

616.13/14-001.45

SIMULACE ÚČINKŮ RÁZOVÉ VLNY OD PRONIKAJÍCÍ STŘELY MALÉ RÁŽE NA CÉVNÍ SYSTÉM ČLOVĚKA

Ludvík JUŘÍČEK, Jan KOMENDA
Vojenská akademie, Brno

Souhrn

V článku jsou analyzovány účinky rázové vlny vyvolané pronikem malorázové střely tkání na cévní systém člověka. Jsou zde uvedeny výsledky experimentu provedeného nástřelem náhradních modelů části dolní končetiny, při němž byla kvantifikována odezva cévního systému na nekomplikované střelné poranění.

Klíčová slova: Simulace; Tlaková vlna; Pronikající střela; Cévní systém; Substituční model; Nekomplikované střelné poranění.

Simulation of ShockWave Effects Caused by a Small Calibre Penetrating Projectiles on the Human Vessel System

Summary

The article presents an analysis of shock wave effects developed when a small calibre bullet penetrates the tissue in human blood – vessel system surroundings. The results of experimental verification carried out by shooting into a substitute model of a lower limb part are presented to enable a quantitative response evaluation of the vessel system in case of a non - complicated injury.

Key words: Simulation; Blast wave; Penetrating projectile; Vessel system; Substitute model; Non-complicated injury.

Úvod

V dostupné literatuře zabývající se ranivou balistikou je poměrně velké množství informací o přímých účincích malorázových střel a střepin na živé tkáně i jejich neživé ekvivalenty, ale poměrně málo údajů je k dispozici o nepřímých účincích střel a střepin na cévní systém člověka, zejména na velké magistralní cévy, v jejichž blízkosti střela nebo střepina proniká, aniž by je přímo zasáhla.

Ve snaze přispět k rozvoji vědeckého poznání v této nepříliš probádané oblasti jsme na našem pracovišti provedli experiment spadající do terminální balistiky malorázových střel zaměřený na simulaci účinků tkáněmi pronikajících puškových a výkonných revolverových střel se zvýšeným účinkem na cévní systém člověka. Pro tento experiment jsme navrhli fyzikální model části stehna tvořený blokem náhradního materiálu (NM) s náhradní tepnou. K výrobě reálných modelů byly jako substitute živé tkáně použity tyto náhradní materiály:

- 20% želatinový roztok (Ž-20),
- směs petrolátu s parafinem v poměru 75/25 % (PP75/25-III),
- plastelína – modelovací hmota šedá (PL).

Základní fyzikální charakteristiky těchto materiálů uvádí tabulka 1. Číselné hodnoty byly stanoveny experimentálně na Katedře zbraňových systémů Vojenské akademie v Brně ve shodě s (5).

Tabulka 1

Hodnoty základních fyzikálních charakteristik NM

Charakteristika	Rozměr	Náhradní materiál		
		Ž-20	PP75/25-III	PL
Hustota ρ	kgm ⁻³	1100	933	1710
Index tečení n	1	0,605	0,643	0,866
Dynamická viskozita η	10 ⁻³ [Pas]	4,47	10,98	13,79

Vzorky prvních dvou NM (Ž-20 a PP75/25-III) připravované pro balistický experiment byly upraveny do bloků válcového tvaru o průměru 15 cm a výšce zhruba 20 cm. Vzorky byly vyrobeny litím do připravených forem s následným tuhnutím při pokojové teplotě. U materiálu PP75/25-III byl ma-

nuálně (vymícháváním) eliminován vznik dutin a vtaženin při tuhnutí. Model vyrobený z třetího materiálu (PL) byl upraven do tvaru kvádru mechanicky (pěchováním) do dřevěné formy o rozměrech 15x15x20 cm. Vzorky vyrobené z PP75/25-III a PL byly temperovány na teplotu okolního prostředí (21 °C), vzorek Ž-20 na teplotu 4 °C, která je pro tyto účely doporučována. K imitaci stehenní tepny jsme použili silnostěnnou silikonovou trubici, která byla vedena podélnou osou vzorku.

Poznámka: K imitaci krevního řečiště nebyla použita skutečná náhrada stehenní tepny používaná k transplantacím. Ta je pro svou pórovitost stěn k účelům tohoto experimentu nevhodná. K sestavení fyzikálních modelů byla proto použita silnostěnná silikonová trubice, která se svými rozměrovými a mechanickými vlastnostmi nejvíce blíží vlastnostem a uspořádání skutečné tepny.

Do žádného z použitých modelů nebyla zařazena stehenní kost ani její náhrada. Při přípravě vlastního střeleckého experimentu byla celá hydraulická soustava imitující oběhový systém naplněna **krevní náhradou** (koloidní infuzní roztok Gelafundin). Před vlastním postřelováním byl vytvořen v systému požadovaný tlak a ze systému byl rovněž odstraněn vzduch.

Měřicí stanoviště balistického tunelu viz barevná příloha s. I, obr. 1–2.

