

Jacek Roguski<sup>a)</sup>, Leszek Jurecki<sup>a)</sup>, Ryszard Łyszczek<sup>a)</sup>, Krzysztof Cygańczuk<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowy Instytut Badawczy*

<sup>\*</sup> *Corresponding author / Autor korespondencyjny: jroguski@cnbop.pl*

## Study of the Shock Absorption Effectiveness of Air Cushions

### Badanie skuteczności amortyzacji skokochronów

#### ABSTRACT

**Purpose:** Safety air cushions play a key role in the Polish rescue system. The basic principles of operation of the jump cushion are based on controlled absorption of the kinetic energy of the human body falling from a great height. Thanks to the use of air layers and flexible energy-absorbing materials, the jump cushion is able to reduce the overload affecting the human body during contact with the shock-absorbing surface. The mechanism of impact overload during a fall involves a sudden deceleration and the accumulation of forces acting on the body, which creates a risk of injuries such as fractures, damage to internal organs or concussion. In order to ensure an optimal level of safety while minimising the risk of serious injuries to both rescuers and rescued people, it is important to understand the excessive deceleration mechanisms during a fall from a significant height. Safety air cushions are designed to slow the body down in a controlled manner by spreading kinetic energy over a larger surface area and for a longer period of time, which reduces the risk of serious injury. Typical g-forces on a well-designed air cushion are in the range of 5-10 g and exceeding them significantly increases the risk of injury.

**Methodology:** A series of experiments was conducted, where drop test manikins weighting 40 kg to 90 kg and equipped with accelerometers were thrown from height of 16 metres onto jump cushion targets. During these experiments, various jump cushions from different manufacturers with air-filled frames fed via air tanks were used. The data gathered together with video recordings of those tests were then thoroughly analysed.

**Conclusions:** The research results established acceptable levels of g-force overload for the human body in specific boundary conditions. The data were confirmed consistent with the results accessible in the available literature and enabled the development of technical and operational requirements for safety cushions. The research emphasises the importance of refining the technical parameters of safety air cushions in order to ensure safety and minimise the risk of injuries during rescue operations. In the future, it may be necessary to conduct tests with a manikin of greater mass, which is dictated by the social tendency to gain weight, and to not limit falls to other places on the upper surface of the jump cushion, which may be significant for the magnitude of the overload occurring.

**Keywords:** air cushion, jump cushion, biomechanical overload, air-filled frame, air cushions, impact (shock) absorption technologies

**Type of article:** review article

---

**Received:** 20.11.2024; **Reviewed:** 03.12.2024; **Accepted:** 05.12.2024;

Authors' ORCID IDs: J. Roguski – 0000-0002-7848-053X, L. Jurecki – 0000-0002-7117-7263, R. Łyszczek – 0000-0002-1295-1618; K. Cygańczuk – 0000-0003-1550-5880;

The authors contributed equally to this article;

**Please cite as:** SFT Vol. 64 Issue 2, 2024, pp. 20–45, <https://doi.org/10.12845/sft.64.2.2024.2>;

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

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Skokochrony odgrywają kluczową rolę w polskim systemie ratowniczym. Podstawowe zasady działania skokochronu opierają się na kontrolowanym pochłanianiu energii kinetycznej ciała ludzkiego spadającego z dużej wysokości. Dzięki zastosowaniu warstw powietrza oraz elastycznych materiałów pochłaniających energię, skokochron jest w stanie zredukować przeciążenia oddziałujące na ludzkie ciało podczas kontaktu z powierzchnią amortyzującą. Aby zapewnić optymalny poziom bezpieczeństwa stosowania skokochronów i zminimalizować ryzyko poważnych urazów – zarówno u ratowników, jak i osób ratowanych, istotne jest poznanie mechanizmów przeciążeń towarzyszących upadkowi z wysokości. Mechanizmy te obejmują nagłą zmianę prędkości i akumulację sił działających na ciało. Stwarza to ryzyko urazów, takich jak: złamania, uszkodzenia narządów wewnętrznych czy wstrząsy mózgu. Skokochrony mają za zadanie kontrolowane wyhamowanie ciała upadającego poprzez rozłożenie energii kinetycznej na większą powierzchnię i dłuższy czas. Typowe przeciążenia na dobrze zaprojektowanym skokochronie mieszczą się w zakresie 5–10 g, natomiast ich przekroczenie znacząco zwiększa ryzyko urazów.

**Metodologia:** Przeprowadzono badania doświadczalne obejmujące serię zrzutów manekinów wyposażonych w czujniki przeciążenia. Zastosowano manekiny o masie 40 i 90 kg, zrzucone z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskoku skokochronu. Do testów wykorzystano skokochrony ze stelażem

pneumatycznym, napełniane powietrzem z butli aparatów powietrznych różnych producentów. Dane z czujników oraz rejestracje filmowe przebiegu zrzutów poddano szczegółowej analizie.

**Wnioski:** Wyniki badań pozwoliły na określenie akceptowalnych poziomów przeciążeń dla ludzkiego ciała w określonych warunkach brzegowych. Dane potwierdziły spójność z dostępnymi wynikami literaturowymi oraz umożliwiły opracowanie wymagań techniczno-użytkowych dla skokochronów. Badania podkreślają znaczenie dopracowania parametrów technicznych skokochronów w celu zapewnienia bezpieczeństwa i minimalizacji ryzyka urazów podczas działań ratowniczych. W przyszłości mogą okazać się niezbędne badania z manekinem o większej masie, co podyktowane jest tendencją społeczną do przybierania na wadze oraz nieograniczanie się do innych miejsc upadku na powierzchni górnej skokochronu, co może mieć znaczenie dla wielkości oddziałujących przeciążeń.

**Słowa kluczowe:** skokochron, poduszka ratunkowa, przeciążenia biomechaniczne, stelaż pneumatyczny, poduszki powietrzne

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

**Przyjęty:** 20.11.2024; **Zrecenzowany:** 03.12.2024; **Zaakceptowany:** 05.12.2024;

Identyfikatory ORCID autorów: J. Roguski – 0000-0002-7848-053X, L. Jurecki – 0000-0002-7117-7263, R. Łyszczek – 0000-0002-1295-1618; K. Cygańczuk – 0000-0003-1550-5880;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 64 Issue 2, 2024, pp. 20–45, <https://doi.org/10.12845/sft.64.2.2024.2>;

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

## Introduction

The literature on this subject generally recognizes John T. Scurlock (1926–2008) as the inventor of the jump cushion. Space Walk Inc., the company established by Scurlock, developed the an innovative (for that period) air cushion called ‘space pillow’. Initially it was used primarily by stuntmen. A motivation for working on air cushions was provided by the dramatic fire in the Rault Center in 1972, which demonstrated the need to develop effective methods for rescuing people trapped in tall buildings. Scurlock developed the first jump cushion in 1973 and patented it in 1974 [1–2]. This device enabled a breakthrough in safety by providing an alternative means of rescue in emergency situations.

In Europe, the concept of a standard rescue cushion, commonly referred to as jump cushion, was first officially described in 1989 by Peter Lorschbach, who presented his design in a patent application [3]. This design was a development of Scurlock’s original ideas, but it introduced some modifications that made jump cushions more practical in rescue applications. These changes were intended in particular to improve the stability and speed of assembly of the jump cushion – aspects that are critical in dynamic rescue operations.

The jump cushions used nowadays are based primarily on Peter Lorschbach’s design. They have a pneumatic frame that ensures a better stability of the structure during filling and use. The structure makes it possible to quickly prepare the cushion for use, which significantly reduces the response time of rescue services when people need to be evacuated from a height [4].

It should be emphasized that the basic principles of operation of a jump cushion involve a controlled absorption of the kinetic energy of a human body falling from a large height. By using air layers and flexible materials that absorb energy, a jump cushion is able to reduce the g-force acting on the human body coming in contact with the shock absorbing surface. This minimizes the risk of serious injuries, such as bone fractures, spine injuries and injuries of internal organs.

## Wprowadzenie

W literaturze za pomysłodawcę skokochronu powszechnie uznaje się Johna T. Scurlocka (1926–2008). W założonej przez Scurlocka firmie Space Walk Inc. opracowano innowacyjną (jak na ówczesne czasy) powietrzną poduszkę ochronną „space pillow”. Początkowo używana była głównie przez kaskaderów. Impulsem do podjęcia tematu poduszek ratowniczych był dramatyczny pożar w Rault Center w 1972 roku, który obnażył potrzebę stworzenia skutecznych metod ratowania ludzi uwięzionych w wysokich budynkach. W 1973 roku Scurlock opracował, a następnie w 1974 roku opatentował, pierwszy skokochron ratowniczy [1–2]. Urządzenie to okazało się przełomem w dziedzinie bezpieczeństwa, zapewniając alternatywny sposób ewakuacji w sytuacjach awaryjnych.

W Europie koncepcja standardowej poduszki ratunkowej, powszechnie znanej jako skokochron, została po raz pierwszy oficjalnie opisana w 1989 roku przez Petera Lorschbacha, który przedstawił swój projekt w zgłoszeniu patentowym [3]. Konstrukcja ta stanowiła rozwinięcie idei zapoczątkowanych przez Scurlocka, jednak wprowadziła pewne istotne modyfikacje, które uczyniły skokochrony bardziej praktycznymi w zastosowaniach ratowniczych. Zmiany te miały w szczególności poprawić stabilność oraz szybkość montażu skokochronu – czyli kluczowe aspekty w warunkach dynamicznych operacji ratowniczych.

Współcześnie użytkowane skokochrony bazują głównie na konstrukcji opracowanej przez Petera Lorschbacha. Skokochrony te posiadają stelaż pneumatyczny, który zapewnia lepszą stabilizację struktury podczas jego napełniania oraz użytkowania. Konstrukcja ta pozwala na szybkie przygotowanie urządzenia do użycia, co znacząco skraca czas reakcji służb ratowniczych w przypadku konieczności ewakuacji z wysokości [4].

Warto podkreślić, że podstawowe zasady działania skokochronu opierają się na kontrolowanym pochłanianiu energii kinetycznej ciała ludzkiego podczas upadku z dużej wysokości. Dzięki zastosowaniu warstw powietrza oraz elastycznych materiałów

The jump cushion technology has been developed and adapted for various rescue conditions for decades. In addition to standard rescue situations, jump cushions have also been used in high-elevation operations, such as evacuation from tall industrial building structures. At the same time, the evolution of jump cushions involved research to find materials of better shock-absorbing characteristics and development of air filling systems that ensure fast and safe preparation of the cushion for use.

At present, jump cushion structures are based on concepts developed more than 30 years ago by Peter Lorscheid's company, which use air-filled pneumatic frames. The materials and air filling technologies improved since ensure the high reliability and effectiveness of these products in critical situations. As a result, jump cushions are a crucial piece of equipment used by rescue units worldwide [4].

Safety air cushions can be considered as pneumatic shock absorbers that are designed specifically for providing safety to persons falling from a height. The best known example of a device of this type is car airbags, which provide protection passengers during car crashes. Literature on this subject contains various reports and publications on numerical simulations and experimental testing of the behaviour of airbags in various conditions [5].

Despite the many years of research and experience in this area, airbags continue to be the object of intensive research and are constantly improved, which is necessary to improve their effectiveness and the safety of their users [6]. The innovations made are intended to improve their effectiveness and minimize the risk of negative effects of their operation. The research focuses, among other things, on the possible risks associated with an improper use of airbags, such as cases involving children - passengers who are at risk of injuries caused by the operation of standard airbags [7].

Similar devices are also developed for individual protection of pedestrians; an example is systems of airbags protecting pedestrians in the event of a collision with a vehicle [8]. Pneumatic energy absorbers are used broadly not only in the car industry, but also in other demanding fields, such as:

- vehicle suspension systems, where they effectively absorb energy generated when driving over uneven surfaces [9];
- landing systems for unmanned aerial vehicles (UAV), which must be equipped with technologies that ensure their safe and smooth landing [10];
- spacecraft landing gear, where pneumatic shock absorbers play a key role in the protection of a precious load during landing on other planets [11].

Despite the huge importance of safety air cushions to safety and life protection, there are no systematic studies with a fully scientific approach to safety air cushions. Studies conducted to date do not comprehensively take into account their properties and impact on the safety of evacuation from large heights. Jump cushions, as special safety air cushions, are designed to absorb the kinetic energy of a falling body by reducing the g-force and mitigating the effects of the fall. Their main role is to reduce the risk of injury and to save the life of people evacuated in emergency situations, such as fires in tall buildings [12].

pochłaniającej energię skokochron jest w stanie zredukować przeciążenia oddziałujące na ludzkie ciało podczas kontaktu z powierzchnią amortyzującą. W ten sposób minimalizuje ryzyko poważnych urazów, takich jak: złamania kości, uszkodzenia kręgosłupa czy urazy narządów wewnętrznych.

Technologia skokochronów była rozwijana przez dekady i adaptowana do różnych warunków ratowniczych. Oprócz klasycznych sytuacji ratowniczych, skokochrony znalazły również zastosowanie w operacjach wysokościowych, takich jak ewakuacje z wysoko położonych obiektów przemysłowych. Równocześnie, ewolucja skokochronów wiązała się z badaniami nad materiałami o lepszych właściwościach amortyzujących oraz rozwijaniem systemów napełniania powietrzem, które zapewniają szybkie i bezpieczne przygotowanie urządzenia do pracy.

Obecnie konstrukcje skokochronów bazują na rozwiązaniach opracowanych ponad 30 lat temu przez firmę Petera Lorscheida i wykorzystujących stelaże pneumatyczne napełniane powietrzem. Udoskonalone na przestrzeni następnych lat materiały i technologie napełniania pozwalają na uzyskanie wysokiej niezawodności i efektywności tych wyrobów w sytuacjach krytycznych. Wszystko to sprawia, że skokochrony stanowią kluczowy element wyposażenia jednostek ratowniczych na całym świecie [4].

Poduszki ratownicze można zaliczyć do grupy amortyzatorów pneumatycznych, które zostały specjalnie zaprojektowane do asekuracji podczas upadku osób z wysokości. Najbardziej znanym przykładem tego typu urządzeń są samochodowe poduszki powietrzne. Wykorzystuje się je w celu ochrony pasażerów podczas kolizji. W literaturze przedmiotu znaleźć można liczne raporty i publikacje, które dotyczą symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych zachowania poduszek powietrznych w różnorodnych warunkach [5].

Mimo wieloletnich badań i doświadczeń w tej dziedzinie, poduszki powietrzne nadal są obiektem intensywnych badań i ulepszeń, co wynika z konieczności dalszej poprawy ich skuteczności oraz bezpieczeństwa użytkowników [6]. Wprowadzane innowacyjne rozwiązania mają na celu zwiększenie ich efektywności oraz minimalizowanie ryzyka negatywnych skutków ich działania. Badania naukowe skupiają się między innymi na możliwych zagrożeniach związanych z niewłaściwym użyciem poduszek powietrznych, takich jak przypadki dzieci-pasażerów, które mogą być narażone na obrażenia w wyniku działania standardowych poduszek samochodowych [7].

Podobne urządzenia opracowywane są także do ochrony indywidualnej pieszych, jak na przykład systemy poduszek powietrznych, które mają za zadanie chronić pieszego w przypadku kolizji z pojazdem [8]. Pneumatyczne pochłaniacze energii znalazły szerokie zastosowanie nie tylko w motoryzacji, ale również w innych wymagających dziedzinach, takich jak:

- systemy zawieszenia pojazdów, gdzie zapewniają skuteczne pochłanianie energii wynikającej z jazdy po nierównych nawierzchniach [9];
- systemy lądowania bezzałogowych statków powietrznych (UAV), które muszą być wyposażone w technologie pozwalające na bezpieczne i miękkie lądowanie [10];
- lądowniki planetarne, gdzie pneumatyczne amortyzatory pełnią kluczową rolę w ochronie cennego ładunku podczas lądowania na powierzchniach obcych planet [11].

The first jump cushion in Poland that received a formal approval document issued by the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute (CNBOP) was approved for use on 7 June 1993. It was made by Klaus Esser KG. This certification was a key step in the development of rescue systems and provided the basis for the formal introduction of this technology as the standard equipment of rescue units in Poland.

