

Tadeusz ORZECOWSKI, Zbigniew SKROBACKI

KOMFORT CIEPLNY W KABINIE SAMOCHODU – BADANIA EKSPERYMENTALNE

Streszczenie

Współcześnie produkowane pojazdy mają wiele systemów wspomagających pracę kierowcy i zdecydowanie podnoszą nie tylko bezpieczeństwo ludzi, ale przyczyniają się do ograniczanie liczby wypadków drogowych. Zjawiska te dotyczą również komfortu pasażerów, a już szczególnie kierowcy. Jednym z takich systemów jest układ klimatyzacji, który wymaga odpowiednich nastaw regulacyjnych tak, by utrzymywać pożądane parametry termiczne wewnątrz. W niniejszej pracy przeprowadzono pomiary temperatury w pięciu punktach wewnętrznych kabiny samochodu osobowego: w okolicach nóg, kolan i głowy kierowcy oraz na wysokości kolan pasażerów tylnej kanapy. Badania prowadzono przy nawiewie na nogi i głowę przy maksymalnej nastawie chłodzenia, ale przy trzech różnych położeniach pokrętki dmuchawy. Z przeprowadzonych badań wynika, że - przy zadanych nastawach regulacyjnych - najbardziej równomierny, a więc i najkorzystniejszy rozkład temperatury wewnątrz kabiny samochodu występuje przy niskim stopniu turbulizacji przepływu. Odpowiada to minimalnej wydajności dmuchawy w systemie omówiony klimatyzacji.

WSTĘP

Rejestrowane w ostatnich latach anomalie pogodowe wydają się być zjawiskami powtarzalnymi w dłuższym cyklu czasowym. W środowisku klimatologów trwa dyskusja o ich przyczynach czego wnioskiem jest alarmujący sygnał o trwałej zmianie klimatu, która może być nieodwracalna, jeśli nie podejmie się działań ograniczających postępującą degradację środowiska naturalnego. Wnioskiem i podstawowym zaleceniem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych poprzez radykalne zmniejszenie zużycia nieodnawialnych nośników energii. Nawet niewielka ich podmiana na odnawialne jest w długim okresie czasu działaniem wysoce pożądanym, choć w początkowym okresie wymaga znacznych inwestycji w opracowanie nowych lub usprawnienie technologii dotychczas stosowanych. Dotyczy to również systemów klimatyzacji, których najstarsze odkrycia z zakresu chłodzenia pomieszczeń datuje się na około 3000 rok p.n.e., gdzie na dziedzińcu wewnętrznym domu Asyryjczyka zastosowano system wypary. Wykorzystywanym w tym czasie sposobem obniżania temperatury powietrza było rozpylanie wody lub rozwieszanie w otworach drzwiowych i okiennych mokrych mat wykonywanych z dostępnych materiałów trawiastych lub włóknistych. Tak zorganizowany system klimatyzacji miał szereg wad. Wilgotne powierzchnie należało rozmieścić w bezpośrednim sąsiedztwie obiektu chłodzonego, co stwarzało nie tylko dyskomfort nadmiernej wilgotności, ale też sprzyjało rozwojowi bakterii i pleśni. Problem ten zauważył już Hipokrates około 400 roku p.n.e. wiążąc częstotliwość chorób człowieka od sposobu zmian pogody, temperatury i wilgotności, a na samopoczucie człowieka z lokalnym klimatem.

Do znaczącego postępu w technice klimatyzacji przyczyniły się dopiero odkrycia dziewiętnastowieczne, kiedy Faraday zauważył, że sprężanie i skraplanie amoniaku powoduje pobieranie i oddawanie ciepła. Odkrycie to było podstawą prac Carla von Linde, który w 1870 roku opracował zasadę działania i zbudował pierwszą sprężarkę chłodniczą. Jednak początek klimatyzacji wiąże się z nazwiskiem Carrier'a, który w 1902 roku skonstruował zraszający system kontroli temperatury i wilgotności drukarni. Od tego czasu przyjęto definiować klimatyzację jako proces nadawania powietrzu we-