Cíl experimentu

Vedle základního cíle, který spočíval v ověření funkčnosti navrženého fyzikálního modelu, použitelnosti měřicí aparatury tlaku a vypovídací schopnosti experimentu podle navrženého postupu, jsme si stanovili tyto dílčí cíle:

- posoudit chování NM, zejména z hlediska jeho schopnosti přenést energii rázové vlny vyvolané pronikem střely v tkáni;
- na základě určení tlakových extrémů v cévě stanovit předpokládané účinky střely na vlastní cévu v blízkosti střelného kanálu;
- predikovat účinek pronikající střely na cévní systém člověka.

Experiment byl zaměřen na simulaci nekomplikovaného střelného poranění stehna, kdy střela pronikne pouze měkkými tkáněmi a nezasáhne přímo

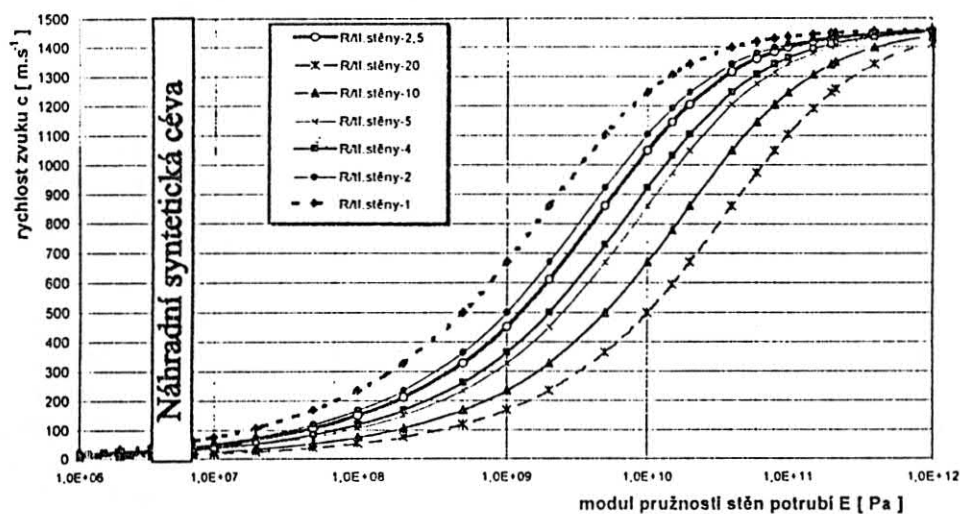
velkou cévu ani stehenní kost. Ke střelbě byly použity dva balisticky odlišné zbraňové systémy ráže 7,62 mm vz. 43 a 357 Magnum (Eldorado).

Hydraulická měření a záznam tlaku v cévě

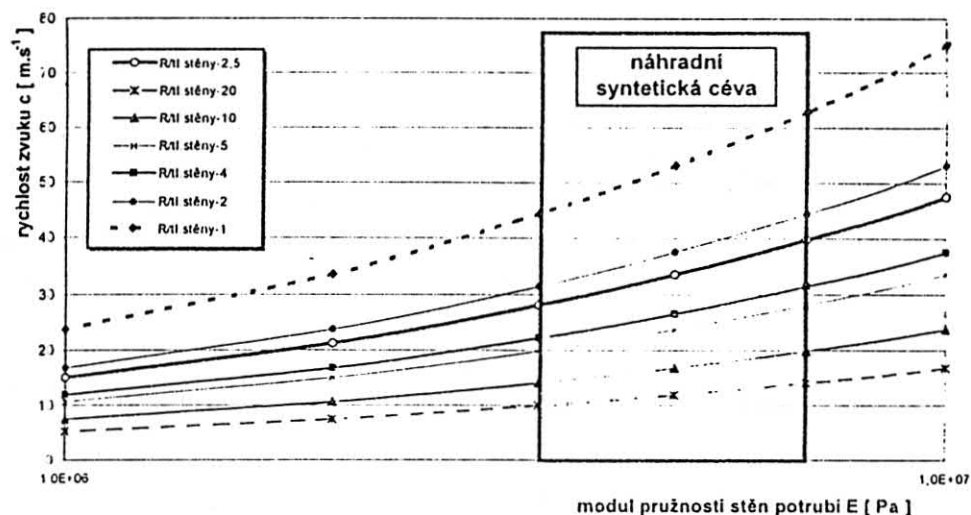
K simulaci cévního systému jsme použili silnostěnnou silikonovou trubici s vnějším průměrem $2R = 10$ mm a tloušťkou stěny $t = 2$ mm (světlost trubice 6 mm). Rychlost šíření zvukové vlny v trubici zaplněné tekutinou je závislá na modulu pružnosti E (MPa) materiálu trubice a poměru R/t trubice. Modul pružnosti použité trubice byl určen experimentálně a činí 7 MPa, poměr $R/t = 2,5$.