It must be noted that, despite their long history, jump cushions continue to be the object of research intended to optimize them to improve their effectiveness and safety. Particular attention is paid to an analysis of the biomechanics of the g-forces acting on the human body falling on jump cushion and to research on materials used to make jump cushions so as to ensure the most effective energy absorption. A correct understanding and further development of this technology can contribute to an improved safety of those evacuated and to a reduction in the number of injuries associated with falling from a height.

The following legislation and standards are the normative documents that specify the requirements and research methods for jump cushions:

- DIN 14151-3-2024-04 [13], a standard applicable in the German market that concerns jump cushions with a pneumatic frame of the 16 type, i.e. with the maximum jump height of 16 m;
- Annex to the Regulation of the Minister of Interior and Administration of 27 April 2010 amending the regulation on a list of products serving to ensure public safety or health and life as well as life protection, as well as the rules of issuing approvals for use of those products [14], which applies in the Polish market and concerns jump cushions with a pneumatic frame that are filled from cylinders for cylinder breathing apparatuses and jump cushions without a frame filled with fans, without identifying the maximum jump height.

The issues related to the safety and health of the service of firefighters of the State Fire Brigade are regulated, among others, by the Regulation of the Minister of Interior and Administration of 31 August 2021 on the detailed safety and health conditions for the service of firefighters of the State Fire Brigade [14]. That document specifies the detailed requirements aimed to ensure the safety of firefighters during rescue operations, training and exercise alike.

One of the important aspects included in the regulation are the rules applicable to jumping onto the jump cushions, which are discussed in detail in Chapter 5 (of part IX) titled *Service safety and health requirements during rescue operations at a height or below the ground level and during exercises and training at a height or below the ground level*. Particular attention is paid to the limitations on the conduct of exercises. According to sec. 48(2)(4), 'exercises and training shall not be conducted in the case of activities related to the performance of practice jumps onto jump cushions'.

An analysis of these provisions leads to the conclusion that they limit, to a significant extent, or even prevent conducting practical training related to making rescue jumps. Exercises with the use of jump cushions are eliminated primarily due to the desire to minimize the risk of injury to firefighters during the training, but

Mimo ogromnego znaczenia poduszek ratowniczych dla bezpieczeństwa i ochrony życia, brakuje systematycznych badań, które traktowałyby ratownicze poduszki powietrzne w sposób w pełni naukowy. Dotychczasowe prace nie uwzględniają kompleksowo ich właściwości i wpływu na bezpieczeństwo ewakuacji z wysokości. Skokochrony, jako specjalistyczne poduszki ratownicze, są przeznaczone do pochłaniania energii kinetycznej spadającego ciała, redukując przeciążenia i łagodząc skutki upadku. Ich głównym zadaniem jest zmniejszenie ryzyka urazów i ratowanie życia osób ewakuowanych w sytuacjach kryzysowych, takich jak pożary wysokich budynków [12].

W Polsce pierwszy skokochron, który otrzymał formalny dokument dopuszczający wydany przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej (CNBOP), został zatwierdzony do użytkowania 7 czerwca 1993 roku. Wyprodukowała go firma Klaus Esser KG. Certyfikacja była kluczowym krokiem w rozwoju systemów ratowniczych oraz stanowiła podstawę do formalnego wprowadzenia tej technologii do standardowego wyposażenia jednostek ratowniczych w kraju.

Należy zauważyć, że skokochrony, mimo swojej długiej historii, są nadal obiektem badań mających na celu ich optymalizację pod kątem skuteczności i bezpieczeństwa. Szczególną uwagę poświęca się analizie biomechaniki przeciążeń oddziałujących na ciało człowieka w trakcie upadku na skokochron oraz badaniu materiałów wykorzystywanych do ich produkcji, aby zapewnić jak najskuteczniejszą absorpcję energii. Właściwe zrozumienie i dalszy rozwój tej technologii może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa osób ewakuowanych i zredukowania liczby urazów związanych z upadkami z wysokości.

Dokumentami normatywnymi określającymi wymagania oraz metody badawcze dla skokochronów są następujące przepisy i normy:

- norma DIN 14151-3-2024-04 [13], która jest stosowana na rynku niemieckim i dotyczy skokochronów ze stelażem pneumatycznym typu 16 tj. o maksymalnej wysokości skoku 16 m;
- załącznik do Rozporządzenia 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 [14], który jest stosowany na rynku krajowym i dotyczy skokochronów ze stelażem pneumatycznym napełnianym z butli do aparatów powietrznych butlowych oraz skokochronów bez stelaża napełnianych za pomocą wentylatorów, bez określenia maksymalnej wysokości skoku.

Kwestie bezpieczeństwa i higieny służby strażaków Państwowej Straży Pożarnej regulowane są między innymi przez Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 31 sierpnia 2021 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpieczeństwa i higieny służby strażaków Państwowej Straży Pożarnej [14]. Dokument ten określa szczegółowe wymagania mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa strażakom zarówno podczas działań ratowniczych, jak i szkoleń oraz ćwiczeń.

Jednym z istotnych aspektów ujętych w rozporządzeniu są zasady dotyczące skoków na skokochrony, które zostały

it also results in a limitation of the possibility of practical preparation of rescuers for emergency situations, in which such skills may be necessary.

The human body poorly tolerates long g-forces, and their duration has a key impact on the intensity of the negative effects. People much better withstand lateral g-forces than those acting along the body (from the head to the feet). This is during take-off astronauts are in a laying position in the take-off modules, which minimizes the g-forces acting on the body.

From the standpoint of biomechanics, the mechanical properties of structures such as bones, cartilages, ligaments, tendons and muscles, which transfer the forces produced by the g-forces, are closely related to their function. The strength of those structures is very different depending on their location and role in the load-transfer system [15]. Particularly important are the delicate organs of the nervous system and the senses, such as the brain and the eyeballs, which are susceptible to blood pressure changes caused by the direction and force of the g-force. When blood flows into those organs, the risk of brain haemorrhages or haemorrhages into the eyeballs, which can lead to a permanent damage to the eyesight or a risk to life [2–16].

In the daily life, g-forces can be seen, e.g., during elevator rides, sudden braking or acceleration of a vehicle, while driving in bends (e.g. during drifting), as well as during in-flight turbulences. However, the greatest g-forces occur in extreme situations, such as traffic accidents, plane crashes and aviation manoeuvres. In such cases, multi-organ injuries often occur [2–17].

In principle, people can withstand g-forces of up to approx. 5G, but this range of tolerance can be broadened by targeted physical training and the use of appropriate safeguards. For example in the 1960s, American military and NASA conducted numerous studies to determine the limits of human tolerance of g-forces. The experiments conducted involved over 100,000 10-second tests in which people were subjected to g-forces of up to 25G for 1.5 seconds and 18G for almost 2.5 minutes. These studies played a key role in the design of anti-gravity suits for pilots and astronauts.

However, there is limited and unequivocal literature data on the response of the human body to g-forces in different conditions. There are no quantitative methods to identify the mutual relationship between the intensity of the g-force stimulus and the physiological responses of the human body [17–18]. Most studies focus on the specific group of pilots and astronauts who undergo special training, which makes them different from the average man forced to act in extreme situations, e.g. jumping onto a jump cushion in situations where their lives are at risk.

The highest g-forces, albeit of short duration, occur in situations such as being catapulted from a plane and reach values of up to 20–22G (in the case of some Soviet designs) or 12–14G (in Western-made military planes). During aviation manoeuvres, for example competitive aerobatics or air fight, g-forces may reach up to 10G [18, s. 358], [19–20]. High g-forces are also present during fast recovery of a plane from a dive and during manoeuvres performed at high speed in bends. Higher levels of tolerance to such g-forces result from physiological adaptation of the body and the use of proper protections [19–23].

szczegółowo omówione w Rozdziale 5 (działu IX), zatytułowanym: *Wymagania bezpieczeństwa i higieny służby podczas prowadzenia akcji ratowniczej na wysokości lub poniżej poziomu terenu oraz ćwiczeń i szkoleń na wysokości lub poniżej poziomu terenu*. Szczególną uwagę zwraca się na ograniczenia w zakresie przeprowadzania ćwiczeń. Zgodnie z §48 ust. 2 pkt 4 „ćwiczeń lub szkoleń nie prowadzi się w przypadku działań związanych z wykonywaniem skoków ćwiczebnych na skokochrony”.

Analiza powyższych zapisów pozwala stwierdzić, że regulacje te w znacznym stopniu ograniczają, a wręcz uniemożliwiają przeprowadzanie praktycznych szkoleń związanych z wykonywaniem skoków ratowniczych. Wylimitowanie ćwiczeń z wykorzystaniem skokochronów wynika przede wszystkim z dążenia do zminimalizowania ryzyka obrażeń u strażaków podczas szkoleń, jednak prowadzi również do ograniczenia możliwości praktycznego przygotowania ratowników do sytuacji awaryjnych, w których takie umiejętności mogą być niezbędne.

Ciało ludzkie źle znosi długotrwałe przeciążenia, a czas ich oddziaływania odgrywa kluczową rolę w intensywności negatywnych skutków. Człowiek jest znacznie bardziej odporny na przeciążenia boczne niż te działające wzdłuż osi ciała (głowa-stopy). Właśnie z tego powodu kosmonauci podczas startów znajdują się w pozycji leżącej w modułach startowych, co minimalizuje obciążenie organizmu.

Z punktu widzenia biomechaniki właściwości mechaniczne struktur, takich jak kości, chrząstki, więzadła, ścięgna i mięśnie, które przenoszą siły wynikające z przeciążeń, są ściśle związane z ich funkcją. Wytrzymałość tych struktur jest bardzo zróżnicowana w zależności od ich położenia i roli w układzie przenoszenia obciążeń [15]. Szczególne znaczenie mają delikatne narządy układu nerwowego i zmysłów, takie jak mózg i gałki oczne, które są podatne na zmiany ciśnienia krwi spowodowane kierunkiem i siłą przeciążeń. Przy napływie krwi do tych narządów wzrasta ryzyko krwotoków mózgowych lub wylewów do gałek ocznych, co może prowadzić do trwałego uszkodzenia wzroku lub zagrożenia życia [2–16].

W codziennym życiu stany przeciążenia można zaobserwować m.in. podczas jazdy windą, gwałtownego hamowania lub przyspieszenia pojazdu, w trakcie zakrętów (np. drifting) lub podczas turbulencji w czasie podróży samolotem. Największe przeciążenia występują jednak w sytuacjach ekstremalnych, takich jak wypadki drogowe, katastrofy lotnicze, czy manewry lotnicze. W takich przypadkach często dochodzi do obrażeń wielonarządowych [2–17].

Zasadniczo człowiek jest w stanie wytrzymać przeciążenia do około 5G, jednak tolerancja ta może być zwiększona dzięki ukierunkowanemu treningowi fizycznemu oraz zastosowaniu odpowiednich zabezpieczeń. Na przykład w latach 60. XX wieku, amerykańskie wojsko i NASA przeprowadziły liczne badania w celu określenia granic ludzkiej wytrzymałości na przeciążenia. W eksperymentach przeprowadzono ponad sto tysięcy 10-sekundowych testów, poddając badanych przeciążeniom o wartości do 25G przez 1,5 sekundy oraz 18G przez prawie 2,5 minuty. Badania te odegrały kluczową rolę w projektowaniu kombinezonów anty-grawitacyjnych dla pilotów i astronautów.

Istnieją jednak ograniczone i niejednoznaczne dane literaturowe dotyczące reakcji organizmu na przeciążenia w różnych warunkach. Brakuje metod ilościowych, które uchwyciłyby

According to the results of studies on the behaviour of pilots, the experimental models used are often based on simplified cause and effect relationships. 'One cause – one effect' relationships are analysed most often, where the exposure to a specific level of acceleration results in a single reaction in the form of selected physiological or mental parameters of the tested persons.

The tolerance of the human body to acceleration can be increased by specialized, targeted training programs that use modern methods and forms of physical training. However, in the case of the studies discussed herein, the performance of such programs is subject to significant formal restrictions arising from the legislation in force, which significantly hinders the implementation of those strategies in practice. These restrictions prevent conducting comprehensive training under conditions that imitate the real g-force scenarios, which can influence the quality of preparation of the staff for acting under extreme acceleration conditions.

współzależności między intensywnością bodźca przeciążeniowego a reakcjami fizjologicznymi organizmu [17–18]. Większość badań skupia się na specyficznej grupie, jaką są piloci i astronauta, którzy przechodzą specjalistyczne treningi, co różni ich od przeciętnego człowieka zmuszonego do działania w ekstremalnych sytuacjach, np. skoków na skokochron w sytuacji zagrożenia życia.

Najwyższe przeciążenia, choć krótkotrwałe, występują w sytuacjach, takich jak katapultowanie z samolotu, osiągając wartości do nawet 20–22G (w przypadku niektórych radzieckich konstrukcji) oraz 12–14G (w zachodnich samolotach bojowych). Podczas manewrów lotniczych, na przykład wyczynowej akrobacji lotniczej czy walki powietrznej, przeciążenia mogą sięgać do 10G [18, s. 358], [19–20]. Duże przeciążenia występują również podczas szybkiego wyprowadzania samolotu z lotu nurkowego, a także przy manewrach wykonywanych z dużą prędkością na łukach. Wyższe wartości tolerancji na takie przeciążenia wynikają z fizjologicznej adaptacji organizmu oraz stosowania odpowiednich zabezpieczeń [19–23].

Zgodnie z wynikami badań dotyczących zachowania pilotów, stosowane modele doświadczalne często opierają się na uproszczonych zależnościach przyczynowo-skutkowych. Najczęściej analizuje się relacje typu „jedna przyczyna – jeden skutek”, gdzie ekspozycja na określony poziom przyspieszenia skutkuje pojedynczą reakcją w postaci zmian wybranych parametrów fizjologicznych lub psychicznych badanych osób.

Tolerancję organizmu ludzkiego na przyspieszenia można zwiększyć poprzez specjalistyczne, ukierunkowane programy treningowe, które wykorzystują nowoczesne metody i formy treningu fizycznego. Jednakże w przypadku omawianych badań, realizacja takich programów napotyka na istotne ograniczenia formalne wynikające z obowiązujących regulacji, co znacząco utrudnia wdrożenie tych strategii w praktyce. Ograniczenia te uniemożliwiają przeprowadzanie kompleksowych szkoleń w warunkach odwzorowujących realne scenariusze przeciążeń, co może wpływać na jakość przygotowania personelu do działania w ekstremalnych warunkach przyspieszenia.

## Methodology and results of the study

The main objective of the study is to analyse the effectiveness of the shock absorption of jump cushions. This objective can be achieved by studying the value of the g-force acting on the human body (dummy) during a free fall onto a jump cushion with the maximum rescue height allowed by its manufacturer. The research results help formulate conclusions regarding the effectiveness of the shock absorption of jump cushions.

## Purpose of the study – the importance of the g-force phenomenon in the evaluation of the effectiveness of jump cushions

The phenomenon of g-force is crucial to the evaluation of the safety and effectiveness of the operation of jump cushions during evacuation from tall structures. This is due to the fact that

## Metodologia i wyniki badań

Głównym celem prowadzonych badań jest analiza skuteczności amortyzacji skokochronów. Osiągnięcie opisanego celu jest możliwe dzięki zbadaniu parametru, jakim jest wielkość przeciążeń oddziaływujących na ciało człowieka (manekin) w czasie swobodnego upadku na skokochron z maksymalnej dopuszczonej przez producenta wysokości ratowniczej. Wyniki badań pozwolą sformułować wnioski dotyczące skuteczności amortyzacji skokochronów.

## Cel badań – znaczenie zjawiska przeciążenia w ocenie skuteczności skokochronów

Zjawisko przeciążenia odgrywa kluczową rolę w ocenie bezpieczeństwa i skuteczności działania skokochronów podczas ewakuacji z wysokości. Wynika to z tego, że przeciążenie wpływa

g-forces impact both the biomechanics of the human body when it stops and the design of the jump cushion. In the context of life and health protection, the g-force determines the risk of injury and the effectiveness of absorption of the kinetic energy during the fall.