wnętrznemu określonych parametrów i warunków poświadanych ze względów higienicznych ze względu na dobre samopoczucie ludzi. W latach następnych proces ten zaczęto wykorzystywać do poprawy komfortu w domach, a następnie również i w samochodach. Początkowo było to prymitywne urządzenie bez żadnej regulacji, które w USA od roku 1933 montowano w najdroższych limuzynach z silnikiem o wystarczająco dużej mocy, by pokryć dodatkowe obciążenie. Po drugiej wojnie światowej firma Chrysler zaczęła montować taki system w samochodach produkowanych seryjnie tak, że w końcu lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku połowa produkowanych samochodów była weń wyposażona. Był to wynalazek amerykański, który długo był postrzegany w Europie i Azji jako wyposażenie luksusowe i dopiero w obecnym wieku zaczyna być stosowany powszechnie. Przyczyną są wysokie, niejednokrotnie przekraczające 30 °C, temperatury latem, co sprawia, że klimatyzacja jest urządzeniem wręcz niezbędnym dla bezpiecznego użytkowania pojazdów. Spostrzeżenia te są potwierdzane przez prowadzone badania wiążące zdarzenia drogowe z temperaturą otoczenia. W pracy [12] rozpatrzono wpływ dziesięciu różnych czynników na częstość wypadków samochodowych. Przeprowadzona analiza wykazała alkohol jako najniebezpieczniejszy główny z czynników, zaś temperaturę umiejscowiono na miejscu trzecim. Zagadnienia komfortu cieplnego w kabinie pojazdu nie mogą więc być wiązane tylko z wygodą, ale przede wszystkim z bezpieczeństwem ruchu. W pracy [2] przeprowadzono badania na grupie pięćdziesięciu osób, które losowo przypisano do jazdy w trzech różnych warunkach klimatycznych: pierwsza w warunkach zimnych przy 5°C druga w neutralnych przy 20°C i trzecia przy temperaturze 35°C. We wszystkich przypadkach zachowano jednakowe warunki wilgotności względnej równej 50%. Stwierdzono najwyższą sprawność prowadzenia pojazdów w warunkach neutralnych. W czasie prowadzonych 30 minutowych pomiarów nie zauważono wpływu temperatury otoczenia na ciepłość ciała i częstość uderzeń serca. Na jakość kierowania ma za to bardzo duży wpływ koncentracja uwagi kierowcy, która wyraźnie ulega obniżeniu przy ręcznym sterowaniu parametrów powietrza nawiewanego do wnętrza.

Efekt zmian wilgotności względnej w kabinie na odczucie komfortu cieplnego przez pasażerów rozpatrywano w [1]. Wyniki przeprowadzonej analizy termodynamicznej i psychrometrycznej wska-

zują, że zmiana wilgotności względnej może usprawnić proces przygotowania powietrza i ograniczyć straty energii. Wyniki analizy podano na wykresie wskaźnika PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) w funkcji PMV (Predicted Mean Value).

We wnioskach stwierdza się, że:

- Zwiększenie końcowej wilgotności względnej w przedziale pasażerskim zmniejsza ilość ciepła odprowadzanego z powietrzem wentylacyjnym, co zmniejsza zużycie paliwa.
- Praca układu klimatyzacji przy wysokiej temperaturze otoczenia i niskiej wilgotności jest mniej energochłonna w porównaniu z powietrzem o dużej wilgotności o tej samej temperaturze.
- Efektywne sterowania pracą układu klimatyzacji musi uwzględniać wilgotność powietrza świeżego.
- Niezależne nawilżanie wyparne do sterowania poziomem wilgotności względnej w kabinie pojazdu, wymaga zmiany konstrukcyjnej układu.

