

Dorota Szulczyńska^{a)}, Jacek Roguski^{a)*}

^{a)} *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpozarowej – Państwowy Instytut Badawczy*

* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: jroguski@cnbop.pl*

Complex Approach to Thermal Testing of Firefighters' Protective Clothing

Kompleksowe podejście do badań termicznych odzieży ochronnej strażaków

ABSTRACT

Aim: An extremely important property of firefighters' special clothing is thermal resistance of the clothing materials to heat transfer from radiation or flame. Performing tests with the use of thermal mannequins may contribute to the improvement of clothing sets, as such tests indicate weak points of the tested products. The review article presents information on the testing of special clothing on mannequins and a short history of test stands with the use of thermal mannequins.

Introduction: Using innovative techniques and technologies provides firefighters-rescuers with an appropriate level of safety. Special clothing is a barrier between the human body and the heat and water vapour from the environment. It is this garment that protects the human body from overheating or cooling down.

Methodology: The general test procedure for using thermal mannequins is described in ASTM standards (for instance ASTM F2370 – 10 [1], ASTM F2371 – 10 [2]). Testing of special clothing allowing for an accurate assessment of the degree of protection of the human body against the effects of fire, flame and heat was initiated in the United States. The assumption of these works was to create a mannequin for testing the resistance of clothing equipped with heat sensors to flash fires. Currently, there are around 100 different models of thermal mannequins around the world. Technological progress in the post-war period resulted in the rapid development of mannequins built with a multi-segment structure. This allowed to increase the accuracy of the measurements that simulated heat exchange between the human body and the environment. The data obtained in this manner is repeatable, which allows for standardization of the test requirements for thermal insulation of clothing sets.

Conclusions: Performing tests using thermal mannequins contributes to the improvement of clothing sets in order to increase the safety of the users. The results obtained under the test conditions very accurately indicate the number, location and degree of burns to which the user of such clothing may be exposed.

Keywords: protective clothing, special clothing, thermal mannequin, thermal resistance, test stands to determine thermal loads

Type of article: review article

Received: 27.10.2021; Reviewed: 23.11.2021; Accepted: 23.11.2021;

Authors' ORCID IDs: D. Szulczyńska – 0000-0001-8003-8452; J. Roguski – 0 0000-0002-7848-053X;

The authors contributed the equally to this article;

Please cite as: SFT Vol. 58 Issue 2, 2021, pp. 154–163, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.9>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Niezwykle ważną właściwością strażackich ubrań specjalnych jest odporność termiczna materiałów odzieżowych na przenikanie ciepła pochodzącego z promieniowania lub płomienia. Wykonywanie badań przy użyciu manekinów termicznych może przyczynić się do udoskonalania zestawów odzieżowych, bowiem badania takie wskazują słabe punkty testowanych wyrobów. W artykule mającym charakter przeglądowy przedstawiono informacje na temat prowadzonych badań ubrań specjalnych na manekinach oraz krótką historię stanowisk badawczych z wykorzystaniem manekinów termicznych.

Wprowadzenie: Zastosowanie innowacyjnych technik i technologii zapewnia strażakom-ratownikom odpowiedni stopień bezpieczeństwa. Odzież specjalna stanowi barierę pomiędzy ludzkim ciałem a ciepłem i parą wodną pochodzącymi ze środowiska. To właśnie ubranie ma za zadanie chronić ciało człowieka przed nadmiernym przegrzaniem lub wychłodzeniem.

Metodologia: Ogólna procedura postępowania badawczego z wykorzystaniem manekinów termicznych opisana jest w standardach ASTM (np. ASTM F2370 – 10 [1], ASTM F2371 – 10 [2]). Badania odzieży specjalnej pozwalające na dokładną ocenę stopnia ochrony ludzkiego ciała przed działaniem ognia, płomienia i ciepła zapoczątkowano w Stanach Zjednoczonych. Założeniem wspomnianych prac było stworzenie manekina do badania odporności odzieży na działanie pożarów błyskawicznych, wyposażonego w czujniki ciepła. Obecnie na świecie funkcjonuje ok. 100 różnych modeli manekinów termicznych. Postęp technologiczny w okresie powojennym spowodował szybki rozwój budowanych manekinów, które posiadały wielosegmentową

budowę. Pozwoliło to na zwiększenie dokładności wykonywanych pomiarów symulujących wymianę ciepła między organizmem ludzkim a otoczeniem. Uzyskane w ten sposób dane są powtarzalne, co pozwala na znormalizowanie wymagań badawczych izolacyjności cieplnej zestawów odzieżowych.

Wnioski: Wykonywanie badań przy użyciu manekinów termicznych przyczynia się do udoskonalania zestawów odzieżowych, aby zwiększać bezpieczeństwo użytkowników. Uzyskane w warunkach badawczych wyniki w bardzo dokładny sposób wskazują liczbę, lokalizację i stopień oparzeń, na jakie może być narażony użytkownik takiego ubrania.

Słowa kluczowe: odzież ochronna, ubrania specjalne, manekin termiczny, odporność termiczna, stanowiska badawcze do określenia obciążeń cieplnych

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Przyjęty: 27.10.2021; **Zrecenzowany:** 23.11.2021; **Zaakceptowany:** 23.11.2021;

Identyfikatory ORCID autorów: D. Szulczyńska – 0000-0001-8003-8452; J. Roguski – 0 0000-0002-7848-053X;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu.

Proszę cytować: SFT Vol. 58 Issue 2, 2021, pp. 154–163, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.9>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Introduction

Rapid industrial development and global warming increase the risk of fires. The fire brigade is the leading rescue service involved in extinguishing fires. Rescue and firefighting operations carried out by the firefighters repeatedly take a long time. While extinguishing fires, rescuers wear the so-called special clothing, which should provide them with an appropriate level of safety. Clothing is a barrier between the human body and the heat and water vapour from the environment [3]. It is this garment that protects the human body from overheating or cooling down. An extremely important property of firefighters' special clothing is the thermal resistance of the clothing materials to heat transfer from radiation or flame.