The g-force during the fall is the force acting on the body at the time of deceleration, expressed as a multiple of the gravitational acceleration. The physical parameters characteristic of a free fall that are crucial for the minimization of the risk to the health or life of an evacuated person are:

- the final velocity of the body before the impact, which depends on the height of the fall and the gravitational acceleration;
- the stopping time, which affects the value of the g-force; the shorter the deceleration time, the larger the g-force;
- distribution of the forces acting on the body – an even distribution of the forces reduces the load on the critical points, such as the spine or the internal organs [24].

During a fall, the body is exposed to abrupt acceleration changes that can lead to injuries. In the case of a fall onto hard and inflexible surfaces (e.g. asphalt, concrete, or lawn), the stop time is relatively short (several ms), which can result in large acceleration values. The task of a jump cushion is to reduce the acceleration, preferably to a level tolerated by the human body, which is usually no more than 10–15 g. Exceeding this value significantly increases the risk of:

- injuries of internal organs, such as haemorrhages and injuries to the heart and the lungs;
- fractures of the spine and other bones as a result of sudden stopping;
- neurological effects, such as loss of consciousness or injuries to the brain caused by abrupt acceleration or deceleration.

Jump cushions are designed to reduce the g-force to safe levels. This process is implemented by:

- extending the deceleration time:
  - the use of flexible materials to make the jump cushion (e.g. pneumatic coatings) that make it possible to drop the body gradually;
  - filling the jump cushion with air, which works like a shock absorber and extends the time during which the body decelerates;
- even distribution of the forces:
  - the use of a jump cushion design that makes the forces to be distributed on a larger surface, thus minimizing the pressure exerted on the body and reducing the risk of local damage to soft tissues and bones.

## Scope of the study

The study included a series of test in which a dummy weighing 40 and 90 kg, imitating a human body, was dropped onto the centre of the drop surface of the jump cushion. The dummies, equipped with g-force sensors, were dropped from the height of 16 meters. During the drops, the data from the g-force sensors was registered for further analysis.

zarówno na biomechanikę ludzkiego ciała w momencie jego zatrzymania, jak i na konstrukcję samego skokochronu. W kontekście ochrony życia i zdrowia, przeciążenie determinuje ryzyko wystąpienia obrażeń, a także skuteczność absorpcji energii kinetycznej w trakcie upadku.

Przeciążenie podczas upadku to siła działająca na ciało w momencie wyhamowania, wyrażana jako wielokrotność przyspieszenia ziemskiego. Parametry fizyczne charakterystyczne dla swobodnego upadku, kluczowe dla zminimalizowania ryzyka utraty zdrowia lub życia osoby ewakuowanej, to:

- prędkość końcowa ciała przed uderzeniem, zależna od wysokości upadku i przyspieszenia ziemskiego;
- czas zatrzymania – wpływający na stopień przeciążenia; im krótszy czas wyhamowania, tym wyższe przeciążenie;
- rozkład sił na ciało – równomierne rozproszenie sił zmniejsza obciążenie na newralgiczne punkty, takie jak kręgosłup czy narządy wewnętrzne [24].

Podczas upadku organizm jest narażony na gwałtowne zmiany przyspieszenia, które mogą prowadzić do urazów. W razie upadku na twarde, mało elastyczne powierzchnie (np. asphalt, beton, trawnik), czas zatrzymania jest stosunkowo niewielki (kilka ms), co może generować wysokie wartości przeciążenia. Zadaniem skokochronu jest zmniejszenie przeciążenia, najlepiej do poziomu tolerowanego przez ludzkie ciało, zwykle wynoszącego nie więcej niż 10–15 g. Przekroczenie tej wartości znacząco zwiększa ryzyko powstania:

- urazów narządów wewnętrznych, takich jak krwotoki czy uszkodzenia serca i płuc;
- złamań kręgosłupa i innych kości w wyniku nagłego zatrzymania;
- efektów neurologicznych, takich jak utrata przytomności lub uszkodzenia mózgu spowodowane nagłym przyspieszeniem lub hamowaniem.

Skokochrony są projektowane tak, aby zmniejszyć przeciążenie do bezpiecznych poziomów. Proces ten odbywa się przez:

- wydłużenie czasu wyhamowania:
  - zastosowanie elastycznych materiałów skokochronu (np. powłok pneumatycznych), które pozwalają na stopniowe zatrzymanie ciała;
  - jak amortyzator, zwiększając czas, w którym ciało wyhamowuje;
- równomierne rozkładanie sił:
  - zastosowanie konstrukcji skokochronu sprawiającej, że siły są rozprowadzane po większej powierzchni, minimalizując nacisk na ciało i zmniejszając ryzyko lokalnych uszkodzeń tkanek miękkich i kości.

## Zakres badań

Badania obejmowały przeprowadzenie serii zrzutów na śródek powierzchni zeskoku skokochronu manekinów o masie 40 i 90 kg odwzorowujących ciało człowieka. Manekiny, wyposażone w czujnik przeciążenia, zrzucone były z wysokości 16 metrów. Podczas zrzutów rejestrowano dane z czujników przeciążenia celem ich dalszej analizy.

## Samples

The study was conducted on four types of jump cushions from two manufacturers of such equipment present in the Polish market.

### Characteristics of jump cushion no. 1



**Figure 1.** Unfolded jump cushion no. 1  
**Rycina 1.** Rozłożony skokochron nr 1

**Source:** CNBOP-PIP's own archive.  
**Źródło:** Archiwum własne CNBOP-PIB.

The frame of the jump cushion is composed of 12 tubes with a circular cross-section, mutually connected to form a cube, made of a fabric coated on both sides with a rubber mixture. After the tubes are filled with air, they form a skeleton of the cuboid constituting the load-bearing frame for the case of the jump cushion walls. The outside case made from a fabric coated with a rubber mixture is attached to the frame. The centre of the drop surface is marked on the case with a black circle on a white background. The inside chamber of the jump cushion is divided in half with a horizontal partition made from a synthetic fibre fabric. A rigid metal end piece with a stop valve for filling with air from compressed air cylinders at the pressure of 200 or 300 bars is connected to the lower tube of the frame. To protect the cylinder against damage, a case covering the cylinder, lined on the inside with a foamed material, is sewn to the lower case of the jump cushion. The jump cushion is equipped with two manually actuated valves for releasing air from the frame, which are located in the horizontal tubes, lower and upper, on the side of the cylinder connection. In the upper horizontal tube of the frame there is a safety valve, which is protected against damage with a plastic cover. In the casing of the jump cushion there are 28 openings in each corner, with the diameter of 60 mm, the purpose of which is to release air from the inside of the jump cushion after the rescued person jumps onto it. Once filled with air, the jump cushion is transported by handles made from polyester tape, fastened to the vertical corner tubes of the frame; there is one of them on each corner of the jump cushion and two on each of its side walls. The lower edge of the side parallel to the

## Próbki

Badania przeprowadzono na czterech typach skokochronów pochodzących od dwóch producentów tego typu urządzeń dostępnych na rynku polskim.

### Charakterystyka skokochronu nr 1

Stelaż skokochronu stanowi 12 połączonych ze sobą w kształcie sześciangu rur o przekroju kołowym, wykonanych z tkaniny dwustronnie powlekanej mieszanką gumową. Po napełnieniu rur powietrzem tworzą one szkielet prostopadłościanu stanowiącego ramę nośną dla powłoki ścian skokochronu. Do stelaża przyklejona jest powłoka zewnętrzna wykonana z tkaniny powlekanej mieszanką gumową. Środek pola skoku skokochronu oznaczony jest na powłoce kołem koloru czarnego na białym tle. Wewnątrz komora skokochronu przedzielona jest na pół poziomą przegrodą wykonaną z tkaniny z włókien syntetycznych. Do dolnej rury stelaża zamocowana jest sztywna, metalowa końcówka z zaworem zwrotnym do napełniania powietrzem z butli na sprężone powietrze o ciśnieniu 200 lub 300 bar. W celu zabezpieczenia butli przed uszkodzeniem, do dolnej powłoki skokochronu przyszyty jest pokrowiec osłaniający butlę, wyłożony od wewnątrz materiałem spienionym. Skokochron wyposażono w dwa zawory do opróżniania stelaża z powietrza, uruchamiane ręcznie, umieszczone w poziomych rurach, dolnej i górnej, od strony przyłącza do butli. W górnej poziomej rurze stelaża zamocowano zawór bezpieczeństwa, osłonięty przed uszkodzeniem pokrywą z tworzywa sztucznego. W powłoce skokochronu, w każdym narożniku wykonano po 28 otworów o średnicy ok. 60 mm mających na celu odprowadzenie powietrza ze środka skokochronu po upadku osoby ratowanej. Do transportu napełnionego powietrzem skokochronu służą uchwyty wykonane z taśmy poliestrowej, przymocowane do pionowych narożnych rur stelaża, w liczbie – po jednym na każdym z narożników skokochronu oraz po dwa uchwyty w każdej bocznej ścianie skokochronu.



place where the air cylinder is fastened has a pocket attached, which is filled with sandbags. Its purpose is to stabilize the jump cushion at the time of the fall of the rescued person. The approximate outside dimensions of the jump cushion, when filled to the operating pressure, are:

- 3350 x 3340 mm (base),
- 1550 mm (height).

Do dolnej krawędzi w boku równoległym do miejsca mocowania butli z powietrzem zamocowano kieszeń wypełnioną workami z piaskiem. Służy ona do stabilizacji skokochronu w momencie upadku osoby ratowanej. Wymiary zewnętrzne skokochronu po napełnieniu go do ciśnienia roboczego wynoszą około:

- 3350 x 3340 mm (podstawa),
- 1550 mm (wysokość).

## Characteristics of jump cushion no. 2

## Charakterystyka skokochronu nr 2



a)

b)

**Figure 2.** Unfolded jump cushion no. 2: a) side view, b) top view  
**Rycina 2.** Rozłożony skokochron nr 2: a) widok z boku, b) widok z góry

Source: CNBOP-PIP's own archive.

Źródło: Archiwum własne CNBOP-PIB.

The frame of the jump cushion consists of 12 mutually connected tubes forming a square regular prism, made of a polyester fabric coated on two sides with rubber. After the tubes are filled with air, they form the load-bearing frame for the case of the jump cushion walls. The side walls as well as the top and bottom surfaces, made of polyester fabric coated on one side with rubber, are glued to the frame. The centre of the drop surface of the jump cushion is marked on the case in blue. The inside chamber of the jump cushion is divided into two parts with a horizontal partition (central shelf). The design of the partition enables the flow of air inside the chambers of the jump cushion. In the lower part of the frame, there is a rigid connection for compressed air cylinders used to fill the frame. The terminal of the connection makes it possible to connect a compressed air cylinder with a filling pressure of 300 bars. To prevent damage to the cylinder, a case covering the cylinder is sewn to the lower tube and the case of the jump cushion. The jump cushion is equipped with two valves for releasing air from the frame, which are located, one each, in the horizontal tubes, lower and upper, on the side of the cylinder connection. In the upper horizontal component of the frame (on the side of the inner chamber), a safety valve is installed. There are 36 openings in each of the four side walls. The jump cushion, filled with air, can be transported using 12 carrying handles fastened to the horizontal tubes (1 on each tube) and to the external side wall fabric (2 on each wall). A counterbalance (a sandbag weighing 6.2 kg) is sewn in the wall of the jump cushion on the side opposite to that where the cylinder is installed.

Stelaż skokochronu składa się z 12 połączonych ze sobą (w kształcie graniastopłu prawidłowego czworokątnego) rur, wykonanych z tkaniny poliestrowej dwustronnie powlekanej gumą. Po napełnieniu rur powietrzem tworzą one ramę nośną dla powłoki ścian skokochronu. Do stelaża przyklejone są ściany boczne oraz powierzchnia górna i powierzchnia dolna, które są wykonane z tkaniny poliestrowej jednostronnie powlekanej gumą. Środek pola skoku skokochronu oznaczono na powłoce kołem w kolorze niebieskim. Wewnątrz komora skokochronu przedzielona jest na dwie części poziomą przegrodą (półka środkowa). Konstrukcja przegrody umożliwia przepływ powietrza wewnątrz komór skokochronu. W dolnej części stelaża zamocowano sztywne przyłącze służące do podłączenia butli ze sprężonym powietrzem napełniającej stelaż. Końcówka przyłącza umożliwia podłączanie butli ze sprężonym powietrzem o ciśnieniu napełniania 300 bar. W celu zabezpieczenia butli przed uszkodzeniem do dolnej rury i powłoki skokochronu przyszyto pokrowiec osłaniający butle. Skokochron wyposażono w dwa zawory do opróżniania stelaża z powietrza, umieszczone po jednej sztuce w poziomych rurach dolnej i górnej od strony przyłącza do butli. W górnym poziomym elemencie stelaża (od strony wewnętrznej komory) zamocowano zawór bezpieczeństwa. W powłoce każdej z czterech ścian bocznych wykonano po 36 otworów. Do transportu napełnionego powietrzem skokochronu służy 12 uchwytów nośnych przymocowanych do pionowych rur (po 1 szt. na każdej rurze) oraz do zewnętrznej tkaniny ściany bocznej (po 2 szt. na każdej ścianie). W ścianie skokochronu, po przeciwnej stronie,

The approximate outside dimensions of the jump cushion, when filled to the operating pressure, are:

- 3440 x 3390 mm (base),
- 1700 mm (height).

### Characteristics of jump cushion no. 3



a)



b)

**Figure 3.** Unfolded jump cushion no. 3: a) side view, b) top view  
**Rycina 3.** Rozłożony skokochron nr 3: a) widok z boku, b) widok z góry

Source: CNBOP-PIP's own archive.

Źródło: Archiwum własne CNBOP-PIB.

Similar to jump cushions no. 1 and no. 2 described above, jump cushion no. 3 consists of 12 mutually connected tubes with a circular cross-section, forming a cube, made from a fabric coated on two sides with a rubber mixture. After the tubes are filled with air, they form a skeleton of the cuboid constituting the load-bearing frame for the case of the jump cushion walls. The outside case made from a fabric coated with a rubber mixture is attached to the frame. The centre of the drop surface is marked on the case with a black circle on a white background. The inside chamber of the jump cushion is divided in half with a horizontal partition made from a synthetic fibre fabric. A rigid metal end piece with a stop valve for filling with air from compressed air cylinders at the pressure of 200 or 300 bars is connected to the lower tube of the frame. To protect the cylinder against damage, a case covering the cylinder, lined on the inside with a foamed material, is sewn to the lower case of the jump cushion. The jump cushion is equipped with two manually actuated valves for releasing air from the frame, which are located in the horizontal tubes, lower and upper, on the side of the cylinder connection. In the upper horizontal tube of the frame there is a safety valve, which is protected against damage with a plastic cover. In the casing of the jump cushion there are 28 openings in each corner, with the diameter of 60 mm, the purpose of which is to release air from the inside of the jump cushion after the rescued person jumps onto it. Once filled with air, the jump cushion is transported by handles made from 4 cm wide polyester tape, fastened to the vertical corner tubes of the frame; there is one of them on each corner of the jump cushion and two on each of its side walls.

gdzie zamontowano butlę wszyto tzw. przeciwwagę (w formie worka z piaskiem o masie 6,2 kg).

Wymiary zewnętrzne skokochronu po napełnieniu do ciśnienia roboczego wynoszą:

- ok. 3440 x 3390 mm (podstawa),
- ok. 1700 mm (wysokość).