Warunki wewnętrzne kabiny samochodu są wynikiem procesów wymiany ciepła i masy. W pracy [3] badano wpływ nastaw kanałów wlotowych powietrza na komfort cieplny, jakość powietrza i zużycia energii podczas chłodzenia. Wykazano, że w przypadku dwóch i więcej osób przebywających w kabinie średniej wielkości samochodu (tutaj Fiat Linea) poziom CO₂ wzrasta powyżej wartości dopuszczalnej 1200 ppm wg ASHRAE. Podano równanie bilansu dwutlenku węgla, na podstawie którego pokazano, że potrzeba aż 50 s na usunięcie powietrza zużytego i doprowadzenie jego do takiego samego stanu jak powietrze zewnętrzne. Właściwe rozmieszczenie i ukierunkowanie nawiewów w okolice głowy zmniejsza ten czas, czego wynikiem jest niższe zużycie energii. Zaobserwowane silne zależności pomiędzy komfortem cieplnym, jakością powietrza i zużyciem energii wymagają zaawansowanych systemów sterowania układami wentylacji, ogrzewania i klimatyzacji samochodu.

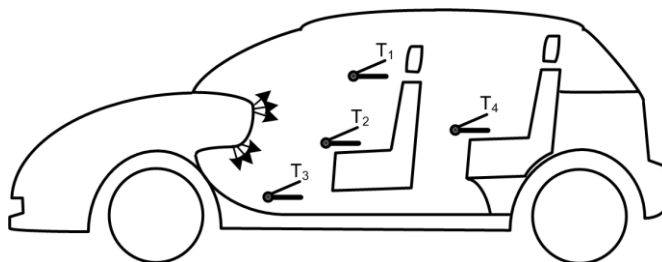
Podczas dłuższego postoju w słońcu temperatura wewnątrz samochodu może wzrosnąć do 65°C, zaś powierzchni poddanych bezpośredniemu napromieniowaniu powyżej nawet 70°C. Towarzyszy temu obniżenie wilgotności względnej powietrza do około 10% [4]. Zajęcie miejsca w kabinie i jednocześnie włączenie klimatyzacji początkowo powoduje wzrost temperatury ciała, co ma negatywny wpływ na poczucie komfortu cieplnego. Dopiero po około 30 minutach temperatura ciała zaczyna spadać i rośnie poczucie komfortu. Wychładzanie nagrzanego wnętrza samochodu w porównaniu wychładzaniem powietrza trwa dużo dłużej. Podawane różnice temperatury pomiędzy różnymi częściami wnętrza sięgają 25°C na początku działania układu klimatyzacji i maleją do 3-4°C wskutek ciągłej pracy tego systemu. Po odpowiednio długim czasie zaobserwowano stałą różnicę pomiędzy średnią temperaturą powietrza i częściami stałymi około 13°C.

Geometria samochodu i różnorodność materiałów często o nieznanach parametrach fizycznych sprawia, że do opisu komfortu cieplnego buduje się możliwie prosty model fizyczny [5]. Ale nawet takie niezbyt skomplikowane obliczenia wymagają możliwie pełnej informacji o urządzeniach wywarzających ciepło lub chłód, szczególnie wtedy kiedy stosuje się wysokowydajne elementy wymiennikowe [10], [11], na powierzchniach których obserwuje się złożone zjawiska zmiany fazy czynnika [6], [7]. Dotyczy to również własności emisyjnych i refleksyjnych wtedy, kiedy występują wyraźne różnice temperatur będące wynikiem złożonych oddziaływań radiacyjnych [8], [9].

Duża niepewność wprowadzanych danych wejściowych niezbędnych do opisu teoretycznego wymaga przeprowadzenia badań na obiekcie rzeczywistym.