Při predikci rychlosti šíření zvukové vlny v potrubí zaplněném vodou jsme vyšli z diagramu na grafu 1, na kterém jsou znázorněny křivky odpovídající trubici o různé geometrii. Křivka patřící použité trubici je na obrázku zobrazena plnou tlustou čarou. Podrobnější diagram na grafu 2 zobrazuje možnou oblast modulů pružnosti běžně používaných materiálů náhradních syntetických cév o modulech pružnosti blízkých se rozsahu 3,5–7,0 MPa. Z křivky odpovídající geometrii použité trubice lze odečíst pro modul pružnosti $E = 7$ MPa hodnotu rychlosti šíření zvukové vlny $c = 40 \text{ ms}^{-1}$. Tato rychlost odpovídá potrubí s velmi poddajnou stěnou zaplněnou málo stlačitelnou tekutinou.

K měření spojitého průběhu tlaku uvnitř syntetické cévy byly použity tlakové piezoelektrické převodníky DMP 331 s měřicím rozsahem –1 až 7 barů (1 bar = 0,1 MPa) u snímače S_1 a –1 až 1 bar u snímače S_2 . Umístění obou snímačů (schéma 1) vycházelo z požadavku co možná nejvýstižnějšího postižení šíření tlakové vlny v měřeném objektu. Snímač S_1 byl proto umístěn na cévě těsně nad vzorkem (modelem) ve vzdálenosti 10–20 cm od předpokládaného místa vniku střely do vzorku. Náhradní céva byla ve spodní části uzavřena v úrovni dna vzorku zátkou. Horní neuzavřená část cévy ústila do kruhové ocelové nádoby (průměr 25 cm) uložené nad vzorkem, kde byla svinuta v délce 110 cm do spirály. Snímač S_2 byl umístěn na konci této cévy opět přes připojovací T-kus s plnicím ventilem tak, aby bylo možné celý hydraulický systém zaplnit náhradní krví, vyvodit v systému požadovaný hydrostatický tlak a odstranit z cévy případné vzduchové bubliny. Celý prostor mezi svinutou cévou se snímačem S_2 a nádobou byl vyplněn molitanovou drtí, přikryt víkem a zatížen 5 kg



Graf 1: Závislost rychlosti šíření zvuku c (m/s) v potrubí zaplněném vodou na modulu pružnosti stěn potrubí E (MPa)



Graf 2: Zobrazení možné oblasti modulů pružnosti běžně používaných materiálů náhradních cév. Silně orámovaná oblast vymezuje na logaritmické stupnici (vodorovná) rozsah modulů pružnosti E od 3,5 do 7,0 MPa

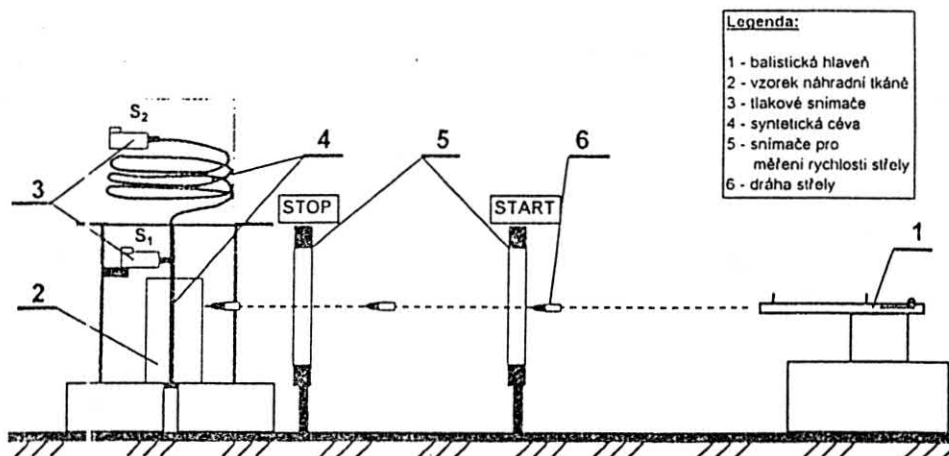


Schéma 1: Měřicí stanoviště – balistický tunel (VA v Brně)

závažím, simulujícím nitrosvalové napětí okolních tkání. Uvedenými úpravami jsme dosáhli před nástřelem počátečního tlaku v cévě v místě připojení snímače S_1 v úrovni 9 kPa (67 mm Hg) a v místě tlakového snímače S_2 asi 7 kPa (52 mm Hg). Hodnoty těchto tlaků byly poněkud nižší, než byl původní předpoklad.

K záznamu průběhu tlaku jsme použili **duální měřicí systém**.

Jedna větev tohoto systému byla vytvořena z digitálního paměťového osciloskopu HP 54 645 A, který umožňoval grafický záznam průběhu tlaku z obou snímačů současně. Vzhledem k odlišným rozsahům snímačů neposkytoval tento grafický záznam reálnou představu o úrovni dosažených tlaků, ale pouze o jejich časových průbězích. Z těchto důvodů sloužil tento záznamový kanál pouze jako záložní.

Druhá (hlavní) větev měřicího systému byla vytvořena na bázi měřicího počítače s příslušným hardwarovým i softwarovým vybavením. Měřený signál z obou snímačů byl vzorkován frekvencí 10 tisíc vzorků za sekundu na kanál s hloubkou záznamu 7000 hodnot na kanál. Zvolená frekvence vzorkování i počet zaznamenávaných hodnot byly zcela dostačující pro spojitě vykreslení požadovaných průběhů tlaků.