The method of heat and moisture exchange in the firefighter's personal protective equipment (protective clothing, gloves, boots, helmets) depends on the materials and the used design solutions. Due to the complex phenomena of heat and moisture transport, the greatest risk of burns occurs in the area of clothes and gloves [4]. The factors defining the protective properties of the firefighter's special clothing are the parameters of the material package, which include the thickness of the individual layers and their thermal properties depending on the conditions of use. The protective properties are defined by the coefficient of heat conduction, specific heat and thermal diffusivity [4].

The presence of moisture in the protective clothing influences its thermal properties, and in some situations it may cause burns with steam [5]. The use of an additional layer of clothing (underwear) under special clothing reduces the risk of burns [4].

A necessary condition for ensuring the safety of a firefighter during firefighting and rescue operations is to equip him/her with the personal protective equipment. They include, among others, eye and face protection, head, hearing and respiratory protection, as well as clothing. The basic feature of special clothing is its multifunctionality, which means the ability to maximally protect the user against various external dangers occurring in the firefighter's work environment. If the clothing provides effective protection of a firefighter in a very wide range against various hazards, then it is referred to as special clothing, which is the basic protective clothing of a firefighter. It usually consists of two parts: a jacket

Wprowadzenie

Szybki rozwój przemysłowy oraz globalne ocieplenie powoduje wzrost ryzyka występowania pożarów. Wiodącą służbą ratowniczą uczestniczącą w gaszeniu pożarów jest straż pożarna. Akcje ratowniczo-gaśnicze wykonywane przez strażaków wielokrotnie trwają długo. Ratownicy podczas gaszenia pożarów są ubrani w tak zwane ubrania specjalne, które powinny zapewnić im odpowiedni stopień bezpieczeństwa. Odzież stanowi barierę pomiędzy ludzkim ciałem a ciepłem i parą wodną pochodzącymi ze środowiska [3]. To właśnie ubranie ma za zadanie chronić ciało człowieka przed nadmiernym przegrzaniem lub wychłodzeniem. Niezwykle ważnymi właściwościami strażackich ubrań specjalnych jest odporność termiczna materiałów odzieżowych na przenikanie ciepła pochodzącego od promieniowania lub płomienia.

Sposób wymiany ciepła i wilgoci w ochronach osobistych strażaka (odzieży ochronnej, rękawicach, obuwiu, hełmach) zależy od zastosowanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. Największe ryzyko wystąpienia oparzeń – z uwagi na złożone zjawiska transportu ciepła i wilgoci – występuje w obszarze ubrań i rękawic [4]. Czynnikiem definiującym właściwości ochronne odzieży specjalnej strażaka są parametry pakietu materiałowego, do których można zaliczyć grubość poszczególnych warstw oraz ich właściwości cieplne zależne od warunków użytkowania. Właściwości ochronne określane są współczynnikiem przewodzenia ciepła, ciepłem właściwym oraz dyfuzyjnością cieplną [4].

Obecność wilgoci w ubraniu ochronnym wpływa na jego właściwości cieplne, a w pewnych sytuacjach może przyczynić się do oparzeń parą wodną [5]. Zastosowanie dodatkowej warstwy ubrania (bielizny) pod ubraniem specjalnym zmniejsza ryzyko wystąpienia oparzenia [4].

Warunkiem koniecznym dla zapewnienia bezpieczeństwa strażaka podczas działań gaśniczo-ratowniczych jest wyposażenie go w środki ochrony indywidualnej. Zalicza się do nich m.in. środki ochrony oczu i twarzy, głowy, słuchu, układu oddechowego, a także odzież. Podstawową cechą ubrania specjalnego jest wielofunkcyjność, która oznacza zdolność maksymalnie skutecznej ochrony użytkownika przed różnicowanymi zewnętrznymi niebezpieczeństwami występującymi w środowisku pracy strażaka. Jeśli odzież

and trousers. In order for the special garment to protect the user in all these unfavourable conditions, it is extremely important to select appropriate materials and construction of the special garment, which will ensure the appropriate comfort of work by meeting a number of requirements regarding parameters related to the body's thermoregulation, water resistance, vapour permeability and mechanical strength. The comfort of use is also of great importance, so that the clothes do not irritate the skin, do not restrict movements or contribute to additional effort with their weight. All requirements for products from the group of personal protective equipment (PPE) are subject to legal regulations and are described in detail in standards. In the countries belonging to the European Union, the standards have been unified and are included in the so-called European standard (PN-EN 469:2021-01) [7].

Protective clothing should comprehensively protect against threats, both from the outside and from the inside. During rescue operations, firefighters are accompanied by stress, haste and increased physical exertion. In order not to overheat, the body produces heat and sweat. A layer of material which is too tight can cause dangerous consequences. These include burns, which are formed due to a lack of protection against heat, as a result of sweat soaking into the material which is in direct contact with the skin. Another dangerous consequence can be stress caused by overheating of the body. It occurs as a result of a disturbed cooling mechanism. When it is not possible to dissipate the heat secreted by the body, its amount continues to increase, thus increasing the body temperature, which in the worst case leads to death due to heat stroke [6].

In Poland, special clothing of the firefighters must meet the provisions of PN-EN 469: 2021-01 [7] and the requirements of the Regulation of the Minister of Interior and Administration of 27 April 2010 amending the regulation on the list of products used to ensure public safety or protection of health and life and property, as well as the rules for issuing admittance of these products for use [8]. Before being admitted for use, this clothing must be subjected to, among others, thermal tests such as:

- resistance to heat transfer from radiation;
- resistance to heat transfer from the flame;
- resistance to spreading flames;
- resistance to soaking.