1. OPIS BADAŃ

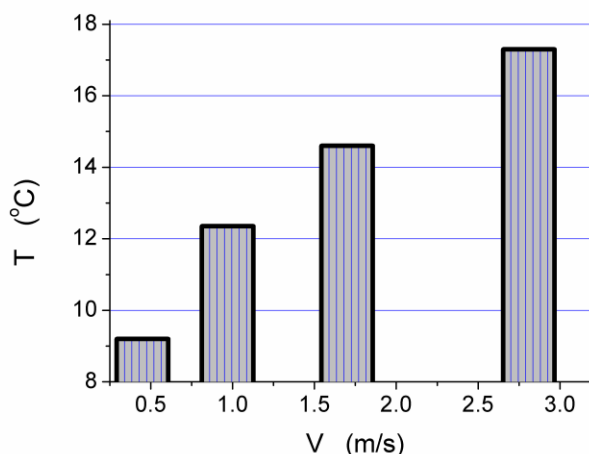
Do badań wybrano samochód marki Suzuki SX4 fabrycznie wyposażony w manualny system jednostrefowej klimatyzacji, który może pracować w funkcji grzania zimą i chłodzenia latem. Parametry nawiewu zadaje się dwoma niezależnymi pokrętkami: jednym w sposób ciągły nastawia się temperaturę, a drugim skokowo w czterech zakresach zmienia się obroty wentylatora, co odpowiednio przekłada się na strumień doprowadzanego powietrza. Może to być powietrze zewnętrzne lub cyrkulacyjne. Nawiew, w zależności od potrzeb, może być kierowany tylko na przednią szybę, na szybę i w dolną lub górną strefę pojazdu poprzez system nawiewników kierunkowych w konsoli przedniej pojazdu oraz nawiewy dolne. Ich schematyczne rozmieszczenie pokazano na rysunku 1. Dla oszraniania lub osuszania szyb dostępna jest również opcja kierowania nawiewu tylko na szybę przednią.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia termopar w kabinie samochodu.

Nawiewane do wnętrza samochodu powietrze oziębiane lub podgrzewane jest na wymienniku krzyżowym. Przy rozgrzanym silniku i ustalonych parametrach dopływu czynnika grzewczego lub chłodniczego do wymiennika, temperatura nawiewanego powietrza zależy od prędkości przepływu przez nagrzewnicę lub chłodnicę.

Pomiary parametrów wprowadzanego do wnętrza schłodzonego powietrza przeprowadzono ustawiając parametry systemu klimatyzacji na najniższą temperaturę i nawiewem ustawionym w pozycji na głowę i nogi.

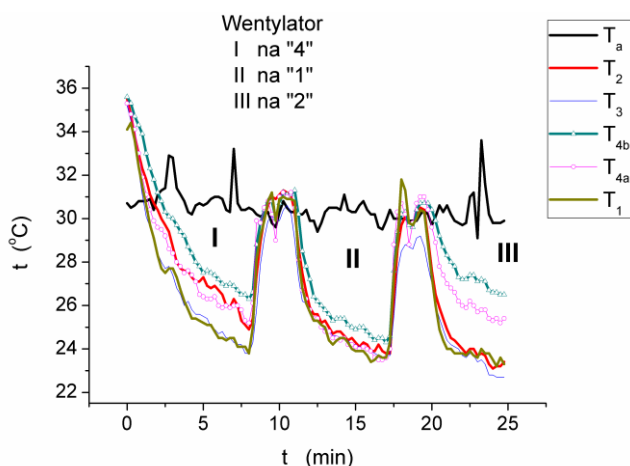


Rys. 1. Zależność temperatury nawiewanego powietrza od prędkości przepływu przy czterech różnych nastawach dmuchawy.

Rejestrację temperatury i prędkości nawiewu prowadzono przy czterech różnych prędkościach obrotowych dmuchawy określonych położeniem pokrętła sterującego w pozycji od 1 do 4. Czujniki umieszczano w płaszczyźnie dwóch kratek nawiewników panelu przedniego z przepływem nakierowanym na głowę. Temperaturę mierzono termoparą płaszczoową typu K podłączoną do miernika, z którego wskazania odczytuje się z rozdzielczością 0,1 K. Do pomia-

ru prędkość przepływu wykorzystano anemometr skrzydełkowy o średnicy wiatraczka nieco większej do średnicy otworu nawiewnego. Jego rozdzielczość wskazań wynosi 0,01 m/s, a dokładność $\pm 0,1$ m/s. Dla obydwu otworów pomiary powtarzano kilkakrotnie, z których obliczono wartości średnie. Na rysunku 2 pokazano zależność temperatury powietrza świeżego w funkcji prędkości nawiewu. Temperatura czerpanego z zewnątrz powietrza przed schłodzeniem była stała i wynosiła około 30,5°C. Po schodzeniu zaś jej wartość, jak widać na rysunku 2, silnie zależy od prędkości przepływu tak, że przy najniższej prędkości obrotowej dmuchawy wynosi około 9,2°C, a przy najwyższej rośnie do 17,3°C.