Balistická charakteristika experimentu

Zkušební vzorek s cévou a snímači byl na střelnici uložen a fixován na podstavec zaručující jeho stabilitu při postřelování. Po připojení snímačů na záznamová zařízení byl vzorek postupně nástřelen 2 střelami tak, aby byl využit celý objem vzorku, a nedocházelo tak k ovlivnění výsledků sousedními střelnými kanály. Vzorek byl umístěn 5 m, resp. 3 m od ústí hlavně zbraně.

Ke střelbě bylo použito:

- a) **Puškové střelivo (pro samopal) ráže 7,62x39** (v AČR vzor 43) s celopláštěvou střelou o hmotnosti 7,9 g. Náboje standardní konstrukce byly vystřelovány ze zkušební balistické hlavně (v_0 kolem 750 m/s, $E_0 = 2220$ J). Vzdálenost ústí hlavně od vzorku byla 5 m. Při každém výstřelu byla měřena pomocí indukčních nekontaktních snímačů a optického hradla rychlost střely v_3 , kterou lze považovat vzhledem k poloze vzorku za rychlost dopadovou.

- b) **Revolverové střelivo ráže 357 Magnum Eldorado (PMC) s expanzivní střelou** o hmotnosti 9,73 g. Náboje byly vystřelovány z revolveru Taurus s třípalcovou hlavní (v_0 kolem 340 m/s, $E_0 = 560$ J). Vzdálenost ústí hlavně od vzorku byla 3 m. Při každém výstřelu byla také stejným zařízením měřena dopadová rychlost střely v_1 .

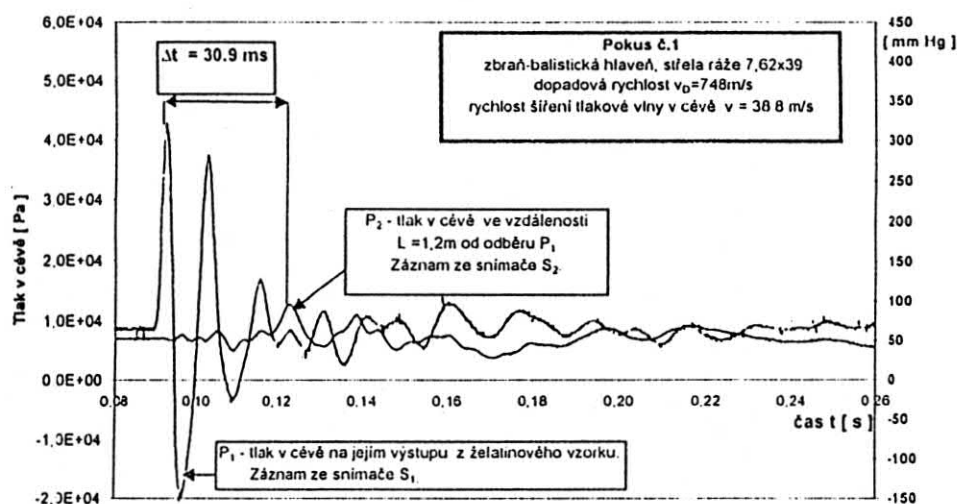
Záměrný bod na ploše vzorku byl volen u obou druhů střeliva tak, aby střela pronikla vzorkem ve vzdálenosti 3–4 cm od zkušební cévy (viz barevná příloha s. II, obr. 3–6). V obou případech střely pronikaly zkušebním modelem s přebytkem kinetické energie (průstřely). Velikost předané energie nemohla být z důvodu absence měření výletové rychlosti střely po opuštění vzorku stanovena.

Hodnocení dosažených výsledků

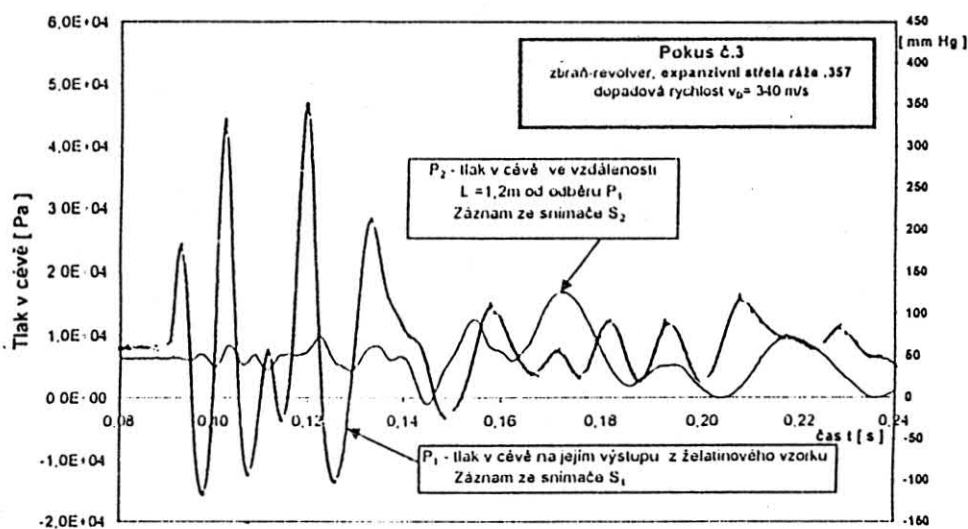
Experimentálně zjištěné záznamy průběhů tlaku jsou dokumentovány v diagramech na grafu 3 a 4. Na grafu 3 jsou znázorněny průběhy tlaku z obou snímačů v závislosti na čase pro první nástřel ráže 7,62x39 a na grafu 4 odpovídá v pořadí třetímu nástřelu s ráží 357 Magnum Eldorado (PMC).