Tests on thermal mannequins

Initially, the thermal comfort provided by firefighter clothing was tested by surveying the users. The tested clothes were rated on a seven-point scale: hot, warm, slightly warm, comfortable, slightly cool, cool and cold. The subjectivism of the assessment and the imperfection of the rating scale did not allow for correct inference, and thus the introduction of adequate structural,

zapewnia skuteczną ochronę strażaka w bardzo szerokim zakresie przed różnorodnymi zagrożeniami, mówi się wtedy o ubraniu specjalnym, które stanowi podstawowe ubranie ochronne strażaka. Składa się ono najczęściej z dwóch części: kurtki oraz spodni. Aby ubranie specjalne zabezpieczało użytkownika w tych wszystkich niesprzyjających warunkach niezwykle ważną kwestią jest odpowiedni dobór materiałów i konstrukcji ubrania specjalnego, które będzie zapewniać odpowiedni komfort pracy przez spełnienie szeregu wymagań dotyczących parametrów związanych z termoregulacją organizmu, wodoodpornością, paroprzepuszczalnością czy wytrzymałością mechaniczną. Duże znaczenie ma również komfort użytkowania, aby ubranie nie podrażniało skóry, nie ograniczało ruchów albo swoim ciężarem nie przyczyniało się do dodatkowego wysiłku. Wszystkie wymagania dotyczące wyrobów z grupy sprzętu ochrony osobistej (ang. *personal protective equipment*, PPE) podlegają przepisom prawa i zostały szczegółowo opisane w normach. W krajach należących do Unii Europejskiej standardy zostały ujednoczone i zawarte są w normie europejskiej (PN-EN 469:2021-01) [7].

Odzież ochronna powinna kompleksowo zabezpieczać przed zagrożeniami zarówno od zewnątrz, jak i od wewnątrz. Podczas akcji ratowniczych strażakom towarzyszy stres, pośpiech i wzmożony wysiłek fizyczny. Aby nie doprowadzić do przegrzania, organizm wytwarza ciepło i pot. Zbyt szczelna warstwa materiału może powodować niebezpieczne skutki. Należą do nich poparzenia, które tworzą się z powodu braku ochrony przed żarem, w wyniku namakania przez pot materiału znajdującego się w bezpośrednim kontakcie ze skórą. Kolejnym niebezpiecznym następstwem może być stres wywołany przegrzaniem organizmu. Następuje ono na skutek zaburzonego mechanizmem schładzania. Kiedy nie ma możliwości odprowadzenia wydzielanego przez organizm ciepła, jego ilość wciąż wzrasta, podnosi temperaturę ciała, co w najgorszym wypadku prowadzi do śmierci na skutek udaru cieplnego [6].

W Polsce ubrania specjalne strażaków muszą spełniać zapisy normy PN-EN 469:2021-01 [7] oraz wymagania zawarte w rozporządzeniu Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 27 kwietnia 2010 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochronie zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad wydawania dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania [8]. Odzież ta przed dopuszczeniem do użytkowania musi zostać poddana między innymi takim badaniami termicznym jak:

- odporność na przenikanie ciepła pochodzącego z promieniowania;
- odporność na przenikanie ciepła pochodzącego z płomienia;
- odporność na rozprzestrzenianie płomieni;
- odporność na przemakanie.

Badania na manekinach termicznych

Początkowo badania komfortu termicznego, jaki dają ubrania strażackie, prowadzono przez ankietowanie użytkowników. Badane ubrania były oceniane w siedmiostopniowej skali: gorąco, ciepło, lekko ciepło, wygodnie, lekko chłodno, chłodno i zimno. Subiektywizm oceny oraz niedoskonałość skali ocen nie pozwalała na poprawne wnioskowanie, a co za tym idzie wprowadzanie

design and material changes in the production of firefighter's special clothing [9]. The tests with the use of thermal mannequins enables the simulation of the heat exchange that takes place between the body and the environment [10–11], taking into account the heat transfer by convection, thermal conduction and thermal radiation [12–13]. Stands equipped in such a manner are mainly used to test the thermal properties of clothing.

The interest in carrying out tests that allow for the accurate assessment of the degree of protection of the human body against fire, flame and heat by the use of special clothing, so as to prevent burns, began during the Second World War. In the United States, the work was initially carried out by various organizations that aimed to create a mannequin for testing resistance of clothing equipped with heat sensors to flash fire [13].

Currently, there are around 100 different models of thermal mannequins in use worldwide [15–16]. Over time, thermal mannequins became more and more multifunctional and used the latest technological solutions. Initially, the mannequins had a single-section structure, were made of copper and had internal heating, distributed by an in-built fan. In the mid-1940s, the General Electric Company developed a mannequin made of electroplated copper with built-in electrical circuits that evenly heated its entire surface [17]. Plastics and aluminium alloys began to be used for their construction. The multi-segment design allowed to increase the accuracy of the measurements that simulate heat exchange between the human body and the environment. The next stage in the development of the mannequins was the creation of models equipped with the ability to move, simulate the feeling of thermal comfort, as well as simulate breathing or sweating [15]. The closest to today's mannequins was the Swiss model SAM [18] and the American Adam [19].

Performing tests with the use of thermal mannequins allows to obtain repeatable data [15, 20] and, consequently, to standardize the test requirements for thermal insulation of clothing sets. Among the thermal mannequins, the most popular are models manufactured by El du Pont de Nemours and Company. The company has manufactured three complete stands of this type, which are located in Plant in Richmond in the USA, European Technical Centre in Meyrin – Geneva in Switzerland and the Middle East in Dubai. The Thermo-Man test stand is a full-size mannequin made of epoxy resin and a glass-fibre blend. It has 122 thermal sensors located all over the body, except for the hands and feet. The test uses 12 gas burners, fuelled with propane gas, which generate heat energy of 2 cal/cm/sec. Their settings ensure that the temperature in the test fire chamber during a simulated flash fire is maintained in the range of 600–1000°C, and the exposure of the clothing set to its operation takes 3–25 seconds. In addition, the DuPont test stands contain advanced data acquisition that processes information from sensors and signalling third-degree burns occurring during the tests. The information on burns can be obtained through the use of skin damage models developed by the US military and through testing. The results of the performed tests graphically show the number, location and degree of burns to which the user of such clothing may be exposed.

adekwatnych zmian konstrukcyjnych, projektowych oraz materiałowych w produkcji strażackich ubrań specjalnych [9]. Badania przy użyciu manekinów termicznych umożliwiają symulację wymiany ciepła, jaka następuje pomiędzy organizmem a otoczeniem [10–11] z uwzględnieniem wymiany ciepła na drodze konwekcji, przewodzenia cieplnego oraz promieniowania cieplnego (radiacyjnego) [12–13]. Tak wyposażone stanowiska wykorzystuje się głównie do prowadzenia badań właściwości termicznych odzieży.