Po dłuższym postoju latem przy wysokich temperaturach, często w słońcu, we wnętrzu samochodu ustala się temperatura, przy której obniża się sprawność kierowcy. W takich przypadkach należy możliwie szybko wychłodzić powietrze, co czyni się poprzez włączenie klimatyzacji. Do wyboru są różne opcje dziania tego systemu. Jednym z parametrów, którym można sterować, jest nastawa dmuchawy. Jej różna wydajność powoduje różną temperaturę świeżego powietrza, a więc również, zależnie od ustawionych parametrów, zmienne w czasie warunki termiczne. Dla ich określenia zamontowano wewnątrz kabiny pięć termopar, szóstą wykorzystano do pomiaru temperatury powietrza na zewnątrz. Pierwszą z termopar T_1 mierzono temperaturę na wysokości głowy kierowcy, drugą T_2 na wysokości kolan, zaś trzecią T_3 na poziomie stóp. Dwie termopary na rysunku 1 oznaczone wspólnym symbolem T_4 umieszczono na wysokości kolan pasażerów tylnej kanapy. Wszystkie czujniki podłączono do stacji akwizycji danych, którą zaprogramowano do zapisu wszystkich sygnałów z częstotliwością 1/15 Hz, tj. cztery pomiary na minutę. Bezpośrednio przed przystąpieniem do badań samochodem, który stał w słońcu, przejechano około 5 km, aby rozgrzać silnik tak, by po włączeniu układu klimatyzacji pracował w ustalonym stanie termicznym pojazdu. Następnie zaparkowano w cieniu i uruchomiono rejestrację temperatury. Zmierzona temperatura początkowa wewnątrz pojazdu wynosiła ponad 35°C, zaś temperatura zewnętrzna około 30,5°C. Badania prowadzono w trzech ośmiominutowych seriach przy ustawieniu maksymalnej temperatury chłodzenia. W pierwszej serii przełącznik prędkości obrotowej dmuchawy ustawiono w położeniu 4-tym, co odpowiada jej maksymalnej wydajności. Po około 7 minutach dmuchawę wyłączono i przewietrzono dokładnie całe wnętrze, po czym nadmuch ustawiono w pozycji minimalnej, tj. w położeniu 1-szym. Zamknięto wszystkie drzwi i odczekano około 7 minut. Identyczną procedurę powtórzono przed trzecią serią, podczas której dmuchawa pracowała w 2-gim położeniu przełącznika. Tak otrzymane wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zmiana temperatury w punktach wewnętrznych kabiny wg rys. 1 oraz temperatury otoczenia T_a .

2. Dyskusja otrzymanych wyników

Wprowadzanie powietrza do kabiny samochodu może mieć charakter mieszający, niskoburzliwy lub laminarny. Podstawą takiego podziału jest stopień turbulizacji strugi, przez który rozumie się stosunek uśrednionej w czasie wartości pulsacji prędkości do średniej prędkości przepływu.