### Charakterystyka skokochronu nr 3

Podobnie jak w przypadku opisanych wcześniej modeli 1 i 2, skokochron 3 opiera się na konstrukcji 12 połączonych ze sobą w kształcie sześciangu rur o przekroju kołowym wykonanych z tkaniny dwustronnie powlekaną mieszanką gumową. Po napełnieniu rur powietrzem tworzą one szkielet prostopadłościanu stanowiącego ramę nośną dla powłoki ścian skokochronu. Do stelaża przyklejona jest powłoka zewnętrzna wykonana z tkaniny powlekaną mieszanką gumową. Środek pola skoku skokochronu oznaczony jest na powłoce kołem koloru czarnego na białym tle. Wewnątrz komora skokochronu przedzielona jest na pół poziomą przegrodą wykonaną z tkaniny z włókien syntetycznych. Do dolnej rury stelaża zamocowana jest sztywna, metalowa końcówka z zaworem zwrotnym do napełniania powietrzem z butli na sprężone powietrze o ciśnieniu 200 lub 300 bar. W celu zabezpieczenia butli przed uszkodzeniem, do dolnej powłoki skokochronu przyszyty jest pokrowiec osłaniający butlę, wyłożony od wewnątrz materiałem spienionym. Skokochron wyposażono w dwa zawory do opróżniania stelaża z powietrza, uruchamiane ręcznie, umieszczone w poziomych rurach, dolnej i górnej, od strony przyłącza do butli. W górnej poziomej rurze stelaża zamocowano zawór bezpieczeństwa, osłonięty przed uszkodzeniem pokrywą z tworzywa sztucznego. W powłoce skokochronu, w każdym narożniku wykonano po 28 otworów o średnicy ok. 60 mm mających na celu odprowadzenie powietrza ze środka skokochronu po upadku osoby ratowanej. Do transportu napełnionego powietrzem skokochronu służą uchwyty wykonane z taśmy poliestrowej o szerokości 4 cm, przymocowane do pionowych narożnych rur stelaża, w liczbie: po jednym na każdym

A pocket, filled with sandbags, is fastened to the lower edge on the side parallel to the place where the air cylinder is fastened; its role is to stabilize the jump cushion when a rescued person drops onto it. The approximate outside dimensions of a jump cushion filled with air to the operating pressure are:

- 3,350 x 3,350 mm (base),
- 1,550 mm (height).

#### Characteristics of jump cushion no. 4



a)

**Figure 4.** Unfolded jump cushion no. 4: a) side view, b) top view  
**Rycina 4.** Rozłożony skokochron nr 4: a) widok z boku, b) widok z góry

**Source:** CNBOP-PIP's own archive.

**Źródło:** Archiwum własne CNBOP-PIB.

The frame of jump cushion no. 4 is composed of 24 tubes with circular cross-section connected to each other to form a prism with an octagonal base, made of a fabric coated on both sides with a rubber mixture. After the tubes are filled with air, they form a skeleton of the prism constituting the load-bearing frame for the case of the jump cushion walls. The outside case made from a fabric coated with a rubber mixture is attached to the frame. The centre of the drop surface is marked on the case with a black circle on a white background. The inside chamber of the jump cushion is divided in half with a horizontal partition made from a synthetic fibre fabric. A rigid metal end piece with a stop valve for filling with air from compressed air cylinders at the pressure of 200 or 300 bars is connected to the lower tube of the frame. To protect the cylinder against damage, a case covering the cylinder, lined on the inside with a foamed material, is sewn to the lower case of the jump cushion. The jump cushion is equipped with two manually actuated valves for releasing air from the frame, which are located in the horizontal tubes, lower and upper, on the side of the cylinder connection. In the upper horizontal tube of the frame there is a safety valve, which is protected against damage with a plastic cover. In the jump cushion case, in the four side walls, there are 60 openings to release air

z narożników skokochronu oraz po dwa uchwyty w każdej bocznej ścianie skokochronu. Do dolnej krawędzi na boku równoległym do miejsca mocowania butli z powietrzem przytwierdzono kieszeń wypełnioną workami z piaskiem, której zadaniem jest stabilizowanie skokochronu w momencie upadku osoby ratowanej. Przybliżone wartości wymiarów zewnętrznych skokochronu po napełnieniu do ciśnienia roboczego są następujące:

- 3350 x 3350 mm (podstawa),
- 1550 mm (wysokość).

#### Charakterystyka skokochronu nr 4



b)

Stelaż skokochronu nr 4 stanowi 24 połączonych ze sobą w kształcie graniastostupa o podstawie ośmiokąta rur o przekroju kołowym wykonanych z tkaniny dwustronnie powlekanej mieszanką gumową. Po napełnieniu rur powietrzem, tworzą one szkielet graniastostupa stanowiącego ramę nośną dla powłoki ścian skokochronu. Do stelaża przyklejona jest powłoka zewnętrzna wykonana z tkaniny powlekanej mieszanką gumową. Środek pola skoku skokochronu oznaczony jest na powłoce kołem koloru czarnego na białym tle. Wewnątrz komora skokochronu przedzielona jest na pół poziomą przegrodą wykonaną z tkaniny z włókien syntetycznych. Do dolnej rury stelaża zamocowana jest sztywna, metalowa końcówka z zaworem zwrotnym do napełniania powietrzem z butli na sprężone powietrze o ciśnieniu 200 lub 300 bar. W celu zabezpieczenia butli przed uszkodzeniem do dolnej powłoki skokochronu przszyty jest pokrowiec osłaniający butlę, wyłożony od wewnątrz materiałem spienionym. Skokochron wyposażono w dwa zawory do opróżniania stelaża z powietrza, uruchamiane ręcznie, umieszczone w poziomych rurach, dolnej i górnej, od strony przyłącza do butli. W górnej poziomej rurze stelaża zamocowano zawór bezpieczeństwa, osłonięty przed uszkodzeniem pokrywą z tworzywa sztucznego. W powłoce skokochronu, w czterech ścianach bocznych wykonano po 60 otworów mających na

from the inside after an evacuated person drops onto the jump cushion. Once filled with air, the jump cushion is transported by handles made from polyester tape, fastened to the vertical corner tubes of the frame; there is one of them on each corner of the jump cushion and two on its four side walls. On the lower edge of the side parallel to the place where the air cylinder, there is a pocked attached, which is filled with sandbags. It is used to stabilize the jump cushion at the time of the fall of the rescued person. The average outside dimensions of the jump cushion, when filled to the operating pressure, are:

- 4585 x 4585 mm (base),
- 2280 mm (height).

### Characteristics of the test equipment

In the study, dummies consisting of a torso and a head, and weighing 40 and 90 kg were used (see Figure 5). A dummy is a rigid solid filled with resin, with handles for hanging on a crane, hoist, or other similar piece of equipment that can lift the load to a specific height. In the upper part of the dummy's torso, a socket for installing an inertial measurement unit is placed.

The battery-powered inertial measurement unit (see Figure 6) has integrated acceleration sensors with indication ranges of  $\pm 3$  g,  $\pm 6$  g,  $\pm 12$  g and  $\pm 24$  g on the low side and  $\pm 100$  g,  $\pm 200$  g,  $\pm 400$  g on the high side. The sensitivity of the acceleration sensors is 0.09 mg/LSB for the  $\pm 24$  g range and 49 mg/LSB for the  $\pm 100$  g range. The measured g-force values are recorded with the accuracy of  $0,0001 \text{ m/s}^2$ . Moreover, the measurement unit is equipped with an angular speed sensor with indication ranges of 125 dps, 250 dps, 500 dps, 1,000 dps and 2,000 dps. The sensitivity of the angular speed sensor is 0.061 DPS/LSB for the 2000 dps range. The measurement unit allows recording data with the frequency of 1000 Hz for 7 seconds. The measurements can be started in one of two modes. In the manual mode, the measurements start immediately after the inertial measurement unit is activated. In the automatic mode, the measurement unit first detects motion along the vertical axis and then starts recording the data. The measurement unit enables an automatic selection of data from the acceleration sensors depending on the level of the recorded values. The measured data is transformed into a gravity system and filtered according to the SAE J211-1:1995.03 standard [25]. Immediately after the recording, access is provided from the WebGUI level to a preview of the data in the following charts: the RAW CHART (non-filtered acceleration), FILTERED CHART (filtered data in the IMU system), OUTPUT CHART (acceleration transformed into the gravity system after full filtration according to SAE J211-1:1995.03 [25]).

The tests were performed using a remotely controlled releasing device suspended on a crane installed in CNBOP-PIB's climbing tower (see Figure 5).

celu odprowadzenie powietrza ze środka skokochronu po upadku osoby ratowanej. Do transportu napełnionego powietrzem skokochronu służą uchwyty wykonane z taśmy poliestrowej, przymocowane do pionowych narożnych rur stelaża – po jednym na każdym z narożników skokochronu oraz po dwa uchwyty w czterech bocznych ścianach skokochronu. Do dolnej krawędzi na boku równoległym do miejsca mocowania butli z powietrzem umieszczono kieszeń wypełnioną workami z piaskiem. Ma ona służyć do stabilizacji skokochronu w momencie upadku osoby ratowanej. Uśrednione wymiary zewnętrzne skokochronu po napełnieniu do ciśnienia roboczego wynoszą:

- 4585 x 4585 mm (podstawa),
- 2280 mm (wysokość).

### Charakterystyka aparatury badawczej

W badaniach wykorzystano manekiny o kształcie tułowia z głową o masie odpowiednio 40 i 90 kg (zob. ryc. 5). Manekin tworzy sztywna bryła, wypełniona żywicą z uchwytami do podwieszenia do żurawia, dźwigu lub podobnego urządzenia, umożliwiającego podniesienie obciążenia na określoną wysokość. W górnej części korpusu manekina umieszczono gniazdo do montażu układu pomiarowego.

Układ pomiarowy (zob. ryc. 6) typu IMU (ang. *inertial measurement unit*), zasilany bateryjnie, posiada wbudowane czujniki przyspieszenia o zakresie wskazań  $\pm 3$  g,  $\pm 6$  g,  $\pm 12$  g,  $\pm 24$  g w niskim zakresie oraz  $\pm 100$  g,  $\pm 200$  g,  $\pm 400$  g w zakresie wysokim. Czułość czujnika przyspieszenia wynosi 0,09 mg/LSB dla zakresu  $\pm 24$  g oraz 49 mg/LSB dla zakresu  $\pm 100$  g. Rejestracja przeciążeń odbywa się z dokładnością  $0,0001 \text{ m/s}^2$ . Ponadto układ pomiarowy wyposażony jest w czujnik prędkości kątowej o zakresie wskazań 125 dps, 250 dps, 500 dps, 1000 dps, 2000 dps. Czułość czujnika prędkości kątowej wynosi 0,061 DPS/LSB dla zakresu 2000 dps. Układ pomiarowy zapewnia rejestrację wyników z częstotliwością 1000 Hz przez okres 7 sekund. Rozpoczęcie pomiarów możliwe jest w dwóch trybach. Tryb ręczny zapewnia rozpoczęcie pomiarów od razu po jego uruchomieniu. Tryb automatyczny uzbrojenia wykrywa ruch w osi pionowej i po jego detekcji układ rozpoczyna rejestrację danych. Układ pomiarowy zapewnia automatyczny wybór danych z czujników przyspieszenia, w zależności od poziomu rejestrowanych wartości. Uzyskane dane są transformowane do układu grawitacyjnego oraz filtrowane zgodnie z normą SAE J211-1:1995.03 [25]. Bezpośrednio po rejestracji z poziomu WebGUI zapewniony jest dostęp do podglądu danych na wykresach, odpowiednio RAW CHART (wykres przyspieszeń niefiltrowanych), FILTERED CHART (dane filtrowane w układzie IMU), OUTPUT CHART (przyspieszenia przetransformowane do układu grawitacyjnego po pełnej filtracji zgodnie z normą SAE J211-1:1995.03 [25]).

Do badań wykorzystano zdalnie sterowane urządzenie zwalniające, podczipione do żurawia zamontowanego na wieży wspinalni CNBOP-PIB (zob. ryc. 5).

## Research methodology

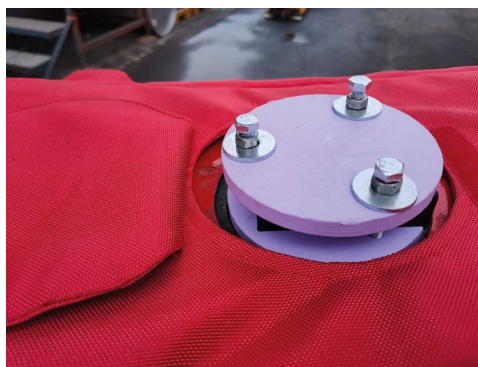
During the tests, the dummy was connected to a remotely controlled releasing device shown in Figures 5 and 6. Taking into account the results of previous studies [26], it was assumed that the study will involve dropping the dummies described above (40 and 90 kg) [27]<sup>1</sup> onto jump cushions of various types, onto the centre of their drop surface, from the height of 16 meters.



**Figure 5.** Dummy installed on the dropping device  
**Rycina 5.** Manekin zamontowany na urządzeniu zrzutowym

**Source:** CNBOP-PIP's own archive.

**Źródło:** Archiwum własne CNBOP-PIB.



**Figure 6.** The DROP LOGGER inertial measurement unit installed on a dummy  
**Rycina 6.** Układ pomiarowego DROP LOGGER zamontowany na manekinie

**Source:** CNBOP-PIP's own archive.

**Źródło:** Archiwum własne CNBOP-PIB.

## Results

For each drop, the mechanical response of the jump cushion was determined for the weight used and its corresponding impact velocity. The height was determined with a tolerance allowed in a laboratory, i.e.  $\pm 1\%$  of the nominal height. The weights of the dropped objects were 40.54 kg and 90.54 kg. A minimum of 3 drops

<sup>1</sup> It was assumed that the weight of a firefighter is 90 kg. The smaller the weight and the larger the fall height, the smaller the deflection of the jump cushion and the larger the g-forces – in previous years, the smallest weight was assumed (a very thin adult of a teenager).

## Metodyka badań

W trakcie badań manekin podczepiony był do zdalnie sterowanego urządzenia zwalniającego przedstawionego na rycinach 5 i 6. Uwzględniając wyniki wcześniej prowadzonych prac [26], przyjęto że badania będą polegały na zrzutach wspomnianych powyżej manekinów (40, 90 kg) [27]<sup>1</sup> na różne typy skokochronów, w środek ich powierzchni zeskoku, z wysokości 16 metrów.

## Wyniki

W każdym zrzucie wyznaczono odpowiedź mechaniczną skokochronu dla użytej masy i odpowiadającej jej prędkości uderzenia. Wysokość ustalana była z tolerancją przewidzianą w laboratorium, tj.  $\pm 1\%$  wysokości nominalnej. Masy zrzucanego obiektu wynosiły odpowiednio 40,54 kg oraz 90,54 kg. Dla każdego

<sup>1</sup> Przyjęto masę strażaka 90 kg. Im mniejsza masa i wyższa wysokość upadku, tym ugięcie skokochronu mniejsze, a więc przeciążenia większe – we wcześniejszych latach realizacji przyjęto najmniejszą masę 40 kg (bardzo szczupła osoba lub nastolatek).

were performed for each set of parameters. During each test, the values of the g-force were recorded for 7000 ms from the moment of release of the load.

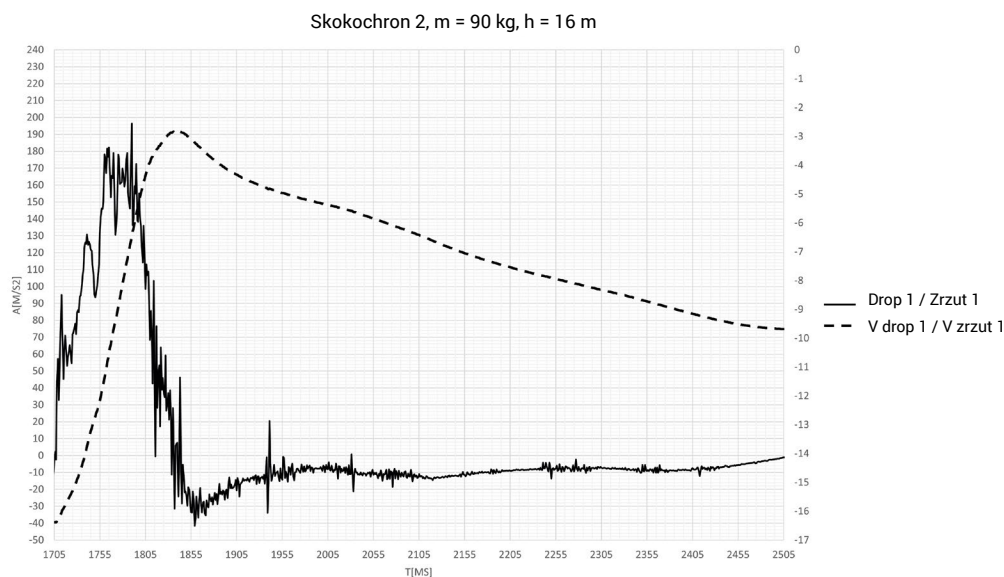
The results were analysed in terms of the value and duration of the g-force. A graph showing the change of the g-force in time is shown below. The g-force value is a rolling average for 3 points (3 ms).