Zainteresowanie wykonywaniem badań pozwalających na dokładną ocenę stopnia ochrony ludzkiego ciała przed działaniem ognia, płomienia i ciepła przez stosowanie odzieży specjalnej, tak by zapobiegać poparzeniom, miało swój początek w trakcie drugiej wojnie światowej. W Stanach Zjednoczonych prace początkowo były realizowane przez różne organizacje, które zakładały stworzenie manekina do badania odporności odzieży na działanie pożarów błyskawicznych (ang. *flash fire*), który wyposażony byłby w czujniki ciepła [13].

Obecnie na świecie pozostaje w użyciu ok. 100 różnych modeli manekinów termicznych [15–16]. Z czasem manekiny termiczne stawały się coraz bardziej wielofunkcyjne i wykorzystywały najnowsze rozwiązania technologiczne. Początkowo manekiny miały budowę jednosegmentową, były wykonane z miedzi oraz zawierały wewnętrzne ogrzewanie, rozprowadzane przez wbudowany wentylator. W połowie lat 40. XX w. General Electric Company opracowało manekin wykonany z miedzi galwanicznej, z wbudowanymi obwodami elektrycznymi, które równomiernie ogrzewały całą jego powierzchnię [17]. Do ich budowy zaczęto wykorzystywać tworzywa sztuczne i stopy aluminium. Wielosegmentowa konstrukcja pozwoliła na zwiększenie dokładności wykonywanych pomiarów symulujących wymianę ciepła między ludzkim organizmem a otoczeniem. Następnym etapem w rozwoju manekinów było tworzenie modeli wyposażonych w zdolność poruszania się, symulacji odczuwania komfortu cieplnego, a także w funkcje symulowania oddechu czy pocenia się [15]. Najbliższy dzisiejszym manekinom był szwajcarski model SAM [18] oraz amerykański Adam [19].

Wykonywanie badań przy użyciu manekinów termicznych pozwala na uzyskiwanie powtarzalnych danych [15, 20] i – co za tym idzie – znormalizowanie wymagań badawczych izolacyjności cieplnej zestawów odzieżowych. Wśród manekinów termicznych najbardziej popularne są modele produkowane przez firmę E. I. du Pont de Nemours and Company. Firma ta wyprodukowała trzy kompletne stanowiska tego typu, które znajdują się w Plant in Richmond w USA, European Technical Center in Meyrin – Geneva w Szwajcarii oraz Middle East w Dubaju. Stanowisko Thermo-Mana to pełnowymiarowy manekin wykonany z żywicy epoksydowej i mieszanki włókien szklanych. Posiada on 122 czujniki termiczne rozlokowane na całym ciele, z wyjątkiem dłoni i stóp. Do badań wykorzystuje się 12 palników gazowych, zasilanych gazem propanowym, które wytwarzają energię cieplną 2 cal/cm/sec. Ich ustawienia gwarantują utrzymanie temperatury w badawczej komorze pożarowej podczas symulowanego pożaru błyskawicznego w zakresie 600–1000°C, a narażenie zestawu ubraniowego na jej działanie przebiega w czasie 3–25 sek. Dodatkowo stanowiska badawcze firmy DuPont zawierają zaawansowaną akwizycję danych przetwarzającą informacje z czujników i sygnalizującą oparzenia trzeciego stopnia występujące w trakcie testów.

Other test stands equipped with thermal mannequins are also used in the world. These are:

- North Carolina State University, USA – “PyroMan”,
- University of Alberta, Canada – “Harry Burns”,
- EMPA Institute in St. Gallen, Switzerland – “Henry”,
- BTTG certification lab in Manchester, Great Britain – “Ralph”,
- Teijin Laboratories, Japan – “Pliff”,
- National Research Institute of Fire and Disaster, Japan,
- Daegu University, Korea,
- Aitex Textile Research Institute, Alcoy, Spain.

Uzyskanie informacji dotyczących oparzeń możliwe jest dzięki użyciu modeli uszkodzeń skóry opracowanych przez wojsko USA oraz podczas badań naukowych. Wyniki przeprowadzonych testów w sposób graficzny pokazują ilość, lokalizację i stopień oparzeń, na jakie może być narażony użytkownik takiego ubrania.

Na świecie wykorzystywane są również inne stanowiska wyposażone w manekiny termiczne. Są to:

- North Carolina State University, USA – „PyroMan”,
- University of Alberta, Kanada – „Harry Burns”,
- EMPA Institute in St.Gallen, Szwajcaria – „Henry”,
- BTTG certification lab in Manchester, Wielka Brytania – „Ralph”,
- Teijin Laboratories, Japonia – „Pliff”,
- National Research Institute of Fire and Disaster, Japonia,
- Daegu University, Korea,
- Aitex Textile Research Institute, Alcoy, Hiszpania.

Table 1. Summary of differences by type of mannequin
Tabela 1. Zestawienie różnic w poszczególnych manekinach

Name of the mannequin / Nazwa manekina	Material / Materiał	Number of sensors / Liczba sensorów	Number of burners / Liczba palników	Heat flux (kW/m ²) / Strumień ciepła (kW/m ²)
Thermo-Man	Polyester resin or glass fibre reinforced with polyester resin / Żywica poliestrowa lub żywica poliestrowa wzmocniona włóknem szklanym	122	12	~150
PyroMan	Polyester resin or glass fibre reinforced with polyester resin / Żywica poliestrowa lub żywica poliestrowa wzmocniona włóknem szklanym	122	8	6–126
Harry Burns	Fiberglass / Włókno szklane	110	6	67–84
Ralph	Plastic reinforced with glass using vinyl ester resin / Tworzywo sztuczne wzmocnione szkłem za pomocą żywicy winyloestrowej	123	12	~84
Henry	Vinyl ester reinforced with glass / Ester winylu wzmocniony szkłem	120	12	~84

Source: Own elaboration based on [22–23].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [22–23].