Zobrazené diagramy uvádějí závislosti v časovém intervalu od 0,08 do 0,26 sekundy.

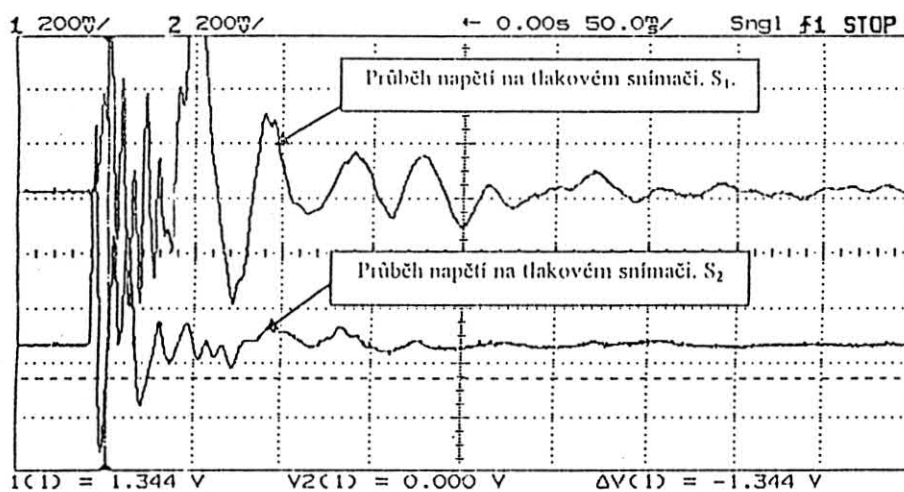
Oba popsané pokusy (nástřely) byly provedeny na modelu vyrobeném z želatiny (Ž-20). Model vyrobený ze směsi PP75/25-III neposkytl i přes plnou funkční schopnost měřicí aparatury žádné měřitelné výsledky. Měření provedená na plastelínovém modelu (PL) selhala v důsledku technických problémů při experimentu, kdy prvním nástřelem ráží 7,62 mm došlo k totální destrukci vzorku bez získání použitelného záznamu průběhu tlaku hlavním měřicím řetězcem. Náhradní signál byl zachycen osciloskopem a má pouze informativní význam (graf 5). Z průběhu obou signálů od snímačů S_1 a S_2 je zřejmá podobnost s průběhy získanými u želatiny. Nejsou však k dispozici hodnoty tlakových špiček. Pro uvedené průběhy (graf 3 a 4) je charakteristický velmi prudký nárůst tlaku p_1 v cévě (průměrná rychlost nárůstu tohoto tlaku dosahuje hodnoty 8–10 MPa/s, resp. 60–75 mm Hg/s!!) na maximální hodnoty překračující 30–40 kPa (200 až 300 mm Hg), u ráže 357 Magnum dokonce téměř



Graf 3: Průběhy tlaku v cévě při průstřelu zkušebního želatinového bloku celopláštovou puškovou střelou ráže 7,62x39 (1. nástřel).



Graf 4: Průběhy tlaku v cévě při průstřelu zkušebního želatinového bloku revolverovou expanzivní střelou ráže 357 Magnum Eldorado (3. nástřel).



Graf 5: Průběhy tlaku v cévě při průstřelu zkušebního plastelinového bloku celopláštovou puškovou střelou ráže 7,62x39. (Záznam pořízen na osciloskopu HP-54 645 A).

50 kPa (tj. 370 mm Hg). Po překročení maxima nastává stejně rychlý pokles tlaku na hodnoty minus 10–20 kPa. Následný nárůst tlaku u ráže 7,62 mm je již méně výrazný a po několika tlumených oscilacích se tlak ustálí na jeho původní hodnotě. U ráže 357 Magnum je absolutní tlakový extrém (graf 4) časově posunut za prvním lokálním extrémem tlakového vzruchu. Celková doba trvání děje nepřekročila **několik desetin sekundy**, přičemž do 0,05 sekund tlak poklesl pod hodnotu 10 kPa.