At first, the authors analysed the g-force and the velocity as a function of time for one of the drops. The function is shown in the graph in Figure 7.

zestawu parametrów przeprowadzono minimum 3 zrzuty. W trakcie każdej próby rejestrowano przebiegi przeciążeń przez 7000 ms od momentu zwolnienia obciążenia.

Uzyskane wyniki zostały poddane analizie pod kątem wielkości przeciążeń i czasu ich oddziaływania. Poniżej zaprezentowano wykresy przeciążenia w funkcji czasu. Wartość przeciążenia jest średnią krocząco z 3 punktów (3 ms).

Na początku autorzy przeprowadzili analizę przeciążenia oraz prędkości w funkcji czasu dla jednego ze zrzutów. Przebieg funkcji przedstawia wykres na rycinie 7.



**Figure 7.** The change in the g-force and the velocity as a function of time for the drop of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 2

**Rycina 7.** Przebieg przeciążenia oraz prędkości w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 90 kg z wysokości 16 m na skokochron 2

**Source:** Own elaboration by CNBOP-PIB.

**Źródło:** Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The graph starts at the moment of the first contact of the dummy with the jump cushion's surface. At a given time, the force acting on the dummy starts to change, but due to the flexibility of the jump cushion, the initial contact does not generate a large g-force. At the same time, the dummy's velocity resulting from the free fall continues to be negative, which conforms to the direction of the force of gravity. The initial change of the g-force from negative to positive values indicates the beginning of the resistance of the jump cushion, which means that the jump cushion begins to absorb the dummy's kinetic energy.

As the dummy continues to penetrate into the surface of the jump cushion, its case begins to bend, which results in changes in the g-force along the vertical axis. The value of the g-force changes from negative (typical of a free fall) to positive, when the jump cushion gradually increases its response force, resulting in an effective deceleration of the dummy. The g-force increases moderately, which suggests that the process of contact is gradual and the dummy's kinetic energy is gradually absorbed by the case of the jump cushion.

Wykres rozpoczyna się od momentu pierwszego kontaktu manekina z powierzchnią skokochronu. W danej chwili siła działająca na manekina zaczyna się zmieniać, jednak ze względu na elastyczność skokochronu początkowy kontakt nie generuje dużych przeciążeń. Jednocześnie prędkość manekina, wynikająca ze swobodnego spadku, utrzymuje się na wartości ujemnej, co jest zgodne z jej kierunkiem odpowiadającym działaniu siły grawitacji. Początkowa zmiana przeciążenia z wartości ujemnych na dodatnie wskazuje na początek oporu stawianego przez skokochron, co oznacza, że skokochron zaczyna pochłaniać energię kinetyczną manekina.

Wraz z dalszym wnikaniem manekina w powierzchnię skokochronu, powłoka zaczyna się stopniowo uginać, co powoduje zmiany przeciążenia w osi pionowej. Przeciążenie zmienia swoją wartość z ujemnej (charakterystycznej dla swobodnego spadku) na dodatnią, gdy skokochron sukcesywnie zwiększa swoją siłę reakcji, prowadząc do skutecznego hamowania manekina. Wartości przeciążenia rosną w sposób umiarkowany, co sugeruje, że proces kontaktu jest stopniowy, a energia kinetyczna manekina jest sukcesywnie absorbowana przez powłokę skokochronu.

When the braking force of the jump cushion reaches its maximum value, which involves the maximum compression of its case, an abrupt increase in the g-force is observed. At this stage, the jump cushion is subject to a maximum compression and causes the largest resistance. At the same time, the dummy's velocity reaches its maximum value (the smallest negative value), which indicates an effective energy absorption by the jump cushion. After this value is reached, the resistance force begins to gradually decrease, which means that the jump cushion stops to intensively decelerate the dummy.

Of note is the fact that after the jump cushion has absorbed the energy, it does not bounce off the dummy in a way that would cause the direction of its velocity to change to a positive one (i.e. a direction opposite to the direction of the fall). Instead, the case gradually decompresses, thus dissipating the stored energy sufficiently to allow the dummy to be kept above the surface, without a clear bouncing. After the maximum compression, the jump cushion returns to its original shape, but it is not flexible enough to fully bounce off the dummy. In this phase, the dummy continues to be supported on the jump cushion case, which deflects under its weight again towards the ground.

The graph also shows some fluctuations in the g-force value, which indicate a dynamic behaviour of the jump cushion. These fluctuations are most likely due to the oscillation of the jump cushion case after the first impact, which is typical of the dynamic properties of flexible materials. Nevertheless, these motions are too small to clearly bounce off the dummy, and so the velocity still oscillates around negative values.

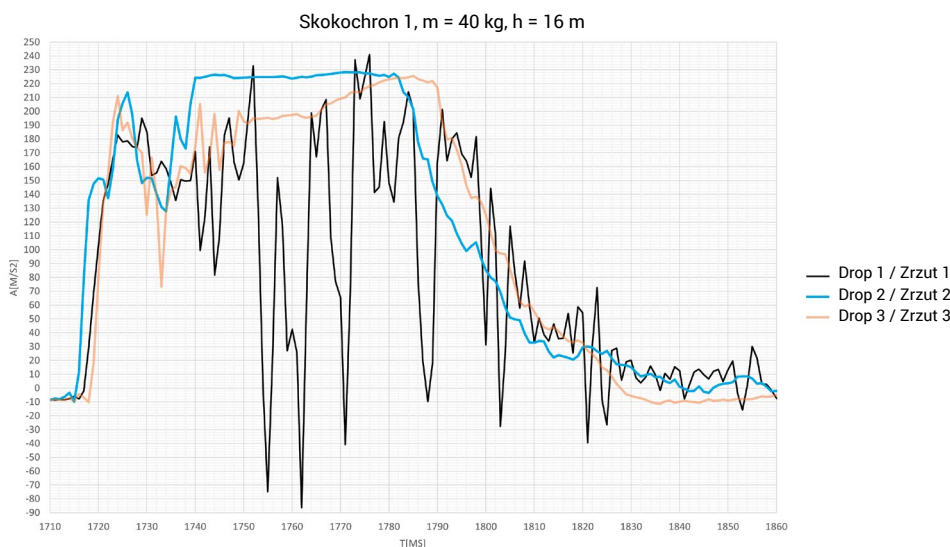
Further in the analysis, the authors focused on an assessment of the effectiveness of energy absorption by the jump cushion, starting from the moment of the first contact with the jump cushion case, when the vertical velocity reaches its maximum value for the first time. This moment corresponds to the maximum compression of the jump cushion and reflects the effectiveness of its shock absorption properties.

W chwili, gdy siła hamowania skokochronu osiąga maksimum, co jest związane z maksymalną kompresją powłoki, obserwuje się gwałtowny wzrost przeciążenia. Jest to etap, w którym skokochron ulega maksymalnemu zgmiotowi i stawia największy opór. W tym samym czasie prędkość manekina osiąga swoją maksymalną wartość (najmniejszą wartość ujemną), co wskazuje na efektywne pochłanianie energii przez skokochron. Po osiągnięciu tej wartości siła oporu zaczyna stopniowo maleć, co oznacza, że skokochron przestaje dalej intensywnie hamować manekin.

Warto zauważyć, że po zgromadzeniu energii skokochron nie odbija manekina w sposób, który spowodowałby zmianę kierunku prędkości na dodatni (czyli w kierunku przeciwnym do upadku). Zamiast tego, powłoka stopniowo rozpręża się, rozpraszając zmagazynowaną energię w sposób wystarczający, aby manekin został utrzymany nad powierzchnią, bez wyraźnego odbicia. Po maksymalnej kompresji, skokochron powoli powraca do swojego pierwotnego kształtu, jednak nie jest na tyle sprężysty, aby wywołać pełne odbicie manekina. W tej fazie manekin jest nadal podtrzymywany przez powłokę skokochronu, która opada pod jego ciężarem, ulegając ponownemu załamaniu w kierunku podłoża.

Na wykresie można również zaobserwować pewne fluktuacje wartości przeciążenia, które wskazują na dynamiczne zachowanie skokochronu. Fluktuacje te są najprawdopodobniej wynikiem oscylacji powłoki skokochronu po pierwszym uderzeniu, co jest charakterystyczne dla dynamicznych właściwości elastycznych materiałów. Niemniej jednak, te ruchy są zbyt małe, aby spowodować wyraźne odbicie manekina, przez co prędkość nadal oscyluje wokół wartości ujemnych.

W dalszej analizie autorzy skupili się na ocenie skuteczności tłumienia energii przez skokochron, począwszy od chwili pierwszego kontaktu z powłoką do momentu, w którym wartość prędkości pionowej osiągnie swoje maksimum po raz pierwszy. Ten moment odpowiada maksymalnej kompresji skokochronu i odzwierciedla efektywność jego właściwości amortyzacyjnych.



**Figure 8.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 1  
**Rycina 8.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 40 kg z wysokości 16 m na skokochron 1

**Source:** Own elaboration by CNBOP-PIB.

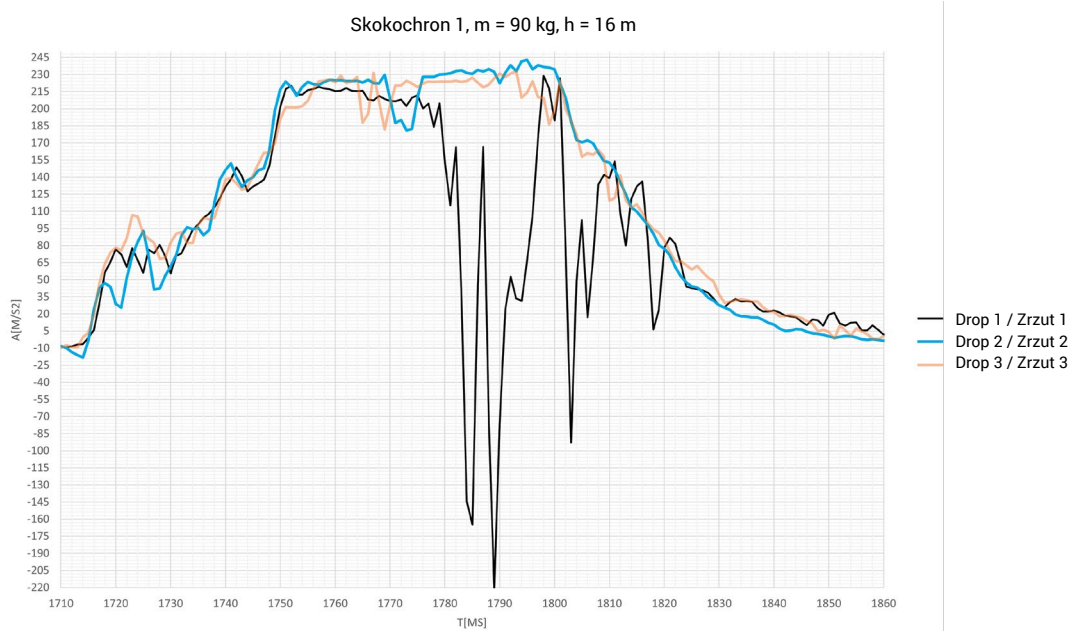
**Źródło:** Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum g-force caused by a fall of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 1 ranged from 225.8 m/s<sup>2</sup> for drop no. 2 to 241.0 m/s<sup>2</sup> for drop no. 1. The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) ranged from 15 ms for drop no. 3 to 42 ms for drop no. 2.

The standard deviation for the maximum g-force was 6.65 m/s<sup>2</sup>. The value of the standard deviation for the duration of the maximum g-force values was assumed to be at the level of 11.22 ms. Due to the relatively large g-force values in the context of g-force tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 106 ms for drop no. 3 to 138 ms for drop no. 1. For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 104 ms for drop no. 3 to 138 ms for drop no. 1 (with a standard deviation of 14.38 ms). For g-force values greater than 20 g, it ranged from 103 ms for drop no. 3 to 138 ms for drop no. 1 (with a standard deviation of 15.28 ms).

Maksymalne przeciążenie wynikające z upadku masy 40 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskokochronu 1 wyniosło od 225,8 m/s<sup>2</sup> dla zrzutu 2 do 241,0 m/s<sup>2</sup> dla zrzutu 1. Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), wyniósł od 15 ms dla zrzutu 3 do 42 ms dla zrzutu 2.

Odchylenie standardowe maksymalnego przeciążenia wyniosło 6,65 m/s<sup>2</sup>. Wartość odchylenia standardowego dla czasu trwania maksymalnych przeciążeń przyjęto na poziomie 11,22 ms. Z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego na przeciążenia, przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 106 ms dla zrzutu 3, do 138 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 13,2 ms). Dla progu powyżej 15 g wyniósł od 104 ms dla zrzutu 3, do 138 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 14,38 ms). Natomiast powyżej progu 20 g wyniósł od 103 ms dla zrzutu 3 oraz do 138 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 15,28 ms).



**Figure 9.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 1  
**Rycina 9.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 90 kg z wysokości 16 m na skokochron 1

Source: Own elaboration by CNBOP-PIB.

Źródło: Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The values of the maximum g-force resulting from the fall of a dummy weighing 90 kg from a height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 1 ranged from 228.8 m/s<sup>2</sup> to 242.8 m/s<sup>2</sup> for drops no. 1 and 2, respectively. The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) ranged from 19 ms (drop no. 2) to 50 ms (drop no. 1).

The standard deviation for the maximum g-force was 5.88 m/s<sup>2</sup>. The standard deviation for the duration of the maximum g-force

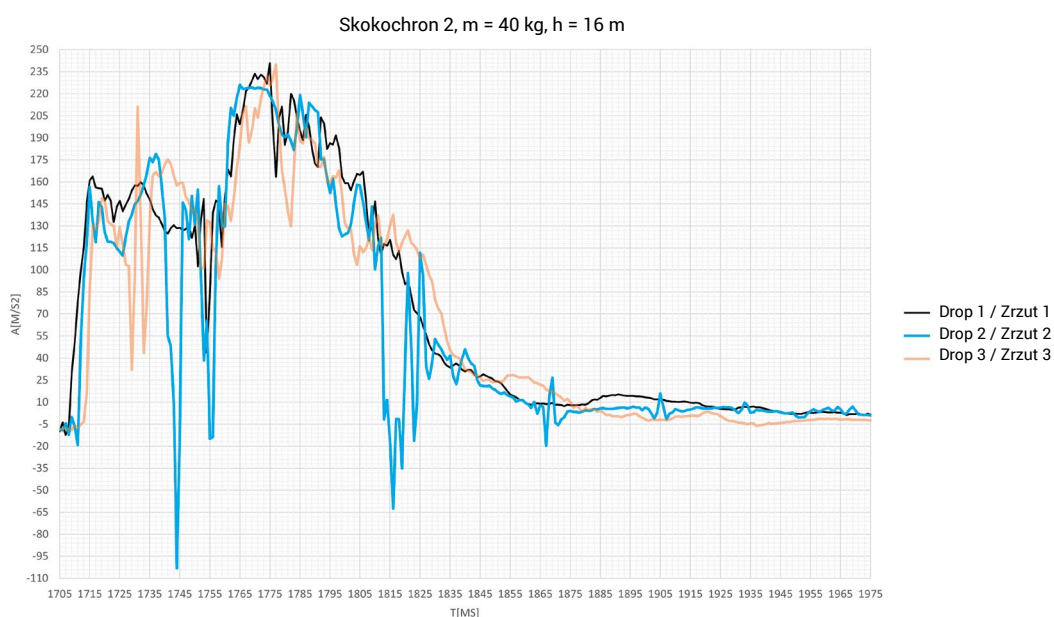
Wartości maksymalnego przeciążenia wynikającego z upadku masy 90 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskokochronu 1 wyniosły od 228,8 m/s<sup>2</sup> do 242,8 m/s<sup>2</sup> dla odpowiednio dla zrzutów 1 i 2. Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), wyniósł od 19 ms (zrzut 2) do 50 ms (zrzutu 1).

Odchylenie standardowe maksymalnego przeciążenia wyniosło 5,88 m/s<sup>2</sup>. Odchylenie standardowe czasu trwania maksymalnych przeciążeń było równe 13,42 ms. Z uwagi na relatywnie duże



was 13.42 ms. Due to the relatively large g-force values in the context of g-force tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 124 ms for drop no. 2 to 141 ms for drop no. 1 (with a standard deviation of 6.98 ms). For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 121 ms for drop no. 2 to 134 ms for drop no. 1 (with a standard deviation of 5.35 ms). For g-force values greater than 20 g, it ranged from 116 ms for drop no. 2 to 134 ms for drop no. 1 (with a standard deviation of 7.41 ms).

wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego na przeciążenia przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 124 ms dla zrzutu 2, do 141 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 6,98 ms). Dla progu powyżej progu 15 g wyniósł od 121 ms dla zrzutu 2, do 134 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 5,35 ms). Natomiast powyżej progu 20 g wyniósł od 116 ms dla zrzutu 2, do 134 ms dla zrzutu 1 (z odchyleniem standardowym 7,41 ms).



**Figure 10.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 2  
**Rycina 10.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 40 kg z wysokości 16 m na skokochron 2

**Source:** Own elaboration by CNBOP-PIB.

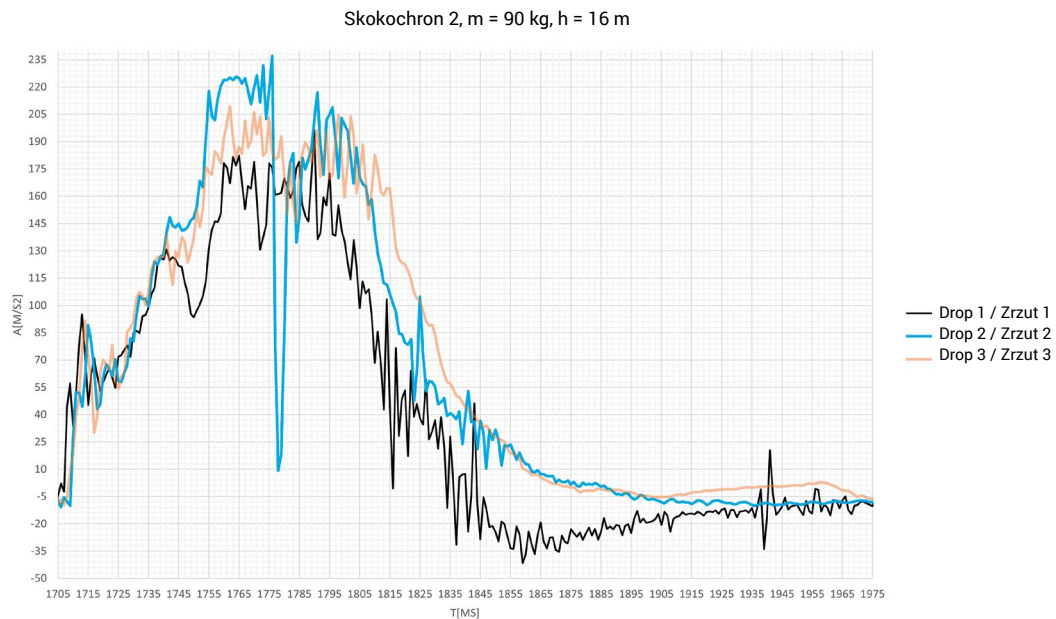
**Źródło:** Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum g-force caused by a fall of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 1 ranged from 226.1  $m/s^2$  (for drop no. 2) to 240.8  $m/s^2$  (for drop no. 1). The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) ranged from 3 ms (for drop no. 3) to 21 ms (for drop no. 2).

The standard deviation for the maximum g-force was assumed at the level of 6.72  $m/s^2$ . The standard deviation for the duration of the maximum g-force was 8.06 ms. Due to the relatively large g-force values in the context of the tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 161 ms (for drop no. 3) to 205 ms (for drop no. 1), with a standard deviation of 18.57 ms. For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 156 ms (for drop no. 3) to 193 ms (for drop no. 2), with a standard deviation of 15.51 ms. For g-force values greater than 20 g, it ranged from 144 ms for drop no. 1 and 2 to 157 ms for drop no. 3, with a standard deviation of 5.31 ms.

Maksymalne przeciążenie wynikające z upadku masy 40 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskoku skokochronu 1 mieściło się w granicach od 226,1  $m/s^2$  (dla zrzutu 2) do 240,8  $m/s^2$  (dla zrzutu 1). Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), wyniósł od 3 ms (dla zrzutu 3) do 21 ms (dla zrzutu 2).

Wartość odchylenia standardowego maksymalnego przeciążenia przyjęto na poziomie 6,72  $m/s^2$ . Odchylenie standardowe czasu trwania maksymalnych przeciążeń było równe 8,06 ms. Z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego, przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 161 ms (dla zrzutu 3) do 205 ms (dla zrzutu 1), z odchyleniem standardowym 18,57 ms. Dla progu powyżej progu 15 g wyniósł od 156 ms (dla zrzutu 3) do 193 ms (dla zrzutu 2) z odchyleniem standardowym 15,51 ms. Z kolei powyżej progu 20 g wartość ta wyniosła od 144 ms dla zrzutów 1 i 2 oraz do 157 ms dla zrzutu 3 z odchyleniem standardowym 5,31 ms.



**Figure 11.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 2  
**Rycina 11.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 90 kg z wysokości 16 m na skokochron 2

Source: Own elaboration by CNBOP-PIB.

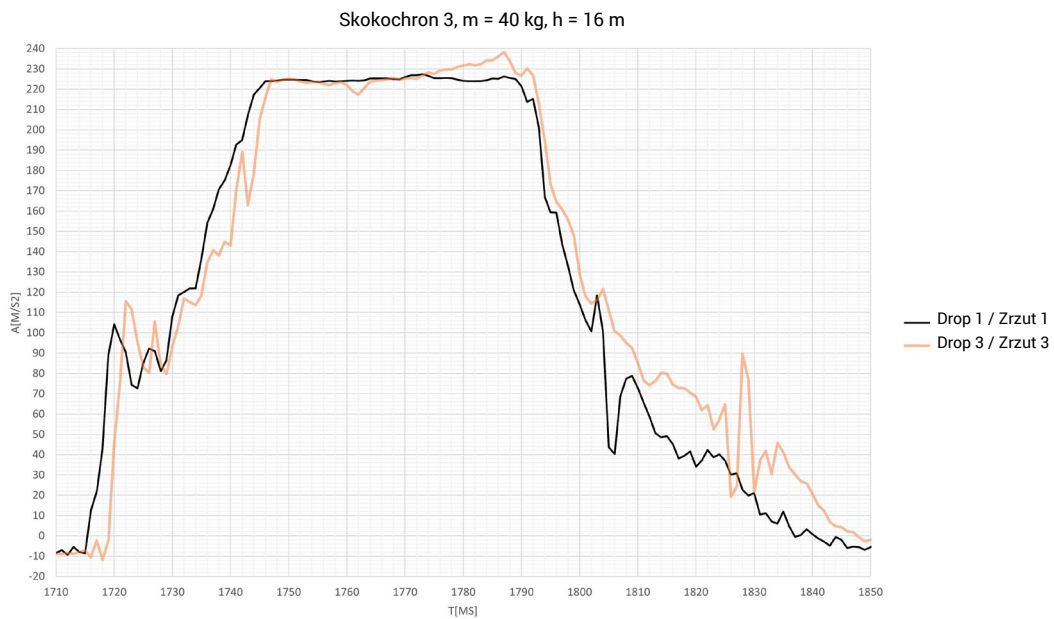
Źródło: Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum g-force caused by a fall of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 2 ranged from  $196.3 \text{ m/s}^2$  (drop no. 3) to  $237.1 \text{ m/s}^2$  (drop no. 2). The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) ranged from 12 ms (drop no. 2) to 41 ms (drop no. 3). For drop no. 1, it was not possible to determine the duration of g-force exceeding 95% of the maximum value, which was due to the fluctuation of the changes.

The standard deviation of the maximum g-force was determined at the level of  $17.21 \text{ m/s}^2$ . The standard deviation of the duration of the maximum g-force was equal to 17.21 ms. Due to the relatively large g-force values in the context of the tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 135 ms (for drop no. 1) to 151 ms (for drop no. 2), with a standard deviation of 7.12 ms. For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 135 ms for drop no. 1 to 149 ms for drop no. 2, with a standard deviation of 6.38 ms, and for g-force values greater than 20 g, it ranged from 135 ms for drop no. 1 to 145 ms for drop no. 2, with a standard deviation of 4.32 ms.

Maksymalne przeciążenie wynikające z upadku masy 90 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskokochronu 2 mieściło się w zakresie od  $196,3 \text{ m/s}^2$  (zrzut 3) do  $237,1 \text{ m/s}^2$  (zrzut 2). Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), wyniósł od 12 ms (zrzut 2) do 41 ms (zrzut 3). W zrzucie 1 nie udało się określić czasu oddziaływania przeciążeń powyżej 95% wartości maksymalnej, co było wynikiem fluktuacji przebiegu.

Odchylenie standardowe maksymalnego przeciążenia ustalono na poziomie  $17,21 \text{ m/s}^2$ . Odchylenie standardowe czasu trwania maksymalnych przeciążeń wyniosło 17,21 ms. Z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 135 ms (dla zrzutu 1) do 151 ms (dla zrzutu 2) z odchyleniem standardowym 7,12 ms. Dla progu powyżej 15 g wyniósł od 135 ms dla zrzutu 1, do 149 ms dla zrzutu 2 z odchyleniem standardowym 6,38 ms, natomiast powyżej progu 20 g od 135 ms dla zrzutu 1 i do 145 ms dla zrzutu 2 z odchyleniem standardowym 4,32 ms.



**Figure 12.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 3  
**Rycina 12.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 40 kg z wysokości 16 m na skokochron 3

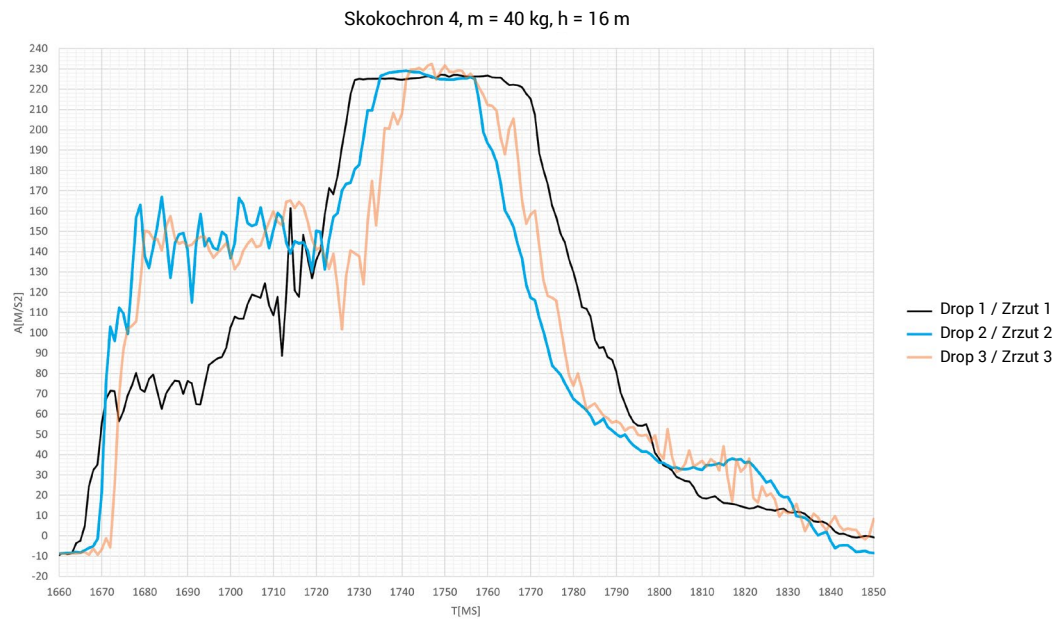
Source: Own elaboration by CNBOP-PIB.  
 Źródło: Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum g-force caused by a fall of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 3 ranged from 227.5 m/s<sup>2</sup> (for drop no. 1) to 238.5 m/s<sup>2</sup> (for drop no. 3). The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) ranged from 19 ms (for drop no. 3) to 46 ms (for drop no. 1).

The standard deviation for the value of the maximum g-force was equal to 5.51 m/s<sup>2</sup>, and the standard deviation for the duration of the maximum g-force was equal to 13.5 ms. Due to the relatively large g-force values in the context of the tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 119 ms (for drop no. 1) to 122 ms (for drop no. 3), with a standard deviation of 1.15 ms. For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 113 ms (for drop no. 1) to 121 ms (for drop no. 3), with a standard deviation of 4 ms, and for g-force values greater than 20 g it ranged from 113 ms (for drop no. 1) to 120 ms (for drop no. 3), with a standard deviation of 3.5 ms.

Maksymalne przeciążenie wynikające z upadku masy 40 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskoku skokochronu 3 wyniosło od 227,5 m/s<sup>2</sup> (dla zrzutu 1) do 238,5 m/s<sup>2</sup> (dla zrzutu 3). Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), wyniósł od 19 ms (dla zrzutu 3) do 46 ms (dla zrzutu 1).

Wartość odchylenia standardowego maksymalnego przeciążenia wyniosła 5,51 m/s<sup>2</sup>, a odchylenia standardowego czasu trwania maksymalnych przeciążeń – 13,5 ms. Z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 119 ms (dla zrzutu 1) do 122 ms (dla zrzutu 3) z odchyleniem standardowym 1,15 ms. Dla progu powyżej progu 15 g wyniósł od 113 ms (dla zrzutu 1) do 121 ms (dla zrzutu 3) z odchyleniem standardowym 4 ms, natomiast powyżej progu 20 g wyniósł od 113 ms (dla zrzutu 1) do 120 ms (dla zrzutu 3) z odchyleniem standardowym równym 3,5 ms.



**Figure 13.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 4  
**Rycina 13.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 40 kg z wysokości 16 m na skokochron 4

Source: Own elaboration by CNBOP-PIB.

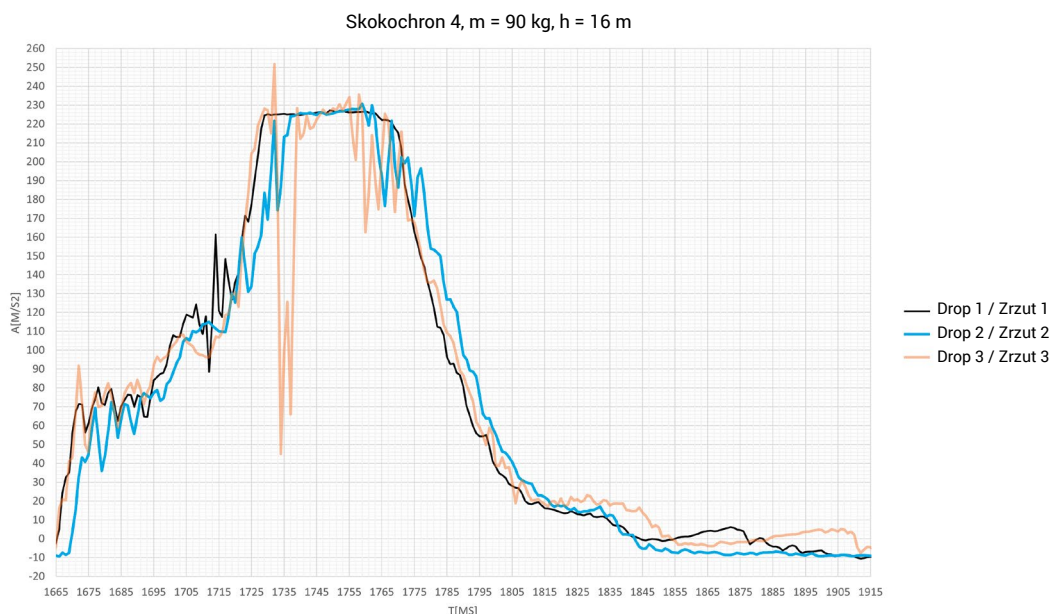
Źródło: Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum g-force caused by a fall of a dummy weighing 40 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 4 ranged from 229.1 m/s<sup>2</sup> (for drop no. 2) to 232.5 m/s<sup>2</sup> (for drop no. 3). The duration of the maximum g-force, i.e. the period in which the g-force was close to the maximum one (exceeded 95% of the maximum value) ranged from 16 to 24 ms for drops no. 3 and 1, respectively.