Increasingly, thermal mannequins are used in various fields of industry (e.g. clothing industry, automotive industry) and science (e.g. environmental engineering to study the climate and human environment in the buildings) [24–25]. Initially, mannequins were manufactured in the shape of men, but with time female equivalents and models of the size of children began to be constructed [26]. Scientific research shows that it does not matter on which of the above types of mannequins thermal tests of clothing are carried out [10].

Coraz częściej manekiny termiczne są wykorzystywane w różnych dziedzinach przemysłu (np. przemysł odzieżowy, motoryzacyjny) i nauki, (np. w inżynierii środowiskowej do badania klimatu i otoczenia człowieka w budynkach) [24–25]. Początkowo produkowano manekiny o posturze mężczyzny, ale z czasem zaczęto również konstruować odpowiedniki żeńskie oraz modele wielkości dzieci [26]. Badania naukowe wskazują, że nie ma znaczenia, na którym z powyższych typów manekinów prowadzone są testy termiczne odzieży [10].

Pain injury area (%) / Obszar bólu (%)	First-degree burn injury area (%) / Obszar oparzenia pierwszego stopnia (%)	2nd degree burn injury area (%) / Obszar oparzenia drugiego stopnia (%)	3rd degree burn injury area (%) / Obszar oparzenia trzeciego stopnia (%)	Predicted total area of burn injury (2nd and 3rd degree) (%) / Przewidywa- ny całkowity obszar oparzenia (II i III stopień) (%)
17,5	0,9	0,9	0,0	0,9

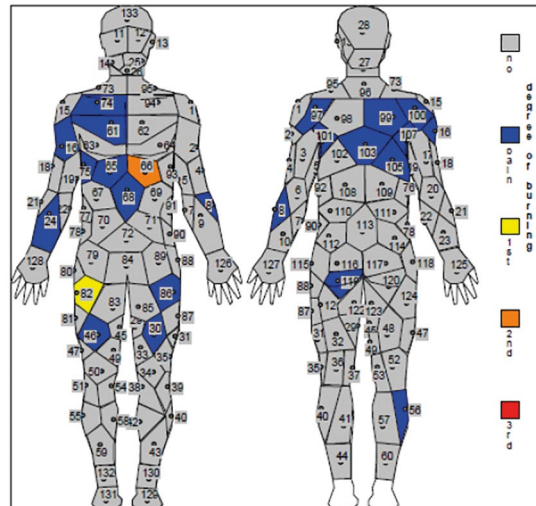


Figure 1. Example results of tests of firefighters' special clothing obtained at the Thermo-Tex stand
Rycina 1. Przykładowe wyniki badań strażackiego ubrania specjalnego uzyskane na stanowisku Thermo-Tex
Source: Data provided by the Aitex laboratory in Spain.
Źródło: Dane udostępnione przez laboratorium Aitex w Hiszpanii.

The general test procedure with the use of thermal mannequins is described in ASTM standard [27]. However, this document relates generally to testing clothing and not specifically to special clothing used by the fire service. Therefore, the methodologies based on thermal mannequins should be optimized and modified, taking into account, among others, the testing of firefighting clothing in full completion (i.e. with breathing apparatus and tank stretchers, helmets, footwear and gloves) [28].

The use of thermal mannequins currently used as a test facility for the firefighters' special clothing has certain limitations:

- the existing thermal mannequins allow testing only in a vertical, upright position, while firefighters often work in a squat or bent position, which may affect the fit of the garment to the firefighter's silhouette and the intensity of thermal exposure;
- the currently used mannequins do not take into account the possibility of conducting tests in conditions of variable humidity, i.e. the influence of various degrees of humidity – both the inner layer of the garment (moisture from sweat) and the outer layer (moisture coming from the water used for extinguishing).

As already mentioned, the currently available models are equipped with the heat sensors located on the body, excluding the hands, feet and head – efforts should be made to develop thermal mannequins with appropriate sensors also on the surfaces

Ogólna procedura postępowania badawczego z wykorzystaniem manekinów termicznych opisana jest w standardach ASTM [27]. Jednakże dokument ten odnosi się ogólnie do testowania odzieży, a nie konkretnie do ubrań specjalnych używanych przez straż pożarną. W związku z tym metodyki oparte na manekinach termicznych należałoby zoptymalizować i zmodyfikować, uwzględniając między innymi prowadzenia badań odzieży strażackiej wraz z pełnym ukończeniem (czyli między innymi z aparatami powietrznymi i noszakami na butlę, hełmami, obuwem i rękawicami) [28].

Zastosowanie manekinów termicznych obecnie używanych jako zaplecze badawcze odzieży specjalnej strażaków niesie z sobą pewne ograniczenia:

- istniejące manekiny termiczne umożliwiają prowadzenie badań jedynie w pozycji pionowej wyprostowanej, tymczasem niejednokrotnie strażacy pracują w pozycji kucznej lub pochylonej, co może mieć wpływ na dopasowanie ubrania do sylwetki strażaka oraz na intensywność ekspozycji termicznej;
- aktualnie wykorzystywane manekiny nie uwzględniają również możliwości prowadzenia badań w warunkach zmiennej wilgotności, a więc wpływu różnych stopni wilgotności – zarówno warstwy wewnętrznej ubrania (wilgoć od potu), jak i zewnętrznej (wilgoć pochodząca od wody używanej do gaszenia).

mentioned above, so that it is possible to test the full set of personal protection used by the firefighters during rescue and fire-fighting operations.

