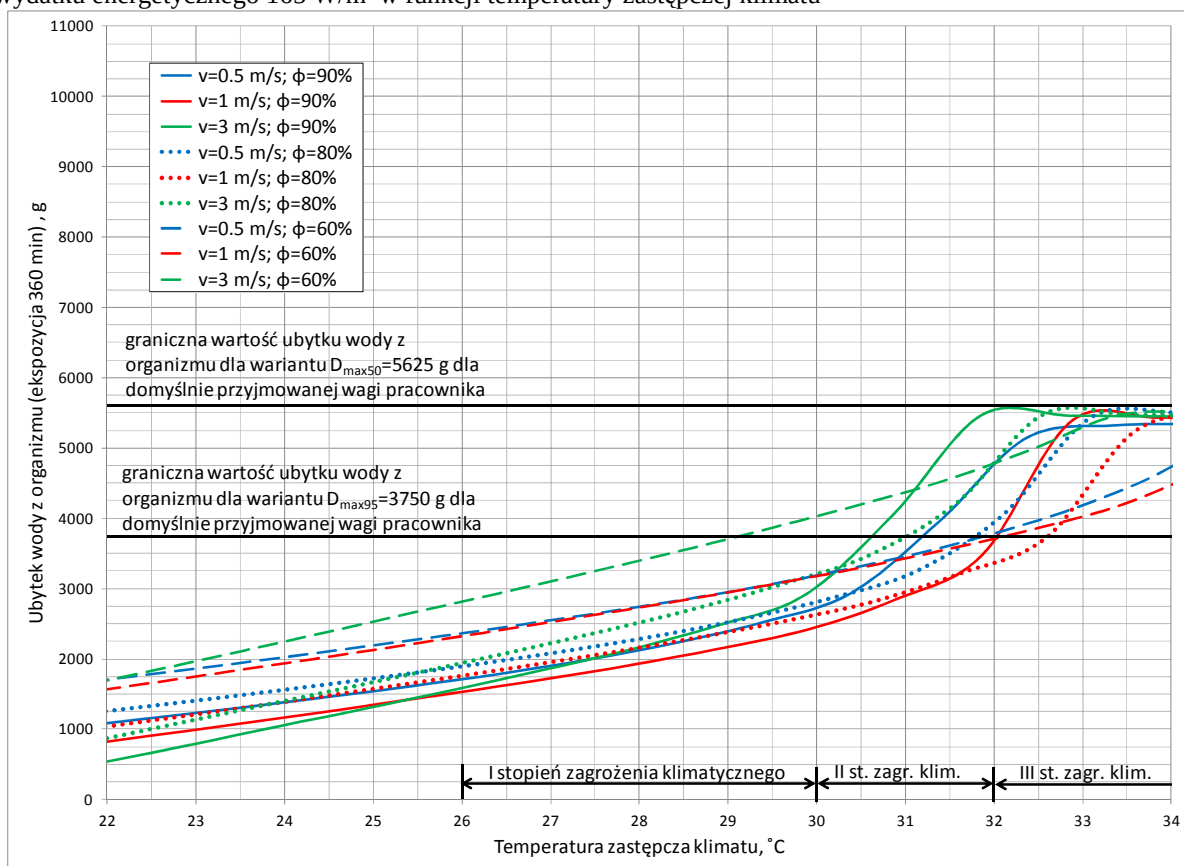
Rys. 82. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



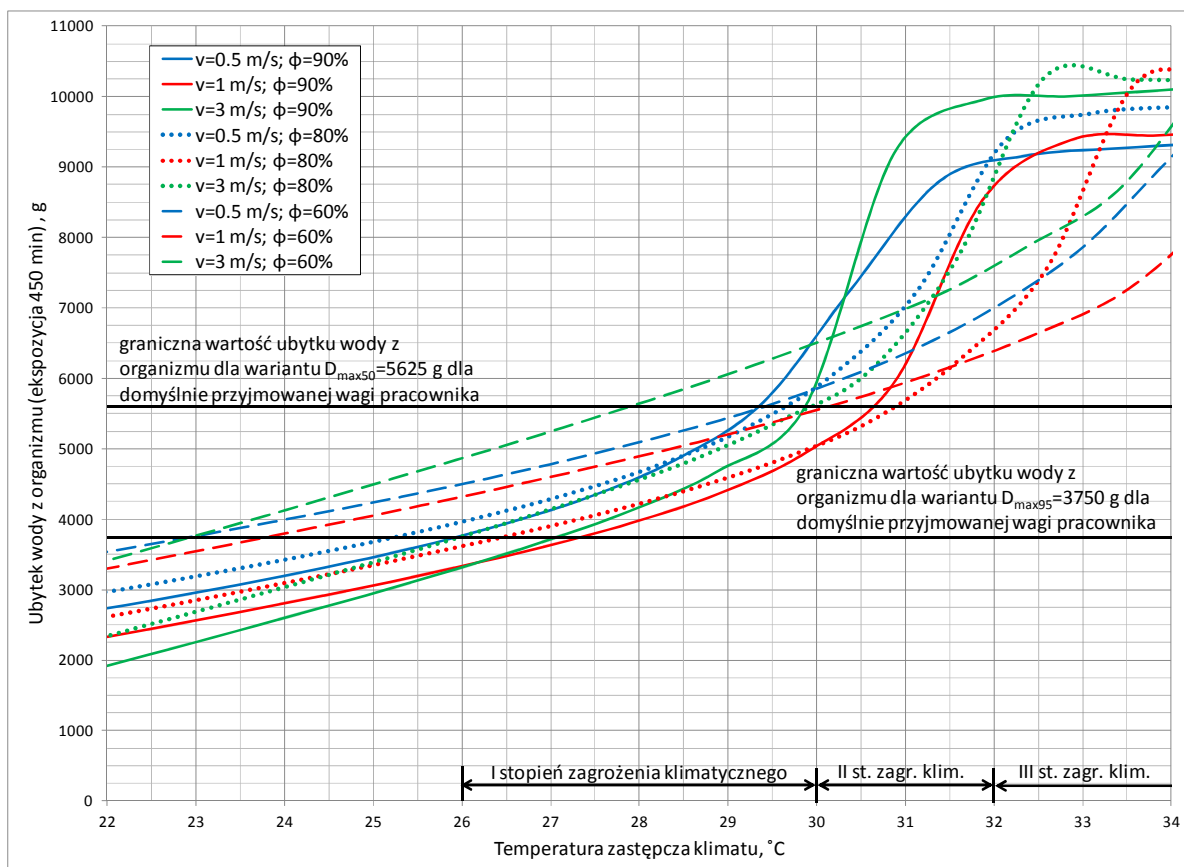
Rys. 83. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



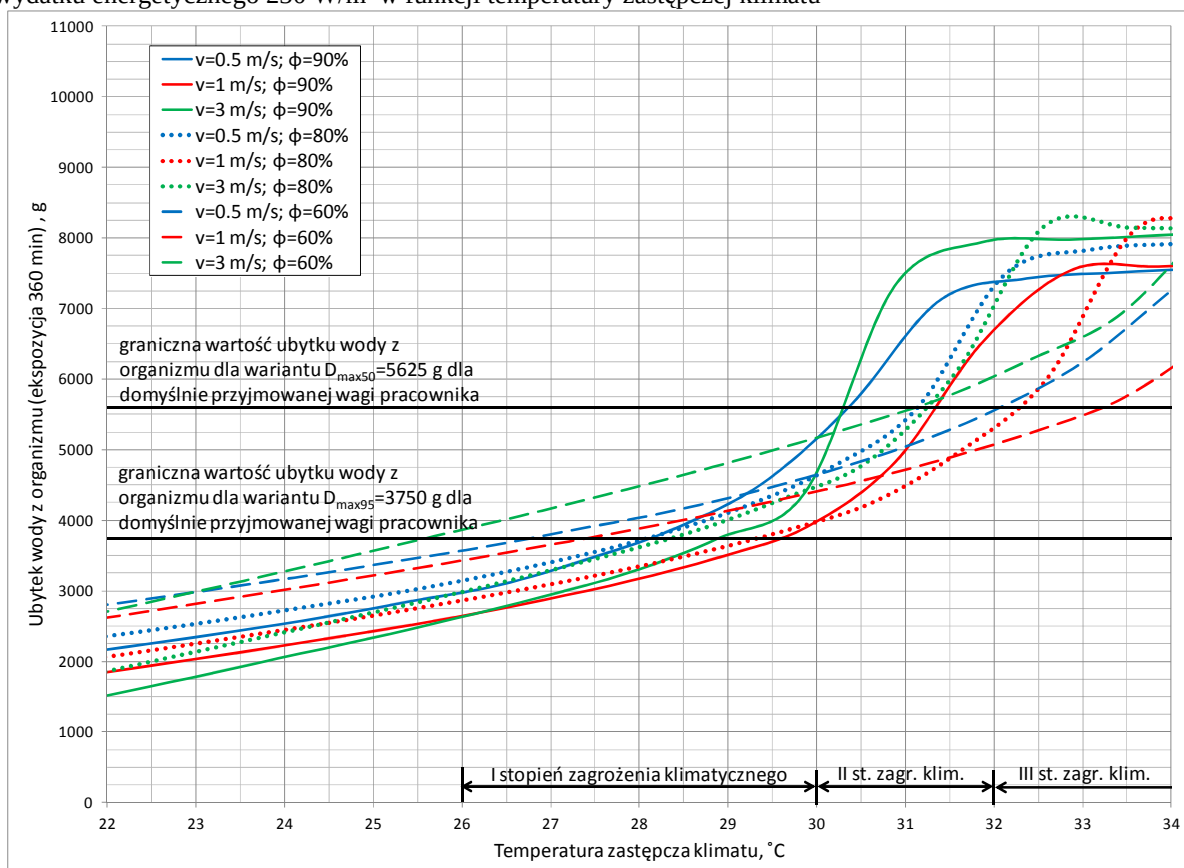
Rys. 84. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



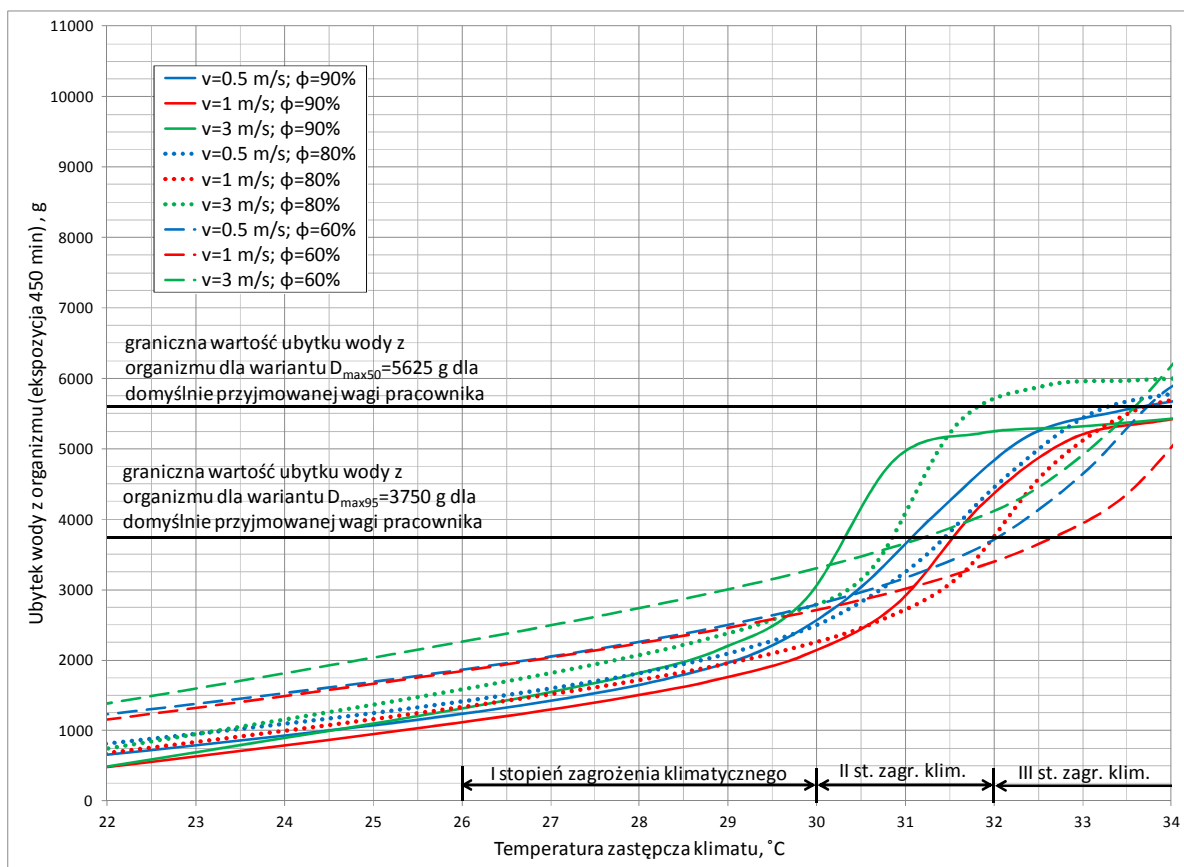
Rys. 85. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



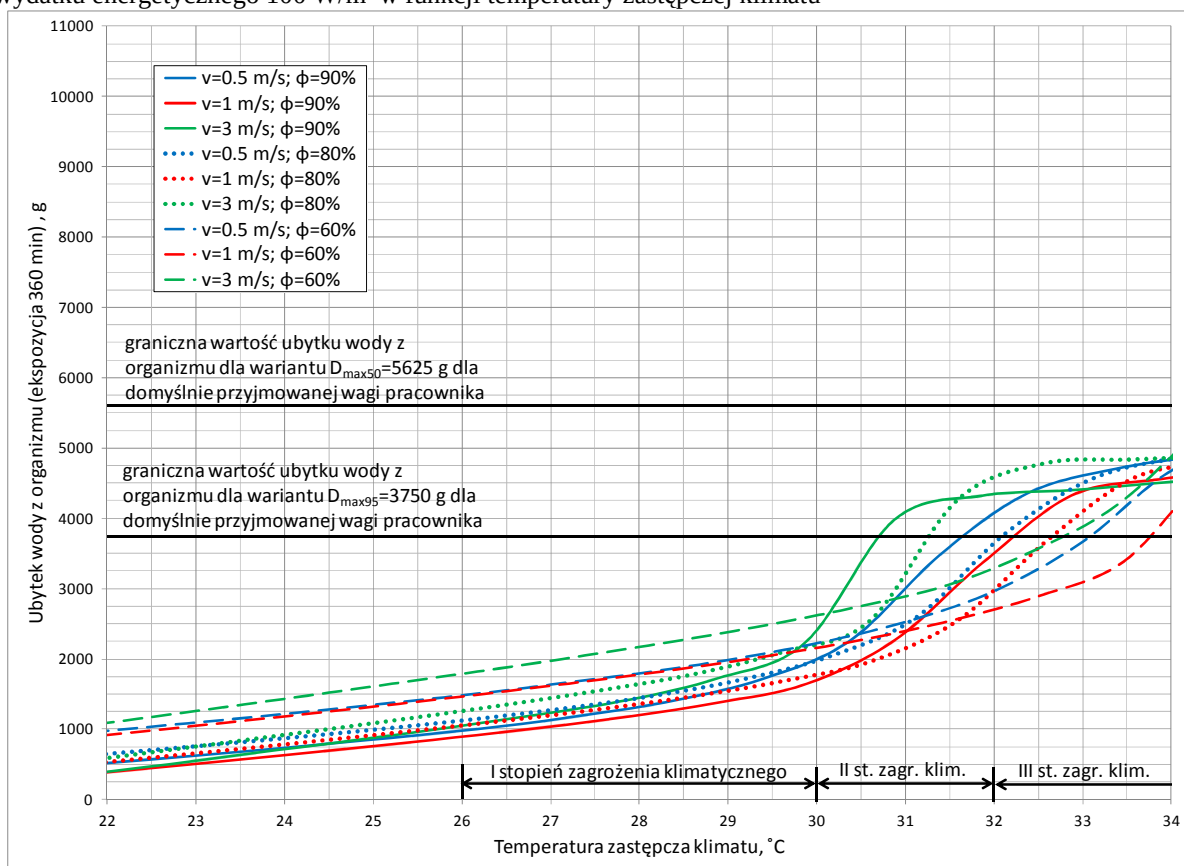
Rys. 86. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



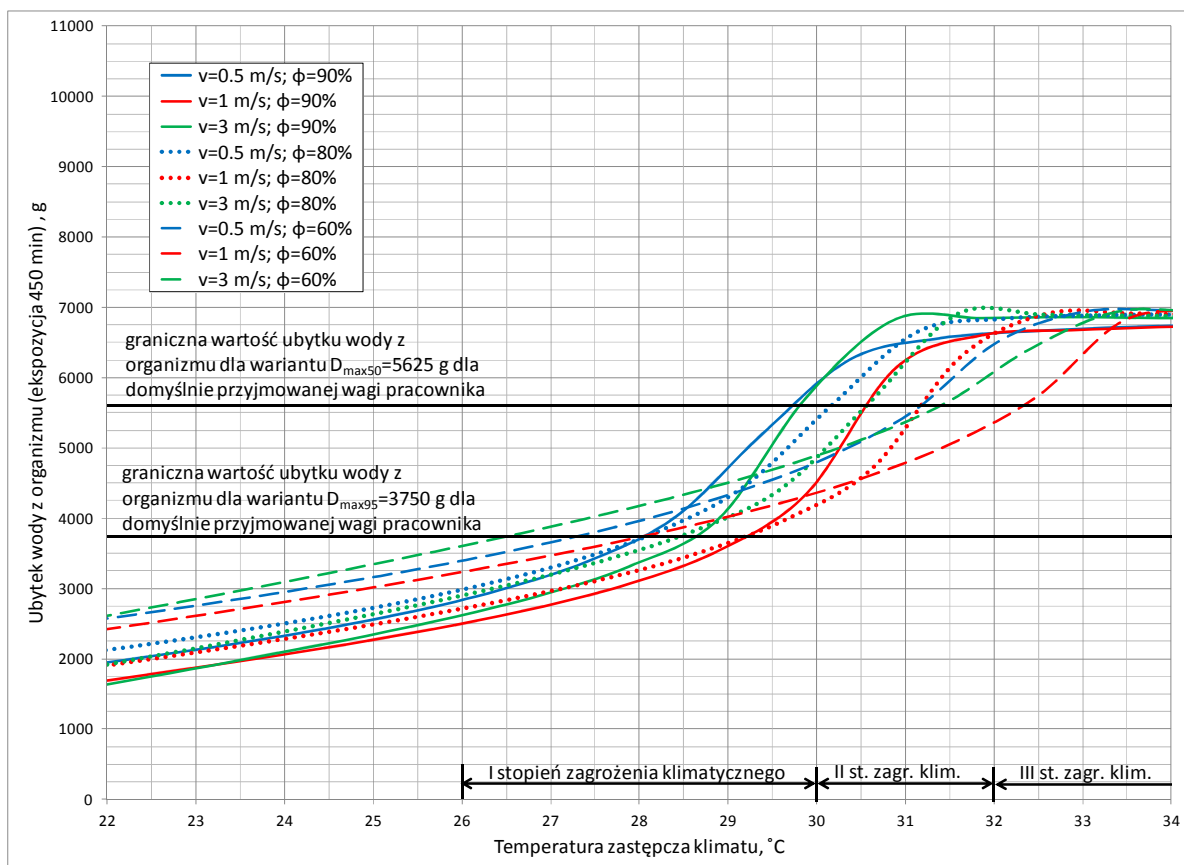
Rys. 87. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



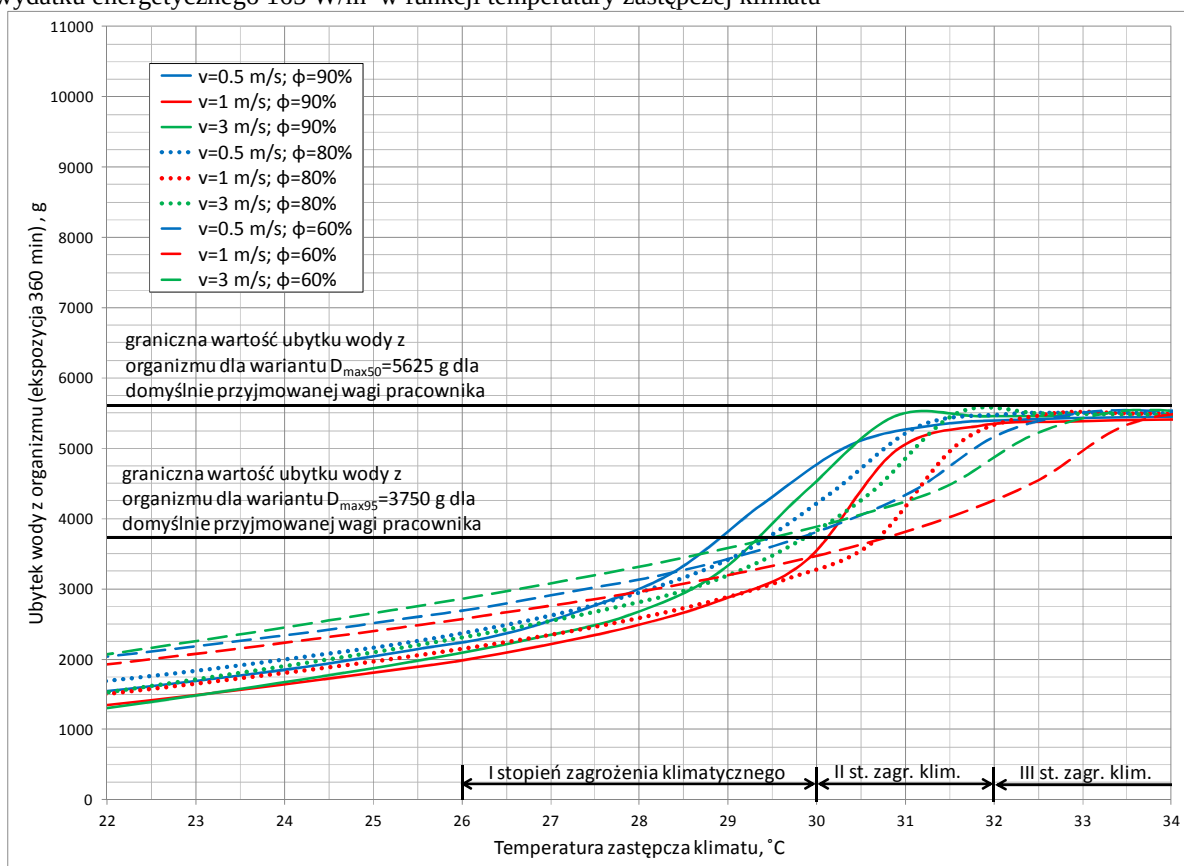
Rys. 88. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



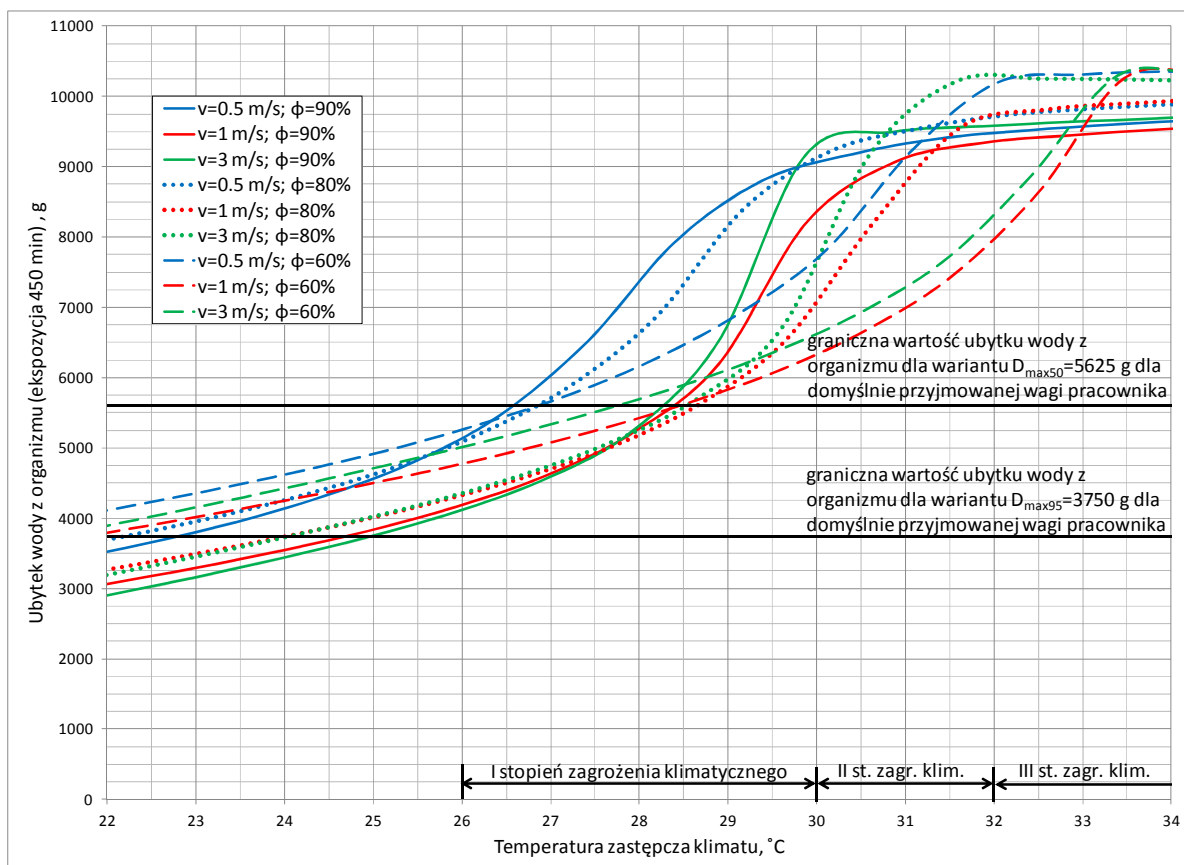
Rys. 89. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



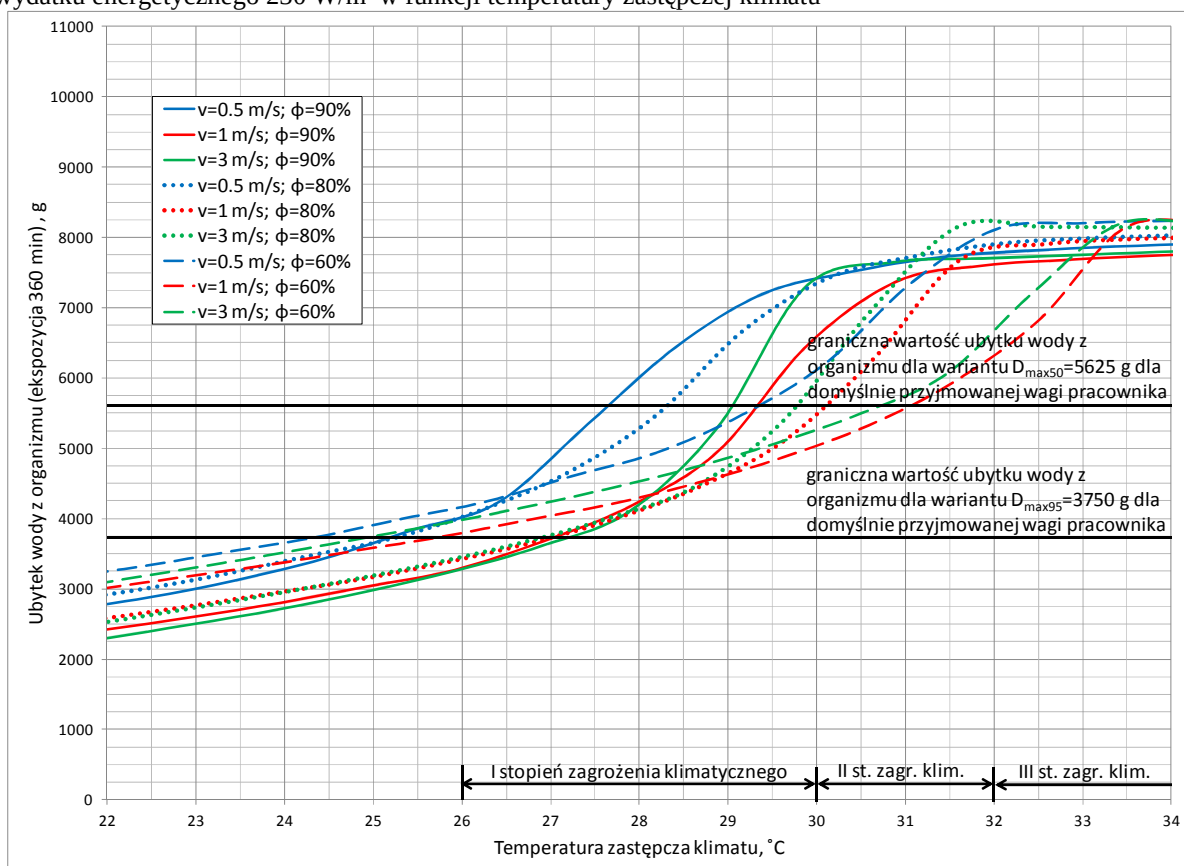
Rys. 90. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



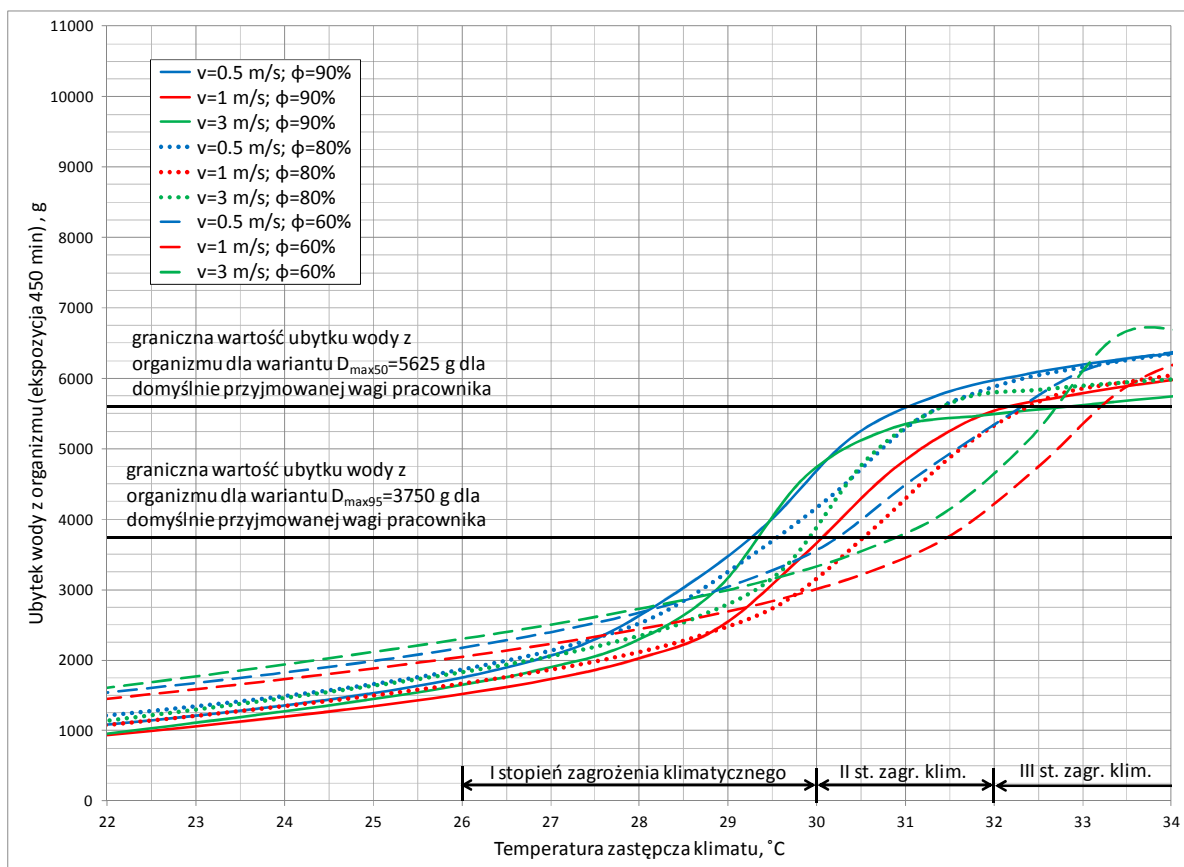
Rys. 91. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



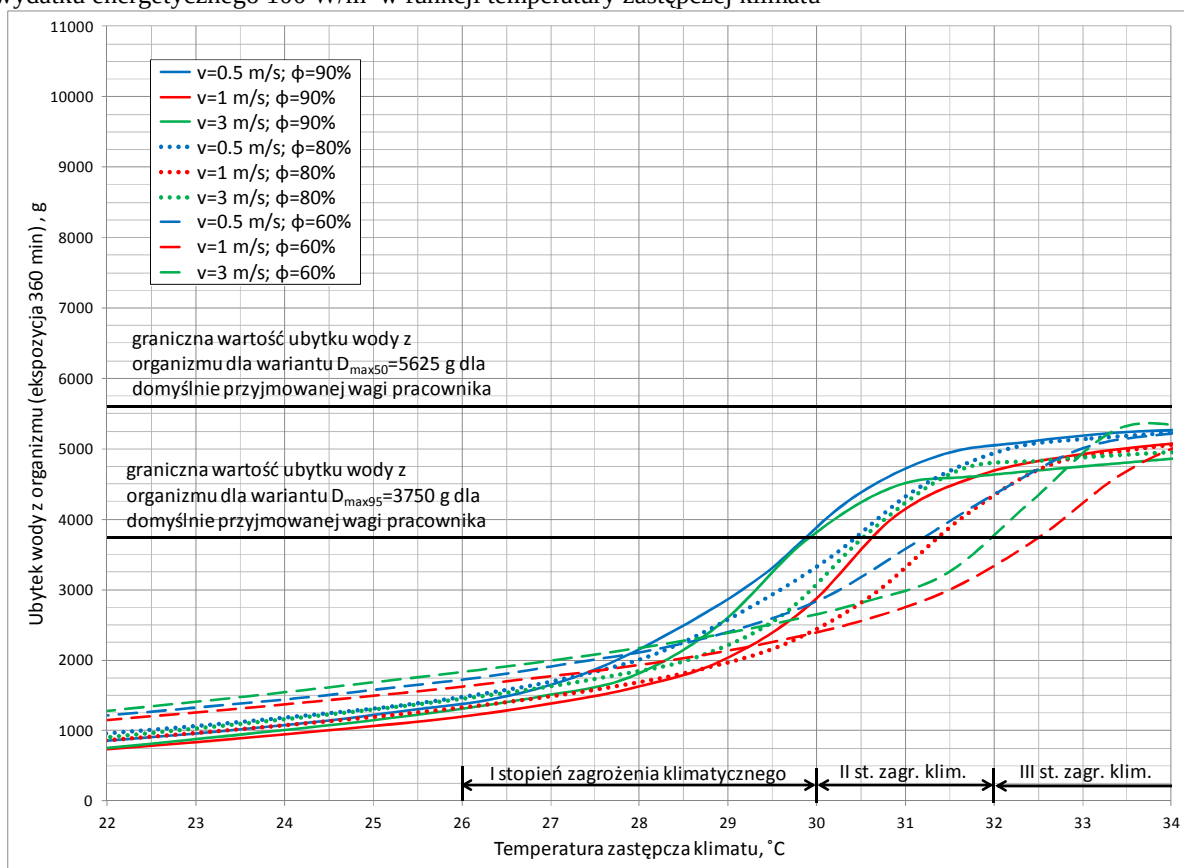
Rys. 92. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



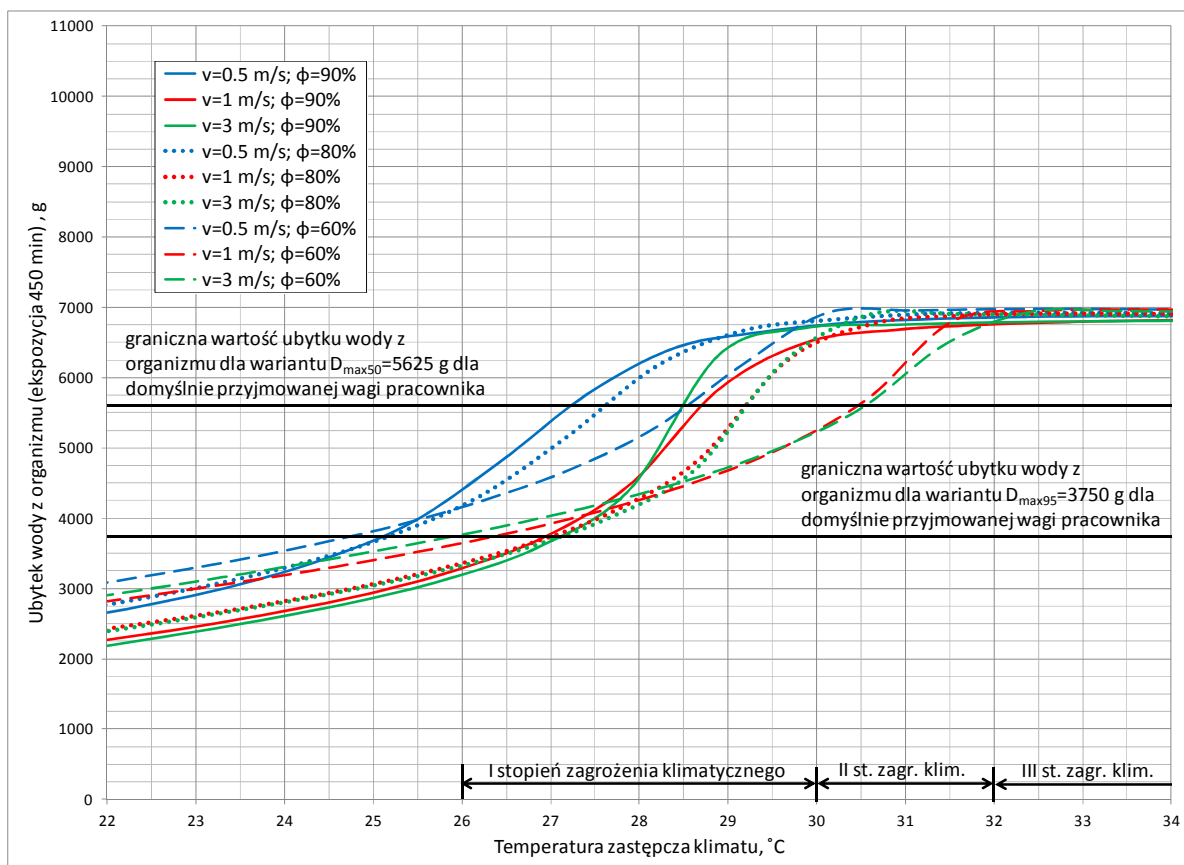
Rys. 93. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



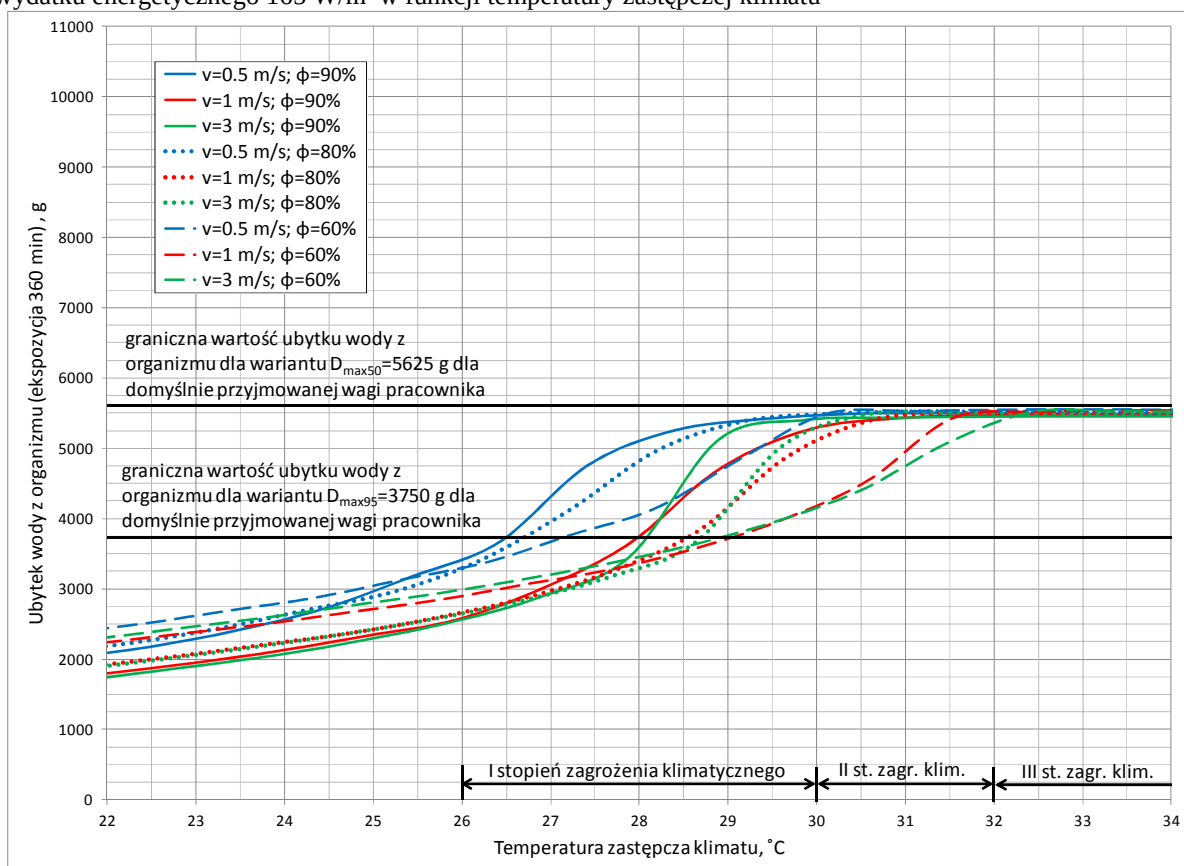
Rys. 94. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



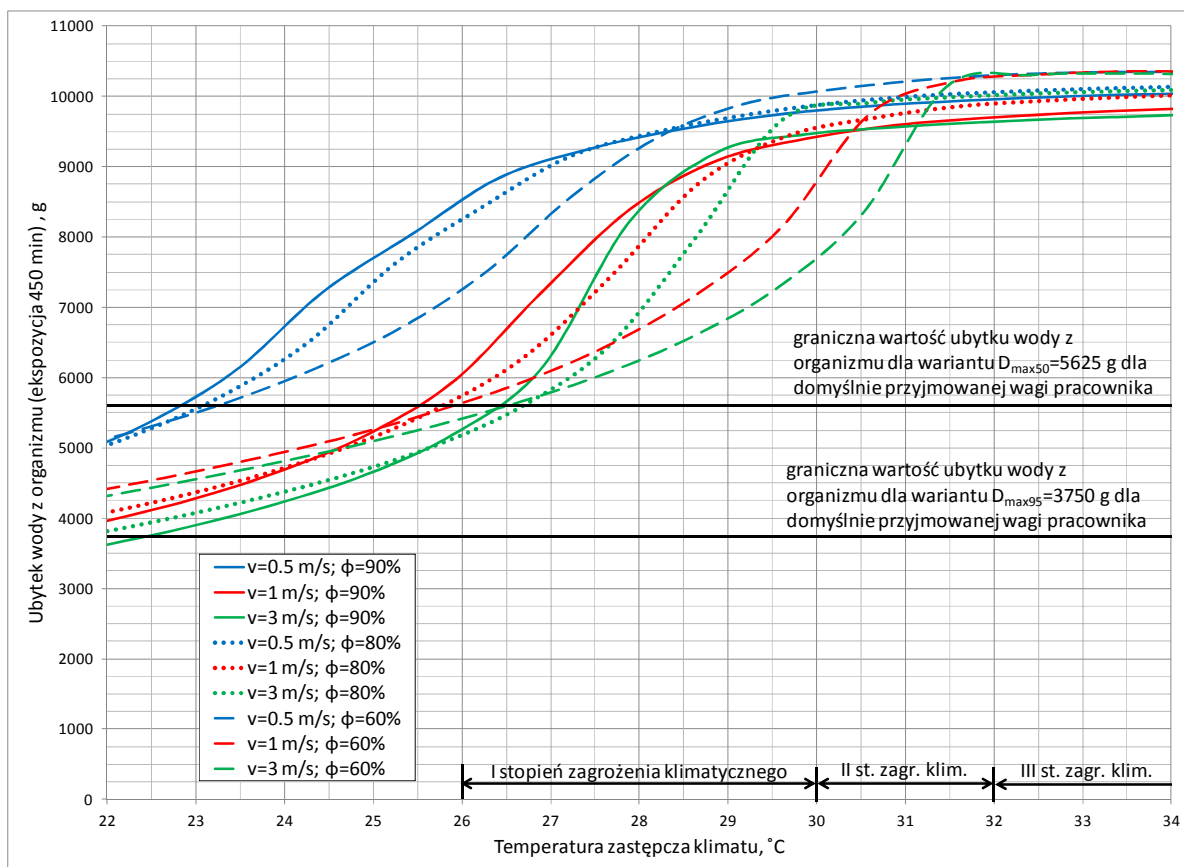
Rys. 95. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



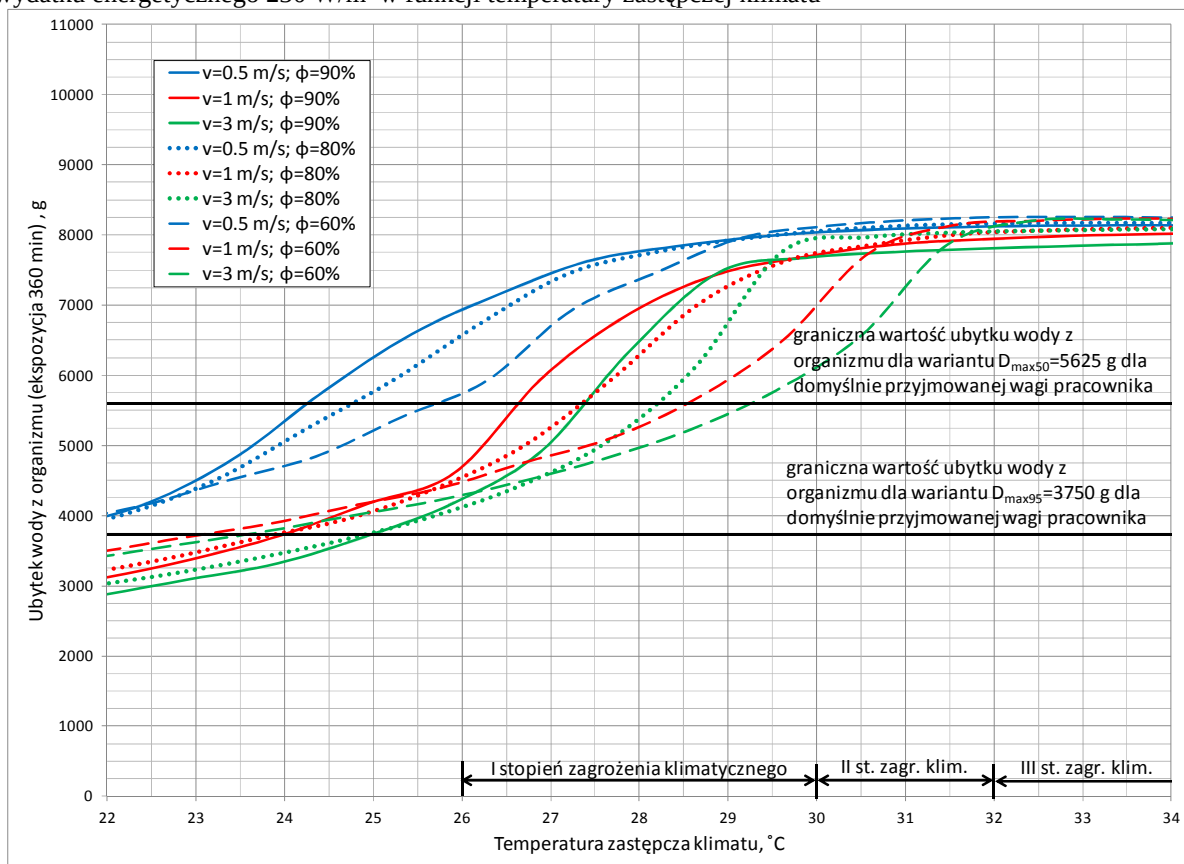
Rys. 96. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



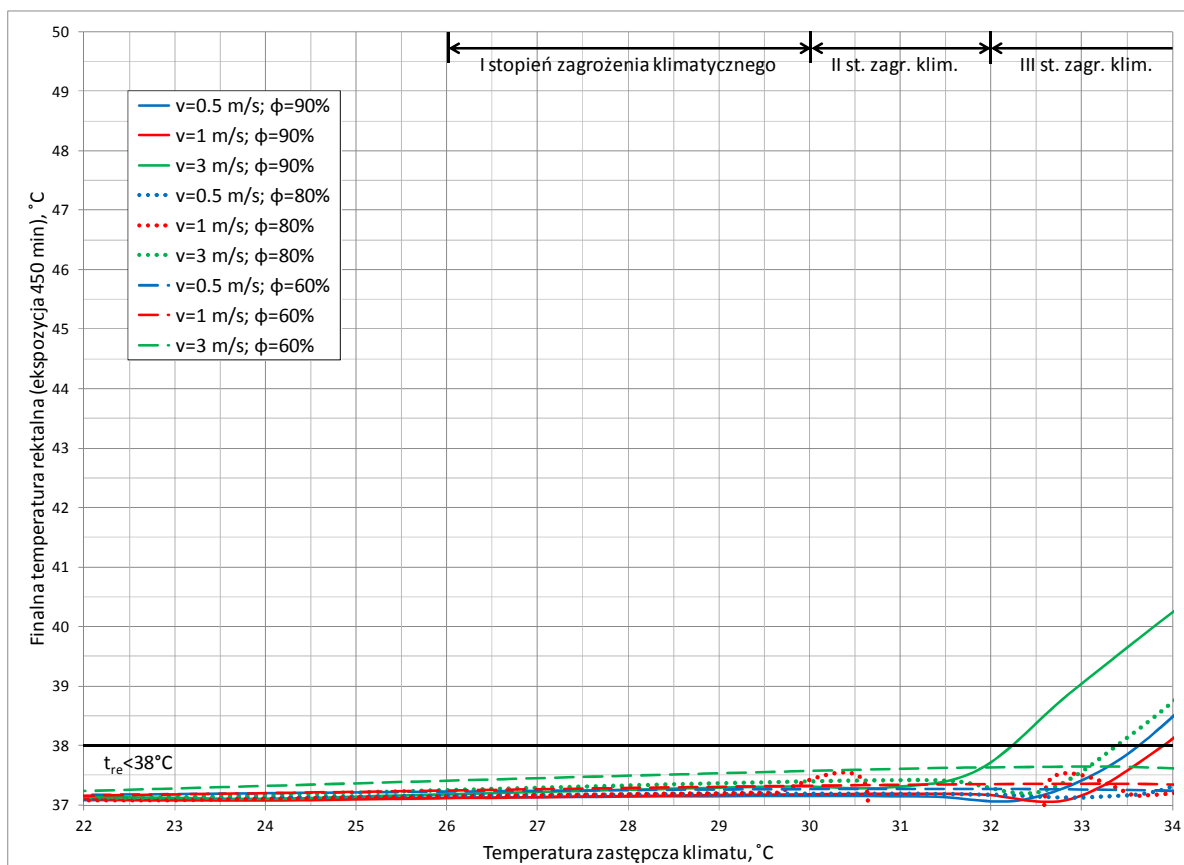
Rys. 97. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



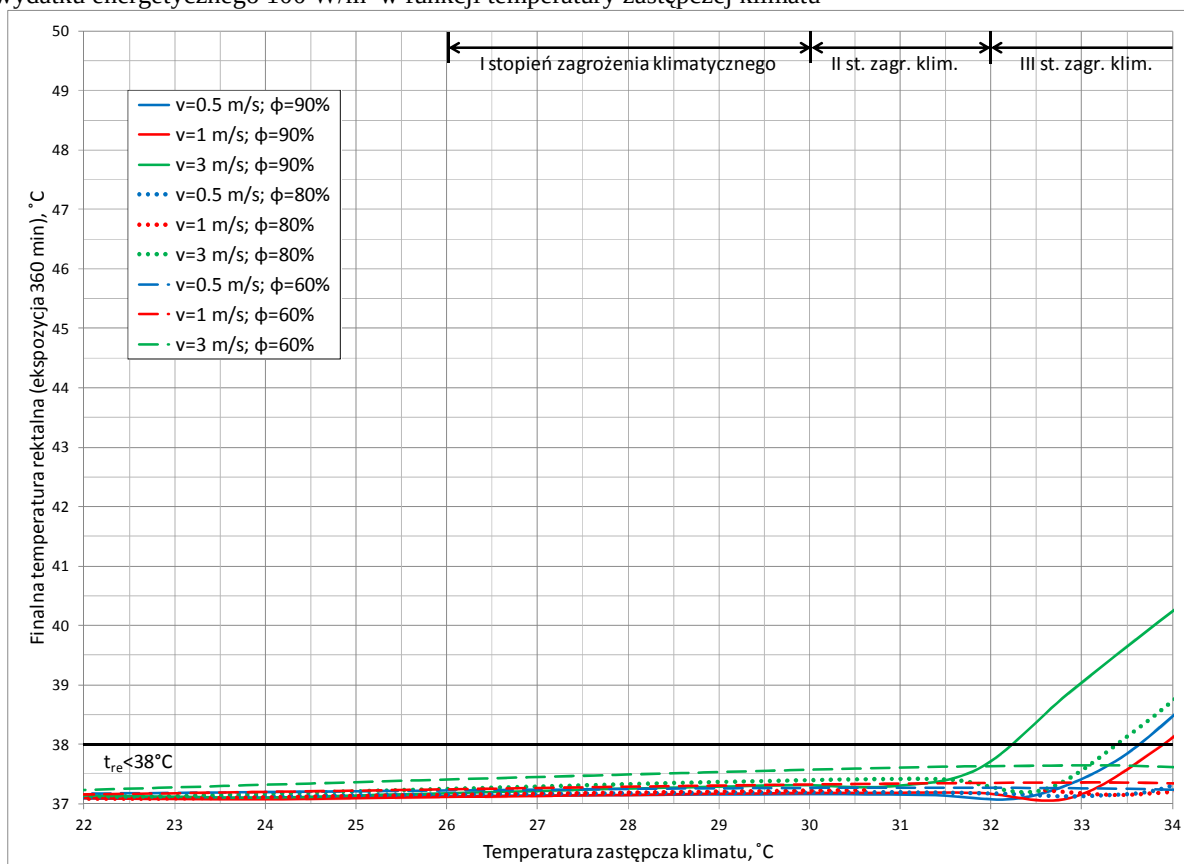
Rys. 98. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



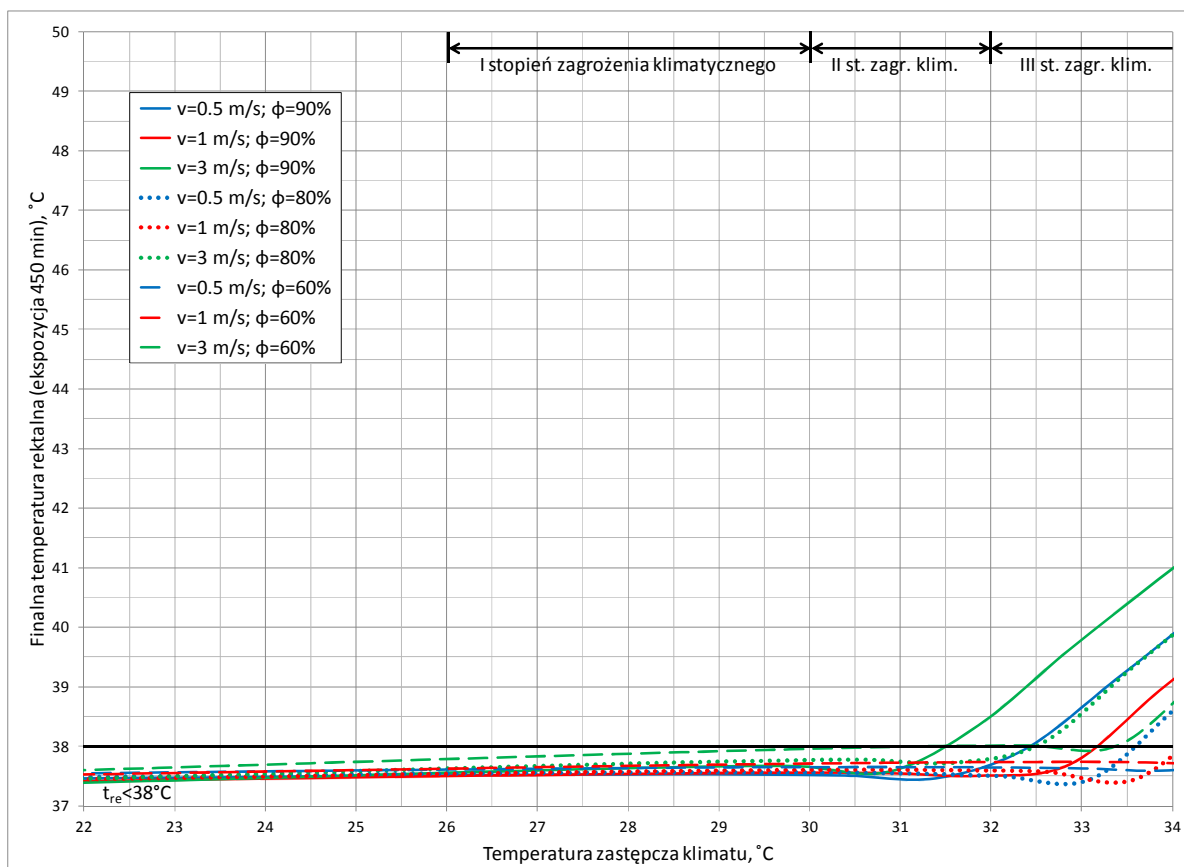
Rys. 99. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



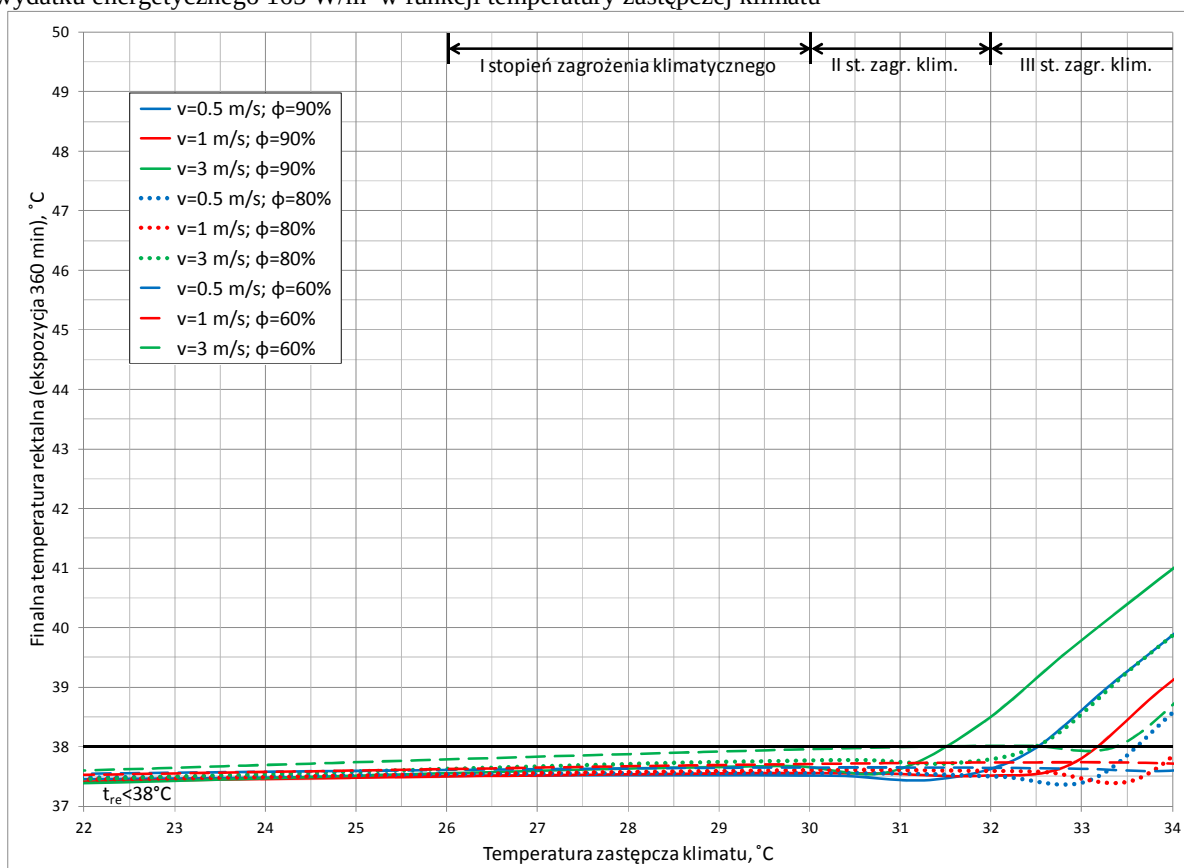
Rys. 100. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



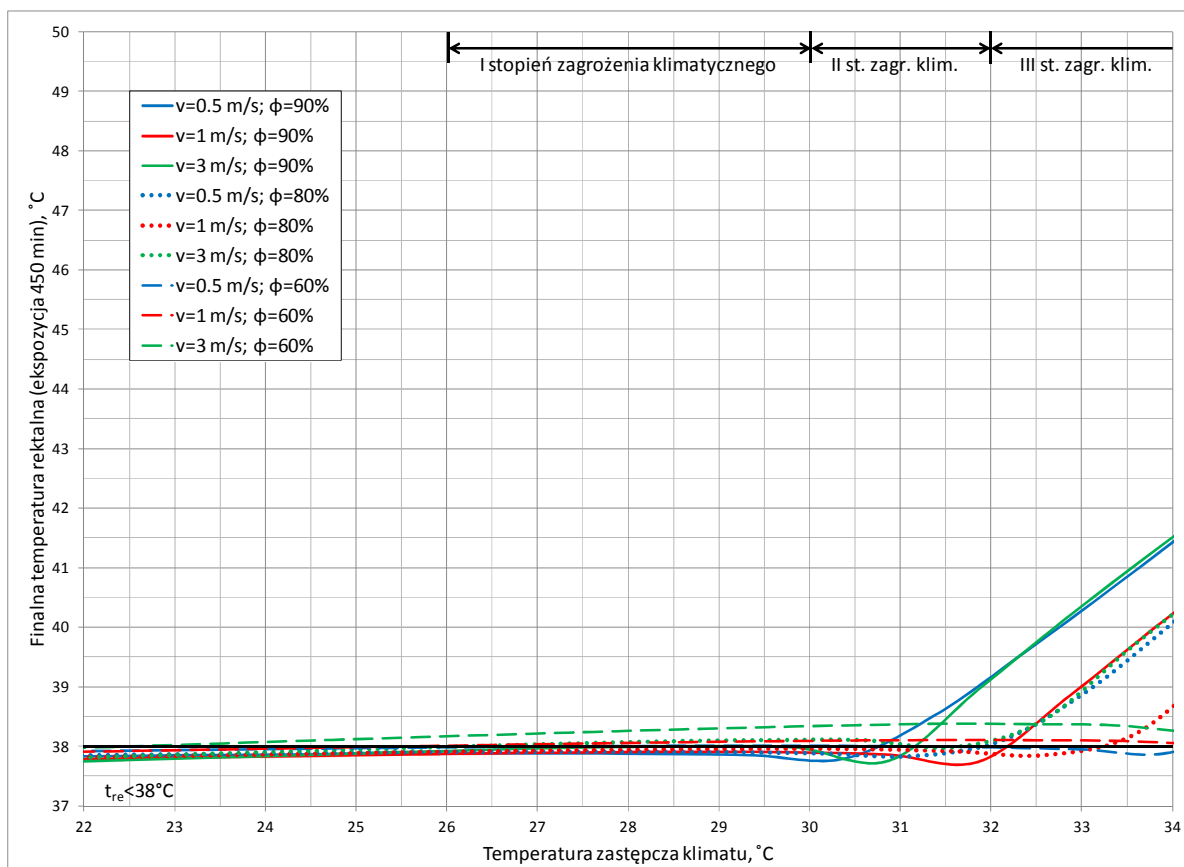
Rys. 101. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



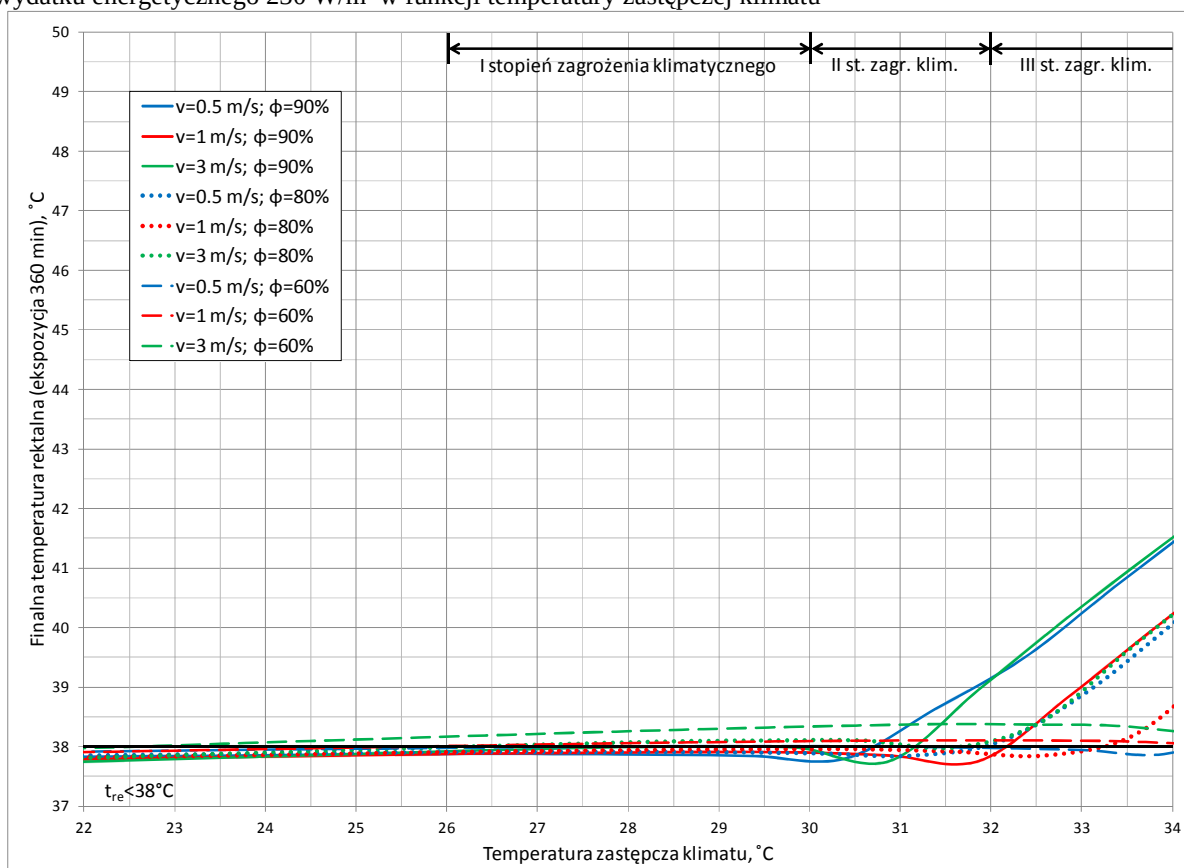
Rys. 102. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



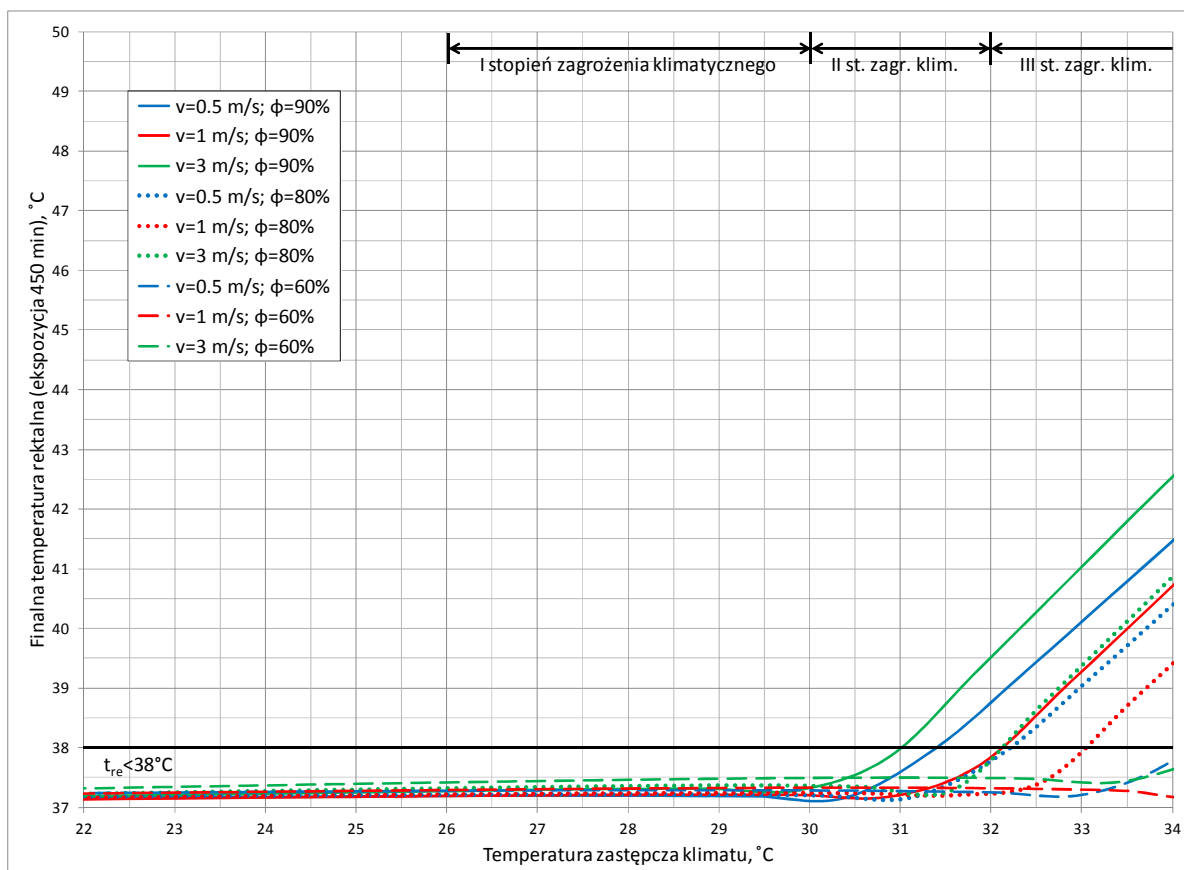
Rys. 103. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



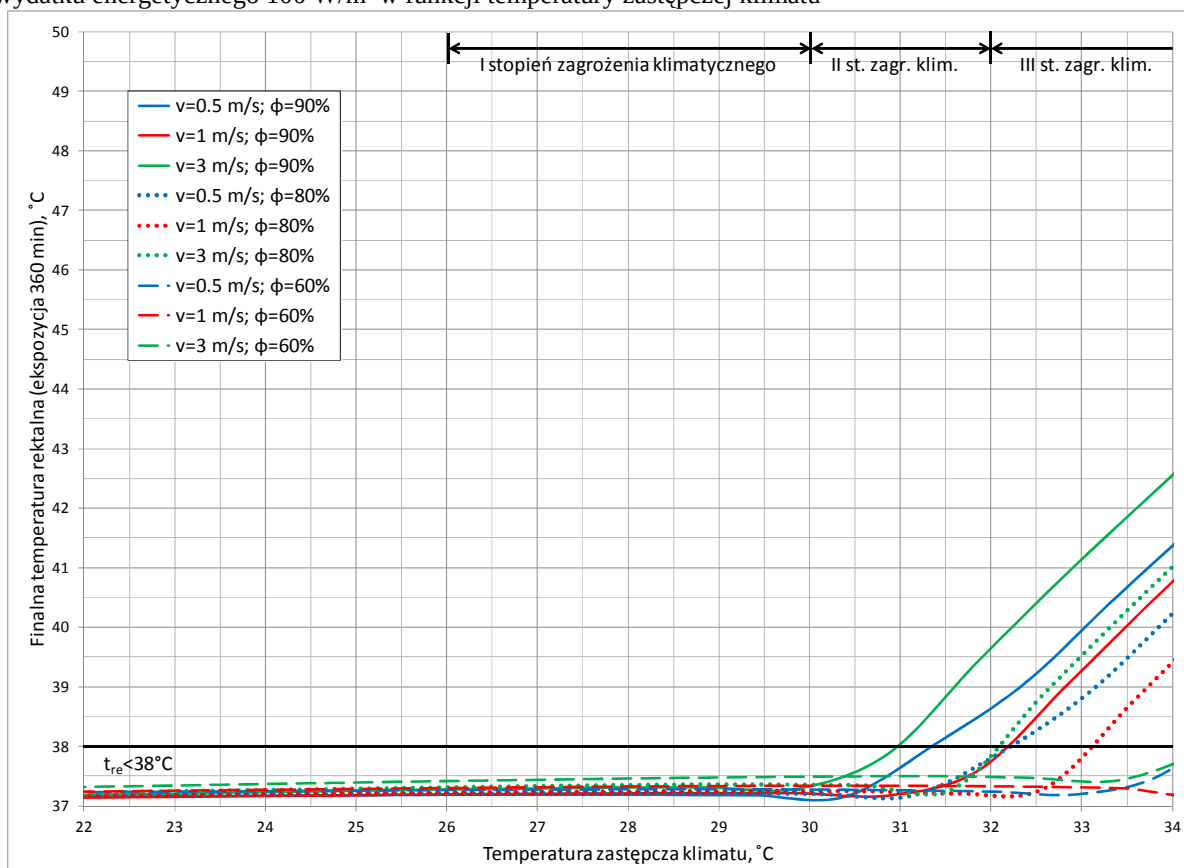
Rys. 104. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



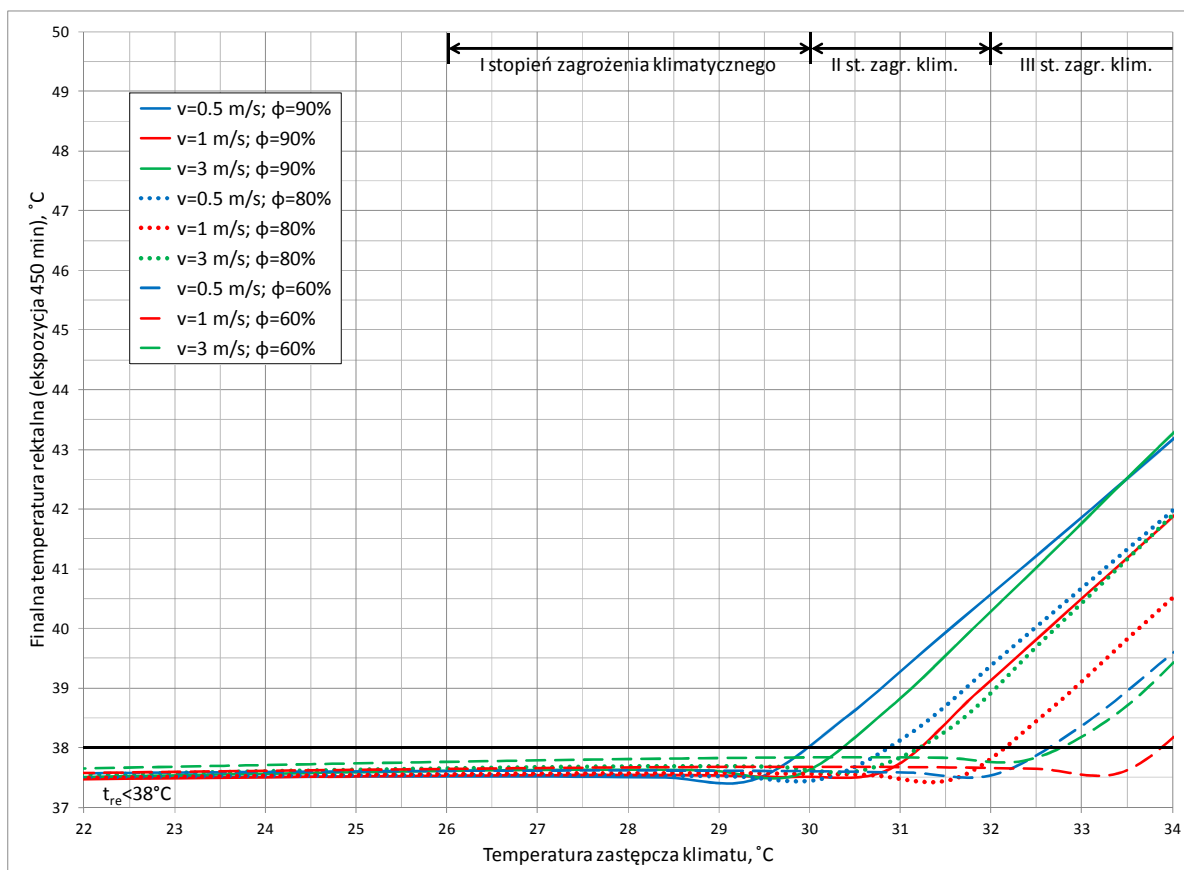
Rys. 105. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



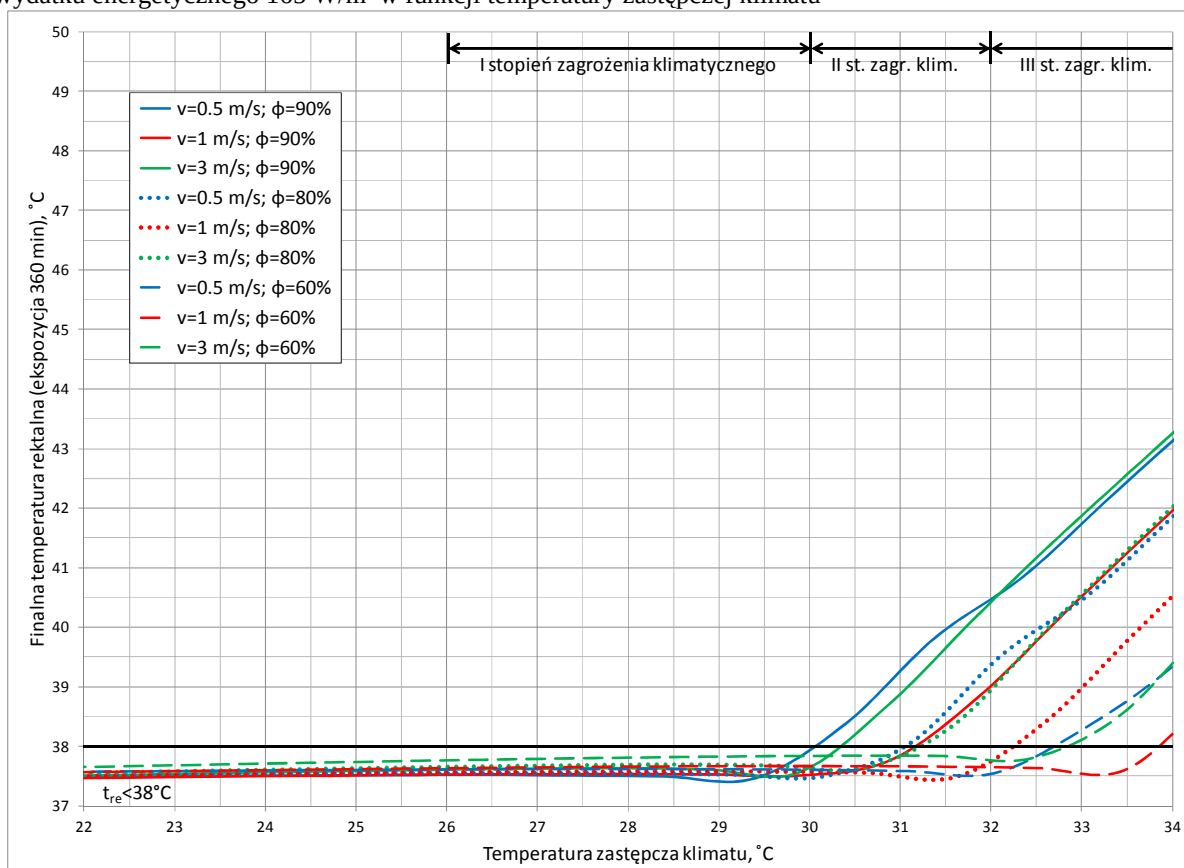
Rys. 106. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



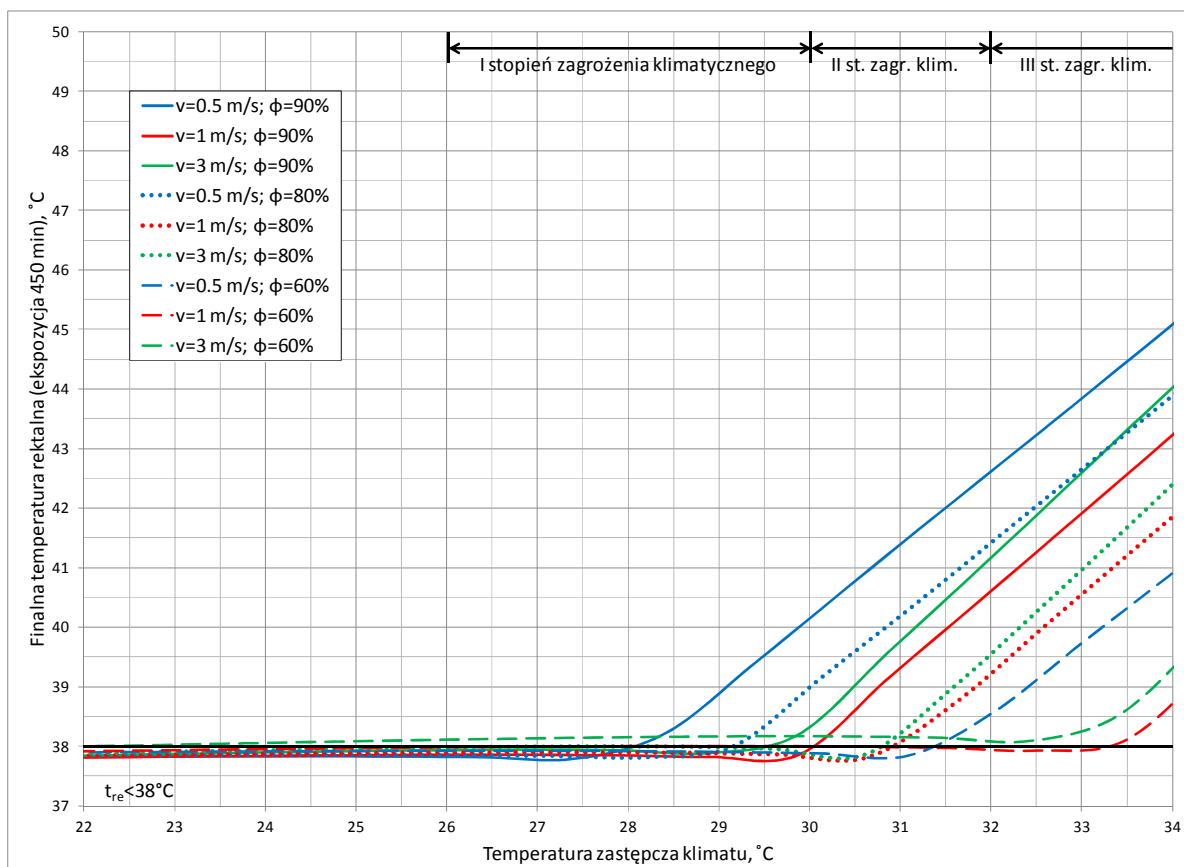
Rys. 107. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



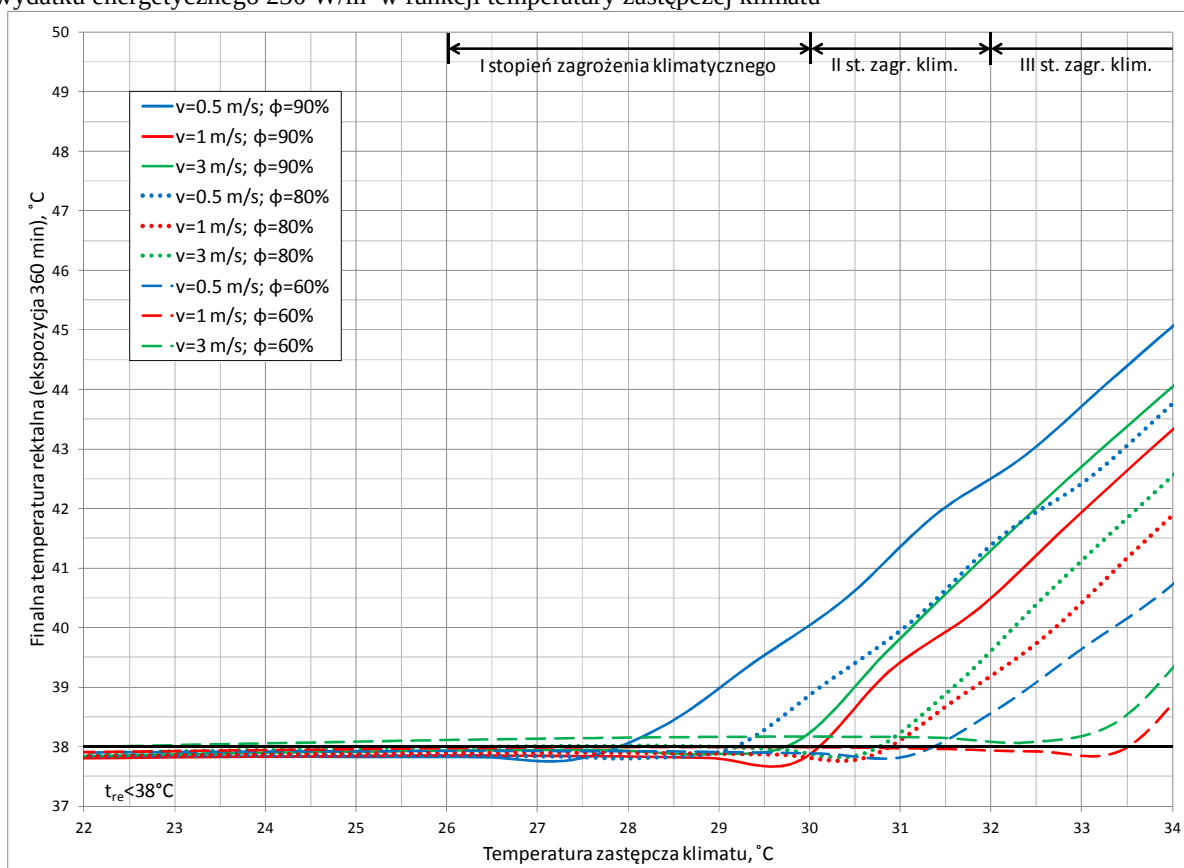
Rys. 108. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



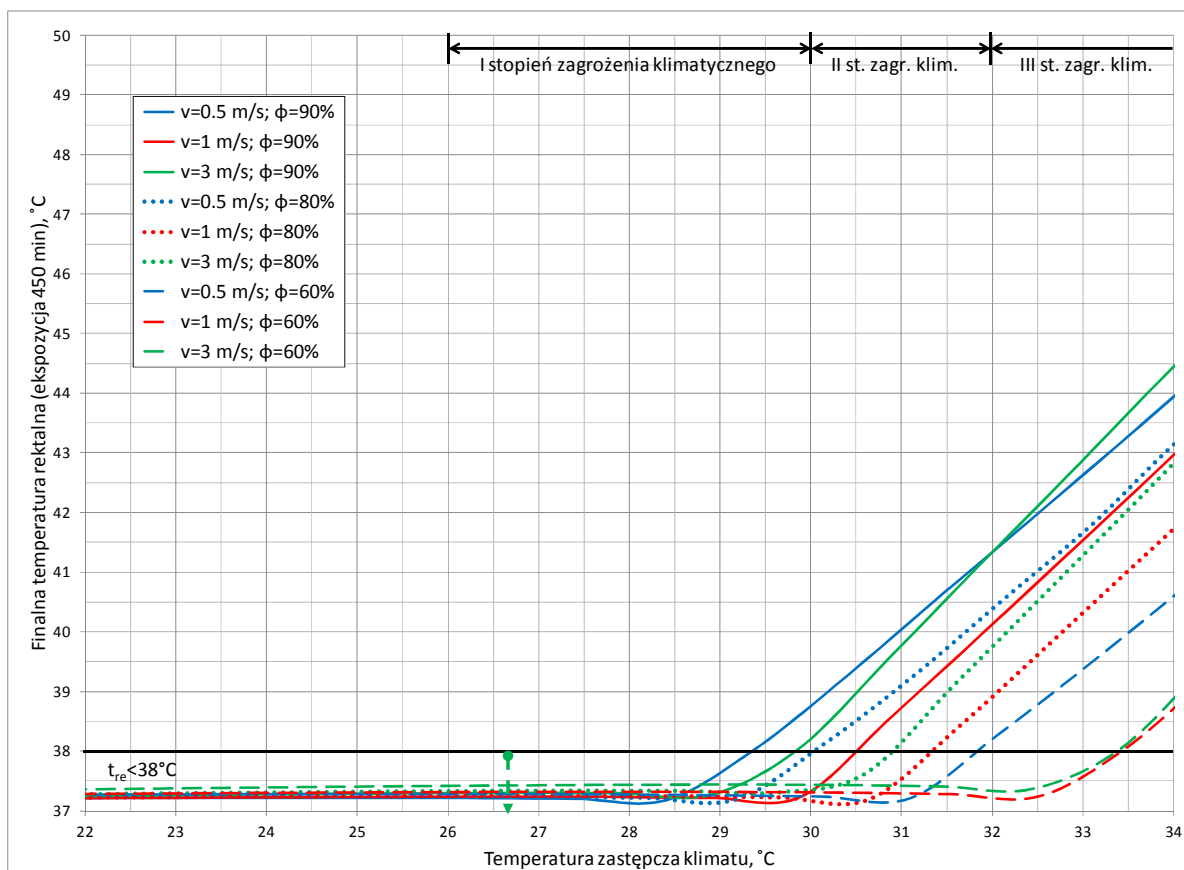
Rys. 109. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



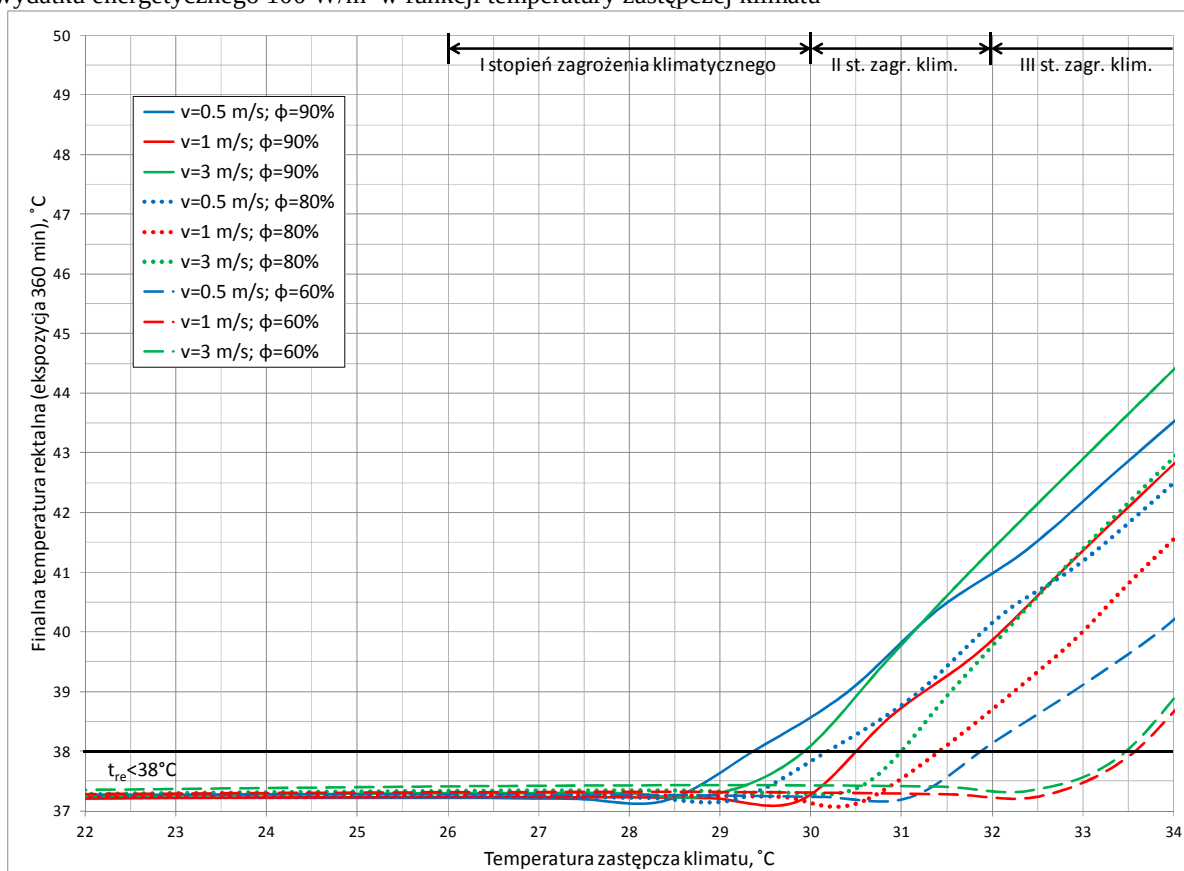
Rys. 110. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



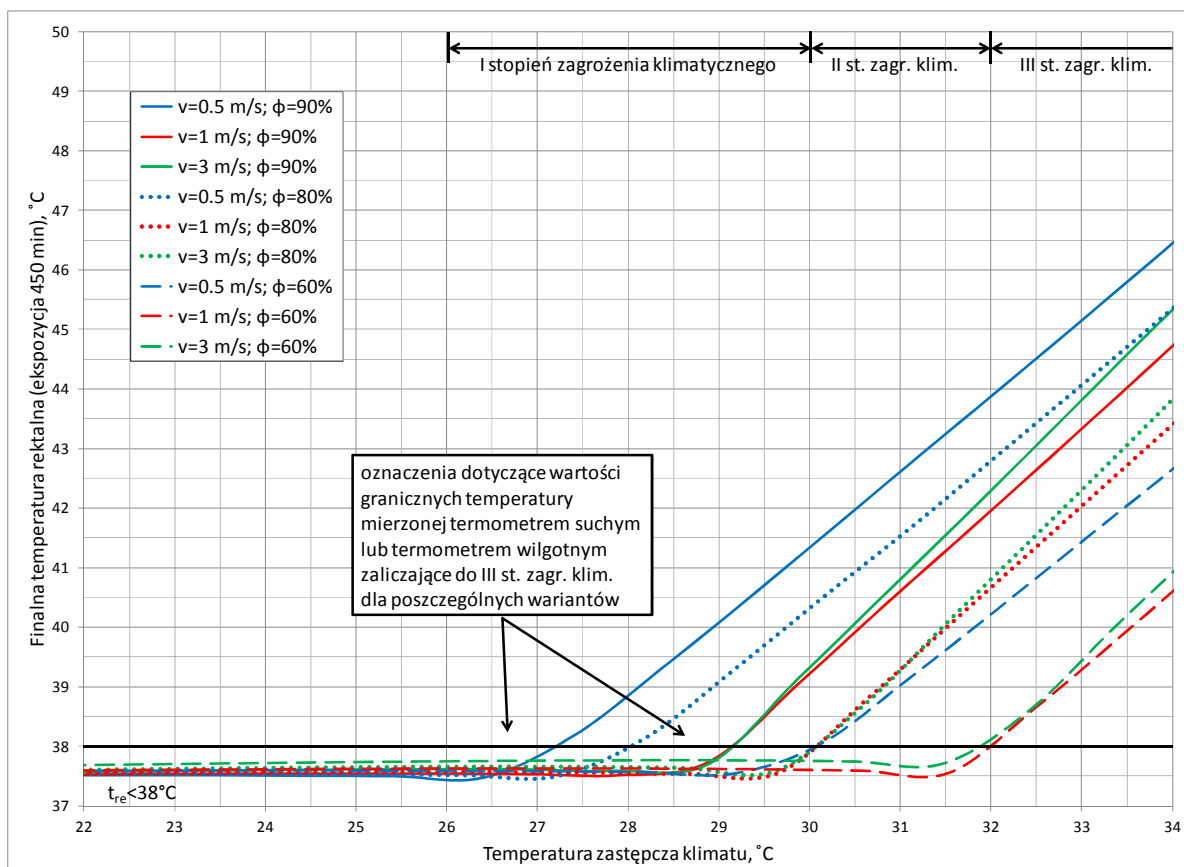
Rys. 111. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



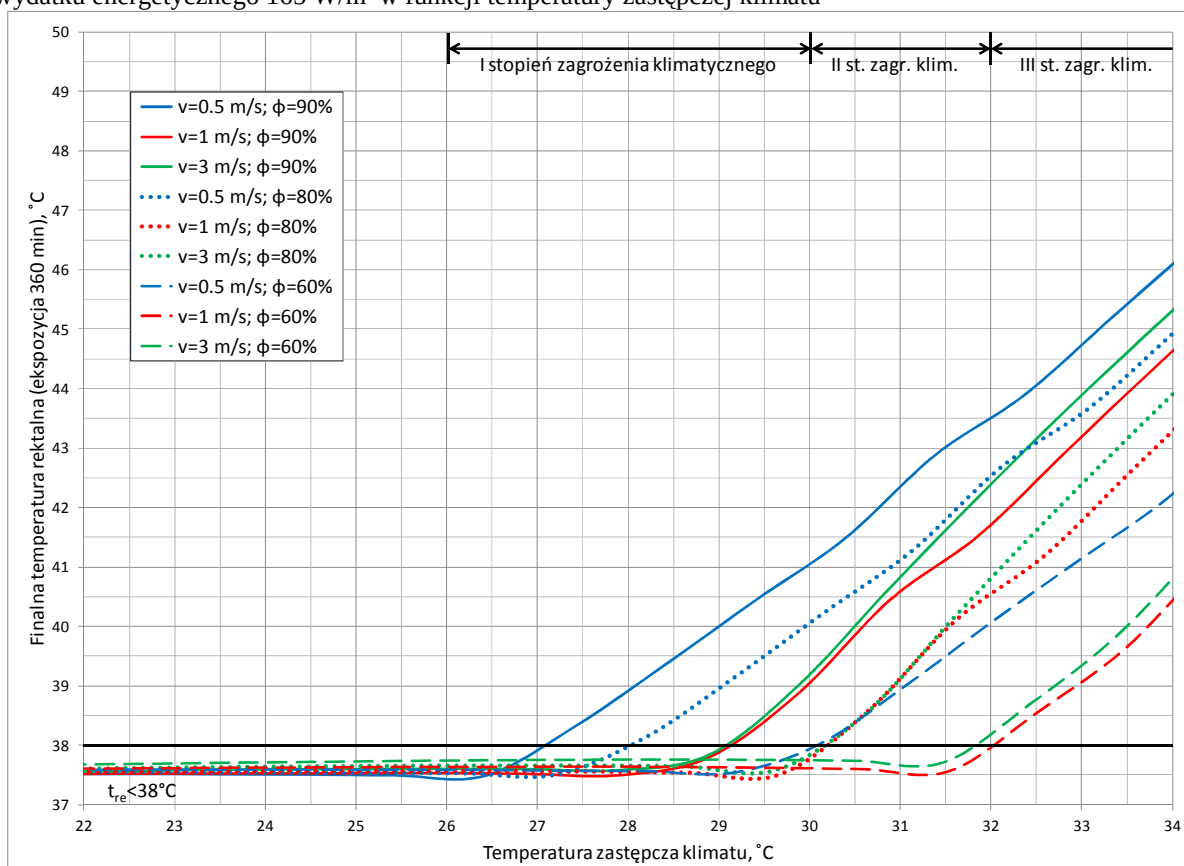
Rys. 112. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



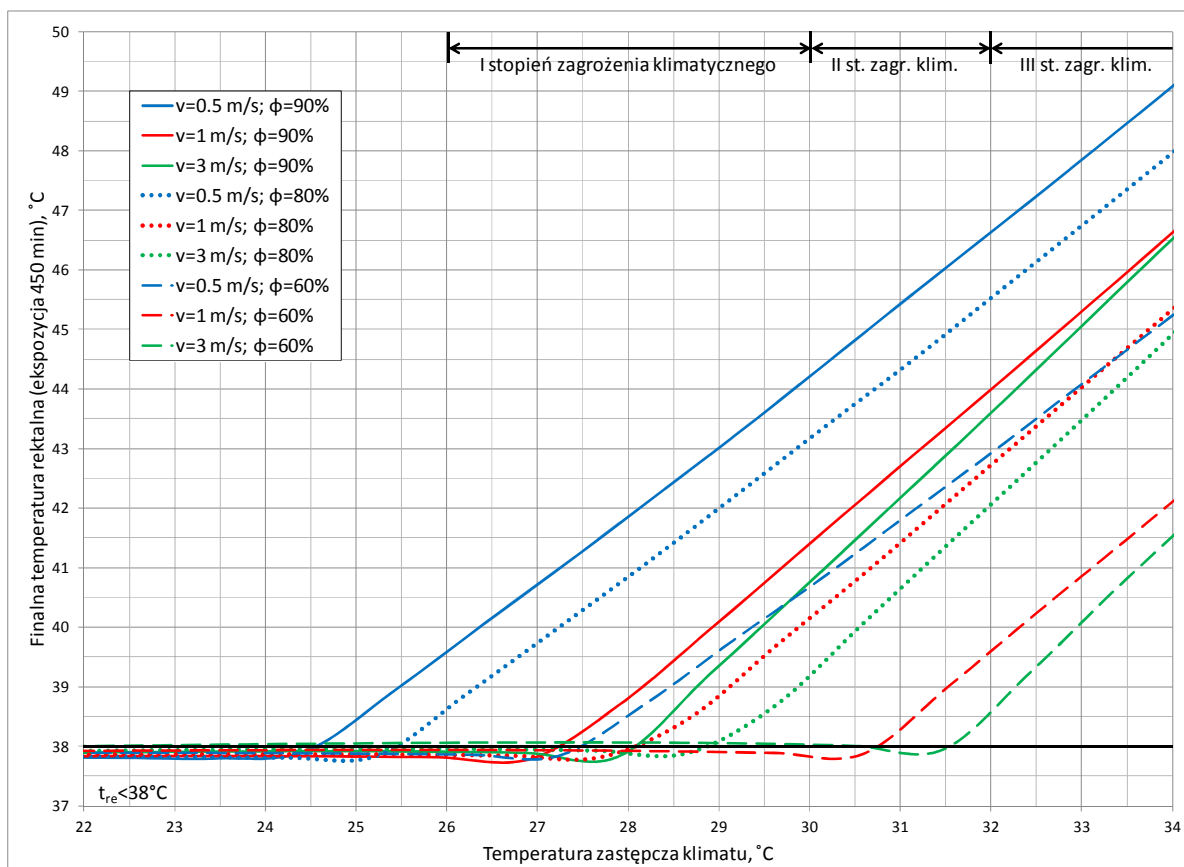
Rys. 113. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 100 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



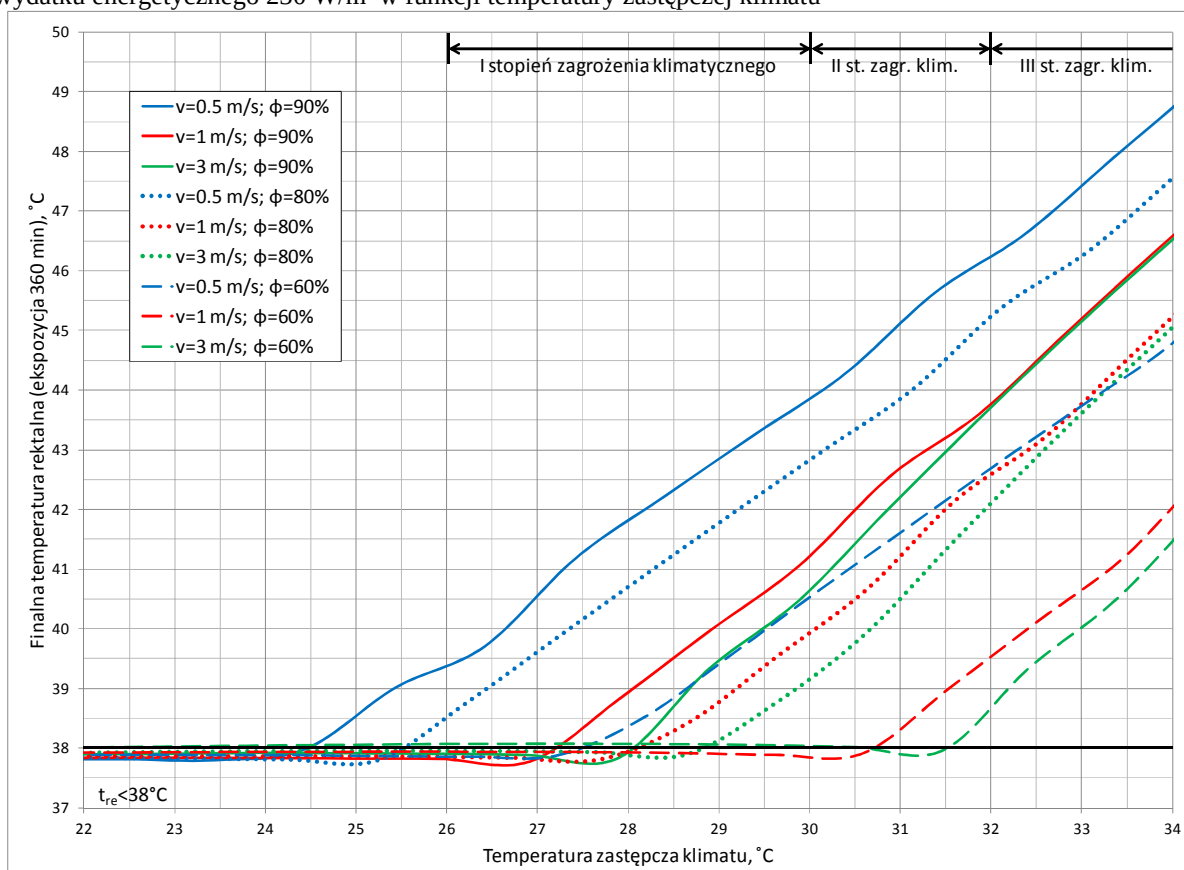
Rys. 114. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



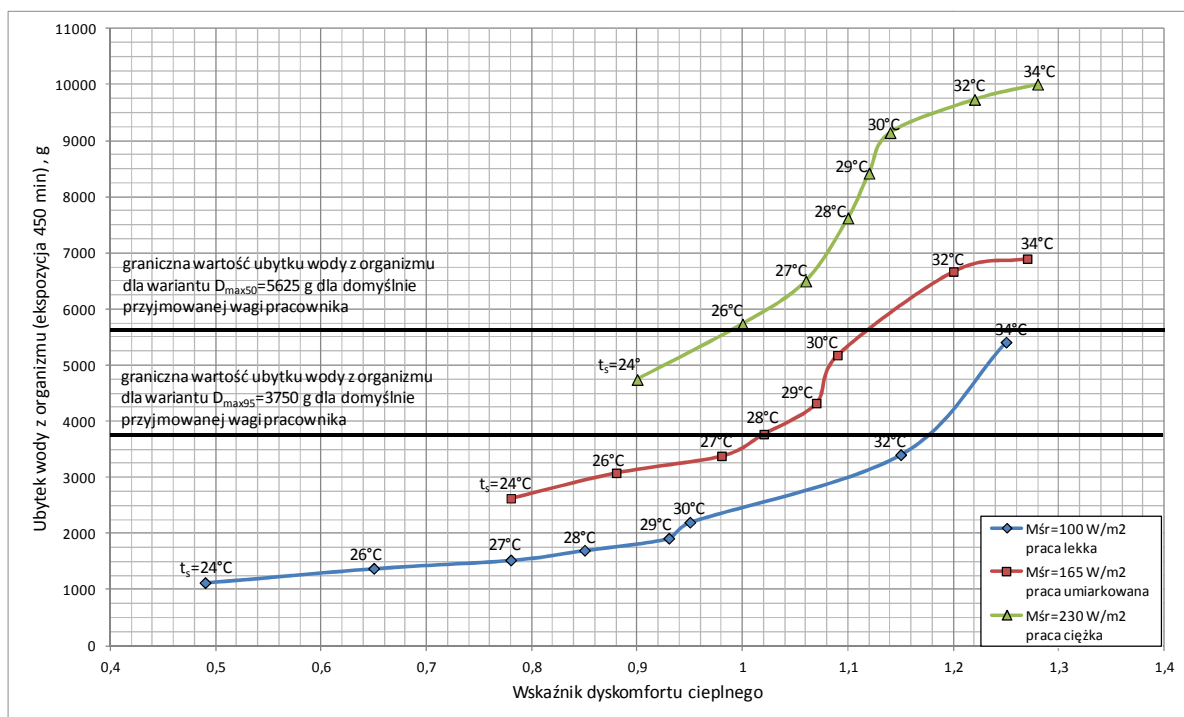
Rys. 115 Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



Rys. 116. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 450 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu

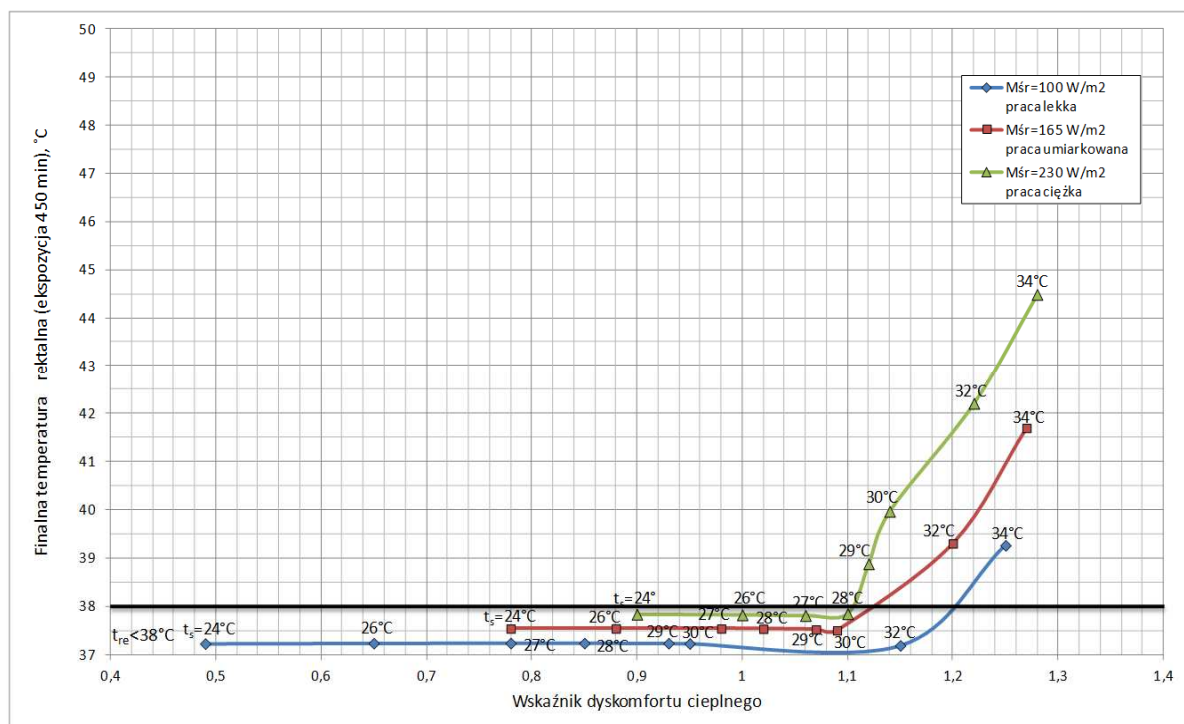


Rys. 117. Zmiany finalnej temperatury rektalnej (ekspozycja 360 min) dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej klimatu



opis: $\delta < 0$ - środowisko chłodne, $\delta = 0$ - komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ - warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ - zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ - trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ - bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ - dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 118. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla izolacyjności odzieży 1 clo, wilgotności względnej 80%, prędkości powietrza 0,5 m/s oraz zmiennego wydatku energetycznego



opis: $\delta < 0$ - środowisko chłodne, $\delta = 0$ - komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ - warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ - zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ - trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ - bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ - dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 119. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla izolacyjności odzieży 1 clo, wilgotności względnej 80%, prędkości powietrza 0,5 m/s oraz zmiennego wydatku energetycznego

Porównanie wybranych wskaźników mikroklimatu z modelem PHS na przykładach z rzeczywistych wyrobisk

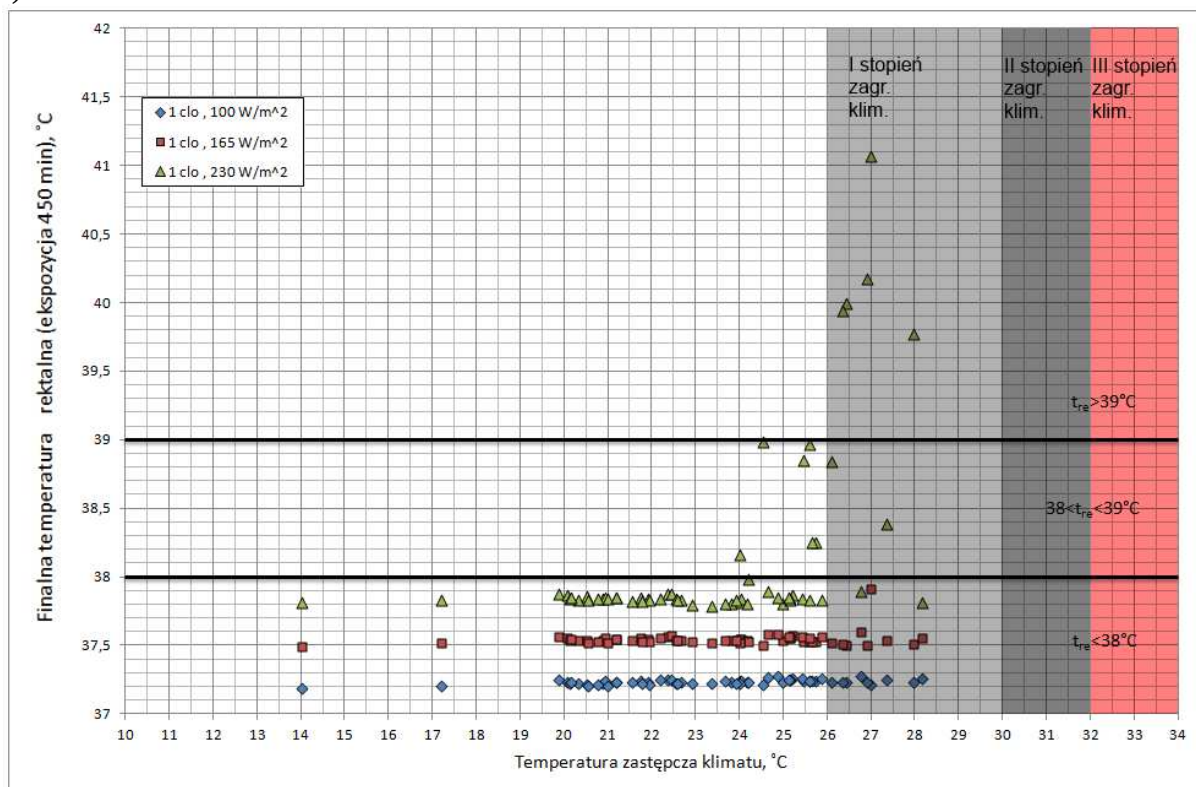
Na podstawie wyników pomiarów parametrów mikroklimatu z wyrobisk przygotowawczych i eksploatacyjnych wykonano porównanie metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego ze wskaźnikami mikroklimatu takimi jak: temperatura zastępcza klimatu, temperatura zastępcza ślaska oraz wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

W modelowaniu numerycznym wykorzystano standardowe parametry pracownika omawiane przy wcześniejszej analizie modelu PHS. Obliczenia wykonano dla dwóch izolacyjności odzieży tj. 0,5 clo i 1 clo oraz dla trzech ciężkości pracy: praca lekka ($M_{sr}=100$), praca umiarkowana ($M_{sr}=165$), praca ciężka ($M_{sr}=230$). Wyniki przedstawiono na rysunkach (120 ÷ 127) w formie wykresów. Na wykresach zaznaczono charakterystyczne graniczne wartości w zależności wskaźnika mikroklimatu. Wykresy umożliwiają porównanie temperatury zastępczej klimatu z temperaturą zastępczą ślaską. Analiza wykresów wykazuje, że wyniki obliczeń prognozowanego ubytku wody podobnie się układają. Dla temperatury zastępczej klimatu, pierwszy stopień zagrożenia klimatycznego odpowiada skróconemu czasowi pracy, natomiast drugi stopień zagrożenia klimatycznego odpowiada pracy zabronionej. Obliczenia wykazały, że istnieją wyrobiska niezaliczone do skróconego czasu pracy lub stopni zagrożenia klimatycznego, które przekraczają graniczną wartość ubytku wody dla wysokich wydatków energetycznych.

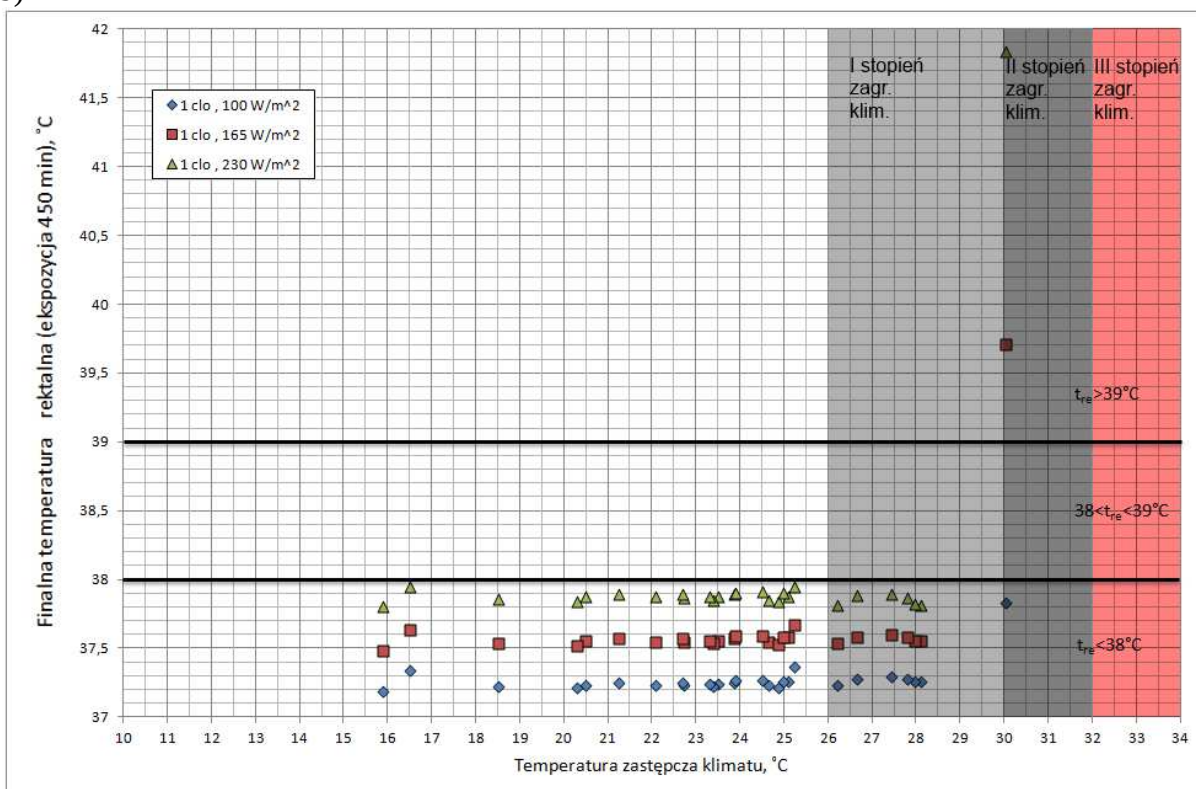
Na rysunkach 128 i 129 przedstawiono porównanie modelu PHS ze wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego. Obliczenie wykonano dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz trzech wydatków energetycznych. Analiza wykazała, że przekroczenie granicznych wartości parametrów określających obciążenie cieplne mogło nastąpić dla przedziałów wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego: $0,8 \leq \delta < 1$ określanych jako bardzo trudne warunki klimatyczne oraz $\delta \geq 1$ gdzie dyskomfort cieplny jest niebezpieczny dla zdrowia.

Z przedstawionych rysunków wynika, że z trzech analizowanych wskaźników mikroklimatu najbardziej rygorystycznym wskaźnikiem jest wskaźnik dyskomfortu cieplnego. Wskaźniki takie jak temperatura zastępcza ślaska i klimatu dopuszczają zastosowanie normalnego czasu pracy w wyrobiskach, w których dochodziłoby do przekroczenia granicznych wartości parametrów fizjologicznych według metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego.

a)

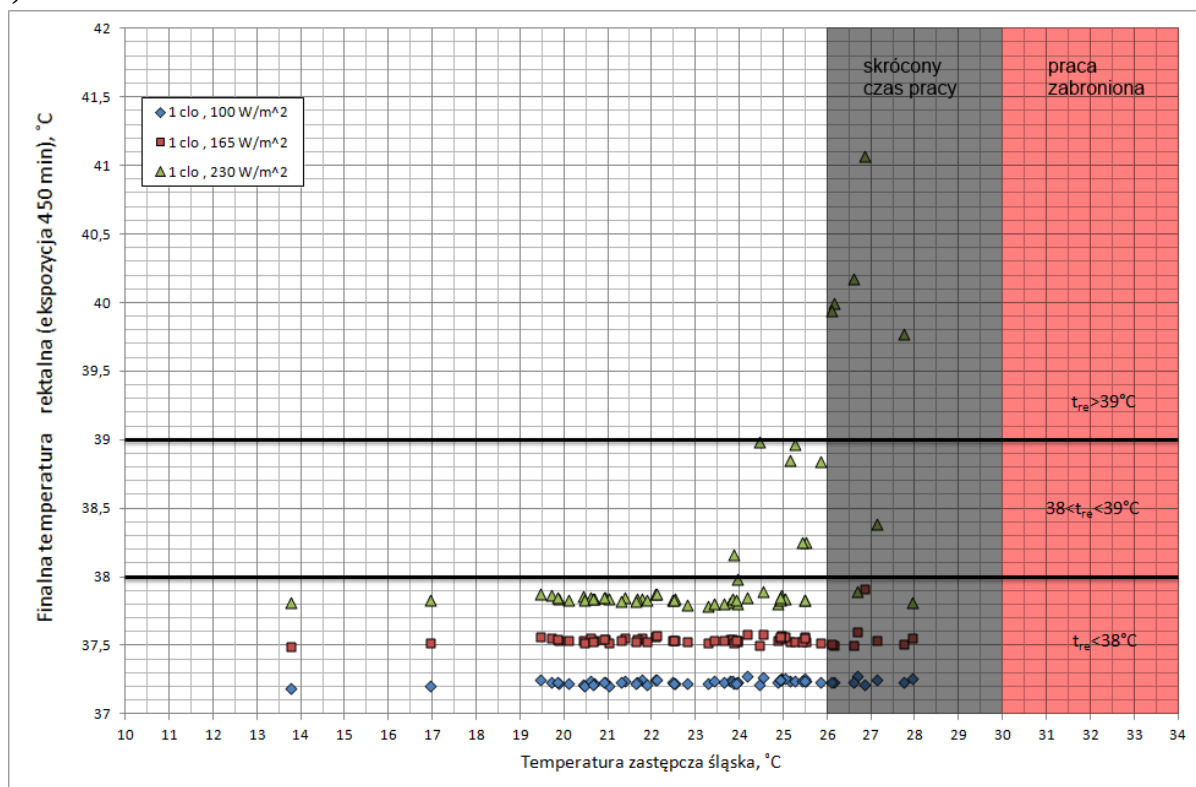


b)

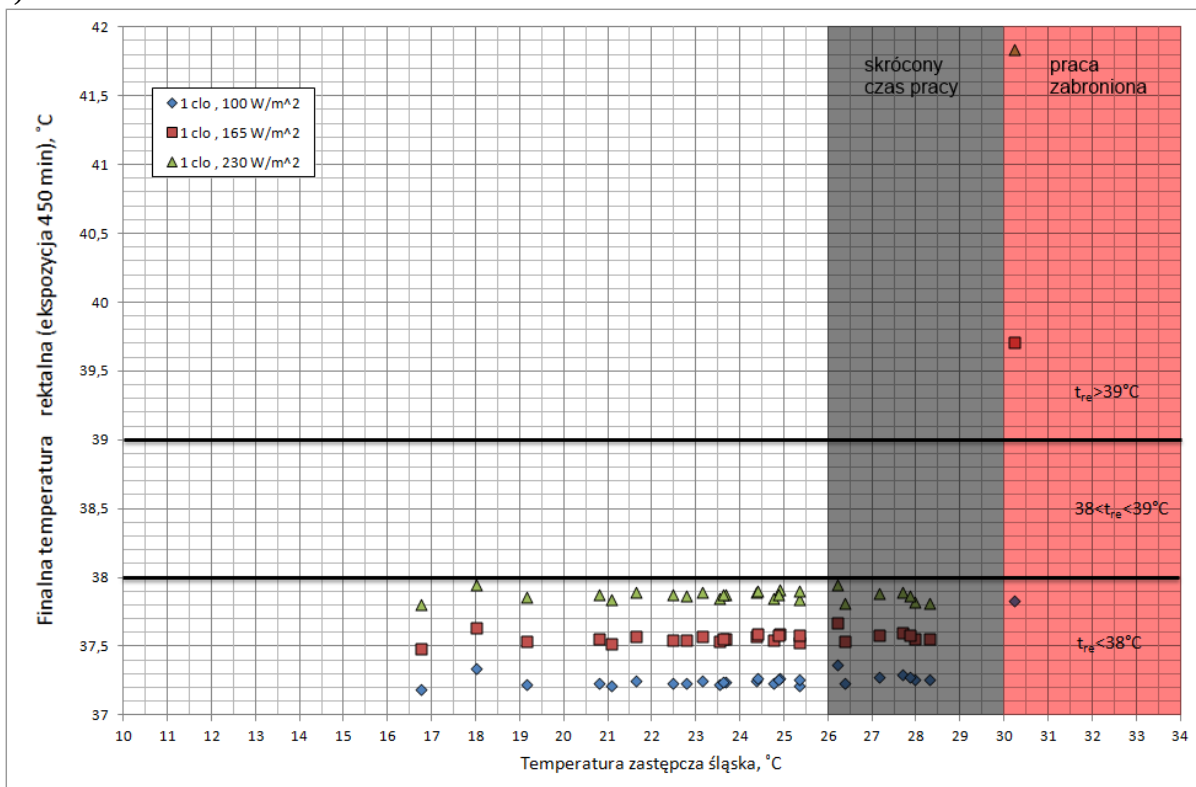


Rys. 120. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury zastępczej klimatu dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

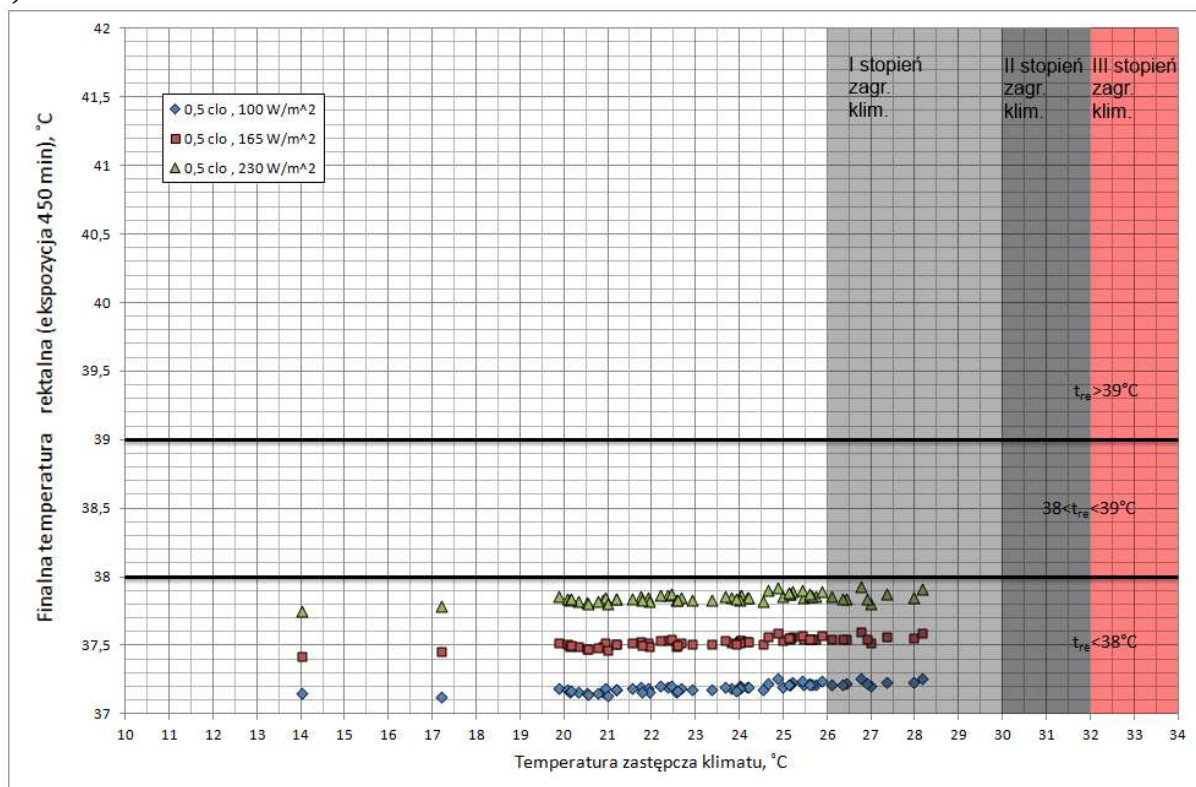


b)

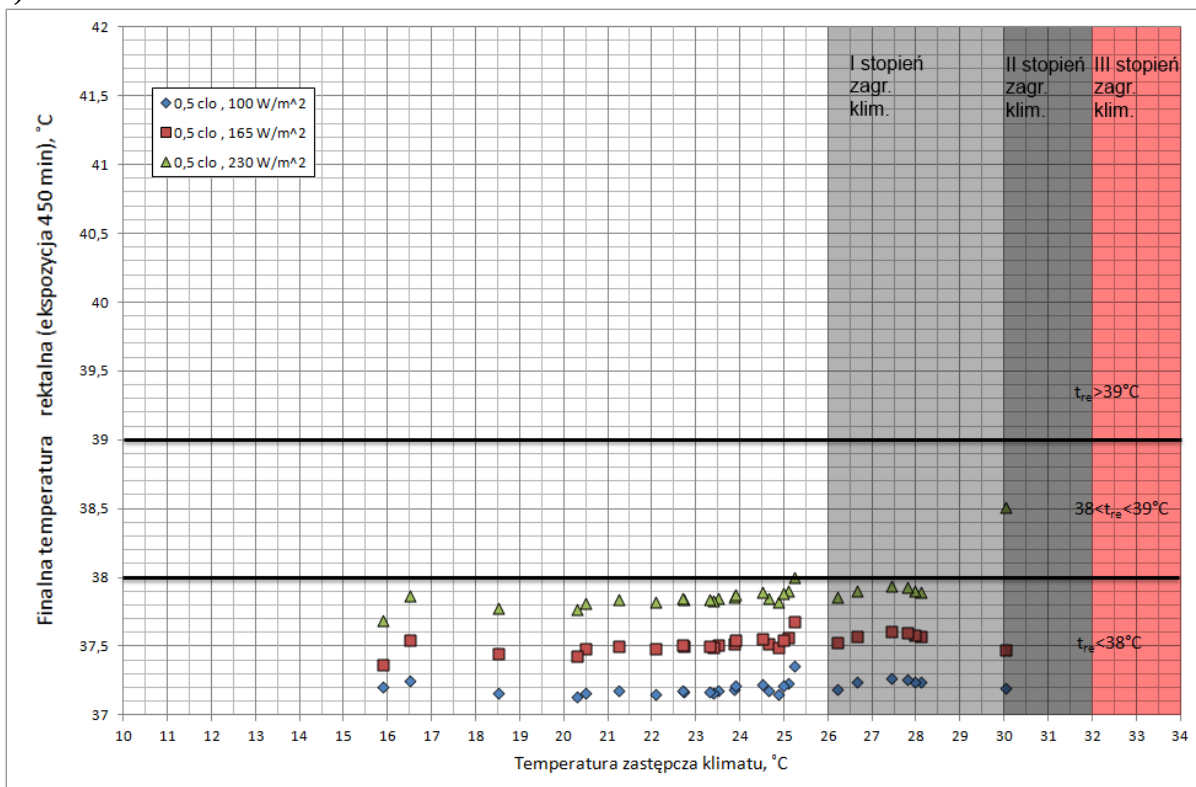


Rys. 121. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury zastępczej ślaski dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

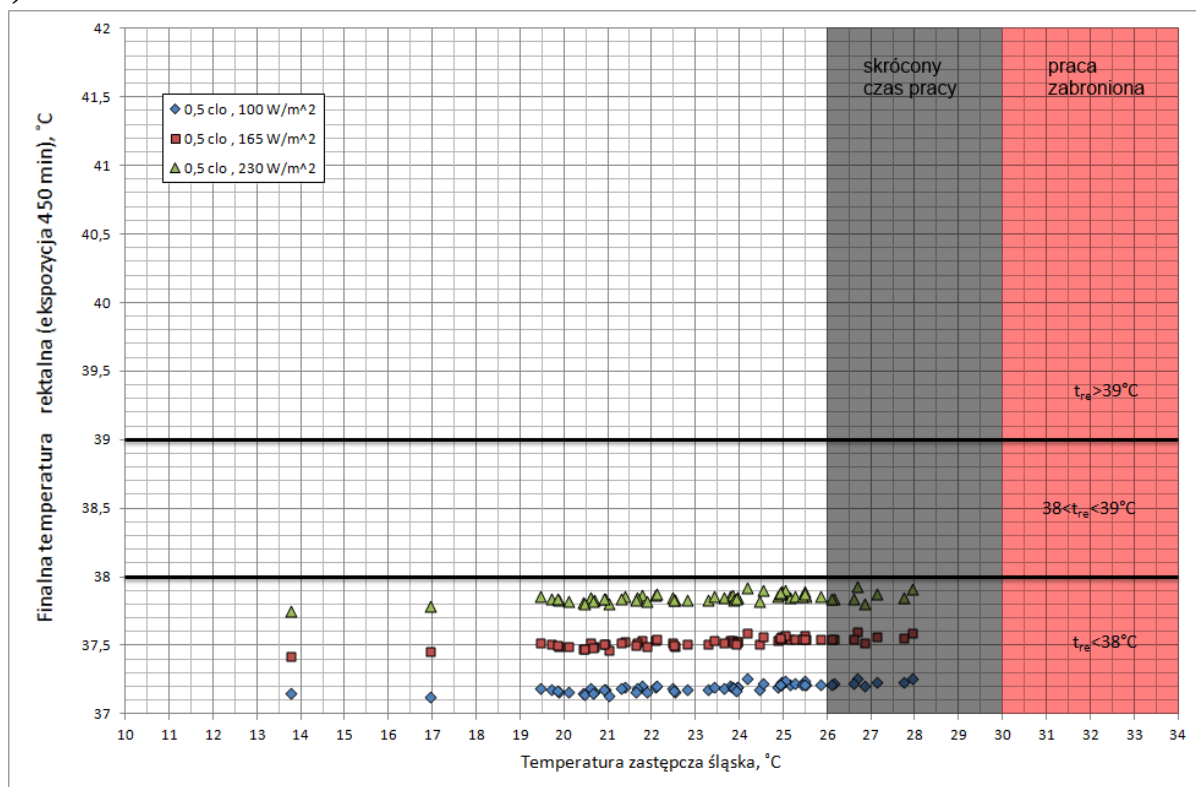


b)

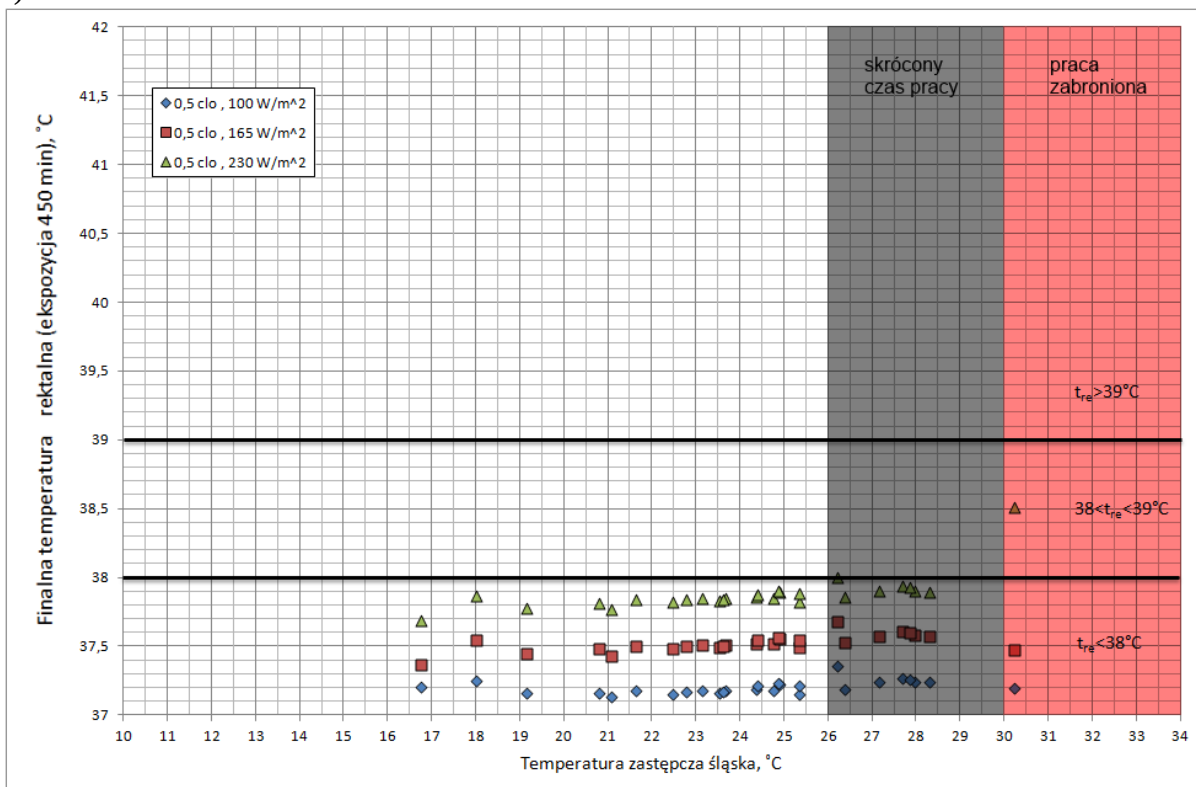


Rys. 122. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury zastępczej klimatu dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

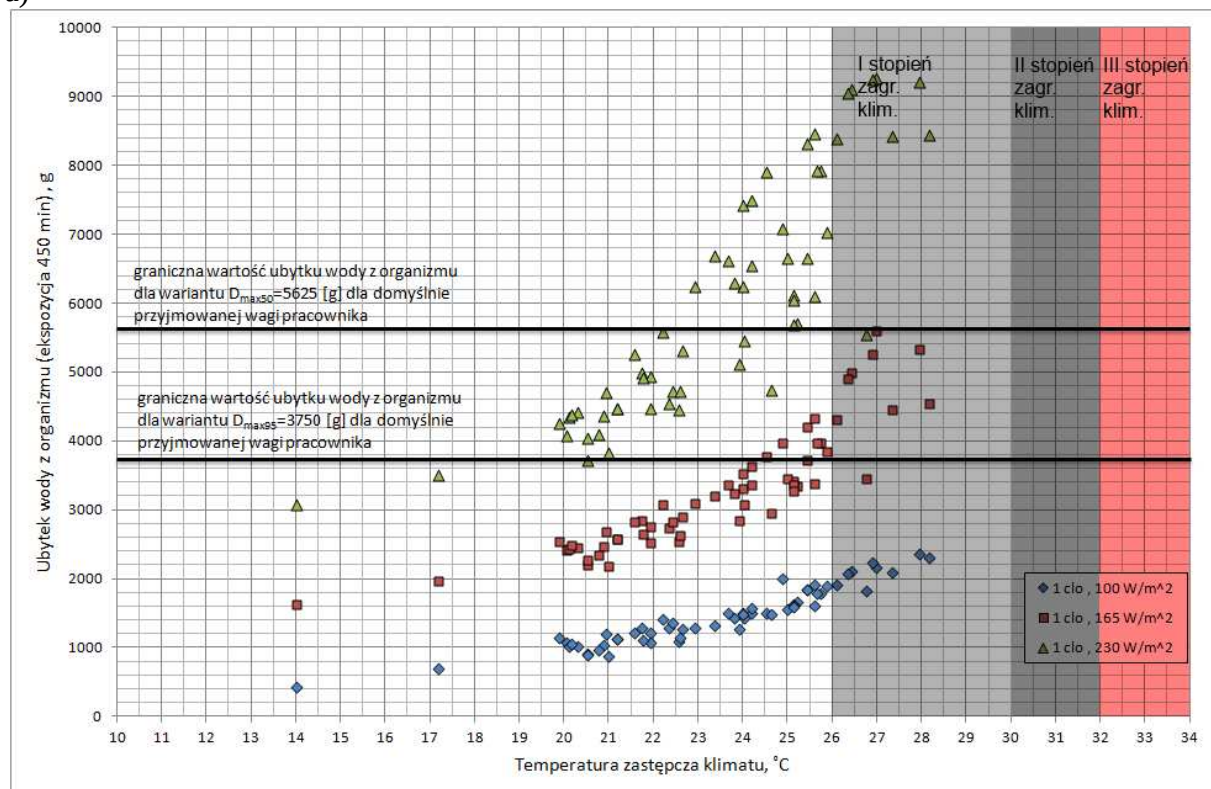


b)

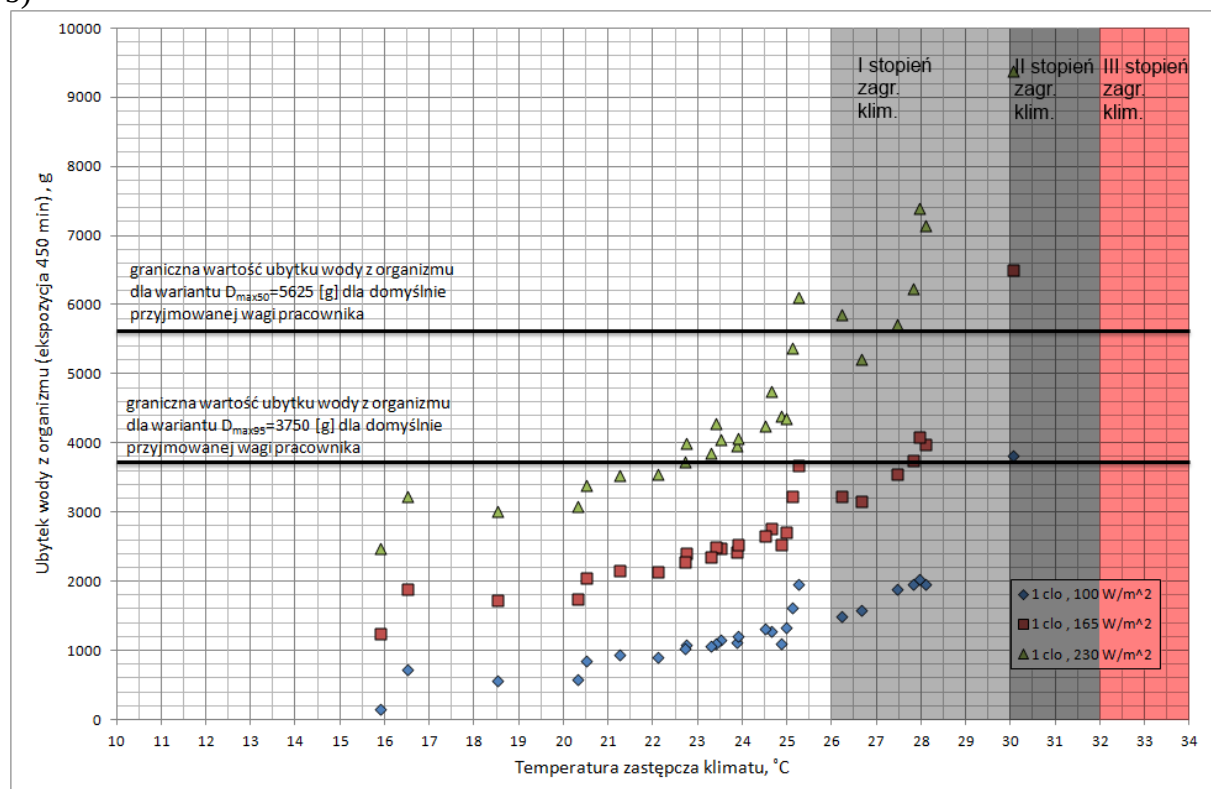


Rys. 123. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji temperatury zastępczej ślaska dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

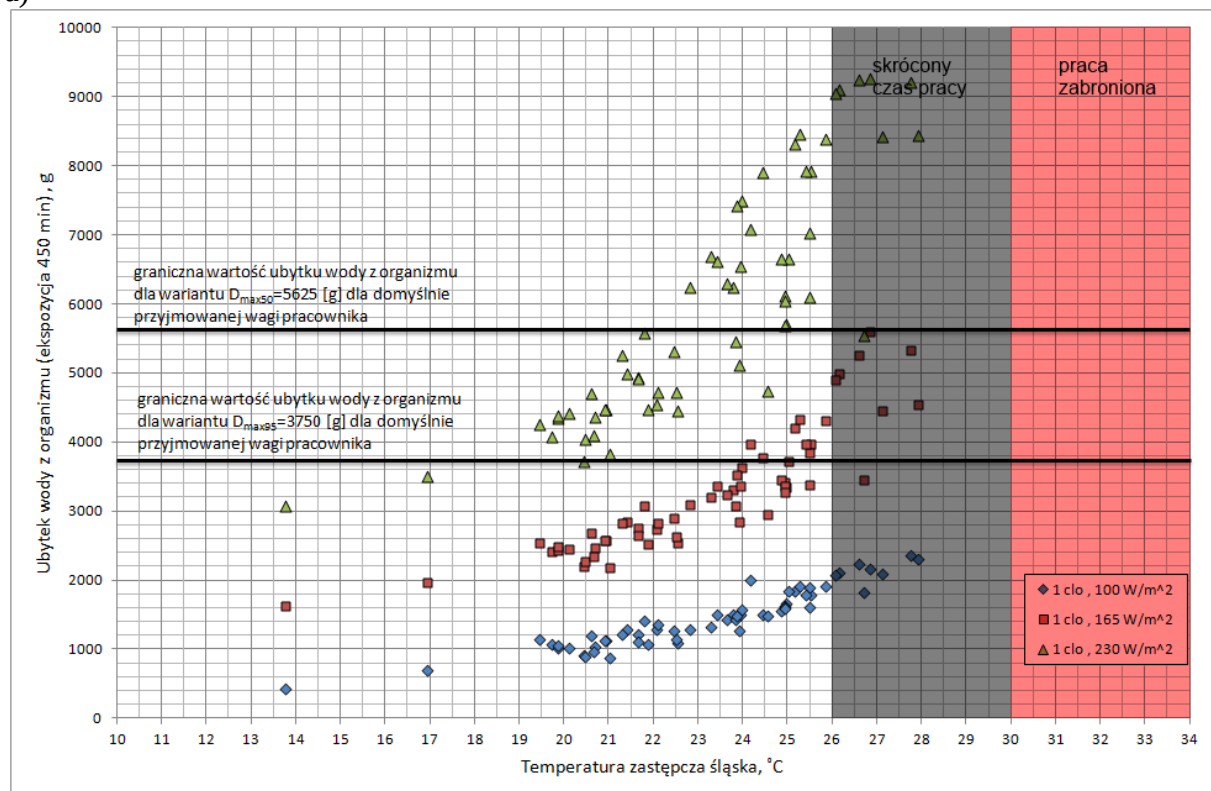


b)

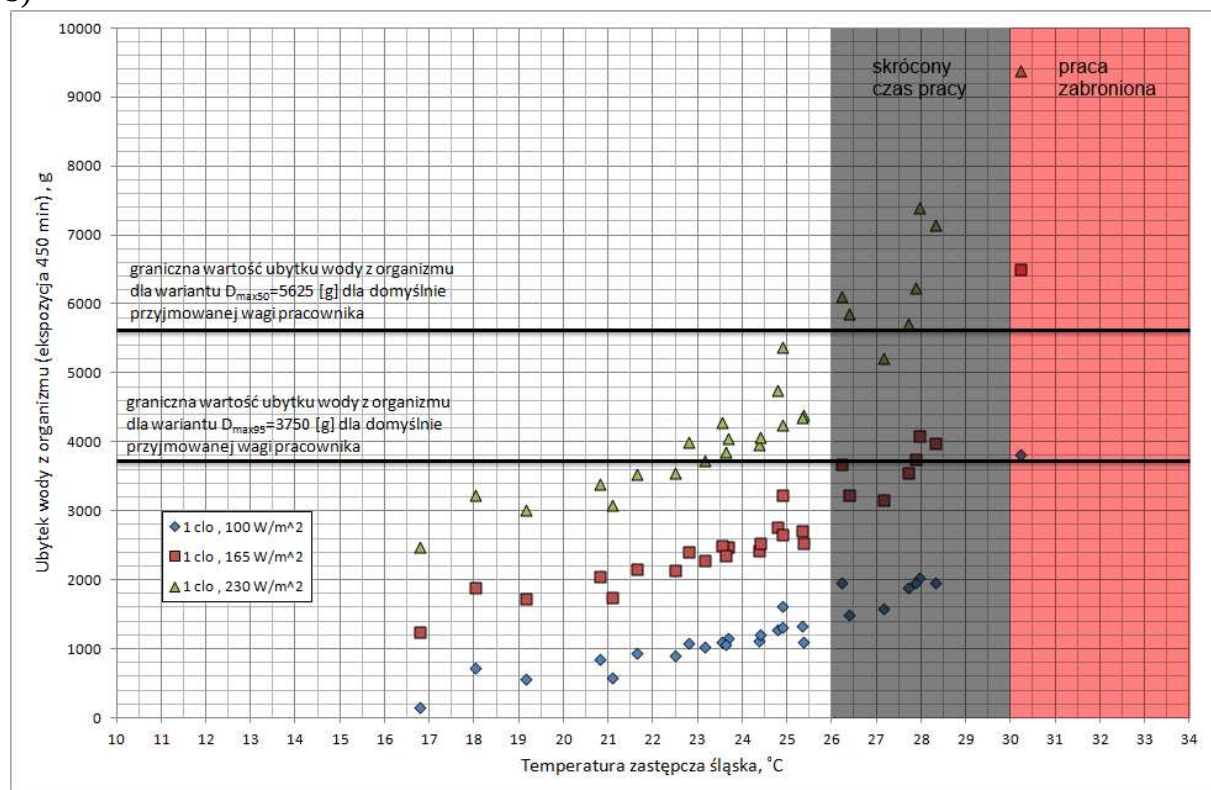


Rys. 124. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury zastępczej klimatu dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

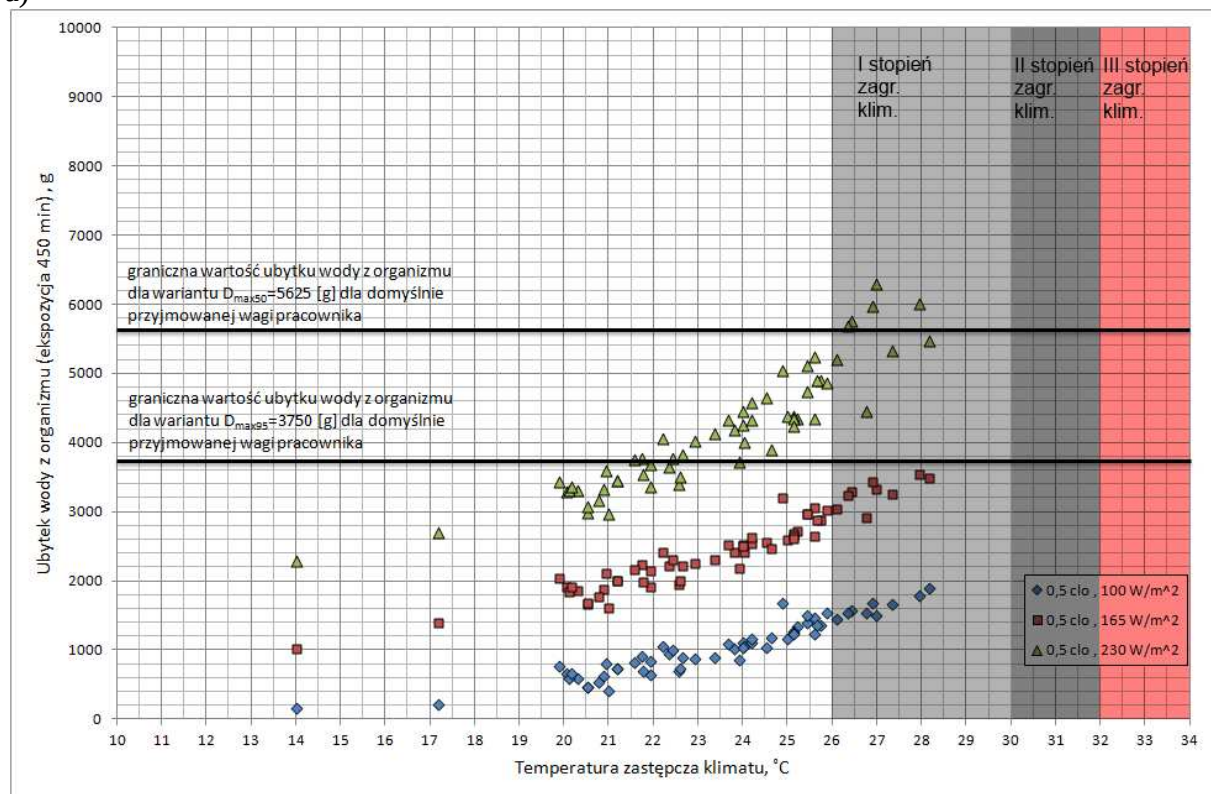


b)

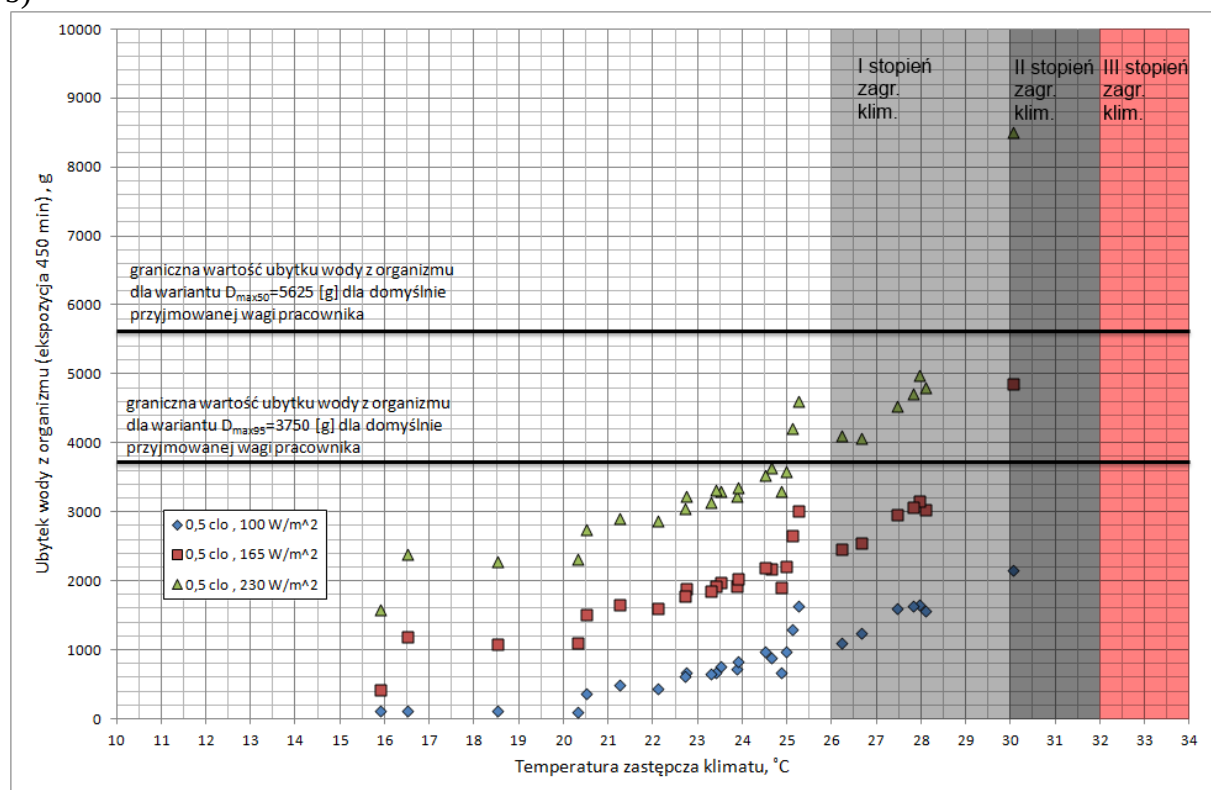


Rys. 125. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury zastępczej ślaska dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

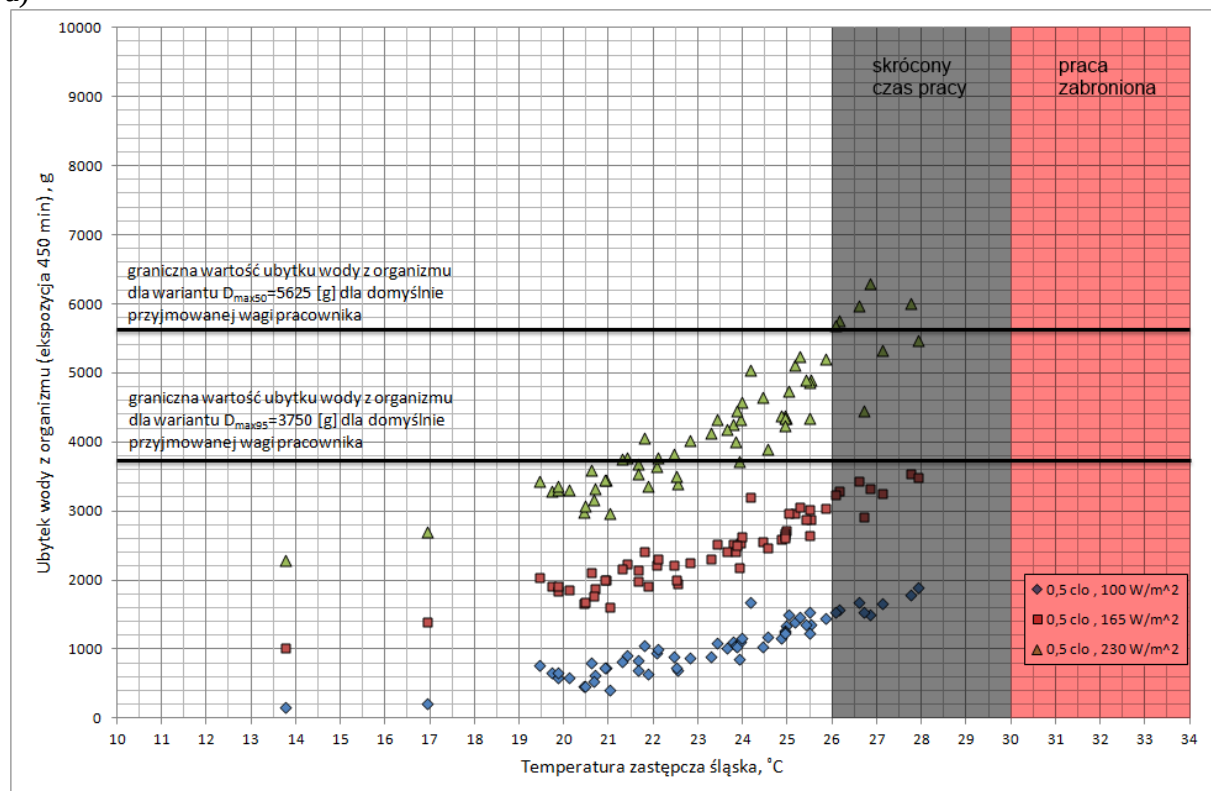


b)

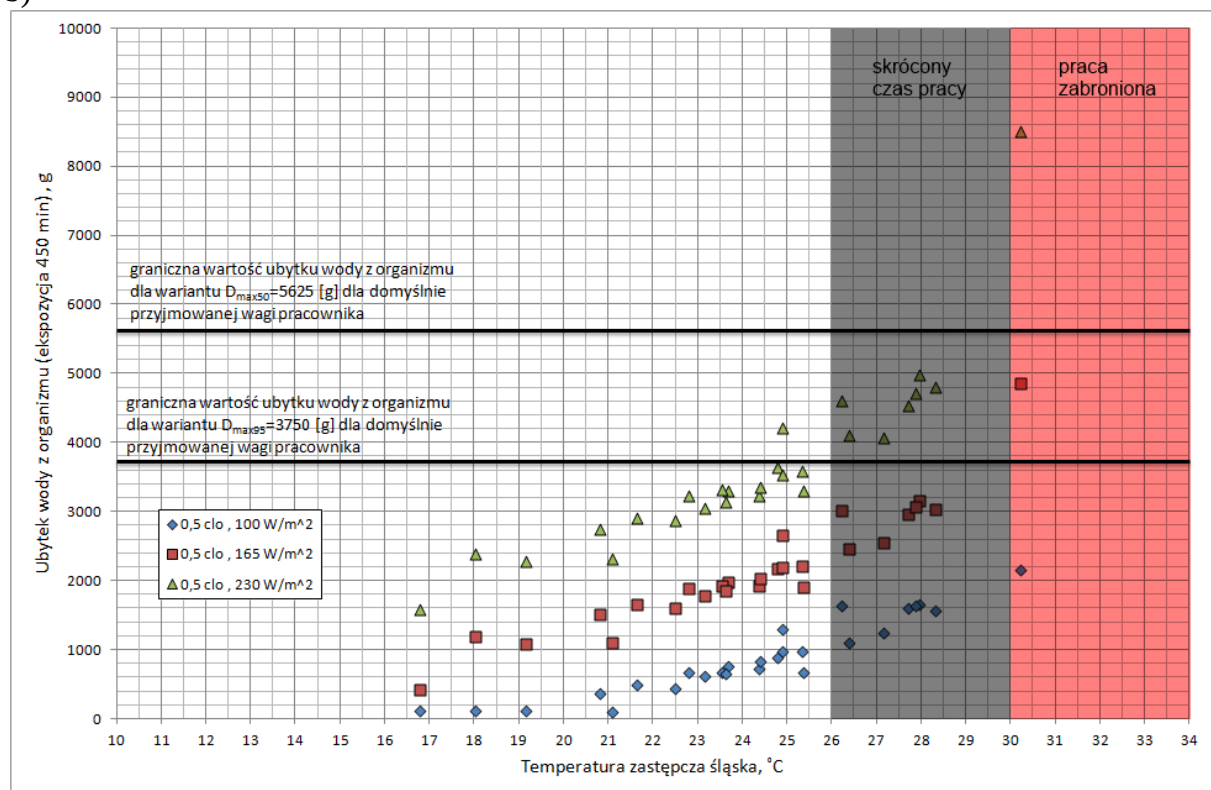


Rys. 126. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury zastępczej klimatu dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)

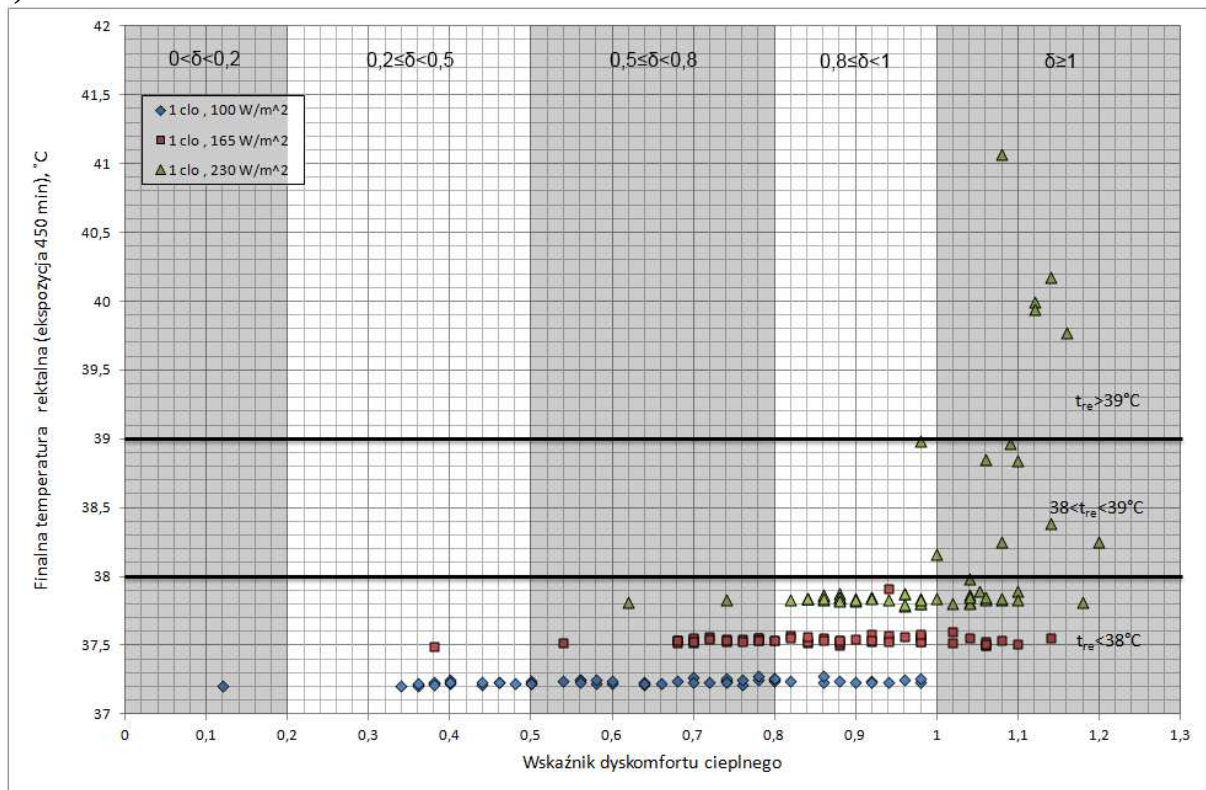


b)

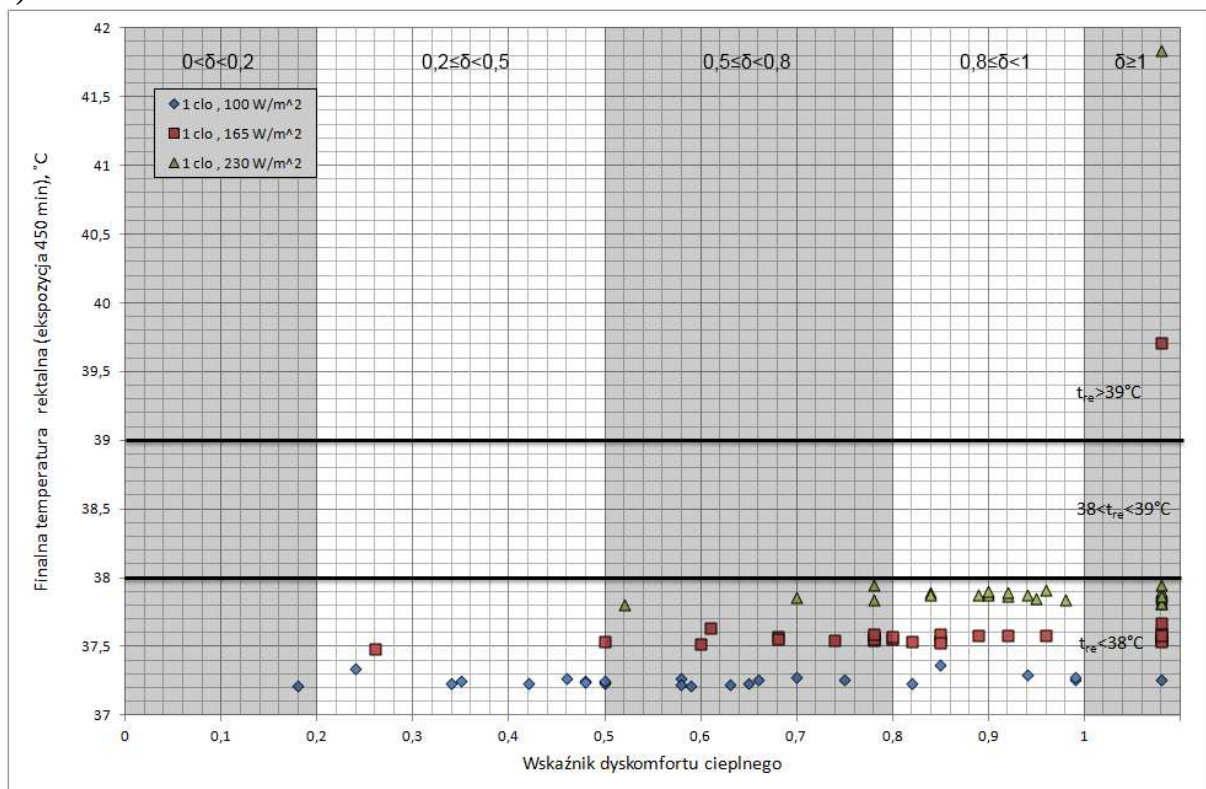


Rys. 127. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji temperatury zastępczej ślaska dla izolacyjności odzieży 0,5 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)



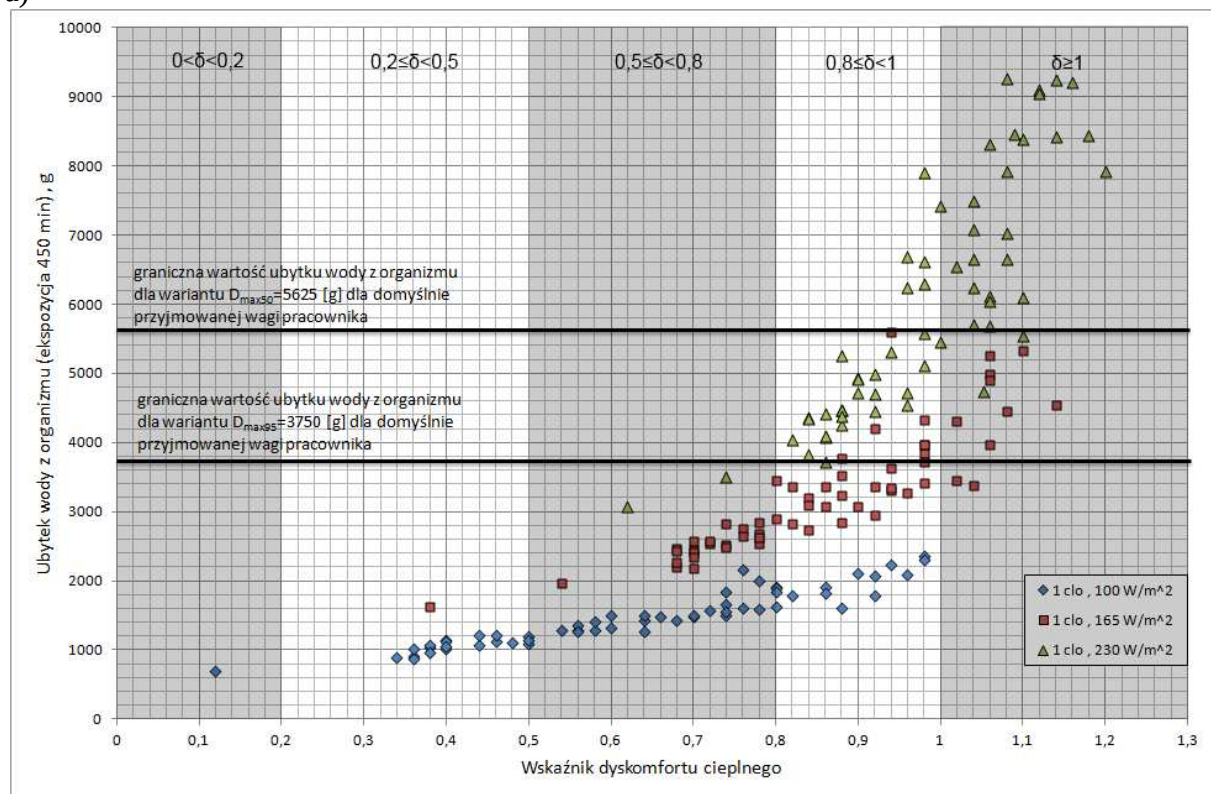
b)



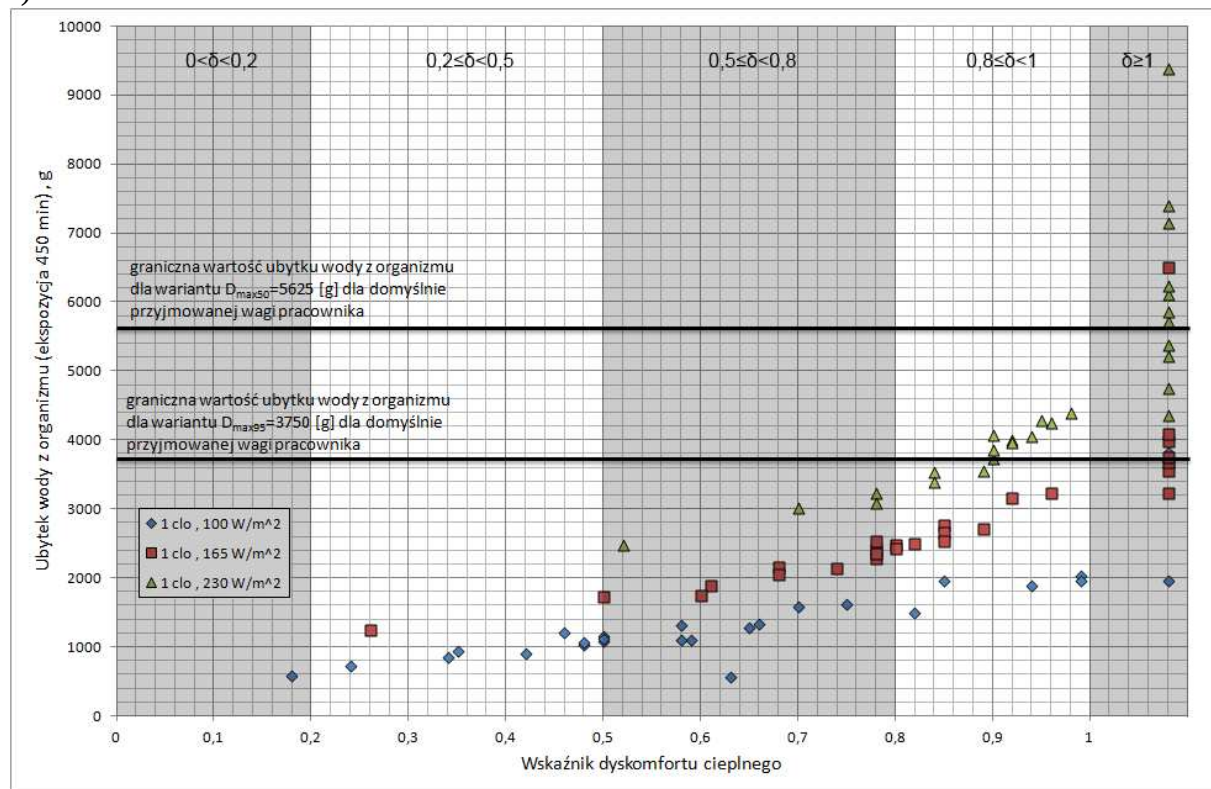
opis: $\delta < 0$ - środowisko chłodne, $\delta = 0$ - komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ - warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ - zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ - trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ - bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ - dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 128. Zmiany finalnej temperatury rektalnej w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

a)



b)



opis: $\delta < 0$ - środowisko chłodne, $\delta = 0$ - komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ - warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ - zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ - trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ - bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ - dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 129. Zmiana ilości ubytku wody z organizmu w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla izolacyjności odzieży 1 clo oraz zmiennego wydatku energetycznego: a) strefa przodkowa, b) wylot ze ściany

Podsumowanie

O bezpieczeństwie termicznym pracownika w trudnych warunkach mikroklimatu decyduje zdolność utrzymania równowagi termicznej ciała. Jeśli równowaga termiczna zostanie zachwiana to dochodzi do gromadzenia ciepła w organizmie, co powodować może wzrost temperatury wewnętrznej ciała do niebezpiecznej dla zdrowia wartości. Praca człowieka o dużym wydatku energetycznym w środowisku o wysokiej temperaturze powietrza powoduje, że głównym mechanizmem odprowadzania ciepła jest parowanie potu. Wartość intensywności odprowadzania ciepła zależna jest od prędkości powietrza, wilgotności powietrza, ciśnienia powietrza oraz od parametrów odzieży takich jak izolacyjność oraz przepuszczalność pary wodnej.

Istnieje możliwość prognozowania temperatury wewnętrznej ciała i utraty wody z organizmu ludzkiego. Tego typu prognozowanie parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne organizmu umożliwia metoda zawarta w normie PN-EN ISO 7933:2005. Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym opiera się na teorii wymiany ciepła między człowiekiem i otoczeniem. Ocena zagrożenia przegrzaniem organizmu oparta jest o takie parametry fizjologiczne jak temperatura rektalna i odwodnienie organizmu. Temperatura rektalna wg tej normy nie powinna przekroczyć 38°C. Według danych literaturowych, jeśli spełni się dodatkowe wymagania dopuszcza się pracę w zakresie $38 < t_{re} < 39$ °C, ale pracownik musi być zaaklimatyzowany i posiadać pełną sprawność układu termoregulacji poświadczoną specjalistycznymi badaniami lekarskimi. ***Zakłada się, że jeśli pracownik przeszedł podstawowe badania pozytywnie i ma stały dostęp do wody w celu uzupełniania płynów maksymalny ubytek wody może wynosić 5% masy ciała.*** Przedstawiona metoda obliczeń numerycznych obciążenia cieplnego bierze pod uwagę nie tylko parametry powietrza, a także intensywność pracy oraz izolacyjność odzieży. Jest to obecnie najbardziej wszechstronne narzędzie oceny obciążenia cieplnego organizmu.

Opracowany program komputerowy na podstawie tej metody umożliwia przeprowadzenie obliczeń numerycznych w celu wyznaczenia bezpiecznego czasu ekspozycji pracownika do chwili uzyskania granicznych (jeszcze bezpiecznych) wartości ubytku wody z organizmu i temperatury wewnętrznej organizmu w określonych warunkach klimatycznych. Program ten został pozytywnie zweryfikowany poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów przeprowadzonych przez Cen-Rat Sp. z o.o. w komorze klimatycznej w Bytomiu w CSRG.

W opracowaniu wykonano porównanie metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego ze wskaźnikami mikroklimatu takimi jak: temperatura zastępcza klimatu, temperatura zastępcza ślaska oraz wskaźnik dyskomfortu cieplnego. Porównanie wykonano na podstawie założonych wcześniej parametrów mikroklimatu opowiadającym trudnym warunkom panującym w kopalniach podziemnych oraz na podstawie danych parametrów z rzeczywistych wyrobisk przygotowawczych i eksploatacyjnych z 5 kopalń węgla kamiennego.

Wykonano obliczenia dla wyrobisk przygotowawczych, które wykazały, że przy izolacyjności odzieży 1 clo i wydatku energetycznym 200 W/m^2 dochodzi do przekroczenia temperatury rektalnej dla 5 wyrobisk przygotowawczych. Natomiast jeśli pracownicy byłiby ubrani w odzież o izolacyjności 0,5 clo nie doszłoby do przekroczenia granicznej wartości temperatury rektalnej w żadnym przypadku. Biorąc pod uwagę warunek ubytku wody z organizmu $D_{max95} = 3750 \text{ g}$ dla izolacyjność odzieży 0,5 clo dochodzi do przekroczenia granicznej wartości ubytku wody przy wydatku energetycznym 200 W/m^2 , ale maksymalny czas pracy mieści się w granicy obowiązujących przepisów w zakresie skróconego czasu pracy (360 minut). Jeśli jednak izolacyjność odzieży wynosiłaby 1 clo doszłoby do sytuacji, że pracownicy nie mogliby przepracować dniówki ze skróconym czasem z uwagi na niebezpieczeństwo wystąpienia stresu cieplnego, odnosi się to do wydatku energetycznego 200 i 175 W/m^2 . Natomiast obliczenia dla wyrobisk eksploatacyjnych wykazały, że przy izolacyjności odzieży 1 clo i wydatku energetycznym 200 W/m^2 dochodzi do przekroczenia temperatury rektalnej w jednym wyrobisku. Natomiast jeśli pracownicy byłiby ubrani w odzież o izolacyjności 0,5 clo nie doszłoby do przekroczenia granicznej wartości temperatury rektalnej w żadnym przypadku. Biorąc pod uwagę warunek ubytku wody z organizmu $D_{max95}=3750 \text{ g}$ dla izolacyjność odzieży 0,5 clo dochodzi do przekroczenia granicznej wartości ubytku wody przy

wydatku energetycznym 200 W/m^2 . Poza jednym wylotem ze ściany maksymalny czas pracy mieści się w granicy obowiązujących przepisów w zakresie skróconego czasu pracy (360 minut). Jeśli jednak izolacyjność odzieży wynosiłaby 1 clo doszłoby do sytuacji, że pracownicy nie mogliby przepracować dniówki ze skróconym czasem z uwagi na niebezpieczeństwo wystąpienia stresu cieplnego, odnosi się to do wydatku energetycznego 200 i 175 W/m^2 oraz w jednym przypadku dla 145 W/m^2 . W jednym wyrobisku gdzie temperatura mierzona termometrem suchym była bliska 32°C a wilgotność wynosiła powyżej 90% dochodziło do przekroczenia zakładanych granic parametrów fizjologicznych dla różnych wartości izolacyjności odzieży (0,5 i 1 clo) oraz dla różnych wydatków energetycznych. Przeprowadzona analiza obciążenia cieplnego pracowników wykazała istotność parametrów, jakim są izolacyjność odzieży i wydatek energetyczny. Powyższe stwierdzenia prowadzą do wniosku, że pracownicy zatrudnieni w środowiskach gorących o dużej wilgotności muszą posiadać lekką, przewiewną odzież o małej izolacyjności, aby móc wykonywać pracę o wysokim wydatku energetycznym.

Ocenę cieplnych warunków pracy w kopalniach podziemnych realizuje się również w oparciu o wskaźniki mikroklimatu, które uwzględniają łączny wpływ kilku podstawowych parametrów powietrza. Wskaźniki te posiadają kryteria określające warunki graniczne, które mówią, kiedy stosować skrócony czas pracy. ***Przeprowadzone porównanie prognozowanego ubytku wody z organizmu oraz temperatury rektalnej przy ekspozycji 450 min i 360 min na zadane warunki środowiska ze wskaźnikami mikroklimatu (temperatura zastępcza ślaska i temperatura zastępcza klimatu) wykazały że granice kryteriów nie odpowiadają obliczeniom granicznej wartości parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne według metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego.*** Wskaźniki - temperatura zastępcza ślaska i klimatu dopuszczają zastosowanie normalnego czasu pracy w wyrobiskach, w których dochodziło do przekroczenia granicznych wartości parametrów fizjologicznych według metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego.

Z uwagi na to, że do trzeciego stopnia zagrożenia klimatycznego, przy temperaturze zastępczej, zaliczamy stanowiska pracy, w których temperatura mierzona termometrem wilgotnym jest większa niż 34°C lub temperatura zmierzona termometrem suchym jest większa niż 35°C może się zdarzyć, że trzeci stopień zagrożenia klimatycznego wystąpi w przedziałach temperatury zastępczej klimatu, do których zaliczamy stanowiska pracy do pierwszego i drugiego stopnia zagrożenia klimatycznego. Możliwe jest to przy niskich wilgotnościach względnych i wysokich wartościach prędkości powietrza. Na przykład przy wilgotności względnej 60% i prędkości powietrza 3 m/s do trzeciego stopnia zagrożenia klimatycznego będzie można zaliczyć stanowiska pracy gdzie temperatura zastępcza klimatu wynosi powyżej $26,7^\circ\text{C}$.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najbardziej rygorystycznym wskaźnikiem jest wskaźnik dyskomfortu cieplnego, który posiada pewnego rodzaju korelację oceny warunków mikroklimatu z metodą analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego. Polega ona na tym, że przekroczenia wartości granicznych parametrów fizjologicznych organizmu znajdują się w przedziałach wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego: $0,8 \leq \delta < 1$ (bardzo trudne warunki klimatyczne) oraz $\delta \geq 1$ (dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia).

Upowszechnienie wyników zadania badawczego

Do dnia zakończenia projektu badawczego opublikowano następujące prace:

1. Szlżak N., Obracaj D., Głuch B.: Analiza warunków mikroklimatu w rejonie ścian eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego. W: Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych : II konferencja naukowo-techniczna : Brenna, 7–9 listopada 2012 r. . Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 2012
2. Szlżak N., Obracaj D., Głuch B.: Warunki mikroklimatu wyrobisk chodnikowych i ścianowych na wybranym przykładzie, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa; 2013 nr 4 s. 5–16.
3. Szlżak N., Obracaj D., Głuch B.: Wybrane elementy obciążenia cieplnego pracowników w ścianach eksploatacyjnych, Kwartalnik Pol. Śl. „Górnictwo i Geologia”.
4. Szlżak N., Obracaj D., Głuch B.: Estimation of microclimate conditions at longwall excavations in hard coal mines. AGH Journal of Mining and Geoengineering, vol. 37, No. 1, Kraków 2013.
5. Szlżak N., Obracaj D., Głuch B.: Wybrane elementy bilansu cieplnego pracowników w wyrobiskach z wentylacją lutniową. Materiały konferencyjne Wyd. Pol. Śl., Gliwice-Rybnik 27.06.2013r.

Konferencje, na których przedstawiono wyniki zadania badawczego:

- Aktualne problemy zwalczania zagrożeń górniczych: II konferencja naukowo-techniczna : Brenna, 7–9 listopada 2012 r. Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 2012.
- Konferencja nt.: „Opracowanie zasad zatrudniania pracowników w warunkach zagrożenia klimatycznego w podziemnych zakładach górniczych” w ramach projektu strategicznego POPRAWA BEZPIECZEŃSTWA PRACY W KOPALNIACH. ITI EMAG w Katowicach, 01.02.2013r.
- Konferencja nt.: „Opracowanie zasad zatrudniania pracowników w warunkach zagrożenia klimatycznego w podziemnych zakładach górniczych” w ramach projektu strategicznego POPRAWA BEZPIECZEŃSTWA PRACY W KOPALNIACH, 27.06.2013r.
- 7 Szkoła Aerologii Górniczej. Polska Akademia Nauk, Komitet Górnictwa, Krynica 2013