The standard deviation for the value of the maximum g-force was equal to 1.47 m/s<sup>2</sup>. On the other hand, the standard deviation for the duration of the maximum g-force was 3.56 ms. In this test, too, due to the relatively large g-force values in the context of the tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 159 ms (for drop no. 1) to 163 ms (for drop no. 3), with a standard deviation of 1.63 ms. For g-force values above 15 g, the value of this parameter ranged from 155 ms (for drop no. 1) to 161 ms (for drop no. 2), with a standard deviation equal to 2.49 ms. On the other hand, for g-force values above 20 g, this parameter ranged from 150 ms (for drop no. 1) to 158 ms (for drop no. 2), with a standard deviation of 3.3 ms.

Maksymalne przeciążenie wynikające z upadku masy 40 kg z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskoku skokochronu 4 wyniosło od 229,1 m/s<sup>2</sup> (dla zrzutu 2) do 232,5 m/s<sup>2</sup> (dla zrzutu 3). Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości), mieścił się w przedziale od 16 do 24 ms – odpowiednio dla zrzutów 3 i 1.

Wartość odchylenia standardowego maksymalnego przeciążenia wyniosła 1,47 m/s<sup>2</sup>. Z kolei odchylenie standardowe czasu trwania maksymalnych przeciążeń było równe 3,56 ms. Także w tym badaniu, z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego, przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 159 ms (dla zrzutu 1) do 163 ms (dla zrzutu 3) z odchyleniem standardowym 1,63 ms. Dla progu powyżej progu 15 g wartość tego parametru mieściła się w granicach od 155 ms (dla zrzutu 1) do 161 ms (dla zrzutu 2) z odchyleniem standardowym równym 2,49 ms. Z kolei powyżej progu 20 g parametr czas ten wyniósł od 150 ms (dla zrzutu 1) do 158 ms (dla zrzutu 2), z odchyleniem standardowym na poziomie 3,3 ms.



**Figure 14.** The change in the g-force as a function of time for the drop of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the jump cushion no. 4  
**Rycina 14.** Przebieg przeciążenia w funkcji czasu dla zrzutu manekina o masie 90 kg z wysokości 16 m na skokochron 4

Source: Own elaboration by CNBOP-PIB.  
 Źródło: Opracowanie własne CNBOP-PIB.

The maximum recorded g-force caused by a fall of a dummy weighing 90 kg from the height of 16 m onto the centre of the drop surface of the jump cushion no. 4 ranged from 227.2 m/s<sup>2</sup> for drop no. 1 to 264 m/s<sup>2</sup> for drop no. 2. The duration of the maximum g-force, i.e. the period of time in which the g-force value was closed to the maximum one (exceeded the threshold of 95% of the maximum value) was 41 ms (drop no. 1) or longer. For drops no. 2 and 3, it was not possible to determine the duration of g-force exceeding 95% of the maximum value, which was due to the fluctuation of the changes.

The standard deviation of the value of the maximum g-force was equal to 15.3 m/s<sup>2</sup>. The standard deviation for the duration of the maximum g-force was at the level of 19.33 ms.

Due to the relatively large g-force values in the context of the tolerance of the human body, an analysis was also conducted of g-force values greater than 10, 15 and 20 g. The duration of g-force exceeding 10 g ranged from 1501 ms (for drop no. 3) to 1836 ms (for drop no. 3), with a standard deviation of 156.99 ms. For g-force values greater than 15 g, the duration ranged from 151 ms for drop no. 1 to 1449 ms for drop no. 3, with a standard deviation of 581.51 ms. On the other hand, for g-force values above 20 g, this duration ranged from 142 ms (for drop no. 1) to 1427 ms for drop no. 3, with a standard deviation of 578.55 ms.

## Results and discussion

A series of dummy drops was performed onto jump cushions with pneumatic frames, filled with air from cylinders for breathing apparatuses from various manufacturers and various manufacturing periods. The drops were performed each time onto the centre of the drop surface from a height of 16 m, which was due

Maksymalne zarejestrowane przeciążenie wynikające z upadku masy 90 kg, z wysokości 16 m na środek powierzchni zeskoku skokochronu 4 wyniosło 227,2 m/s<sup>2</sup> – dla zrzutu 1 oraz 264 m/s<sup>2</sup> – dla zrzutu 2. Czas trwania maksymalnego przeciążenia, tj. okres, w którym przeciążenie było bliskie maksymalnemu (przekroczenie progu 95% maksymalnej wartości) wyniósł od 41 ms (zrzut 1). W zrzutach 2 i 3 nie udało się określić czasu oddziaływania przeciążeń powyżej 95% wartości maksymalnej, co wynikało z fluktuacji przebiegu.

Wartość odchylenia standardowego maksymalnego przeciążenia była równa 15,3 m/s<sup>2</sup>. Odchylenie standardowe czasu trwania maksymalnych przeciążeń było na poziomie 19,33 ms.

Z uwagi na relatywnie duże wartości przeciążeń w kontekście tolerancji ciała ludzkiego przeprowadzono również analizę przeciążeń powyżej progu 10, 15 i 20 g. Czas trwania przeciążeń powyżej progu 10 g wyniósł od 1501 ms (dla zrzutu 3) do 1836 ms (dla zrzutu 3) z odchyleniem standardowym 156,99 ms. Dla progu powyżej 15 g wartość ta wyniosła 151 ms dla zrzutu 1 oraz 1449 ms dla zrzutu 3 z odchyleniem standardowym 581,51 ms. Z kolei powyżej progu 20 g czas ten wyniósł od 142 ms dla zrzutu 1 do 1427 ms dla zrzutu 3 z odchyleniem standardowym 578,55 ms.

## Wyniki i dyskusja

Dokonano serii zrzutów manekinów na skokochrony ze stelażem pneumatycznym, napelniane powietrzem z butli do aparatów powietrznych pochodzących od różnych producentów, z różnych okresów produkcji. Zrzuty wykonywane były za każdym razem na środek powierzchni zeskoku z wysokości 16 m, co podyktowane

to the maximum jump height of the jump cushions approved for use. The values of the dropped weight were selected taking into account the weight of a person who can make the jump by himself or herself (a thin adult or a teenager) and the average weight of a firefighter.

In the tests conducted, the maximum g-force values were as large as  $264 \text{ m/s}^2$  (which corresponds to approx. 27 g). Such large g-forces can pose a significant risk to the human body, especially if their duration is long. In each tests, the duration of the maximum g-force (exceeding 95% of the maximum value) ranged from 3 ms to 50 ms. Such a short duration of high g-force values can reduce the risk of serious injuries, but still involves some risks, especially for the spine. The duration of g-forces above 10 g ranged from 1501 ms to 1836 ms, and their standard deviation was 156.99 ms. Such a long duration of g-forces at this level can lead to serious injuries of internal organs, because the tolerance of the human body to long duration of such great forces is limited. The duration of g-forces above 15 g ranged from 151 ms to 1449 ms, and their standard deviation was 581.51 ms. Exceeding the value of 15 g for such a long time poses a risk to the integrity of bones, especially the spine.

The duration of g-forces above 20 g ranged from 142 ms to 1427 ms, and their standard deviation was 578.55 ms. Such a long duration of forces exceeding 20 g can lead to irreversible damage, such as bone fractures and injury to the spinal cord.

Of note is the fact that the initial contact of the dummy with the surface of the jump cushion did not generate large g-forces immediately, which means that the jump cushion effectively absorbed the kinetic energy by gradually increasing the reaction force. As a result, it reduced the initial g-force; however, later the g-force increased abruptly due to the maximum compression of the jump cushion case.

The recorded g-force fluctuations after the first impact indicate a dynamic, oscillating properties of the jump cushion, which does not bounce the dummy off after absorbing its energy in a way that could cause a repeated increase in the velocity in the upward direction. A high value of the g-force and its long duration can have a significant impact on human safety. G-force above 10 g, 15 g and especially 20 g can result in serious injuries, especially when present for a long time.

Flexibility of a jump cushion is crucial to the absorption of the energy of the fall – a slow decompression and a lack of a clear bounce reduce the risk of secondary injuries caused by the bounce of the body. The variability of the maximum g-force and its duration, as well as the significant standard deviations, indicate that the effectiveness of jump cushions in the attenuation of forces depends on many factors, such as the weight of the object, the precise drop height and the specific characteristics of the jump cushion case.

Despite the large g-values, the benefits arising from the use of jump cushions exceed the associated risks. In the case of a fall from the height of 16 m onto the ground, g-force can reach as much as  $1800 \text{ m/s}^2$ , which results in extensive injuries to many internal organs and in practice means death in most cases.

Jump cushions can still be improved in terms of their absorption properties by modifying both their designs and the materials

by the maximum jump height of the jump cushions approved for use. The values of the dropped weight were selected taking into account the weight of a person who can make the jump by himself or herself (a thin adult or a teenager) and the average weight of a firefighter.

W przeprowadzonych testach uzyskane maksymalne przeciążenia wynosiły nawet do  $264 \text{ m/s}^2$  (co odpowiada ok. 27 g). Tak wysokie przeciążenia mogą stanowić poważne zagrożenie dla ciała człowieka, szczególnie jeśli czas oddziaływania jest długi. W każdej z prób czas trwania maksymalnych przeciążeń (przekroczenie 95% wartości maksymalnej) wynosił od 3 ms do 50 ms. Tak krótki czas działania dużych przeciążeń może zmniejszać ryzyko ciężkich urazów, ale nadal niesie zagrożenie, szczególnie dla kręgosłupa. Przeciążenia powyżej 10 g trwały od 1501 ms do 1836 ms, a ich odchylenie standardowe wynosiło 156,99 ms. Tak długi czas trwania przeciążeń na tym poziomie może prowadzić do poważnych uszkodzeń narządów wewnętrznych, ponieważ ciało człowieka ma ograniczoną tolerancję na długotrwałe działanie tak dużych sił. Przeciążenia powyżej 15 g trwały od 151 ms do 1449 ms, a ich odchylenie standardowe wynosiło 581,51 ms. Przekroczenie progu 15 g przez tak długi okres stanowi ryzyko dla integralności kości, szczególnie dla kręgosłupa.

Przeciążenia powyżej 20 g trwały od 142 ms do 1427 ms, a ich odchylenie standardowe wynosiło 578,55 ms. Tak długie działanie sił przekraczających 20 g może prowadzić do nieodwracalnych uszkodzeń, takich jak złamania kości, uszkodzenie rdzenia kręgowego.

Warto zauważyć, że początkowy kontakt manekina z powierzchnią skokochronu nie generował natychmiast dużych przeciążeń, co oznacza, że skokochron efektywnie pochłaniał energię kinetyczną poprzez stopniowe zwiększanie siły reakcji. Dzięki temu zmniejszał początkowe przeciążenie, ale później obserwowany był gwałtowny wzrost przeciążenia związany z maksymalnym zgniotem powłoki skokochronu.

Zarejestrowane fluktuacje przeciążeń po pierwszym uderzeniu wskazują na dynamiczne, oscylacyjne właściwości skokochronu, który po absorpcji energii manekina nie odbija go w sposób, który mógłby spowodować ponowny wzrost prędkości w górę. Wysokie wartości przeciążeń i ich długotrwałe oddziaływanie mogą mieć istotny wpływ na bezpieczeństwo człowieka. Przeciążenia powyżej 10, 15, a szczególnie 20 g mogą prowadzić do poważnych urazów, szczególnie gdy utrzymują się przez dłuższy czas.

Elastyczność skokochronu jest kluczowa dla pochłaniania energii upadku – powolne rozprężanie i brak wyraźnego odbicia zmniejszają ryzyko wtórnych urazów wynikających z odbicia ciała. Zmienność maksymalnych przeciążeń i ich czasów trwania, jak również znaczące odchylenia standardowe, wskazują, że skuteczność skokochronów w tłumieniu sił zależy od wielu czynników, takich jak masa obiektu, dokładna wysokość zrzutu oraz specyfika powłoki.

Pomimo wysokich przeciążeń korzyści wynikające ze stosowania skokochronów przewyższają ryzyka z nim związane. W przypadku upadku z wysokości 16 m na podłoże wielkości przeciążeń mogą osiągać nawet  $1800 \text{ m/s}^2$ , co powoduje rozległe wielonarządowe urazy wewnętrzne i praktycznie w większości przypadków oznacza śmierć.

Na polu konstrukcji skokochronów można w dalszym ciągu dokonywać poprawy ich właściwości absorpcyjnych, ingerując

from which they are made. One must note, however, that the largest g-force that a human has survived was equal to just under  $1962 \text{ m/s}^2$  and its duration was approx. 3 ms. The knowledge of biomechanics demonstrates that the mechanical properties of bones, cartilages, ligaments, tendons and muscles, which transfer forces and torques that, in this case, are caused by the g-force, correspond to their functions. Moreover, the strength values are very diverse, depending on the part of the human body's system responsible for transferring loads [26]. In this regard, the human body is a complex system that is extremely difficult to imitate, for example in FEA calculations. The properties of bones, cartilages, ligaments, tendons and muscles also depend on a person's age, are non-linear and have a hysteresis, and are influenced by the speed of the deformation. It is therefore not easy to determine the possible injuries occurring in the course of rescue operations involving the use of jump cushions, as they depend on many individual human factors, including the aforementioned mechanical properties.

## Conclusions

In the study conducted, the g-force values measured were up to  $264 \text{ m/s}^2$  (which corresponds to approx. 27 g). Such large g-force values can pose a significant risk to the human body, especially if their duration is long.

In each test, the duration of the maximum g-force (exceeding 95% of the maximum value) ranged from 3 to 50 ms. Such a short duration of high g-force values can reduce the risk of serious injuries, but still involves some risks, especially for the spine and the osteoarticular system.

A high value of the g-force and its long duration can have a significant impact on human safety. G-force values above 10 g, 15 g and especially 20 g can result in serious injuries, especially when present for a relatively long time. The initial contact of the dummy with the jump cushion surface did not generate large g-force values, which means that the jump cushions effectively absorbed the kinetic energy by gradually increasing the reaction force and reducing the initial g-force; later, a sudden increase in the g-force was observed, connected to the maximum compression of the jump cushion case.

The g-force values recorded after the first contact of the dummy with the jump cushion surface indicate a dynamic, oscillating properties of the jump cushion which, after absorbing the dummy's energy, does not bounce it off in a way that could cause a repeated increase of its velocity in the upward direction.

Flexibility of a jump cushion determines the absorption of the energy of the fall – a slow decompression and a lack of a clear bounce reduce the risk of secondary injuries caused by the bounce of the body.

The variability of the g-force and its duration, as well as the standard deviations, indicate that the effectiveness of jump cushions in the attenuation of forces depends on many factors, such as the weight of the dropped object, the precise drop height and the specific characteristics of the jump cushion case material.

Jump cushions can still be improved in terms of their absorption properties by modifying their design and the materials from

zarówno w ich konstrukcje, jak i materiały, z których zostały wykonane. Należy przy tym zauważyć, że najwyższe znane dopuszczalne przeciążenie, jakie przeżył człowiek, wynosiło niecałe  $1962 \text{ m/s}^2$  i trwało ok. 3 ms. Z biomechaniki wiemy natomiast, że właściwości mechaniczne kości, chrząstek, więzadeł, ścięgien i mięśni, które przenoszą siły i momenty w naszym przypadku pochodzące od przeciążeń, wynikają z ich funkcji. Ponadto w zależności od tego z jaką częścią układu przenoszenia obciążeń ciała ludzkiego mamy do czynienia występują bardzo zróżnicowane wielkości wytrzymałości [26]. Pod tym względem ciało ludzkie to skomplikowany układ połączeń, niezwykle trudny do zasymulowania np. w obliczeniach MES. Właściwości kości, chrząstek, więzadeł, ścięgien i mięśni zależą również od wieku, są nieliniowe i posiadają histerezę, a wpływ na nie ma prędkość odkształcania. Ustalenie ewentualnych obrażeń powstałych w wyniku ratowania osób z użyciem skokochronów nie jest więc proste, gdyż zależy od wielu indywidualnych czynników ludzkich, w tym wspomnianych właściwości mechanicznych.

## Wnioski

W przeprowadzonych badaniach uzyskane przeciążenia wynosiły do  $264 \text{ m/s}^2$  (co odpowiada ok. 27 g). Tak wysokie wartości przeciążenia mogą stanowić istotne zagrożenie dla ciała człowieka, szczególnie jeśli czas oddziaływania jest długi.

W każdej z prób czas trwania maksymalnych przeciążeń (przekroczenie 95% wartości maksymalnej) wyniósł od 3 do 50 ms. Tak krótki czas działania dużych przeciążeń może zmniejszać ryzyko ciężkich urazów, ale nadal niesie zagrożenie, szczególnie dla kręgosłupa/układu kostno-stawowego.

Wysokie wartości przeciążeń i ich długotrwałe oddziaływanie mogą mieć istotny wpływ na bezpieczeństwo człowieka. Przeciążenia powyżej 10, 15, a szczególnie 20 g mogą prowadzić do poważnych urazów, szczególnie gdy utrzymują się przez relatywnie dłuższy czas. Zarejestrowane przeciążenia po pierwszym zetknięciu manekina z powierzchnią skokochronu wskazują na dynamiczne, oscylacyjne właściwości skokochronu, który po absorpcji energii manekina nie odbija go w sposób, który mógłby spowodować ponowny wzrost prędkości w górę.

Elastyczność skokochronu decyduje o pochłanianiu energii upadku – powolne rozprężanie i brak wyraźnego odbicia zmniejszają ryzyko wtórnych urazów wynikających z odbicia ciała.

Zmienność przeciążeń i czasów ich trwania, jak również wielkość odchylenia standardowego wskazują, że skuteczność skokochronów w tłumieniu sił zależy od wielu czynników, takich jak: masa zrzuconego obiektu, dokładna wysokość zrzutu oraz specyfika materiału powłoki.

W konstrukcji skokochronów można w dalszym ciągu dokonywać ulepszeń ich właściwości absorpcyjnych, modyfikując rozwiązania konstrukcyjne, jak i materiały, z których zostały wykonane, ponieważ korzyści wynikające ze stosowania skokochronów przewyższają ryzyka z nim związane.

W przyszłości mogą okazać się niezbędne badania z manekinem o większej masie, co podyktowane jest tendencją społeczną do przybierania na wadze oraz nieograniczanie się do

which they are made, because the benefits resulting from their use exceed the associated risks.

In the future, it may be necessary to conduct studies with heavier dummies, due to the increasing body weight of most members of the public, also without restricting the places where the dummy drops on the upper surface of the jump cushion, which may affect the values of the occurring g-forces.

innych miejsc upadku na powierzchnie górną skokochronu, co może mieć znaczenie dla wielkości oddziaływujących przeciążeń.

## Literature / Literatura

- [1] Scurlock J.T. 1974, US Patent 3,851,730, *Inflatable safety cushion system for controlled deceleration from falls of great height*, <https://patentimages.storage.googleapis.com/25/12/59/47561f08f91250/US3851730.pdf> [dostęp: 3.11.2024].
- [2] Molski S., Kwaśniewski J., Gołkowski M., Grzybowski J., Czyż J., *Skokochrony jako alternatywne rozwiązanie względem asekuracyjnych siatek bezpieczeństwa do ochrony zbiorowej podczas prac na wysokości*, [https://winntbg.bg.agh.edu.pl/NTT\\_tom1\\_129](https://winntbg.bg.agh.edu.pl/NTT_tom1_129), [https://doi.org/10.7494/978-83-66727-47-2\\_8](https://doi.org/10.7494/978-83-66727-47-2_8). [dostęp: 3.11.2024].
- [3] Lorsbach P. Jump rescue apparatus US Patent no. 4875548; 1989. [dostęp: 3.11.2024]. <https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/db/0e/9fedfaa57d70a5/US4875548.pdf> [<https://patents.google.com/patent/EP0317904B1/de?q=EP0317904B1>] [dostęp: 3.11.2024].
- [4] Faraj R., Popławski B., Gabryel D., Kowalski T., Hinc K. *Analyses of the rescue cushion design – sensitivity study w: 7th European Conference on Structural Control Book of Abstracts and Selected Papers*, red. J. Holnicki-Szulc, D. Wagg, Ł. Jankowski, (Warszawa, wydawnictwo Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, 2022), 138.
- [5] Marklund P-O., Nilsson L., *Simulation of airbag inflation processes using a coupled fluid structure approach*. *Comput Mech* 2002;29:289–97, <https://doi.org/10.1007/s00466-002-0341-z>.
- [6] Xiao Z., Wang L., Mo F., Zhao S., Liu C., *Optimal design of pre-triggering airbag system for occupant protection performance during frontal crashes*, “*Journal of Automobile Engineering*” 2018, 233(11), 2850–62, <https://doi.org/10.1177/0954407018807330>.
- [7] Farmer M.E., Jain A.K., *Smart automotive airbags: occupant classification and tracking*, “*IEEE Trans Veh Technol*” 2007, 56(1), 60–80, <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.883768>.
- [8] Tamura T., Yoshimura T., Sekine M., Uchida M., Tanaka O., *A wearable airbag to prevent fall injuries*, “*IEEE Trans Inf Technol Biomed*” 2009, 13(6), 910–4, <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2033673>.
- [9] Zhu H., Yang J., Zhang Y., *Dual-chamber pneumatically interconnected suspension: modeling and theoretical analysis*, “*Mech Syst Signal Process*” 2021, 147, 107125, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107125>.
- [10] Huh S., Shim D.H., *A vision-based automatic landing method for fixed-wing UAVs*, “*J Intell Robot Syst*” 2010, 57(1–4), 217–31, <https://doi.org/10.1007/s10846-009-9382-2>.
- [11] Cadogan D., Sandy C., Grahne M., *Development and evaluation of the mars pathfinder inflatable airbag landing system*, “*Acta Astronaut*” 2002, 50(10), 633–40, [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00215-6).
- [12] Faraj R., Popławski B., Gabryel D., Kowalski T., Hinc K., *Adaptive airbag system for increased evacuation safety*, “*Engineering Structures*” 2022, 270, 114853-1-5, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114853>.
- [13] DIN 14151-3:2024-04 Sprungrettungsgeräte - Teil 3: Sprungpolster 16 - Anforderungen, Prüfung <https://dx.doi.org/10.31030/3517953>.
- [14] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 31 sierpnia 2021 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpieczeństwa i higieny służby strażaków Państwowej Straży Pożarnej (Dz.U. 2020 poz. 1123, 1610, 2112 oraz 202 poz. 180, 464), <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-2021-1681,19145487.html> [dostęp: 3.10.2024].
- [15] Jasiński T., *Znaczenie ukierunkowanego treningu fizycznego w zwiększaniu tolerancji organizmu pilota wojskowego na przyspieszenia +Gz, AWF im. Bronisława Czecha w Krakowie*, „*Studia i Monografie*” 32, Kraków 2005.
- [16] Breszka M.A., *Wpływ ukierunkowanego treningu fizycznego podchorążych Lotniczej Akademii Wojskowej na tolerancję przyspieszeń +G*, Rozprawa doktorska, Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie, Warszawa 2022, [https://awf.edu.pl/\\_data/assets/pdf\\_file/0004/54715/M.Breszka\\_rozprawa\\_dr.pdf](https://awf.edu.pl/_data/assets/pdf_file/0004/54715/M.Breszka_rozprawa_dr.pdf) [dostęp: 3.10.2024].
- [17] Zotomayora C., *Ile przeciążenia może wytrzymać przeciętny człowiek?*, <https://www.solidsmack.com/pl/fabrication/how-much-g-force-can-an-average-human-withstand> [dostęp: 3.11.2024].
- [18] *Medycyna lotnicza i kosmiczna*, Barański S. (red.), PZWL, Warszawa 1977.
- [19] Whinnery J.E., Jackson W.G., *Reproducibility of +Gz tolerance testing*, “*Aviat Space Environ Med*” 1979, 50(8), 825-8, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/496752/> [dostęp: 3.11.2024].
- [20] Whinnery J.E., Jones D.R., *Recurrent +Gz-induced loss of consciousness*, “*Aviation, space, and environmental medicine*” 1987 58(10):943-947 PMID: 3675465 - [europepmc.org](http://europepmc.org).



- [21] Whinnery J.E., *Recognizing+ Gz-induced loss of consciousness and subject recovery from unconsciousness on a human centrifuge*, "Aviation, space, and environmental medicine" 1990 61(5):406-411 PMID: 2350309 - europepmc.org.
- [22] Whinnery J.E., *Medical considerations for human exposure to acceleration-induced loss of consciousness*, "Aviation, space, and environmental medicine" 1991, 62(7), 618-623 PMID: 1898295.
- [23] Stoll M., *Human tolerance to positive G as determined by the physiological end points*, "The Journal of Aviation Medicine" 1956, 27(4), 356–367.
- [24] Snyder R.G., *Human Impact Tolerance*, "SAE Transactions" 1970, 79, 1375–1452, <https://doi.org/10.4271/700398>.
- [25] SAEJ211-1:1995.03 Instrumentation for impact test – part 1 – electronic instrumentation [dostęp: 3.11.2024].
- [26] 057/BS/MNiSW/2022 Metody badawcze pojazdów pożarniczych oraz narzędzi i sprzętu pożarniczego CNBOP-PIB, 2023 [materiał niepublikowany].
- [27] 057/BS/MEiN/2023 Metody badawcze pojazdów pożarniczych oraz narzędzi i sprzętu pożarniczego CNBOP-PIB, 2024 [materiał niepublikowany].
- [28] Cygan Sz., *Biomechanika Inżynierska*, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Warszawska, <https://www.docsity.com/pl/docs/biomechanika-inzynierska-1/9551591/> [dostęp: 3.10.2024].

**JACEK ROGUSKI, PH.D. PROF. OF THE INSTITUTE** – focuses in his research work on aspects related to the safety of use of technical equipment in the firefighting sectors and the problems of operation of technical equipment. His current work focuses on issues related to the link between, on the one hand, ergonomics and ergonometry, and on the other hand, the optimization of the processes of operation and reliability of equipment using elements of the theory of reliability and virtual reality, and improving the safety of rescue operations by implementing innovative technologies. He is the author or co-author of a number of articles, monographs and presentations given at conferences in Poland and abroad. His scientific output has been recognized with 19 international and domestic awards granted at invention exhibitions for his research or development works and by his assignment to various functions in scientific committees of 10 international and domestic scientific conferences. He is the co-author of 5 patents and designs.

**LESZEK JURECKI, M.SC. ENG.** – a graduate of the Department of Mechanical Engineering of the Koszalin University of Technology and a deputy head of the CNBOP-PIB's Laboratory of Fire Protection Units' Technical Equipment. He is the author and co-author of a number of publications on operation studies of fire protection vehicles and equipment. He is also the author and reviewer of CNBOP-PIB's standards in the area of fire protection vehicles and pumps. A researcher on research and development projects in the area of broadly defined fire protection technology. He specializes in the problems of stability and strength of hydraulic lifts, mechanical ladders and jump cushions, as well as the reliability of fire protection equipment. In his laboratory work, he is a specialist in fire protection vehicles, water and foam systems and fire protection pumps, as well as fire protection fittings and equipment.

**DR INŻ. JACEK ROGUSKI, PROFESOR INSTYTUTU** – zajmuje się naukowo aspektami związanymi z zagadnieniami bezpieczeństwa użytkowania wyposażenia technicznego w straży pożarnej oraz problemami eksploatacji urządzeń technicznych. Obecnie prowadzone prace koncentrują się na zagadnieniach związanych z powiązaniem aspektów ergonomii i ergonometrii z optymalizacją procesów eksploatacji i niezawodności sprzętu z wykorzystaniem elementów teorii niezawodności i wirtualnej rzeczywistości oraz podniesienia bezpieczeństwa działań ratowniczych przez wdrażanie innowacyjnych technologii. Jest autorem i współautorem szeregu artykułów i monografii oraz wystąpień na konferencjach krajowych i zagranicznych. Dorobek naukowy został potwierdzony przyznaniem 19 międzynarodowych i krajowych wyróżnień na wystawach wynalazczości wynikających z prowadzenia badań naukowych lub prac rozwojowych oraz pełnienie funkcji w komitetach naukowych 10 międzynarodowych oraz krajowych konferencji naukowych. Współautor 5 patentów i wzorów.

**MGR INŻ. LESZEK JURECKI** – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, zastępca kierownika Zespołu Laboratoriów Technicznego Wyposażenia Jednostek Ochrony Przeciwożarowej CNBOP-PIB. Autor i współautor szeregu publikacji z obszaru badań eksploatacyjnych pojazdów pożarniczych i sprzętu pożarniczego. Ponadto współautor i recenzent standardów CNBOP-PIB w obszarze pojazdów i pomp pożarniczych. Wykonawca projektów badawczo-rozwojowych związanych z szeroko rozumianą techniką pożarniczą. Specjalizuje się w zagadnieniach stateczności i wytrzymałości podnośników hydraulicznych, drabin mechanicznych i skokochronów, a także niezawodności sprzętu pożarniczego. W pracy laboratoryjnej jest specjalistą z zakresu pojazdów pożarniczych, układów wodno-pianowych i pomp pożarniczych, a także armatury i sprzętu pożarniczego.

**RYSZARD ŁYSZCZEK, ENG.** – a graduate of the Department of Transportation of the Warsaw University of Technology and a deputy head of the CNBOP-PIB Laboratory of Fire Protection Units' Technical Equipment. A researcher on research and development projects in the area of fire protection technology. His research focuses on the problems of stability and strength of mechanical ladders, as well as jump cushions and lifting airbags. In his laboratory activities, he is a specialist in fire protection vehicles, water and foam systems and fire protection pumps, as well as technical equipment used by firefighters and rescue services.

**KRZYSZTOF CYGAŃCZUK, PH.D. ENG.** – completed his graduate studies at the Szczecin University and doctoral studies at the War Studies University in Warsaw, as well as post-graduate studies in the field of foreign service at the National Defence Academy, studies in data protection and information security at the Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw and studies in crisis management at the NATO Defence College in Rome and the NATO School (3 x Oberammergau). He is an assistant professor at the Department of Research Studies and Scientific Projects at the CNBOP-PIB in Józefów. He is the author and co-author of more than 30 scientific papers in the field of environmental engineering and security studies. He has participated in many international and domestic scientific conferences as member of scientific committees. A representative of Technical Committee no. 176 for Military Technology and Supply at the Polish Committee for Standardization.

**INŻ. RYSZARD ŁYSZCZEK** – absolwent Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, zastępca kierownika Zespołu Laboratoriów Technicznego Wyposażenia Jednostek Ochrony Przeciwożarowej CNBOP-PIB. Realizator projektów badawczo-rozwojowych w obszarze techniki pożarnej. Zajmuje się tematyką związaną ze statecznością i wytrzymałością drabin mechanicznych, a także prowadzi działalność w dziedzinie skokochronów i poduszek podnoszących. W działalności laboratoryjnej jest specjalistą z zakresu pojazdów pożarniczych, układów wodno-pianowych i pomp pożarniczych, a także wyposażenia technicznego stosowanego przez straż pożarną i służby ratownicze.

**DR INŻ. KRZYSZTOF CYGAŃCZUK** – ukończył studia magisterskie na Uniwersytecie Szczecińskim oraz studia doktoranckie w Akademii Sztuki Wojennej w Warszawie, a także studia podyplomowe z zakresu służby zagranicznej w Akademii Obrony Narodowej, ochrony danych i bezpieczeństwa informacji na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie oraz zarządzania kryzysowego w NATO Defence College (Rzym) i NATO School (3 x Oberammergau). Jest adiunktem w Dziale Prac Studialnych i Projektów Naukowych w CNBOP-PIB w Józefowie. Autor i współautor ponad 30 artykułów naukowych w dziedzinie inżynierii środowiska oraz nauk o bezpieczeństwie. Uczestnik wielu konferencji naukowych w formie międzynarodowej i krajowej pełniąc funkcje w komitetach naukowych. Przedstawiciel Komitetu Technicznego nr 176 ds. Techniki Wojskowej i Zaopatrzenia w Polskim Komitecie Normalizacyjnym.