The stringent requirements concerning the thermal properties of the special clothing are justified, most of all, by the safety of the firefighters and their comfort of work [29]. During their operations, firefighters deal with various types of fires, so they work in conditions where the ambient temperature differences may be from 100 to 1200°C, and the heat flux density ranges from 0.8 to 210 kW/m² [30, 4]. In the literature, it is generally assumed that we can talk about normal conditions in case of a temperature in the range of 20–70°C and heat flux density up to 2 kW/m², and in hazardous conditions – when the temperature value reaches 70–300°C, and the flux density heat reach 2–20 kW/m². Critical conditions exist when the temperature is 300–1,000°C and the heat flux density is 12–125 kW/m². Due to the temperature and thermal differences occurring in the fire environment, most of the normative tests are carried out with the heat flux density in the range of 80–84 kW/m², which is considered to be the characteristic value of flashover.

Summary

Performing tests with the thermal mannequins can contribute to the improvement of the clothing sets. The results provide information on the weak points of the tested products, which should be eliminated in order to increase the safety of the users. Test stands with thermal mannequins have many advantages, including:

- the ability to simulate heat exchange between the human body and the environment;
- the possibility of testing dry heat transfer in conditions similar to the real ones;
- the objectivity of measuring the thermal insulation of the tested clothing;
- speed, accuracy and repeatability of the tests.

Among the limitations of thermal mannequins currently used as testing facilities for firefighters' special clothing the following can be pointed out:

- no possibility to conduct testing in a position other than vertical and upright;
- the inability to conduct testing in conditions of variable humidity, and thus to verify the impact of various degrees of humidity (both the inner and outer layers of the clothes) on the tested object;
- no mannequins enabling testing the full set of personal protective equipment used by the firefighters.

There are also advantages and disadvantages to the test methods used to test the material packages of clothing used by the fire brigade, as well as the test methods using mannequins to test the entire products.

Jak już wspomniano, obecnie dostępne modele wyposażone są w czujniki ciepła rozmieszczone na ciele z pominięciem dłoni, stóp i głowy – należy dążyć do opracowania manekinów termicznych posiadających odpowiednie czujniki również na wymienionych wyżej powierzchniach, tak aby umożliwić badania pełnego zestawu ochron osobistych używanych przez strażaków podczas prowadzonych akcji ratowniczo-gaśniczych.

Rygorystyczne wymagania dotyczące właściwości termicznych ubrań specjalnych są uzasadnione przede wszystkim bezpieczeństwem strażaków i ich komfortem pracy [29]. Strażacy w czasie działań mają do czynienia z różnymi typami pożarów, pracują więc w warunkach, gdzie różnice temperatury otoczenia mogą wynosić od 100 do 1200°C, a gęstość strumienia ciepła wahać się w przedziale od 0,8 do 210 kW/m² [30, 4]. W literaturze ogólnie przyjmuje się, że o warunkach normalnych możemy mówić w przypadku temperatury w zakresie 20–70°C i gęstości strumienia ciepła do 2 kW/m², zaś o warunkach niebezpiecznych – gdy wartość temperatury sięga 70–300°C, a gęstości strumienia ciepła 2–20 kW/m². W sytuacji, gdy temperatura wynosi 300–1000°C i gęstość strumienia ciepła 12–125 kW/m² mamy do czynienia z warunkami krytycznymi. Ze względu na różnice temperaturowe i cieplne występujące w środowisku pożaru większość normatywnych badań przeprowadza się z zachowaniem gęstości strumienia ciepła w granicach 80–84 kW/m², która uważana jest za wartość charakterystyczną rozgorzenia.

Podsumowanie

Wykonywanie badań przy użyciu manekinów termicznych może przyczynić się do udoskonalania zestawów odzieżowych. Wyniki dostarczają informacji na temat słabych punktów testowanych wyrobów, które należy eliminować w celu zwiększenia bezpieczeństwa użytkowników. Stanowiska badawcze z manekinami termicznymi mają wiele zalet, do których zalicza się:

- możliwość symulowania wymiany ciepła między organizmem ludzkim a otoczeniem;
- możliwość badania suchej wymiany ciepła w warunkach zbliżonych do rzeczywistych;
- obiektywizm pomiaru izolacji termicznej badanej odzieży;
- szybkość, dokładność i powtarzalność badań.

Wśród ograniczeń manekinów termicznych stosowanych obecnie jako zaplecze badawcze odzieży specjalnej strażaków należy wymienić:

- brak możliwości prowadzenia badań w pozycji innej niż pionowa wyprostowana;
- brak możliwości prowadzenia badań w warunkach zmiennej wilgotności, a tym samym zweryfikowania wpływu różnych stopni wilgotności (zarówno warstwy wewnętrznej, jak i zewnętrznej ubrania) na badany obiekt;
- brak manekinów umożliwiających badanie pełnego zestawu ochron osobistych wykorzystywanych przez strażaków.

Swoje wady i zalety mają również metody badawcze wykorzystywane do badania pakietów materiałowych, z których wykonana jest odzież używana przez straż pożarną, jak i metody badawcze wykorzystujące manekiny umożliwiające badanie całych wyrobów.

It should be noted that both the material packages and the finished products should be tested. Testing the material packages will allow for a full characterization of their properties, while testing a complete product – to determine its properties, taking into account the structure, seams and fitting the garment to the figure. A complex approach to such tests is necessary to ensure that the thermal properties of the garment are determined in the near-real conditions. It is necessary to develop testing methodologies based on the use of thermal mannequins, so that tests with the possibility of setting the mannequin in different positions can be carried out.

Noteworthy is the fact that the studies in question are mainly carried out with the mapping of the thermal conditions of flashover, while most of the work performed by the firefighters takes place at a thermal exposure lower than flashover. Such exposures usually last a few minutes and are not intense enough to deteriorate the outer layer of the firefighter's special clothing. In fact, thermal mannequins with the sweating function are also used in the tests, however, it is not an optimized method that allows the assessment of thermal insulation properties of clothing in case of prolonged exposure to low-level thermal radiation, as well as the assessment of the influence of the absorbed moisture on the protection against burns in such conditions.

There is also a need to adapt or develop testing methodologies in order to enable tests on the thermal properties of the firefighting clothes, taking into account the influence of moisture on burns in the event of a sudden, rapid increase in ambient temperature.

It is necessary to unify and standardize the methods of acquisition and processing of test data from tests conducted with the use of thermal mannequins. Unification in this area would make it possible to compare the results of tests carried out on various test stands.

The above activities will enable full optimization of both the design of protective clothing, as well as allow optimization of the operational practices that may contribute to reducing the exposure of firefighters to burns.

Należy zwrócić uwagę, że badaniom powinno poddawać się zarówno pakiety materiałowe, jak i gotowe wyroby. Badanie pakietów materiałowych pozwoli na pełną charakterystykę ich właściwości, natomiast badanie pełnego wyrobu – na określenie jego właściwości z uwzględnieniem konstrukcji, szwów oraz dopasowania ubrania do sylwetki. Komplementarne podejście do takich badań jest niezbędne w celu zapewnienia określenia właściwości termicznych odzieży w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Konieczne jest dopracowanie metodyk badawczych opartych na wykorzystaniu manekinów termicznych, tak by można było prowadzić testy z możliwością ustawienia manekina w różnych pozycjach.

Warty uwagi wydaje się fakt, że omawiane badania prowadzone są głównie z odwzorowaniem warunków termicznych rozgorzenia, tymczasem większość pracy wykonywanej przez strażaków odbywa się w ekspozycji termicznej niższej niż rozgorzenie. Takie ekspozycje trwają zazwyczaj kilka minut i nie są wystarczająco intensywne, by doprowadzić do degradacji zewnętrznej warstwy strażackiego ubrania specjalnego. W prawdzie wykorzystywane są w badaniach również manekiny termiczne z funkcją pocenia się, jednakże nie jest to zoptymalizowana metoda umożliwiająca ocenę właściwości termoizolacyjnych odzieży w przypadku występowania długotrwałego narażenia na promieniowanie ciepłe o niskim poziomie, a także do oceny wpływu wchłoniętej wilgoci na ochronę przed poparzeniami w takich warunkach.

Istnieje również konieczność dostosowania lub opracowania metodyk badawczych w celu umożliwienia prowadzenia badań właściwości termicznych ubrań strażackich z uwzględnieniem wpływu wilgoci na oparzenia w przypadku wystąpienia nagłego, szybkiego wzrostu temperatury otoczenia.

Niezbędne jest ujednoczenie i znormalizowanie metod akwizycji i przetwarzania danych badawczych z testów prowadzonych przy użyciu manekinów termicznych. Unifikacja w tym zakresie pozwoliłaby na porównywanie wyników badań wykonywanych na różnych stanowiskach badawczych.

Powyższe działania umożliwią pełną optymalizację zarówno projektowania ubrań ochronnych, jak również pozwolą na optymalizację praktyk operacyjnych, które mogą przyczynić się do zmniejszenia narażenia strażaków na oparzenia.

Literature / Literatura

- [1] ASTM F2370 – 10 Standard Test Method for Measuring the Evaporative Resistance of Clothing Using a Sweating Manikin.
- [2] ASTM F2371 – 10 Standard Test Method for Measuring the Heat Removal Rate of Personal Cooling Systems Using a Sweating Heated Manikin.
- [3] Młynarczyk M., Havenith G., Leonard J., Martins R., Hoddes S., *Inter-laboratory proficiency tests in measuring thermal insulation and evaporative resistance of clothing using the Newton-type thermal manikin*, "Textile Research Journal" 2016, 88 (4), <https://doi.org/10.1177/0040517516681957>.
- [4] Wiśniewski T. S., *Wymiana ciepła w ochronach osobistych*, Warszawa 2016.
- [5] Keiser C., *Steam burns. Moisture management in firefighter protective clothing*, PhD dissertation ETH No. 17406, ETH Zurich 2007, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005465697>.
- [6] Czerwienko D., Roguski J., *Koncepcja rozwoju ochron osobistych*, "Zeszyty naukowe SGSP" 2016, 58 (2), 5–32.
- [7] PN-EN 469:2021-01, *Odzież ochronna dla strażaków – Wymagania użytkowe dotyczące odzieży ochronnej przeznaczonej do akcji przeciwpożarowej*.
- [8] Rozporządzeniu Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji

- z dnia 27 kwietnia 2010 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochronie zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad wydawania dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania (Dz.U. 2010 Nr 85, poz. 553 z późn. zm.).
- [9] Goldman R.F., *Thermal Manikins, Their Origins and Role*, in: *Thermal Manikins and Modelling*, w: *Sixth International Thermal Manikin And Modelling Meeting* (6I3M), J. Fan (red.), Hong Kong 2016, 3–18.
- [10] Bogdan A., Zwolińska M., *Future Trends in the Development of Thermal Manikins Applied for the Design of Clothing Thermal Insulation*, "Fibres & Textiles in Eastern Europe" 2012, 20, 4(93), 89–95.
- [11] Anttonen H., Meinander H., Bartels V., Kuklane K., Reinertsen R. E., Varieras S., Sołtysiński K., *Thermal Manikin Measurements—Exact or Not?*, "International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)" 2004, 10 (3), 291–300, <https://doi.org/10.1080/10803548.2004.11076616>.
- [12] Młynarczyk M., *Manekiny termiczne jako narzędzie do badania izolacyjności cieplnej oraz oporu pary wodnej zestawów odzieżowych*, „Bezpieczeństwo pracy” 2015, 1, 18–20.
- [13] Holmer I., *Thermal manikin history and application*, "European Journal of Applied Physiology" 2004, 92, 614–618, <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1135-0>.
- [14] Camenzind M.A., Dale D.J., Rossi R.M., *Manikin test for flame engulfment evaluation of protective clothing: Historical review and development of a new ISO standard*, "Fire and Material" 2006, 31(5), 285–295, <https://doi.org/10.1002/fam.938>.
- [15] Faming W., *A comparative introduction on sweating thermal manikins "Newton" and "Walter"*, 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting – University of Coimbra, September 2008.
- [16] Konarska M., Sołtyński K., Sudoł-Szopińska I., Młodziński D., Chojancka A., *Aspects of Standardisation in Measuring Thermal Clothing Insulation on a Thermal manikin*, "Fibres & Textiles in Eastern Europe" 2006, 14, 4 (58), 58–63.
- [17] Nilsson H.O., Holmer I., *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*, "Indoor Air" 2003, 13(1), 28–37, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.01113.x>.
- [18] Richards M., Mattle M., *Development of a sweating agile thermal manikin (SAM)*, Proceedings of the 4th International Meeting on Thermal Manikin, St. Gallen, Szwajcaria 2001.
- [19] Burke R., McGuffin R., *Development of an advanced thermal manikin for vehicle climate evaluation*, Proceedings of the 4th International Meeting on Thermal Manikin, St. Gallen, Szwajcaria 2001.
- [20] Holmer I., *Thermal manikins in research and standards*, Proceedings of the Third International Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM at the National Institute for Working Life, 1999.
- [21] <http://www.davidvedoruha.hu/pdf/bttg%20teszt.pdf>, [dostęp: 22.01.2019].
- [22] Song G., Wang F., *Firefighters' Clothing and Equipment: Performance, Protection and Comfort*, CRC Press, 2019.
- [23] <https://www.empa.ch/web/s401/henry> [dostęp: 22.11.2021].
- [24] Psikuta A., Allegrini J., Koelblen B., Bogdan A., Annaheim S., Martinez N., Derome D., Carmeliet J., Rossi R.M., *Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research – A review*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2017, 78, 1315–1330, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.115>.
- [25] Fojtlin M., Fiser J., Jicha M., *Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation*, "Experimental Thermal and Fluid Science" 2016, 77, 257–264, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015>.
- [26] Kuklane K., Sandsund M., Reinertsen R.E., Tochihiro Y., Fukazawa T., Holmer I., *Comparison of thermal manikins of different body shapes and size*, "Ergonomics and Aerosol Technology" 2004, 92, 683–688, <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1116-3>.
- [27] ASTM F1930-00, Standard Test Method for Evaluation of Flame Resistant Clothing for Protection Against Flash Fire Simulations Using an Instrumented Manikin, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [28] Prezant D.J., Barker R.L., Stull J.O., King S.J., Rotanz R.A., Malley K.S., Bender M., Guerth C., Kelly K.J., *The Impact of Protective Hoods and Their Water Content on the Prevention of Head Burns in New York City Firefighters: Laboratory Tests and Field Results*, "Journal of burn care & research: official publication of the American Burn Association" 2001, 22(2), 165–178.
- [29] Roguski J., Błogowski M., Kubis D., *Metody badawcze w ocenie odporności środków ochrony indywidualnej na działanie termicznych czynników zewnętrznych*, BITP Vol. 39 Issue 3, 2015, pp. 43–57, <https://doi.org/10.12845/bitp.39.3.2015.4>.
- [30] Wiśniewski T., Furmański P., Łapka P., *Problemy związane z oceną ochron osobistych poddanych obciążeniu cieplnemu*, w: *Problemy Monitoringu eksploatacji sprzętu i wyposażenia w Straży Pożarnej*, J. Roguski (red.), CNBOP-PIB, Józefów 2015, 85–106.
- [31] Foster J.A., Roberts G.V., *Measurements of the Firefighter Environment – Summary Report*, "Fire Engineers Journal" 1995, 55(178), 3034.
- [32] Bugaj M.A., Cieślakiewicz Ł., Wiśniewski T.S., *Badania materiałów odzieży ochronnej będącej w kontakcie z ciałami o podwyższonej temperaturze*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2016, 58 (2), 149–172.
- [33] Giełżecki J., Godniowska M., Kogut B., Koniuch T., Szewczyk A., Wolański R.M., Wójcik Z., *Badania materiałów ochron osobistych poddanych oddziaływaniu płomienia*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2016, 58 (2), 33–56.
- [34] Foster J.A., Roberts G.V., *Measurements of the Firefighter Environment – Summary Report*, „Fire Engineers Journal” 1995, 55(178), 3034.

DOROTA SZULCZYŃSKA, PH.D. ENG. – she completed doctoral studies in 2012 at the Faculty of Materials Science and Engineering of the Warsaw University of Technology, obtaining a PhD degree in technical sciences. She is the author or co-author of articles published in scientific journals and conference materials, and the author of papers presented at national and international conferences. Since 2012, an employee of the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute.

JACEK ROGUSKI, PH.D. ENG. – a graduate of the Warsaw University of Technology and the State Fire Academy of EMERCOM of Russia. He deals with aspects related to the issues of safe use of technical equipment in fire brigades and the problems of using technical devices. An author of several dozen publications, speaker and member of scientific committees at numerous conferences – national and international. Creator of four patents and designs. His scientific achievements have been honored with nineteen international and national awards at exhibitions for inventiveness.

DR INŻ. DOROTA SZULCZYŃSKA – studia doktoranckie ukończyła w 2012 roku na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, uzyskując stopień doktora nauk technicznych. Jest autorką lub współautorką artykułów publikowanych w czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych oraz autorką referatów prezentowanych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Od 2012 roku pracownik Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowego Instytutu Badawczego.

DR INŻ. JACEK ROGUSKI – absolwent Politechniki Warszawskiej oraz Akademii Państwowej Straży Pożarnej w Moskwie (State Fire Academy of EMERCOM of Russia). Zajmuje się aspektami związanymi z zagadnieniami bezpieczeństwa użytkowania wyposażenia technicznego w straży pożarnej oraz problemami eksploatacji urządzeń technicznych. Autor kilkudziesięciu publikacji, prelegent oraz członek komitetów naukowych na licznych konferencjach – krajowych i zagranicznych. Twórca pięciu patentów i wzorów. Jego osiągnięcia naukowe zostały uhonorowane dziewiętnastoma międzynarodowymi i krajowymi wyróżnieniami na wystawach związanych z wynalazczością.