Przy stopniu turbulencji wyższym od 20% na granicy strugi obserwuje się intensywne mieszanie powietrza nawiewanego z powietrzem wewnętrznym, co powoduje wzrost ilości powietrza w strudze wraz ze wzrostem odległości od otworu nawiewnego. Proces taki nasila się ze wzrostem prędkości oraz stopniem turbulencji. W przepływie niskoburzliwym o stopniu turbulencji od 10 do 20% przy nawiewaniu zimnego powietrza obserwuje się proces wyporu powietrza, które nagrzewa się od ciepłych obiektów we wnętrzu i konwekcyjnie unosi do góry niwelując różnice temperatury w przekroju pionowym. Przepływ laminarny jest charakterystyczny dla bardzo małych i ustalonych prędkości nawiewu poniżej 0,4 m/s, a jego utrzymanie wymaga utrzymywania stabilnych warunków wprowadzania powietrza świeżego. Taki charakter przewietrzania wnętrza samochodu może występować przy wyłączonej dmuchawie, stałej prędkości jazdy i w niezmiennych warunkach zewnętrznych.

Przedstawione na rysunku 3 pomiary temperatury w różnych punktach kabiny przeprowadzono zmieniając jedynie prędkość obrotową dmuchawy, co skutkowało różną prędkością nawiewu. W pierwszej serii (zakres I na rysunku 3) przy nastawie dmuchawy na maksimum zmierzona średnia prędkość w płaszczyźnie panelu przedniego wynosiła 2,81 m/s. Tak duża wartość formuje strugę silnie burzliwą. Nawiew jest kierowany na nogi pasażerów oraz do góry w kierunku głowy. Badania prowadzono w samochodzie pustym, tj. w jego wnętrzu nie przebywała żadna osoba. Dlatego też swobodny strumień docierał do części sufitowej, gdzie - wskutek przepływu równoległe do podsufitki o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia - ogrzewał się i zalegał środkowe partie kabiny. Wynikiem tego jest wyraźnie różna temperatura na wysokości kolan pasażerów w porównaniu z tą na wysokości głowy i nóg. Zmiana tych ostatnich jest niemal identyczna, co świadczy o stabilności nawiewów w dół i w górę. Podobne zjawiska obserwuje się przy nastawie dmuchawy w położeniu 2 (zakres II na rysunku 3), gdzie zmierzona średnia prędkość nawiewu wynosiła 0,97 m/s. Tutaj jednak, zanotowano jednakowe temperatury na poziomie głowy, nóg i kolan pasażerów przednich siedzeń. Na poziomie kolan pasażerów tylnej kanapy temperatura jest o 3 do 4 stopni wyższa. Prawdopodobną przyczyną jest utrudniony przepływ zimnego powietrza pod przednimi siedzeniami z części przedniej do tylnej. Jednocześnie nagrany strumień powietrza z nawiewnika górnego nie powoduje znaczącej zmiany w tylnej części kabiny na poziomie kolan i wyżej.

Zupełnie inaczej przedstawia się rozkład temperatury przy najniższej nastawie dmuchawy, tj. w zakresie II wg rysunku 3. Bardzo mała prędkość strumienia powietrza powoduje, że strumień nawiewany na twarz osób zajmujących przednią kanapę nie dociera do nagranych części podsufitki i jako cięższy opada w dół. Dopiero stamtąd, po lekkim podgrzaniu się, jest konwekcyjnie wypierany w górne partie kabiny. Zaobserwowane zjawiska są charakterystyczne dla przepływu niskoburzliwego o niskim stopniu turbulizacji nawiewu.

Niezależnie rejestrowaną była temperatura otoczenia, której przebieg również zamieszczono na rysunku 3. Termoparę tą umieszczono bezpośrednio przy stacji akwizycji danych w okolicach przednich drzwi na wysokości progu samochodu. Pomiary prowadzono w stosunkowo krótkim okresie czasu tak, że temperatura otoczenia pozostawała niemal stała i wynosiła około 3,5°C. Ze względu na konieczność zachowania stabilnych warunków pracy

układu klimatyzacji badania prowadzono przy wcześniej rozgrzanym włączonym silniku, który w tych warunkach intensywnie się nagrzewał. Dlatego też od czasu do czasu włączał się wentylator, by wymusić przepływ powietrza przez chłodnicę i schłodzić płyn. Gorące powietrze po przejściu przez chłodnicę i omyciu zewnętrznych powierzchni silnika wypływało na zewnątrz. Jego część docierała do termopary na zewnątrz powodując widoczny na rysunku 3 chwilowy wzrost temperatury.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że - przy zadanych nastawach regulacyjnych - najbardziej równomierny, a więc i najkorzystniejszy rozkład temperatury wewnątrz kabiny samochodu występuje przy niskim stopniu turbulizacji przepływu. Odpowiada to minimalnej wydajności dmuchawy w systemie klimatyzacji.