Tlakové extrémy p_2 zjištěné druhým snímačem S_2 ve vzdálenosti $L = 1,2$ m od odběru p_1 jsou neporovnatelně nižší (do 100 mm Hg). **Tento výrazný pokles tlakové špičky je dán vysokou elasticitou náhradní tkáně i stěn syntetické cévy.**

Porovnáním časové expozice tlakových maxim z obou snímačů (S_1 a S_2) byla stanovena rychlost šíření tlakové vlny v náhradní cévě $v = 39$ m/s (viz graf 3 – první nástřel). Tato hodnota rychlosti velmi dobře koresponduje s dříve uvedeným údajem odečteným z diagramu na grafu 2.

Při každém nástřelu byla střela po průniku zkušebním vzorkem zachycena blokem bavlny pro vyhodnocení jejich tvarových změn. Celoplošné střely ráže 7,62 mm pronikaly fyzikálními modely bez deformace, expanzivní střely ráže 357 Magnum podléhaly řízené expanzi, při níž se rozevřela přední část a pronikavě se zvýšila odporová plocha střely. Střední hodnota radiálního rozměru střely (průměru) po expanzi jejího těla v želatinovém bloku se pohybovala v průměru kolem 17 mm ($KE = 189\%$), finální hmotnost střely činila 9,55 g, tj. 98 procent původní hmotnosti před průnikem (viz barevná příloha s. III, obr. 7).

Lékařské hodnocení účinků rázové vlny

Tlakový rozdíl 450 mm Hg vyvolaný kombinovaným účinkem přetlaku (+300 mm Hg) a podtlaku (–150 mm Hg) uvnitř stehenní tepny může vyvolat tyto patologické změny:

a) U vlastní cévy:

- poškození endotelu (cévní výstelky) s negativními následky (mikroembolizace, později jizvení tepny),
- odtržení arterosklerotického plátu s možností následné embolické komplikace,

- poškození periferních cév, tvorba trombů v kapilárách.

b) U organismu

- prohloubení šoku **reflexním mechanismem** při poškození tepny.

Poškození tepny kombinovaným účinkem přetlaku a podtlaku bude pravděpodobně méně závažné, než její **přímé poškození rázovou vlnou** šířící se tkáněmi radiálně do okolí střelného kanálu. Účinkem rázové vlny je céva odtlačována do stran a natahována, čímž může dojít (po překročení meze pružnosti tkáně) k ruptuře její stěny.

Poznámka: Uvedená poškození cévního systému budou v případě reálného postřelení výraznější při hypertenzi a dále u tepny s pokročilými sklerotickými změnami v důsledku snížené elasticity její stěny.

Náhradní céva nebyla při experimentu vzhledem ke své výrazně vyšší pevnosti ($E = 7$ MPa) poškozena. Pružností cévního systému velikost tlakových maxim s rostoucí vzdáleností od místa vstřelu výrazně klesá, lze tedy předpokládat, že **funkce srdce a jiných vitálních orgánů** nebude tlakovými změnami výrazněji ovlivněna.

Závěr

Provedený experiment prokázal schopnost kvantifikovat odezvy cévy na šíření rázové vlny vyvolané průnikem střely NM, avšak pouze u želatiny (Ž-20). Další náhradní materiály použité k sestavení fyzikálních modelů, zejména směs petrolátu s parafinem, vzhledem ke svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem tuto schopnost nemají. Proto není možné s nimi pro experimenty tohoto druhu nadále počítat.

Pro ověření uvedených závěrů a jejich objektivizaci bude v dalším období nutné rozšířit experiment větším počtem provedených pokusů s použitím širšího sortimentu MRS, a získat tak výsledky na statisticky významnějším počtu vzorků.

Použití „úplného“ substitučního modelu stehna doplněného stehenní kostí může v budoucnosti přinést cenné výsledky také v oblasti hodnocení komplikovaných střelných poranění (s účastí kosti).

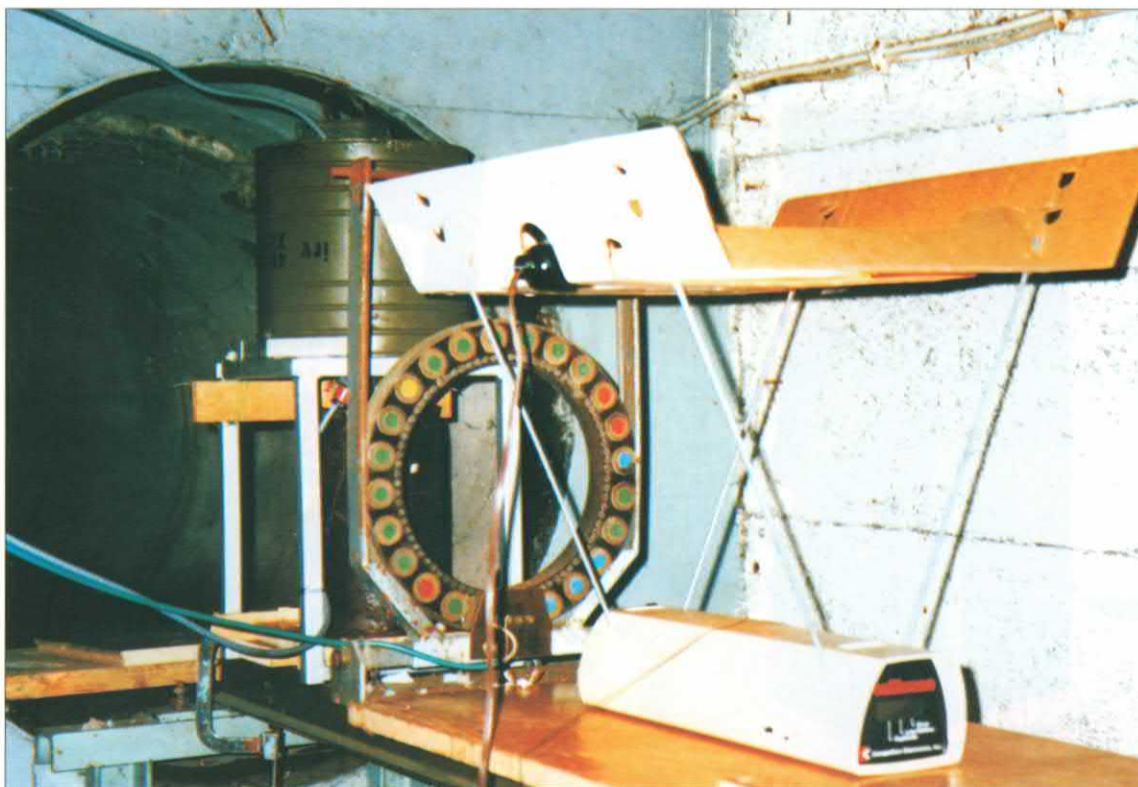
Literatura

1. SELLIER, K. – KNEUBUEHL, B. *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen*. Berlin, Springer-Verlag, 2000.
2. KUNEŠ, J. – VAVROCH, O. – FRANTA, V. *Základy modelování*. Praha, SNTL, 1989.
3. SOUKUP, J. *Identifikace soustav*. Praha, SNTL, 1990.
4. BREPTA, R. – PROKOPEC, M. *Šíření napětových vln a rázy v tělesech*. Praha, Academia, 1972.
5. PLÍHAL, B. – JUŘÍČEK, L. *Modelování náhradního materiálu živé tkáně pro zkoušky ranivé balistiky*. Slavičín, VTÚ VM, 1999.
6. JUŘÍČEK, L. *Simulace a hodnocení účinků malorážových střel na živou sílu*. (Doktorská disertační práce). Brno, Vojenská akademie, 2000.
7. JURKÁČEK, B. *Návrh metodiky zjišťování a vyhodnocování účinků malorážových střel na živou sílu*. Brno, VVÚ ZVS, 1984.
8. COUPLAND, RM. *The Red Cross wound classification*. ICRC, Geneva, 1997.
9. HIRT, M. *Střelná poranění v soudním lékařství*. Brno, MU, 1996.
10. ČSN 657150 – *Petrolát*. Praha, 1955.
11. ČSN 657101 – *Parafíny*. Praha, 1960.

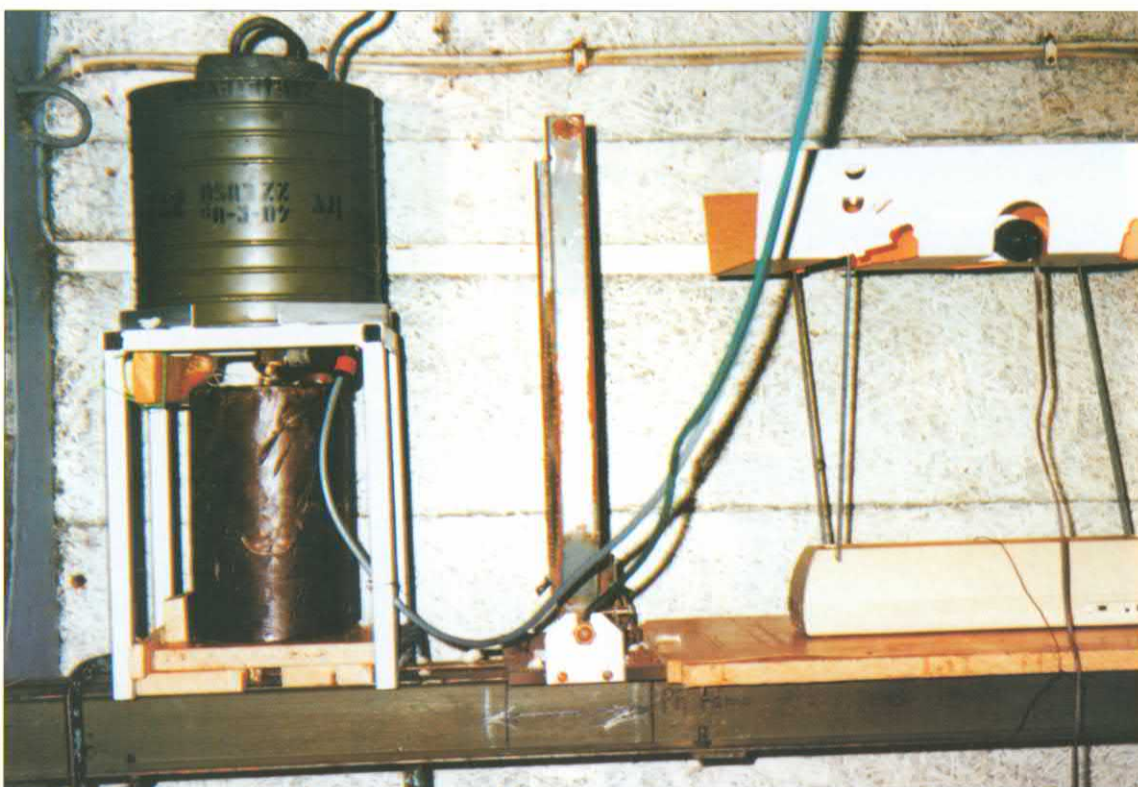
Foto autor

Korespondence: Ing. Ludvík Juříček, Ph.D.
Vojenská akademie
Kounicova 65
612 00 Brno
e-mail: Ludvik.Juricek@vabo.cz

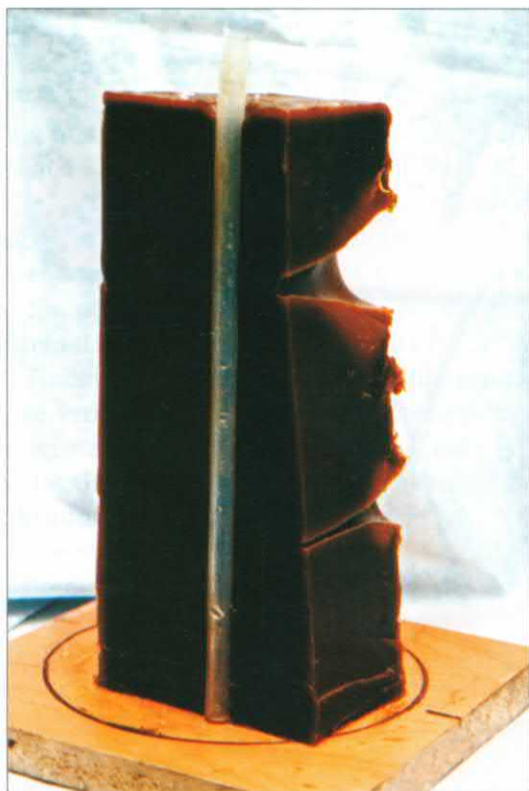
Do redakce došlo 21. 11. 2001



Obr. 1: Měřicí stanoviště balistického tunelu (nekontaktní optické hradlo).



Obr. 2: Měřicí stanoviště balistického tunelu se vzorkem fyzikálního modelu (vyroben ze směsi PP 75/25-III).



Obr. 3: Podélný řez fyzikálním modelem v místě náhradní cévy. Na obrázku je vidět vzdálenost osy střelného kanálu od cévy.



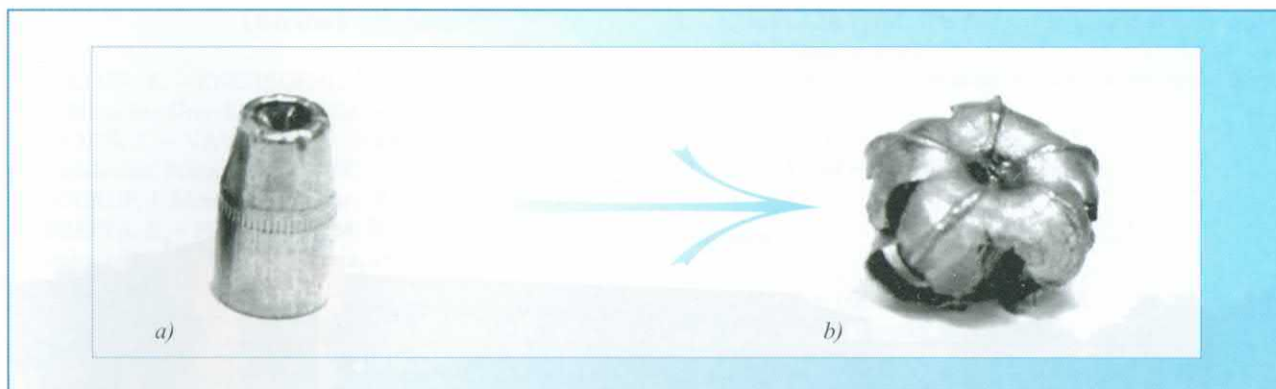
Obr. 4: Fyzikální model části dolní končetiny (stehna) s 2 průstřely (ráže 357 Magnum).



Obr. 5: Podélný řez fyzikálním modelem v místě střelných kanálů od střel ráže 7,62x39.



Obr. 6: Fyzikální model části dolní končetiny (stehna) s 2 průstřely (ráže 7,62x39 FMJ).



Obr. 7: Revolverová střela ráže 357 Magnum Eldorado: a - před expanzí, b - po expanzi.