Warto przypomnieć, że pomiary prowadzono na nieruchomym pojeździe i bez ludzi wewnątrz. Obecność kierowcy i jednego lub więcej pasażerów na pewno zmieni rozpyły powietrza we wnętrzu kabiny, jednak - jak się wydaje - zaobserwowane zjawiska związane z charakterem nawiewu i jego wpływem na rozkład temperatury pozostaną niezmiennie.

BIBLIOGRAFIA

1. Alahmer A., Omar M.A., Mayyas A., Dongi S., Effect of relative humidity and temperature control on in-cabin thermal comfort state. Thermodynamic and psychometric analyses. Applied Thermal Engineering 31 (2011), 2636-2644.
2. Daanen H.A.M., Vliert E., Huang Xu, Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments. Applied Ergonomics 34 (2003), 597-602.
3. Kilic M., Akyol S. M., Experimental investigation of thermal comfort and air quality in an automobile cabin during the cooling period. Heat Mass Transfer 48 (2012), 1375-1384.
4. Kilic M., Kaynakli O., An experimental investigation on interior thermal conditions and human body temperatures during cooling period in automobile. Heat Mass Transfer 47 (2011), 407-418.
5. Orzechowski T., Skrobcki Z.: Ocena stanu termicznego wnętrza kabiny samochodu. Logistyka 4 (2015), 5153-5160.
6. Orzechowski T., Tyburczyk A., Boiling heat transfer on fins experimental and numerical procedure EPJ Web of Conferences 67 (2014), DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146702088>.
7. Orzechowski T., Wciślik S., Instantaneous heat transfer for large drops levitating over a hot surface. International Journal of Heat and Mass Transfer 73 (2014), 110-117.
8. Kruczek T., Determination of annual heat losses from heat and steam pipeline networks and economic analysis of their thermomodernisation. Energy 62 (2013), 120-131.
9. Kruczek T., Use of infrared camera in energy diagnostics of the objects placed in open air space in particular at non-isothermal sky. Energy 91 (2015), 35-47.
10. Pastuszko R., Pool boiling on micro-fin array with wire mesh structures, International Journal of Thermal Sciences 49 (2010), 2289-2298.
11. Pastuszko R., Wójcik T. M., Experimental investigations and a simplified model for pool boiling on micro-fins with sintered perforated foil. Experimental Thermal and Fluid Science 63 (2015), 34-44.
12. Zlatoper, Th.-J., Determinants of motor vehicle deaths in the United States: a cross-sectional analysis. special issue: theoretic

tical models for traffic safety. Accid. Anal. Prev. 23 (5) (1991), 431-436.

THERMAL COMFORT IN A VEHICLE CABIN - EXPERIMENTAL STUDY

Abstract

Today the vehicles have a lot of driver assistance systems and significantly improve not only the safety of people, but contribute to the reduction of road accidents. These phenomena also apply to passenger comfort, and especially the driver. One such system is the air-conditioning system, which requires appropriate regulatory settings so as to maintain the desired thermal parameters inside. In this paper, temperature measurements were performed at five levels inside the cabin of a passenger car: in the leg, knee and head and knee-high passenger rear seats. The study was conducted with ventilation on the legs and head at maximum cooling setpoints, but at three different positions rotary blower. The study shows that - with the given regulatory settings - the most uniform, and thus most favorable temperature distribution inside the vehicle cabin occurs at a low degree of turbulence of the air stream. This corresponds to a minimum productivity of the blower of the air-conditioning system.

Autorzy:

Dr hab. inż. **Tadeusz Orzechowski**, prof. PŚK – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
mgr inż. **Zbigniew Skrobcki** – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach