



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

OPTIMALIZACE PROUDNICE PRO POŽÁRNÍ SPORT

OPTIMIZATION OF NOZZLES FOR FIREFIGHTER SPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Páral

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Filip Páral
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimalizace proudnice pro požární sport

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešeršní práce se bude zabývat rozbořem typů používaných proudnic a jejich doplňkových prvků dostupných na českém trhu. Analýza získaných informací a na základě reálných požadavků navržena optimalizace proudnice s využitím počítačového modelování proudění.

Cíle bakalářské práce:

Rešeršní práce se bude zabývat rozbořem typů používaných proudnic a jejich doplňkových prvků dostupných na českém trhu. Analýza získaných informací a na základě reálných požadavků navržena optimalizace s důrazem na:

- kompaktnost proudu ve vzdálenosti 5–8 m od proudnice
- dosažení malého zpětného rázu a dostatečných tlaků na výstupu při zachování plnění příslušných norem.

Seznam doporučené literatury:

LOŠÁK, J.: Technické prostředky požární ochrany: mobilní. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-260-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou proudění v proudnicích určených pro disciplínu požárního sportu – požární útok. V řešeršní části práce je popsána disciplína požární útok, používané technické vybavení a hydraulické ztráty přítomné při plnění této disciplíny. Dále práce obsahuje přehled současných proudnic, a to jak zásahových proudnic, tak proudnic pro požární sport. Tato část práce také obsahuje požadavky kladené na proudnice. V rámci práce byla provedena analýza proudění v současných modelech proudnic za využití počítačového modelování proudění. Na základě výsledků současných proudnic jsou v závěrečné části práce navrženy optimalizované návrhy geometrií s důrazem na požadavky kladené na proudnice pro disciplínu požární útok.

KLÍČOVÁ SLOVA

požární útok, požární proudnice, požární sport, výpočtové modelování

ABSTRACT

This thesis deals with flow inside of the firesport nozzles. Those are used for a fire attack, one of the firesport disciplines. The research part of this thesis introduces a fire attack, commonly used equipment and hydraulic losses that occur during the flow. This part also consists of an overview of current firefighting and firesport nozzles. It includes requirements for nozzles that are used in the fire attack discipline. Second part of the thesis presents the flow analysis inside firesport nozzles using commercial software for computational fluid dynamics (CFD), ANSYS Fluent. Several nozzle designs are proposed at the end of this thesis, based on conclusions from previous part. These designs satisfy firesport nozzle requirements, previously stated in this thesis.

KEYWORDS

fire attack, firesport nozzle, firesport, firefighting sport, computational fluid dynamics



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PÁRAL, Filip. Optimalizace proudnice pro požární sport. Brno, 2019. 51s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116997>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Optimalizace proudnice pro požární sport vypracoval samostatně na základě svých znalostí, odborných konzultací, odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu v závěrečné části práce a pod vedením doc. Ing. Simony Fialové, Ph.D.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Simoně Fialové, Ph.D. za cenné rady, vstřícnost při konzultacích a aktivní, odborné vedení, které mi poskytla při vypracování této bakalářské práce.

Poděkování patří též Ing. Karlu Gábovi a Kamilu Nevřelovi za poskytnutí dat potřebných pro numerické výpočty.

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk	10
Úvod	11
1 Požární útok.....	12
1.1. Technické vybavení	12
1.1.1. Sací vedení.....	12
1.1.2. Přenosná motorová stříkačka.....	12
1.1.3. Dopravní a útočné vedení	14
1.1.4. Terče pro požární útok.....	15
1.2. Provedení disciplíny.....	16
1.3. Hydraulické ztráty při požárním útoku	17
1.3.1. Ztráty třením	19
1.3.2. Ztráty v uzávěrkách	19
1.3.3. Ztráty v hadicových obloucích a smyčkách	19
1.3.4. Ztráty v odbočkách	20
1.3.5. Ztráty pozvolným zúžením.....	20
1.3.6. Ztráty náhlým zúžením a rozšířením průměru potrubí.....	21
2 Proudnice	22
2.1. Druhy proudnic	22
2.1.1. Plnoprúdová proudnice B 75	22
2.1.2. Plnoprúdová proudnice C 52	22
2.1.3. Clonová proudnice C52	23
2.1.4. Vysokotlaká proudnice	23
2.1.5. Kombinovaná proudnice	24
2.2. Proudnice pro požární sport.....	24
2.2.1. Tvarové prvky v proudnicích pro požární sport	25
2.2.2. Přehled proudnic pro požární sport	26
2.2.3. Požadavky na proudnice pro požární sport	26
3 Nastavení numerického výpočtu	28
3.1. Nastavení výpočetní sítě	29
3.2. Nastavení řešiče a modelu	29
3.3. Nastavení okrajových podmínek	30
4 Zhodnocení výsledků současných proudnic	31
4.1. rychlostní profily jednoduchých geometrií.....	31
4.2. rychlostní profily geometrií s tvarovými prvky	32
4.3. Tlakové průběhy jednoduchých geometrií.....	34
4.4. Tlakové průběhy geometrií s tvarovými prvky.....	36
5 Návrh optimalizovaných geometrií	38
5.1. První skupina návrhů	38

5.2. Zhodnocení první skupiny návrhů	40
5.3. Optimalizovaný návrh.....	41
5.4. Zhodnocení optimalizovaného návrhu.....	44
Závěr.....	46
Seznam použité literatury	48
Seznam použitých obrázků.....	49
Seznam tabulek.....	50
Seznam příloh.....	51

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
Q_v	Objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
S	Obsah	$[m^2]$
v	Rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
d	Průměr	$[m]$
ρ	Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
g	Tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h	Výška	$[m]$
p	Tlak	$[Pa]$
Y_{Z1-2}	Měrná ztrátová energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
ξ_L	Ztrátový součinitel délkových ztrát	$[-]$
ξ_M	Ztrátový součinitel místních ztrát	$[-]$
λ	Délkový ztrátový součinitel	$[-]$
l	Délka	$[m]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
h_{ztr}	Ztrátová výška	$[m]$
p_z	Tlaková ztráta	$[Pa]$
ν	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

ÚVOD

Požární sport byl po dlouhou dobu sportem pouze malé specifické skupiny lidí, zejména příslušníků jednotek Hasičských záchranných sborů (dále jen HZS). V posledních letech však jeho popularita výrazně narůstá a požární sport je v současné době velmi rozšířený a populární. Spolu s rostoucí oblibou tohoto sportu se zvyšuje úroveň sportovních výkonů i nároky kladené na závodníky, kdy o výhře, či prohře často rozhodují pouhé setiny sekundy. Z tohoto důvodu se soutěžní týmy snaží nalézt každou drobnou výhodu, ať už po stránce fyzické připravenosti či připravenosti technického vybavení.

Požární sport zahrnuje více soutěžních disciplín, které svou povahou vychází z atletiky. Soutěžní disciplíny prošly od počátků požárního sportu vývojem, kdy byly různě upravovány či nahrazovány jinými disciplínami, čímž byla mimo jiné zlepšována také divácká atraktivita tohoto sportu [1]. Tato bakalářská práce se zabývá pouze disciplínou požární útok, konkrétně jednou z armatur používaných v této disciplíně: požární proudnicí. Proudnice funguje jako tryska, kterou voda opouští hadicové vedení. Vodní proud je následně nutné nasměrovat do otvoru malého průměru, čímž dojde ke sražení válce terče a ukončení pokusu. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby byl výstupní proud co nejvíce kompaktní a docházelo k co nejmenšímu rozpadu na vzdálenosti od válce, který je nutno srazit. Často však lze na závodních tratích vidět tvary výstupních proudů spíše kuželového charakteru, které jsou velmi vzdálené od ideálního válcového kompaktního proudu, což sražení terče velmi ztěžuje, protože závodník na pozici proud (dále jen proudař), držící proudnici, nevidí na otvor terče, za kterým je válec postaven. Přílišný rozpad proudu dále také komplikuje samotné sražení válce, kdy v případě velkého rozptylu a použití těžkého válce terče, nemá proud vody dostatečnou sílu pro jeho shoení a soutěžní pokus pak nemůže být vůbec dokončen. Dále je vhodné, aby proudnice co nejvíce redukovala zpětné rázy vznikající při průtoku vody proudnicí, které vznikají v důsledku zúžení průtočného průměru na průměr předepsaný pravidly dané soutěže. Vznikající zpětné rázy vychylují proudaře z rovnováhy a dále tak komplikují sražení terče. V krajních případech mohou být tlakové rázy natolik výrazné, že způsobí ztrátu kontroly nad hadicí, což následně často vede ke zranění.

Během posledních let se na trhu objevilo několik výrobců proudnic pro požární sport, kdy téměř každý výrobce přistupuje k návrhu konstrukce a tvaru proudnice po svém. Závodní týmy mohou tedy vybírat z celého spektra proudnic. Bohužel v současné době není k dispozici žádný výzkum, který by se zabýval problematikou proudění v požárních proudnicích a vlivem tvarových prvků proudnic na výstupní tvar proudu, vzdálenost rozpadu a tlakové průběhy. Není tedy možné jednoznačně určit, který ze současných modelů proudnic je nejvhodnější, dle výše zmíněných hledisek. Často tedy soutěžním týmům nezbyvá jiná možnost, než postupně zkoušení a pozorování výstupních proudů z jednotlivých modelů proudnic. Takové experimentální hledání nejvhodnější proudnice je však náročné, jelikož do charakteru výstupního proudu promlouvají i další faktory, jako přítomnost vzduchu ve vodě, kvalita roztažení hadicového vedení apod.

Jedním z cílů této práce je tedy provést analýzu současných technických řešení s využitím počítačového modelování proudění v software ANSYS Fluent a zhodnotit vliv tvaru a konstrukčního řešení proudnic na tvar výstupního vodního proudu a tlakové průběhy. Následně poté, na základě závěrů získaných z analýzy navrhnout optimalizovaný tvar proudnice, který bude výše zmíněná hlediska reflektovat.

1 POŽÁRNÍ ÚTOK

Požární útok je disciplínou nejvíce podobnou skutečnému zásahu hasičů u požáru a také ikonickou disciplínou celého požárního sportu. Soutěžní družstva se skládají ze sedmi členů a každý závodník plní určité dílčí úkoly, které následně vedou k vytvoření sacího, dopravního a útočného hadicového vedení. Sacím vedením je následně voda nasáta, či nalita z nádrže s vodou do přenosné motorové stříkačky, která následně dopraví vodu, pomocí radiálního hydrodynamického čerpadla, dopravním a útočným hadicovým vedením k proudařům, kteří následně pomocí vodního proudu, usměrněného proudnicí, srazí válec terče umístěný za kruhovým otvorem.

1.1. TECHNICKÉ VYBAVENÍ

Na první pohled by se mohlo zdát, že pro úspěch v požárním sportu je důležitá především výborná fyzická připravenost. Neméně důležité je však používané vybavení a jeho kvalita, jelikož při současné úrovni požárního sportu rozhodují o vítězi často pouhé setiny sekundy. Z tohoto důvodu je vhodné používat co možná nejkvalitnější vybavení.

Pro provozování požárního sportu je nutné mít většinu vlastního vybavení včetně přenosné motorové stříkačky. Tento fakt dělá z požárního sportu poměrně nákladnou záležitost, kdy se cena vybavení jednoho závodního týmu pohybuje okolo asi 250 000 Kč, včetně přenosné motorové stříkačky, která je nejnákladnější položkou. Soutěžní týmy tedy obvykle soutěží pod záštitou některého sboru dobrovolných hasičů (dále jen SDH), který jim na tuto soutěžní činnost finančně přispívá. Technické vybavení je popsáno v Technické příloze pravidel požárního sportu, vydávaného Generálním ředitelstvím HZS ČR [8].

1.1.1. SACÍ VEDENÍ

Sací vedení se skládá ze dvou kusů savic a sacího koše a společně tvoří vedení mezi nádrží s vodou a přenosnou motorovou stříkačkou. Savice jsou v podstatě trubky o vnitřním průměru 110 mm a délce $2,5 \pm 0,05$ m [8]. Na koncích jsou osazeny šroubeními pro jejich spojování či připojování armatur. Savice jsou dostupné v několika stupních ohebnosti, kdy je první savice obvykle méně ohebná, jelikož s ní manipuluje pouze strojník, příliš ohebná savice by způsobovala problémovou manipulaci. Druhá savice je naopak velmi ohebná, aby bylo možné její ohnutí do nádrže s vodou a následně také přes hranu nádrže. Volba stupně ohebnosti savice závisí na preferencích závodníků.

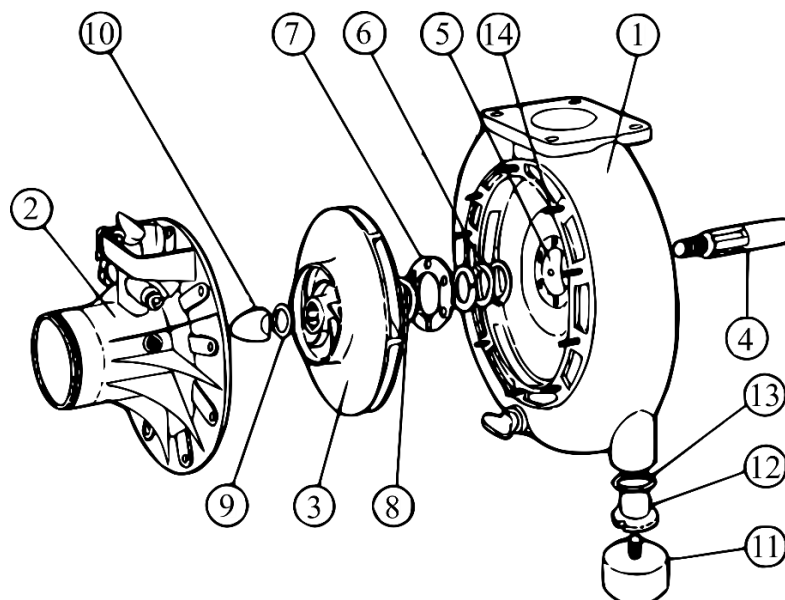
Sací koš je namontován na konci druhé savice. Vstup sacího koše je osazen sítem s oky o maximální velikosti 10×10 mm, které zabraňují vstupu předmětů do sacího vedení a následně také do čerpadla. Uvnitř sacího koše je umístěna zpětná klapka, bránící přerušeni vodního sloupce v savicích. Zpětná klapka zároveň umožňuje úplné vypuštění vody ze savic [8].

1.1.2. PŘENOSNÁ MOTOROVÁ STŘÍKAČKA

Přenosná motorová stříkačka slouží pro nasátí vody z nádrže a její dopravu hadicovým vedením. Jedná se o soustrojí, skládající se z motoru a odstředivého čerpadla [2]. Jelikož je v přenosných motorových stříkačkách použito odstředivé čerpadlo, nejsou tyto stříkačky schopny si vodu nasát jen za pomoci tohoto čerpadla. Proto jsou obvykle opatřeny plynovou vývěvou, která zajistí nasátí vody sacím potrubím, využitím spalín motoru. Spaliny proudí skrz

konvergentně-divergentní trysku, kde dochází ke zvětšování rychlosti proudění spalin na úkor tlaku, což má za následek přisávání ze sacího potrubí, čímž dojde k nasátí vody z vodní nádrže a zavodnění čerpadla. Pro moderní provedení požárního útoku se však vývěva nepoužívá. Zavodnění je provedeno tzv. nabráním, kdy závodníci ponoří jednu ze savic do nádrže s vodou, čímž dojde k jejímu naplnění. Po naplnění je rychlým pohybem vytažen volný konec savice a snížen až na úroveň země, tedy pod úroveň vodní hladiny, kde je následně první savice spojena s druhou. Rychlý pohyb při vytahování savice zajistí zavření zpětné klapky v sacím koši, namontovaném na druhém konci savice, což zabrání vytečení vody ze savice zpět do nádrže. Jelikož je volné hrdlo savice zároveň přesunuto pod úroveň vodní hladiny, sloupec vody v savici doteče až k čerpadlu, čímž dojde k jeho zavodnění a není pak třeba vůbec využít vývěvu. Tento způsob je používán pro jeho rychlejší provedení, oproti sání pomocí vývěvy.

Čerpadlo se skládá ze skříně čerpadla (statoru) a oběžného kola (rotoru), které je rozděleno na několik kanálů pomocí lopatek. Voda přichází do čerpadla v jeho ose, kde je vlivem rotace rotoru nucena k proudění kanály směrem k obvodu oběžného kola. Tím, že oběžné kolo rotuje, předává vodě kinetickou energii. Jakmile voda opustí oběžné kolo a vstoupí do statoru čerpadla, je část kinetické energie přeměněna na energii tlakovou.



1-tělo čerpadla, 2-sací víko, 3-oběžné kolo, 4-hřídel čerpadla, 5-prostor pro těsnění, 6-těsnící šňůra olejová, 7-víko ucpávky, 8-podložka (ø32), 9-podložka, 10-matice, 11-silenblok, 12-seřizovací matice, 13-podložka 30, 14-svorník M8x40

Obr. 1: Schéma rozloženého čerpadla přenosných požárních stříkaček [2]

Konstrukce přenosných motorových stříkaček vychází z modelu PS 12, který se používá v jednotkách hasičských sborů již od konce 60. let minulého století [9]. Tyto stříkačky byly postupem času vyráběny v novějších verzích PS 12 R či PS 12 R1, které disponovaly lepšími parametry. Postupně byly však nahrazeny i tyto stroje novějšími a výkonnějšími stříkačkami, které jsou již konstrukčně zcela odlišné a původním PS 12 se téměř nepodobají. V mnoha sborech dobrovolných hasičů lze i dnes najít i původní stříkačky PS 12.

Oproti původním modelům mají současné stříkačky používané v požárním sportu společného po výkonnostní stránce jen málo, jelikož se vzrůstající výkonností závodníků přestaly postupem času dostávat. Současné požární stříkačky obvykle používají motory s objemem válců okolo 2000 cm³ a čerpadla schopná dodávat až 3600 l/min. Konstrukce a uspořádání jednotlivých

součástí požární stříkačky zůstaly však stejné, kdy se ve většině případů nevyrábí stříkačky nové, ale pouze se upravují starší modely PS 12. Na tyto úpravy požárních stříkaček se v České republice specializuje několik úpravců, kteří při těchto úpravách využívají své znalosti a zkušenosti z příbuzných odvětví, nejčastěji z motorsportu či z oboru konstrukce čerpadel.



Obr. 2: Přenosná motorová stříkačka pro požární sport [10]

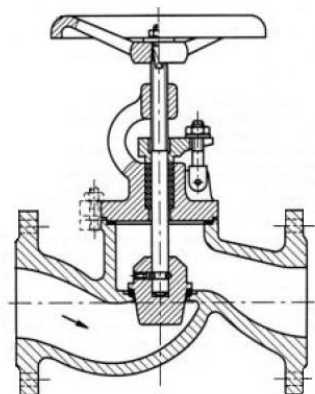
1.1.3. DOPRAVNÍ A ÚTOČNÉ VEDENÍ

Dopravní a útočné vedení se skládá z tlakových hadic a hadicového rozdělovače, kde dochází k větvení vedení na dvě hadicové větve. Požární hadice se označují písmeny, dle plošné šířky a vnitřního průměru. Standardní hadice využívané u požárů C52 a B75 mají velikost vnitřního průměru dle čísla v označení hadice (tj. průměr hadice C52 je 52 mm). Hadice o těchto rozměrech jsou také předepsány pro použití na soutěžích probíhajících dle pravidel požárního sportu. Většina soutěží v požárním útoku probíhá však dle pravidel Extraligy České republiky v požárním útoku (dále jen EXPÚ), kde jsou dovoleny hadice C42 a B65. Hadice se mezi sebou spojují pomocí hadicových koncovek typu STORZ a jejich minimální délka je 19 m.

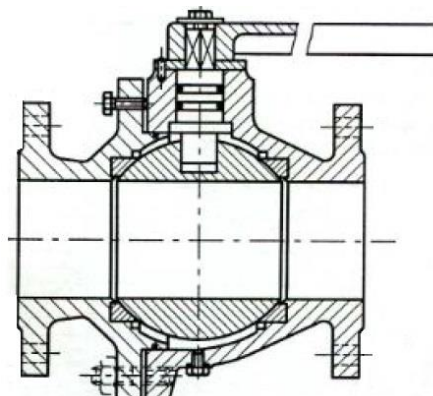
Hadice také tvoří rozdíl mezi provedením požárního útoku v kategorii žen a v kategorii mužů. Týmy v mužské kategorii tvoří vedení složené ze čtyř kusů hadic typu C a třech kusů hadic typu B, zatímco kategorie žen má o jednu hadici typu B méně.

Jak již bylo zmíněno výše, tak rozdělovač slouží pro rozdělení hadicového vedení z jedné větve na dvě. Přívodní větví je hadice typu B, která přichází do rozdělovače jeho zadní částí. V rozdělovači je vedení rozděleno do dvou větví hadic typu C. Toto rozvětvení obvykle svírá úhel 90°. Průtok rozdělovačem je možné regulovat buď pomocí vřetenových, nebo kulových uzávěrů. Vřetenové uzávěry regulují proud vody dosedáváním talířku ventilu na průměr kanálu, kdy je zdvih ventilu regulován otáčením dřívku ventilu, na kterém je zhotoven závit. Kulový uzávěr reguluje průtok vody otáčením kulové zátky s otvorem válcového průměru. Pro účely požárního sportu se obvykle používají rozdělovače s kulovým uzávěrem, a to především díky jejich možnosti rychle uzavřít proud vody v případě nehody na jedné z útočných větví. Tento druh uzávěru je vhodnější také z hlediska hydraulických ztrát, kdy způsobuje oproti vřetenovému uzávěru daleko menší ztráty a víření v kapalině, což je dáno splnutím těla zátky kulového uzávěru se stěnou těla rozdělovače v případě jeho úplného otevření. Vřetenové uzávěry naopak i při úplném otevření stále tvoří překážku v proudění a zvyšují hodnotu víření proudící kapaliny. Rozdělovače s vřetenovými uzávěry jsou také konstrukčně složitější, rozměrnější a obvykle mají i větší hmotnost. Z výše zmíněných důvodů tedy již není téměř

možné vidět na závodních drahách použití tohoto druhu rozdělovače. Při použití rozdělovače s kulovými uzávěry je však nutné dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s kohouty, jelikož při rychlém zavření dochází ke vzniku tlakových rázů v hadicovém vedení, což má často za následek prasknutí některé z hadic.



Obr. 3: Vřetenový ventil [11]

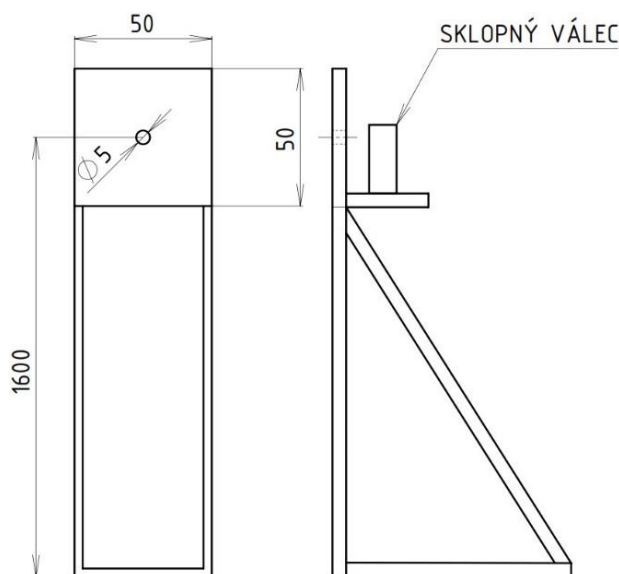


Obr. 4: Kulový kohout [11]

1.1.4. TERČE PRO POŽÁRNÍ ÚTOK

Terče jsou jednotné pro všechny soutěžní družstva a zajišťuje je pořadatel. Hlavní částí terče je čelní štít, jehož šířka je dle pravidel stanovena na $50 \pm 0,5$ cm. Ve štítu je ve výšce 1,6 m nad zemí zhotoven otvor o průměru 50 mm, do kterého se při požárním útoku musí závodníci trefit proudem vody.

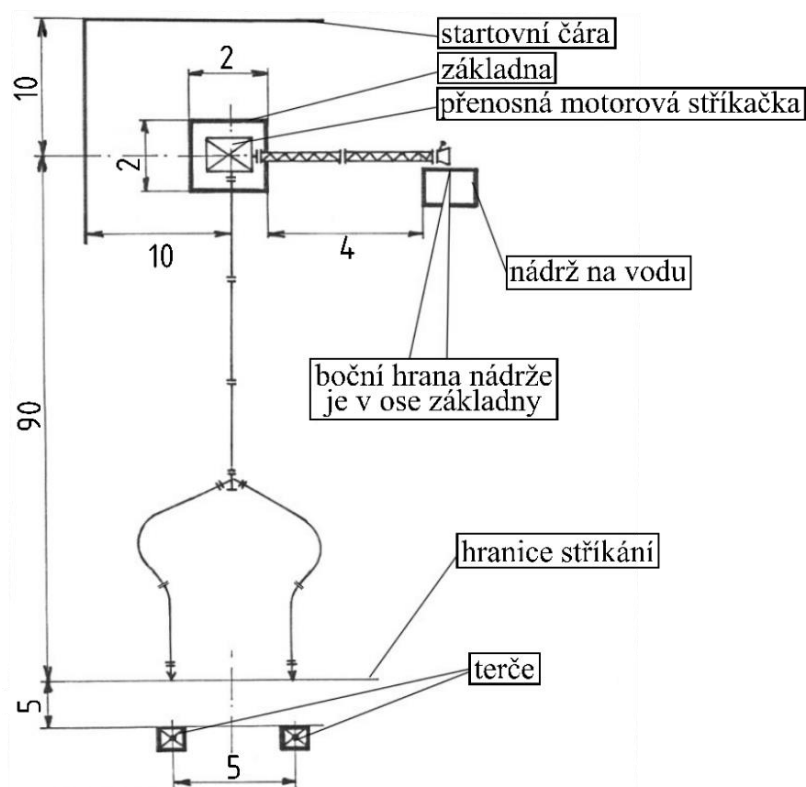
Terče dělíme na dva základní typy dle principu funkce. Prvním typem jsou terče sklopné, kdy je za otvorem ve štítu terče umístěn kovový válec, který se po zásahu proudem vody překlápí kolem pantu a sepne kontakt časomíry. Tento typ terče je používán na soutěžích dle pravidel EXPÚ. Druhým typem jsou terče nástřikové, které mají za otvorem uzavřenou nádrž, kterou je nutné naplnit stanoveným objemem vody, čímž dojde k sepnutí časomíry. U tohoto druhu terčů je tedy nutné směřovat proudem vody do otvoru v terči déle, kdy nejlepším týmům trvají nástřiky 10 l nádrže okolo 3 s. Nástřikové terče jsou předepsány pro soutěže konající se dle pravidel požárního sportu, tedy i pro soutěže mistrovství České republiky.



Obr. 5: Schéma sklopného terče [autor]

1.2. PROVEDENÍ DISCIPLÍNY

Před plněním soutěžního pokusu nastoupí týmy na přípravnou základnu, kde předloží veškeré nářadí, které je následně zkontrolováno. Následně je týmům odpočítáván přípravný čas, ve kterém si družstvo připraví nářadí potřebné ke splnění disciplíny na základnu. Základna je dřevěná deska o rozměrech $2 \times 2 \times 0,5$ m [8]. Družstvo si musí nářadí nachystat tak, aby žádné, kromě savic, nepřesahovalo hrany základny. Po dokončení přípravy se družstvo přesune za startovní čáru. Závodní pokus je obvykle startován dle pokynů startéra a na výstřel z pistole podobně jako v disciplínách atletiky.



Obr. 6: Schéma požárního útoku [8]

Po odstartování doběhnou závodníci k základně, kde každý plní předem nacvičené úkony. Závodník na pozici koše, spolu se závodníkem na pozici savicového spoje, namontuje na jednu ze savic sací koš a provedou nabrání vody. Mezitím strojník namontuje druhou savici na vstupní hrdlo čerpadla a tím zároveň přichystá druhý konec savice pro spojení závodníkem na pozici savicového spoje. Mezitím závodník na pozici spojování hadic typu B spojí všechny hadice B dohromady, tak aby vytvořily souvislé hadicové vedení. První hadici typu B také připojí na výstupní hrdlo čerpadla. Následně pak natáhne první polovinu dopravního vedení. Závodník na pozici rozdělovače připojí do rozdělovače třetí hadici B a dvě hadice C a s rozdělovačem doběhne na vyznačenou značku vzdálenou 60 m od základny. Posledními dvěma členy jsou proudaři, kteří spojí dvě hadice typu C a poté běží na svou značku vzdálenou 90 m od středu základny. Proudáři obvykle nesou poslední hadice typu C s sebou svinuté v kotouči a tyto kotouče rozvinou až ve vzdálenosti cca 20 m od nástřikové čáry. Pokud by hadice rozvinuli již u základny, museli by na celé vzdálenosti k terčům překonávat navíc odpor, který by se tvořil tažením hadic po zemi. Jelikož se při požárních útocích závodí nejčastěji na travnatých tratích, tento odpor není vůbec zanedbatelný. Po rozvinutí posledního hadicového kotouče napojí na tuto hadici proudnici, kterou nesou spolu s hadicí již ze základny. Po doběhnutí k nástřikové

čáře proudaři zakleknou do snížené pozice tak, aby je případný zpětný ráz, vznikající při průchodu vody tělem proudnice, nevyvedl z rovnováhy. Současné požární stříkačky dosahují velkých průtoků, a proto je často velmi obtížné udržet stabilitu při držení hadice ve stoje. Jakmile voda opustí hadicové vedení proudnicí, proudaři co nejrychleji nasměrují vodní proud do otvoru v terči a srazí válec, nebo naplní požadovaný objem terče, čímž je pokus ukončen.

1.3. HYDRAULICKÉ ZTRÁTY PŘI POŽÁRNÍM ÚTOKU

Během proudění tekutin potrubím vznikají odpory, působící proti pohybu kapaliny. V proudících kapalinách se tyto ztráty projevují ve formě úbytku tlaku. Ztráty mohou vznikat v důsledku tření, víření, náhlými změnami směru proudění, nárazem na překážky apod. Již ze samotného principu disciplíny požární útok, kdy se závodníci snaží v co nejkratším čase dopravit vodu na konec hadicového vedení tak, aby byl výstupní proud vody co nejkompaktnější, je zřejmé, že tyto ztráty jsou nežádoucí a je důležité se jimi aktivně zabývat. Minimalizace či úplné odstranění co největšího množství možných hydraulických ztrát je tedy jedním ze základních předpokladů pro schopnost sportovního týmu podávat kvalitní sportovní výkony v dlouhodobém časovém horizontu. Tuto prevenci proti možným ztrátám je nutné opakovat před každým závodem, jelikož sportovní tratě mají svá specifika např. různá převýšení na délce hadicového vedení, nebo různé povrchy tratí.

Hydraulické ztráty lze rozdělit následujícím základním způsobem [3]:

- a) ztráty třením,
- b) místní (lokální) ztráty,
 - ztráty v uzávěrkách,
 - ztráty změnou směru v kolenech a obloucích,
 - ztráty v odbočkách,
 - ztráty náhlým zúžením průřezu potrubí,
 - ztráty náhlým rozšířením průřezu potrubí,
 - ztráty pozvolným zúžením průřezu potrubí,
 - ztráty pozvolným rozšířením průřezu potrubí,
 - ztráty při výtoku vody z nádrže do potrubí.

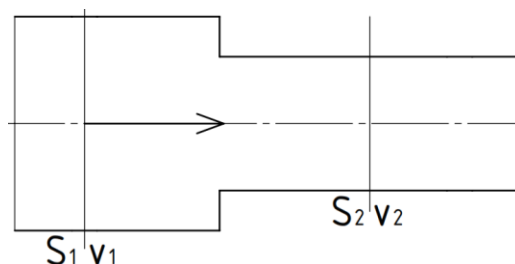
Výše uvedené rozdělení je pouze základního charakteru a zejména u místních ztrát je možné nalézt další místa a situace, kde mohou tyto ztráty vznikat. Právě z důvodu velkého množství původců místních ztrát se v následujících podkapitolách bude tato práce zabývat pouze ztrátami, které jsou významné při provedení disciplíny požární útok.

Pro výpočet ztrát je nutné znát alespoň některé parametry daného proudění a zbývající parametry lze následně dopočítat ze základních rovnic popisujících proudění v uzavřeném kanále.

První základní rovnicí je rovnice kontinuity, která vyjadřuje zákon zachování hmoty. Rovnice kontinuity vyjadřuje vztah mezi rychlostí proudění a příčným průřezem potrubí, tedy i objemového průtoku. Pro ustálené proudění ideální kapaliny tedy platí:

$$Q_v = S \cdot v = \text{konst} \quad (1)$$

Jelikož platí, že při proudění ideální kapaliny zůstává objemový průtok konstantní, tak lze rovnici kontinuity upravit do tvaru, který umožňuje výpočet rychlosti na jiném místě v uzavřeném potrubí s rozdílným příčným průřezem.



Obr. 7: Schéma potrubí pro výpočet rychlosti z rovnice kontinuity [autor]

Pak je tedy možné porovnat průtoky v obou místech zájmu a následně dosadit za průtoky z rovnice 1:

$$Q_{v1} = Q_{v2} \rightarrow S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (2)$$

Následně je možné, po dosazení za obsahy příčných průřezů, z této rovnice vyjádřit rychlost v místě se známým obsahem příčného průřezu, ale s neznámou rychlostí. Pokud bychom tedy chtěli vypočítat rychlost proudění v bodě 2 při známé rychlosti v bodě 1 a průměrech potrubí, byl by tvar rovnice, při uvažování kruhového průřezu potrubí, po dosazení a vyjádření, následujícího tvaru:

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot d_1^2}{d_2^2} \quad (3)$$

Druhou důležitou základní rovnicí popisující proudění kapalin je Bernoulliho rovnice. Tato rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie v proudící kapalině, dává tedy do souvislosti kinetickou, potenciální a tlakovou energii. Pro stacionární proudění ideální kapaliny v uzavřeném potrubí platí:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot h = konst \quad (4)$$

Podobně jako u rovnice kontinuity je možné, díky zákonu zachování energie, pomocí Bernoulliho rovnice vypočítat parametry proudění na jiném místě potrubí v bodě ležícím na stejné proudnici (proudové čáře). Takový tvar tedy porovnává energie ve dvou bodech:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 \quad (5)$$

Tento tvar Bernoulliho rovnice však platí pouze pro proudění ideální kapaliny, tedy beze ztrát. Pokud je nutné do výpočtu zahrnout i délkové a místní ztráty je nutné použít následující tvar Bernoulliho rovnice, kde je navíc přítomen člen měrné ztrátové energie, který tlakové ztráty zohledňuje.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + Y_{Z1-2} \quad (6)$$

Člen měrné ztrátové energie se následně vypočítá dle Darcy-Weissbachova vztahu:

$$Y_{Z1-2} = (\xi_L + \xi_M) \cdot \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

1.3.1. ZTRÁTY TŘENÍM

Ztráty třením jsou nejvýraznější skupinou ztrát přítomných při požárním útoku, což je dáno tím, že po celou dobu provedení požárního útoku jsou tyto ztráty přítomny, jelikož vznikají jednak třením kapaliny o povrch ostatních pevných těles, tedy hadicových stěn, stěn armatur a zařízení, kterými po dobu požárního útoku voda proudí. Dále tyto ztráty vznikají třením částic proudící tekutiny o sebe.

Velikost ztrátového součinitele délkových ztrát lze vypočítat dle vzorce:

$$\xi_L = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad (8)$$

Následně je možné vypočítat také ztrátovou výšku [3]:

$$h_{ztr} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

Pro výpočet délkového ztrátového součinitele λ existuje velký soubor vztahů, které reflektují konkrétní podmínky, za kterých proudění probíhá (druh proudící látky, materiál potrubí, rozměr potrubí apod.). Tyto vzorce jsou obvykle sestavovány na základě experimentálních měření a teoretických znalostí. Pro výpočet teoretického délkového třecího součinitele je pro situaci požárního útoku nejvhodnější vzorec dle Prokofjeva, pro pryžové požární hadice [3]:

$$\lambda = 0,0113 + 0,917 \cdot \text{Re}^{-0,41} \quad (10)$$

Následná tlaková ztráta se vypočítá dle vztahu [4]:

$$p_z = \rho \cdot g \cdot h_{ztr} \quad (11)$$

Experimentální měření provedené na současných požárních hadicích však ukázaly, že velikosti vypočtených tlakových ztrát jsou oproti změřeným hodnotám ztrát vyšší [5]. Toto je nejspíše zapříčiněno jednak technologickým pokrokem při výrobě hadic od doby, kdy byl vzorec poprvé nalezen, a také původem vzorce, který je vyvozen z experimentálních dat.

1.3.2. ZTRÁTY V UZÁVĚRKÁCH

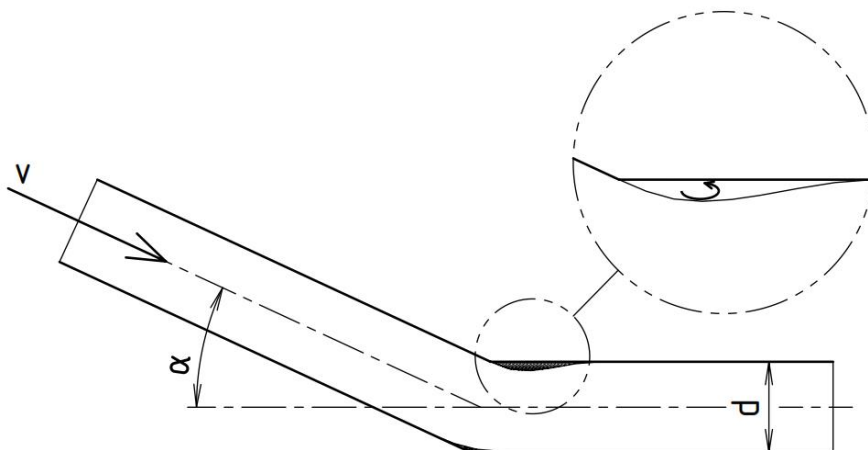
Tento druh ztrát vzniká při proudění přes rozličné prvky sloužící k uzavření či regulaci průtoku potrubím. Těmito prvky mohou být v oblasti požárního sportu vřetenové ventily, kulové uzávěry a zpětné klapky. Jiné uzavírací prvky se v moderním požárním sportu prakticky nepoužívají. Většina soutěžních týmů používá v armaturách, výše zmíněné, kulové uzávěry. Kulové uzávěry se nacházejí v přenosné motorové stříkačce, kde jsou umístěny zpravidla dva uzávěry. Dále je trojice kulových uzávěrů či vřetenových ventilů umístěna na hadicovém rozdělovači.

1.3.3. ZTRÁTY V HADICOVÝCH OBLOUČÍCH A SMYČKÁCH

Hadice používané pro požární útok jsou vyrobeny ze snadno tvarovatelných materiálů, aby bylo možné jejich svinutí do kotouče a následná snadná manipulace a skladování. Právě díky této tvarové nestálosti vznikají při průchodu vody hadicemi hadicové oblouky a smyčky, které umožňují vznik dalším ztrátám.

Pokud jsou poloměry křivosti hadicových smyček a oblouků malé, je proudící voda nucena změnit náhle směr proudění, což vede k oddělení proudu od vnitřní stěny a vzniká kontrakce a následné rozšíření vodního proudu, který opět vyplní celý průměr hadice. V prostoru

uvolněném při odtržení proudu od stěny hadice však vznikají víry, které zapříčiňují vznik tlakových ztrát a zvyšují hodnotu vlastního víření kapaliny. Pokud je hadicový úsek, následující po tomto zakřivení, rovný a nedochází k dalším smyčkám na hadici, dojde po určitém čase k ustálení proudění a opětovnému snížení hodnoty vlastního víření kapaliny. Z tohoto důvodu je nutné se při provedení požárního útoku snažit o maximálně přímé natažení především posledních dvou párů hadic, aby došlo k co největší redukci hodnoty vlastního víření kapaliny před výstupem vody z hadicového vedení proudnicí.



Obr. 8: Náhlá změna směru proudění [3]

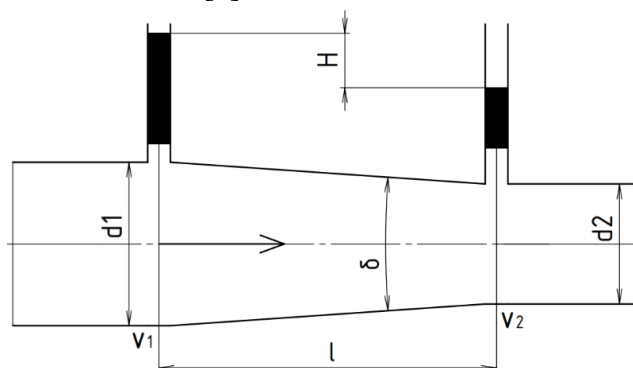
1.3.4. ZTRÁTY V ODBOČKÁCH

Při provedení požárního útoku dochází k větvení hadicového vedení pouze na jednom místě, a to na rozdělovači, kde jsou tedy kromě ztrát v uzavěrkách a ztrát vznikajících zúžením potrubí, přítomny i ztráty vzniklé v důsledku odbočení proudu.

1.3.5. ZTRÁTY POZVOLNÝM ZÚŽENÍM

Tento druh ztrát lze při požárním útoku pozorovat na některých současných modelech proudnic, kdy se pro pozvolné zmenšení průměru používá kuželového tvaru kanálu. Zúžení by mělo být co nejplynulejší, aby nedocházelo ke ztrátám nárazy na stěnu kužele a vířením. V extrémním případě může při prudké změně průměru dojít také k odtržení proudu od stěny kužele, což způsobí další víření kapaliny a vznik ztrát [3].

Obecně platí, že vrcholový úhel kužele by neměl přesáhnout hodnotu 10° , při jejímž překročení hrozí výše zmíněné odtržení proudu. Pro co největší redukci ztrát se doporučuje volit maximální vrcholový úhel kužele do 4° až 5° [3].



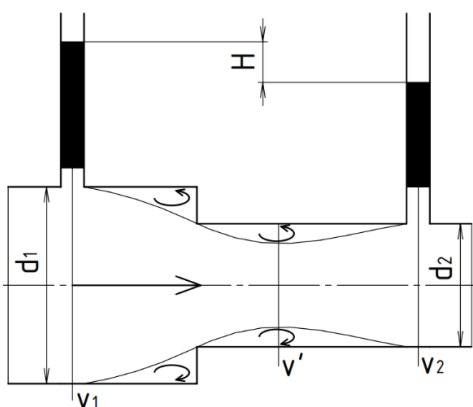
Obr. 9: Pozvolné zúžení potrubí [3]

1.3.6. ZTRÁTY NÁHLÝM ZÚŽENÍM A ROZŠÍŘENÍM PRŮMĚRU POTRUBÍ

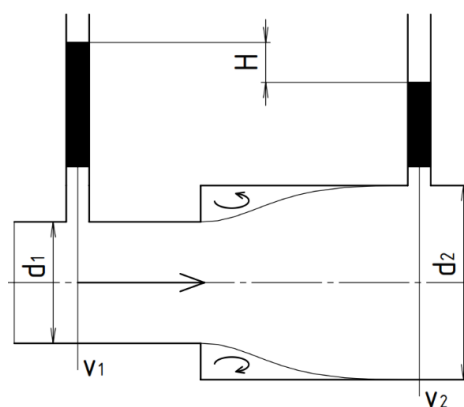
Ztráta zúžením vzniká například při vstupu vody do proudnic, které mají náhlý přechod z průměru 42 mm na výstupní průměr 12,5 mm. Přechod mezi těmito průměry je u proudnic obvykle zaoblený či zkosený. V případě, že má proudnice přechod mezi průměry realizován na velmi malé vzdálenosti je taková proudnice obvykle význačná prudkým tlakovým spádem a s tím spojeným velkým zpětným rázem při výstupu vody z proudnice, který vzniká v důsledku náhlé tlakové změny.

Důsledkem náhlého zúžení průměru je kontrakce proudu za zúžením a jeho následné opětovné rozšiřování po celém průměru, což způsobí vznik vírových struktur ve vzniklém prostoru uvolněném v důsledku kontrakce proudu podobně jako u ztráty v hadicových obloucích a smyčkách. Ztráta vzniká vířením a přeměnou tlakové energie v rychlostní. Kromě vzniklých ztrát dojde ke zvýšení stupně víření kapaliny, což dále negativně ovlivňuje výstupní proud vody.

Rozšíření průměru kanálu způsobí, na základě rovnice kontinuity, menší rychlost proudění, než je tomu v kanálu s menším průměrem. Toto pak způsobuje „narážení“ rychleji proudící kapaliny v malém kanálu do pomaleji proudící kapaliny ve velkém kanálu. Následně pak vzniká víření hranou v místě přechodu mezi velkým a malým kanálem [3].



Obr. 10: Ztráty náhlým zúžením [3]



Obr. 11: Ztráty náhlým rozšířením [3]

2 PROUDNICE

Proudnic je poslední součástí hadicového vedení, pomocí kterého dopravovaná látka toto vedení opouští. Hlavním úkolem proudnice je usměrňování a tvarování proudu dopravované látky dle potřeby hasiče. Je zakončena zužující se částí tzv. hubicí, kde dochází ke zvyšování rychlosti proudění [6].

Proudnic by měly být, kromě správné funkčnosti, navrhovány také s ohledem na ergonomii a způsob použití pro co nejjednodušší manipulaci s proudnicí u zásahu. Dále je třeba při návrhu proudnic zamezit nadměrným energetickým ztrátám tak, aby byly stále dosaženy požadované vlastnosti např. dostřik, celistvost proudu, průtočné množství apod. [6].

2.1. DRUHY PROUDNIC

Požární proudnice lze rozdělit do několika kategorií, dle základních kritérií: [6]

dle způsobu použití

- a) ruční proudnice,
- b) upevněné proudnice.

dle možnosti uzavření průtoku

- a) uzavírací proudnice,
- b) proudnice bez uzávěru.

Proudnic lze dále dělit dle dalších vedlejších kritérií např. dle možnosti regulace průtoku, možnosti tvarování výstupního proudu na proudnici, průřezu tlakové, hrdlové spojky apod. Výběr konkrétního typu proudnice pro použití u požáru je ovlivněn mnoha faktory jako místem zásahu, povětrnostními podmínkami apod. Z tohoto důvodu závisí tato volba vždy na, místě příslušném, veliteli zásahu.

2.1.1. PLNOPROUDÁ PROUDNICE B 75

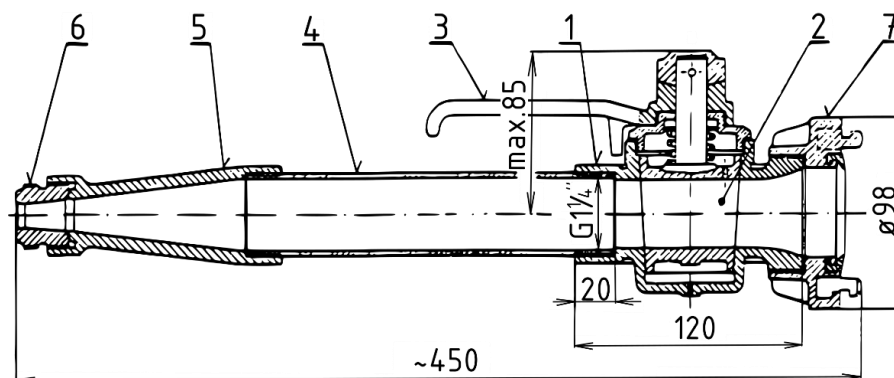
Plnoproudé proudnice jsou nejjednoduššími typy proudnic, jejichž vnitřní tvar je složen z válcové a kuželové části. Nasazuje se v případě, že je třeba zabezpečit velký objem dodávané vody z velké vzdálenosti. Toto může být žádoucí v situaci, kdy není možné se bezpečně přiblížit k oblasti hoření. Je nutné, aby tuto proudnici ovládali alespoň 2 hasiči, pokud je to možné tak 3, jelikož reakční síly vznikající při výstupu vody z proudnice jsou vysoké a při ovládní pouze jedním hasičem, může snadno dojít ke ztrátě kontroly nad proudnicí a zranění [6].

Konstrukce proudnice je složena z několika částí, což je výhodné v případě, že dojde k poškození některé z dílčích částí proudnice, kdy je možné následně vyměnit pouze poškozený díl. Tělo proudnice je obvykle vyrobeno z hliníkové slitiny [7]. Tento druh proudnice je vzhledem k vysoké obtížnosti manipulace vyráběn bez možnosti uzavření a regulace průtoku přímo na proudnici.

2.1.2. PLNOPROUDÁ PROUDNICE C 52

Konstrukčně je proudnice podobná plnoproudé proudnici B 75. Oproti proudnici B 75 je však lépe ovladatelná, kdy je možné ovládní pouze jedním hasičem, zpravidla však vždy proudnici ovládají hasiči dva. Plnoproudé proudnice obvykle pracují v rozmezí tlaků 0,4 až 0,6 MPa. Tato proudnice je obvykle vybavena kulovým kohoutem pro regulaci či uzavření průtoku přímo

na proudnici. Při otevírání kulového kohoutu je však třeba dbát opatrnosti, jelikož příliš rychlé otevření může mít za následek značný tlakový skok, což může vyústit až ve ztrátu kontroly nad proudnicí. Tento druh proudnic je stále možné najít ve výbavách většiny jednotek požární ochrany i přes to, že jsou postupem času nahrazovány novými modernějšími druhy proudnic.



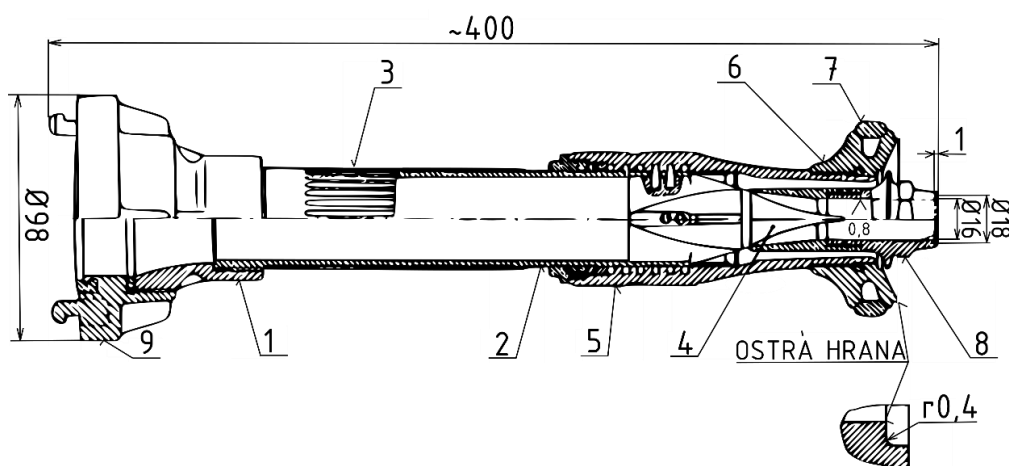
1 – těleso kohoutu, 2 – obratel, 3 – rukojeť, 4 – trubka, 5 – pevná hubice 16, 6 – hubice 12,5 (podle normy ČSN 38 9488), 7 – spojka 52 (podle normy ČSN 38 9462)

Obr. 12: Řez proudnicí C 52 [7]

2.1.3. CLONOVÁ PROUDNICE C52

Použití clonové proudnice je vhodné pro ochranu zasahujících hasičů proti sálavému teplu [6]. Tento druh proudnice lze používat jak v režimu vodní clony, tak v režimu plného proudu, případně v jejich kombinaci, přičemž toto nastavení se provádí přímo na proudnici. Tvorba vodní clony je zajištěna pomocí clonové matice, kterou lze šroubovým pohybem přibližovat, či oddalovat od hubice, čímž se také reguluje úhel vodní clony, kdy clonová matice funguje v podstatě jako deflektor, a tedy zvyšuje podíl radiálních rychlostí ve vodním proudu, čímž je možné dosáhnout vytvoření vodní clony.

Používání této proudnice je v současné době na ústupu, jelikož její použití je zejména oproti kombinovaným proudnicím velmi omezené.



Obr. 13: Řez clonovou proudnicí C52 [7]

2.1.4. VYSOKOTLAKÁ PROUDNICE

Jak již název napovídá, hlavní výhodou tohoto druhu proudnice je její schopnost dopravy vody pod vysokým tlakem, kdy se pracovní tlaky pohybují okolo 4 MPa. Pro její použití je však nutné použití vysokotlakového čerpadla, které je obvykle vestavěno v zásahových vozidlech.

Je tedy vhodná spíše pro rychlé zásahy v oblastech přístupných zásahovému automobilu. Přímou na proudnici je možné nastavit jak plný, tak sprchový proud a je možné proudnici použít i pro vytvoření vodní clony. Na rozdíl od běžných proudnic má vysokotlaká proudnice pistolový tvar [6]. Tento tvar je vhodný pro lepší ovladatelnost proudnice z důvodu vysokých provozních tlaků a tím pádem velkých reakčních sil.

2.1.5. KOMBINOVANÁ PROUDNICE

Kombinovaná proudnice spojuje výhody všech, výše uvedených, typů proudnic, kdy je možné tuto proudnici používat v režimu stříkání plným proudem, nebo sprchovým proudem, ale je možné ji použít i pro vytvoření vodní clony. Také je možné přímo na proudnici regulovat průtok či jej zcela uzavřít. Regulace průtoku je možný obvykle od hodnot od 100 l/min až po hodnoty 700 l/min [6]. Kombinované proudnice jsou pistolového tvaru podobně jako vysokotlaké proudnice, což umožňuje stabilní a pohodlný úchop proudnice. Nastavení tvaru vodního proudu se provádí pomocí několika posuvných matic, kdy jejich různá nastavení vzájemných poloh produkují výše zmíněné tvary proudů.

Především pro svou všestrannost použití jsou kombinované proudnice přednostně volenými proudnicemi při zásazích.

2.2. PROUDNICE PRO POŽÁRNÍ SPORT

Proudnice pro požární sport vychází z původních plnoproudých proudnic typu C 52. Do počátku 21. století byly obvykle pro účely soutěží v požárním sportu používány právě zásahové proudnice. Přibližně od počátku 21. století se začaly ve výbavách sportovních týmů objevovat proudnice vyrobené výhradně pro použití při požárním útoku. Tyto proudnice již zohledňovaly požadavky stále se zrychlujícího provedení disciplíny, což se promítlo v jejich výrazně nižší hmotnosti oproti proudnicím zásahovým. Přizpůsoben byl také tvar. Jelikož se na proudnice pro požární sport přímo nevztahují žádné normy ČSN, ale pouze pravidla dané soutěže, která obvykle omezují pouze maximální délku proudnice a její výstupní průměr, byly tyto proudnice často vyráběny svépomocí. Tvarem byly tyto proudnice již velmi podobné současným proudnicím pro požární útok.



Obr. 14: Proudnice Karbon a P&H [12]

V současné době se výrobou proudnic pro požární sport zabývá asi 5 výrobců po celé České republice a je tedy možné se setkat v rozličnými návrhy konstrukcí proudnic. Sportovní týmy tedy mohou vybírat z celého spektra proudnic, kdy je možné zakoupit proudnice s různými tvary vstupních a výstupních hrdel, vnějších tvarů, vícedílnou konstrukcí či konstrukcí tvořenou jako monolit. Trendem posledních let je také výroba proudnic, které mají uvnitř dutiny proudnice umístěny tvarové prvky křížového tvaru, které rozdělují objem vnitřního kanálu

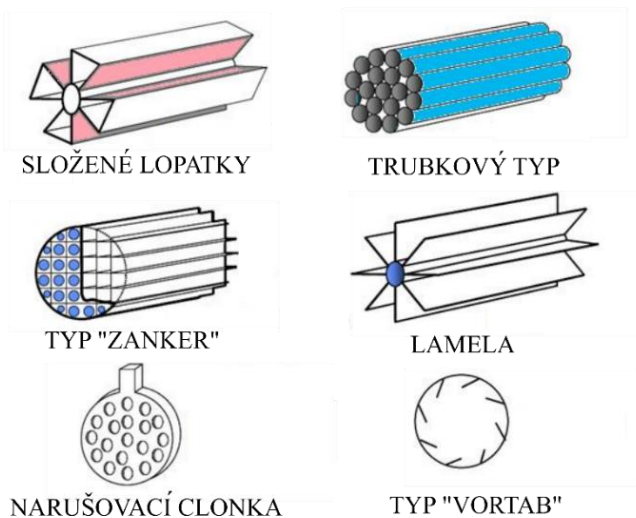
proudnic na několik menších objemů, zpravidla na čtvrtiny, nebo osminy, což má dle tvrzení výrobců vést k usměrnění proudění uvnitř proudnice a následnému menšímu rozptylu proudu na vzdálenosti proudnice od terče.

Do současné doby bohužel nebyl proveden žádný výzkum v oblasti tvaru vnitřního kanálu proudnic pro požární sport a není tedy dosud jasné, které tvarové a výrobní prvky mají příznivý či nepříznivý vliv na výstupní tvar vodního proudu a vznikající tlakové rázy. Výrobci obvykle přistupují k návrhu tvaru proudnice experimentálně, kdy zkoumají vliv různých úprav tvaru vnitřního kanálu proudnice na výstupní proud. Sportovním týmům tedy potom nezbývá jiná možnost než postupně experimentální zkoušení proudnic od různých výrobců a hledání vyhovujícího modelu. Toto praktické zkoušení je nevýhodné jednak finančně, kdy je nutné zakoupit či zapůjčit několik párů proudnic, ale také časově, jelikož je nutné proudnice vyzkoušet na několika požárních útocích při různých podmínkách.

Žádný z výrobců také nerozlišuje rozdíl mezi mužskou a ženskou kategorií, kdy je pro závodní týmy v ženské kategorii trať zkrácena o jednu hadici typu B, což má za následek větší hodnoty průtoku na proudnici, jelikož je ztrátová délka čerpadla menší. Větší průtoky způsobují větší rychlosti proudění, a tak paradoxně zkrácení tratě, jež má vést k usnadnění disciplíny pro ženskou kategorii, způsobuje, že proudařky mají často problém proudnici na terč vůbec zacílit z důvodu vysokých provozních tlaků a s tím souvisejících větších zpětných rázů při průchodu vody proudnicí. Je tedy vhodné, aby při návrhu proudnic pro ženskou kategorii bylo více dbáno na tlakové průběhy v proudnici, a to i v případě, že tlakové zlepšení bude částečně na úkor kompaktnosti výstupního proudu.

2.2.1. TVAROVÉ PRVKY V PROUDNICÍCH PRO POŽÁRNÍ SPORT

Účelem tvarových prvků je zmenšení intenzity turbulence, v ideálním případě úplná relaminarizace proudění, čehož se dosahuje vložením tvarového prvku do příčného průřezu potrubí, který následně rozdělí průtočný průřez na několik menších průřezů. Průchodem proudění přes tvarový prvek pak dojde k narušení již vzniklých vírových struktur uvnitř proudu a k vynucení axiálního směru proudění a tedy srovnání proudnic (proudových čar) do axiálního směru. V průmyslu se tvarové prvky používají nejčastěji pro snížení tlakových ztrát vlivem turbulence proudícího média. Tvarové prvky je nutné navrhnout na míru, pro dané podmínky proudění, kde bude prvek použit.



Obr. 15: Tvarové prvky běžně používané v průmyslu [13]

Současné modely proudnic využívají jako tvarové prvky pouze podélné lopatky rozdělující průtočný průřez buď na poloviny (Klimeš N), čtvrtiny (Karbon s křížem), nebo na šestiny (Jožák 99). Jednotlivé geometrie se mimo počtu rozdělení liší také v délce, tloušťce podélných lopatek a materiálu, ze kterých jsou tyto prvky vyrobeny. Již při základním srovnání tvarových prvků současných proudnic a tvarových prvků běžně používaných v průmyslu, lze pozorovat některé zásadní rozdíly.

Jedním z těchto rozdílů je délka tvarových prvků, kdy v případě současných proudnic zabírají tvarové prvky většinu délky celé proudnice, zatímco v případě průmyslového použití jsou tyto prvky obvykle velmi krátké. Toto si lze vysvětlit snahou o vyvarování se nadbytečných tlakových ztrát způsobených třením proudícího média o stěny, kdy při dlouhém prvku vznikne násobně větší třecí plocha. Druhým zásadním rozdílem je rozložení rozdělujících prvků, kdy se v průmyslu téměř vůbec nepoužívají taková rozdělení, kdy je některý z prvků umístěn v ose kanálu, zatímco všechny současné modely proudnic s tvarovými prvky používají právě takové rozdělení.

2.2.2. PŘEHLED PROUDNIC PRO POŽÁRNÍ SPORT

V současné době je na českém trhu dostupných asi deset modelů proudnic určených pro použití v disciplíně požární útok. Seznam vybraných proudnic a jejich rozměrové a délkové parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 1: Přehled současných proudnic pro požární sport

Název	Tvar vstupu	Tvar hubice	Další tvarové prvky	Délka ¹ [mm]
Klimeš S	Zaoblený	Válcový, kuželový	-	400
Klimeš N	Zaoblený	Válcový, kuželový	Podélné lopatky (4)	400
Firesport Elox	Zaoblený	Válcový, kuželový	-	430
Karbon	Kuželový	Kuželový	-	420
Karbon s křížkem	Kuželový	Kuželový	Podélné lopatky (4)	420
Excellent	Zaoblený	Válcový	-	431
Pavliš & Hartmann	Zaoblený	Válcový, kuželový	-	396
Jožák 99	Kuželový	Válcový, kuželový	Podélné lopatky (8)	387

¹ Délka těla proudnice, bez koncovky

2.2.3. POŽADAVKY NA PROUDNICE PRO POŽÁRNÍ SPORT

Hlavním požadavkem na proudnice je schopnost usměrnit proudění vody takovým způsobem, aby se proud co nejvíce blížil válcovému tvaru na co možná nejdelší vzdálenosti, především na vzdálenosti 5-10 m, což je obvyklá vzdálenost proudáře od terče. Tento požadavek souvisí především s tvarem výstupního rychlostního profilu, kdy je vhodné, aby byla rychlost distribuována rovnoměrně po celém příčném průřezu proudnice. Do tvaru a kompaktnosti výsledného výstupního proudu se promítá krom samotného tvarování proudnice mnoho dalších faktorů jako podíl vzduchu v proudu vody, kvalita roztažení hadicového vedení, správné ovládání přenosné motorové stříkačky, intenzita turbulence kapaliny vstupující do proudnice apod. Proudnice by však měla usměrnit proud vody do největší možné míry a výše zmíněné faktory je pak nutno řešit samostatně. Výstupní rychlosti by také měli dosahovat co možná nejvyšších hodnot vzhledem k rozměrům proudnice a možnostem přenosných motorových stříkaček. Maximální výstupní rychlost je důležitá jednak z hlediska zkrácení časového intervalu, za který proud vody překoná vzdálenost k terči, ale také z důvodu zakřívování

trajektorie vodního proudu na vzdálenosti proudaře od terče, ke kterému dochází právě při nedostatečných rychlostech.

Dalším podstatným požadavkem je co možná největší redukce zpětných rázů vznikajících v proudnici z důvodu prudkých změn tlaků. Vzniklý tlakový ráz může následně vyvést proudaře z rovnováhy a ztížit sražení terče. Je tedy žádoucí, aby křivka tlakového průběhu byla na délce proudnice co možná nejplynulejší a hladká.

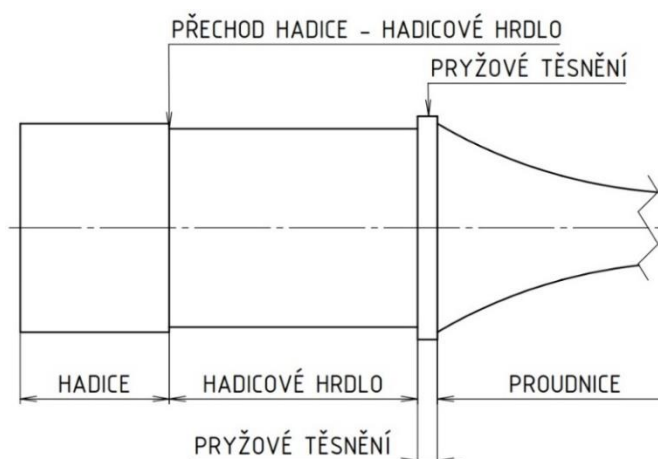
Jelikož proudař musí před sražením terče nejprve uběhnout, s proudnicí v ruce, vzdálenost několika desítek metrů, je výhodné, aby měla proudnice nízkou hmotnost a byla co nejlépe vyvážená vzhledem k místu uchopení proudnice. S hmotností přímo souvisí také volba materiálu, kdy je výhodné, aby bylo tělo proudnice vyrobeno z lehkého materiálu např. slitiny hliníku. Pro snadnou manipulaci s proudnicí je spolu s hmotností důležitá také ergonomie proudnice, kdy by proudnice měla být tvarovaná pro co nejsnadnější a nejpřirozenější uchopení závodníkem. Všechny úkony závodníka s proudnicí během provedení požárního útoku probíhají velmi rychle a je tedy vhodné, aby bylo tělo proudnice tvarované pro snadné uchopení a následnou manipulaci. Ergonomie proudnice v místě úchopu, tedy obvykle těsně za koncovkou, je často závislá na tvarování vnitřního kanálu, tudíž vnější tvarování proudnice obvykle vyplývá z tvaru vnitřního kanálu. S ergonomií a jednoduchostí manipulace přímo souvisí materiál těla proudnice případně zvolená povrchová úprava. Tímto faktorem je vhodné se při návrhu proudnice zabývat a volit, takový materiál či povrchovou úpravu, která nebude kluzká a sníží se riziko vyklouznutí proudnice z ruky zejména při sběru proudnice a při připojování na hadici. Někteří výrobci tomuto předchází použitím pěnového návleku v části proudnice těsně za koncovkou, který zajistí stabilní úchop proudnice.

Tato bakalářská práce se zabývá pouze prvními dvěma výše zmíněnými faktory, průběhem rychlostí a průběhem tlaků.

3 NASTAVENÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU

Za účelem zhodnocení a porovnání současných modelů proudnic byl proveden numerický výpočet proudění v proudnicích v software ANSYS FLUENT. Z důvodu snížení výpočetní náročnosti byla úloha pro modely bez vnitřních tvarových prvků řešena jako rovinná 2D úloha (pozn. na geometrie bez tvarových prvků v kanálu proudnice bude dále referováno jako na geometrie jednoduché). Za účelem snížení výpočetní náročnosti byla také úloha řešena jako symetrická dle podélné osy proudnice. Pro modely obsahující vnitřní tvarové prvky byly úlohy řešeny jako prostorové 3D úlohy a pro opětovné zmenšení výpočetní náročnosti bylo použito jedné, nebo dvou podélných na sebe kolmých rovin symetrie procházejících podélnou osou proudnice.

Jako geometrie byly použity podélné průřezy vybraných současných modelů dostupných na trhu a následně také nově navržené geometrie s ohledem na výsledky současných proudnic. Rozměry současných modelů byly získány měřením. Před samotné geometrie proudnic byly navíc přidány geometrie spojení proudnice s hadicí tedy hadicové hrdlo, hadicové těsnění a 5 cm hadice. Tato geometrie byla přidána z důvodu tvarových změn právě v této oblasti vlivem schodového přechodu mezi hadicí a hadicovým hrdlem a také náhlého rozšíření průměru v místě pryžových těsnění. Lze tedy předpokládat, že tyto tvarové změny v bezprostřední blízkosti samotného těla proudnice, budou mít vliv na vlastnosti proudění vstupujícího do prostoru proudnice. Na tyto přidané geometrie bylo aplikováno několik zjednodušení. Prvním zjednodušením je zanedbání spáry mezi hadicí a hadicovým hrdlem, která je ve skutečnosti na tomto místě přítomna, a to sice z důvodu jejího předpokládaného nevýrazného ovlivnění finálního řešení, avšak ze zkomplikování numerického výpočtu, kdy v tomto místě docházelo k obrácenému proudění a bylo by tedy nutné prodloužení výpočetní domény tak, aby toto zpětné proudění neovlivňovalo vstupní okrajovou podmínku. Druhým zjednodušením je uvažování místa, kde dochází ke styku pryžových těsnění hadice a proudnice pouze jako rozšířeného průměru s válcovým tvarem. Ve skutečnosti v tomto místě vznikají rozličné tvary závislé na deformaci pryžových těsnění, obvykle trojúhelníkového příčného průřezu.



Obr. 16: Schéma přidané geometrie [autor]

Vstupní hodnoty parametrů proudění byly poskytnuty Ing. Karlem Gábou a Kamilem Nevřelou, kteří se aktivně zabývají úpravami čerpadel pro účely požárního sportu a kompletními úpravami strojů PS12. Jelikož jsou napříč sportovními týmy používány stroje o rozdílných objemech

a výkonech, byla pro vstupní okrajovou podmínku zvolena nejobvyklejší naměřená hodnota a to 1 824 000 Pa (18 atm).

3.1. NASTAVENÍ VÝPOČETNÍ SÍTĚ

Výpočetní síť byla vytvořena v software ANSYS Meshing. Optimální počty prvků výpočetní sítě byly zjišťovány experimentálně, iteračním procesem, kdy byly první řešení provedeny na výpočetní síti o velikosti 80 000 prvků. Při postupném navyšování počtu prvků a porovnávání výsledných hodnot s původními simulacemi s menšími počty prvků bylo zjištěno, že výpočetní síť s 80 000 prvky není pro dané parametry proudění dostatečná a nedosahuje dostatečné přesnosti. S ohledem na toto zjištění byly tedy počty prvků postupně navyšovány, dokud nebylo dosaženo dostatečné přesnosti řešení, kdy další navyšování počtu prvků má již pouze minimální zanedbatelný vliv na výsledné hodnoty. Pro 2D geometrie se počet prvků výpočetní sítě pohybuje v rozsahu od 170 000 do 220 000. Pro 3D geometrie se počty prvků pohybují v rozsahu od 2 400 000 do 2 500 000.

3.2. NASTAVENÍ ŘEŠIČE A MODELU

Výběr modelu numerického výpočtu byl ovlivněn vypočtenými hodnotami Reynoldsových čísel. Pro tento výpočet byly použity hodnoty rychlostí vypočtené z průměrných hodnot průtoků při příslušných ztrátových délkách dle následujícího vzorce:

$$v = \frac{Q}{s} \tag{12}$$

Hodnoty průtoků byly poskytnuty Ing. Karlem Gábou a byly získány experimentálním měřením na přenosné motorové stříkačce o objemu 2100 cm³ a úzkých hadicích, tedy C42 a B65. Z vypočtených rychlostí byly následně vypočteny Reynoldsova čísla pomocí následujícího vzorce:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \tag{13}$$

Hodnota kinematické viskozity byla zvolena pro vodu o teplotě 10 °C (1,3063 · 10⁻⁶ m · s⁻¹), což je přibližná teplota vody používané na závodech. Hodnoty průtoků pro příslušné ztrátové délky, rychlostí a Reynoldsových čísel jsou uvedeny v následující tabulce:

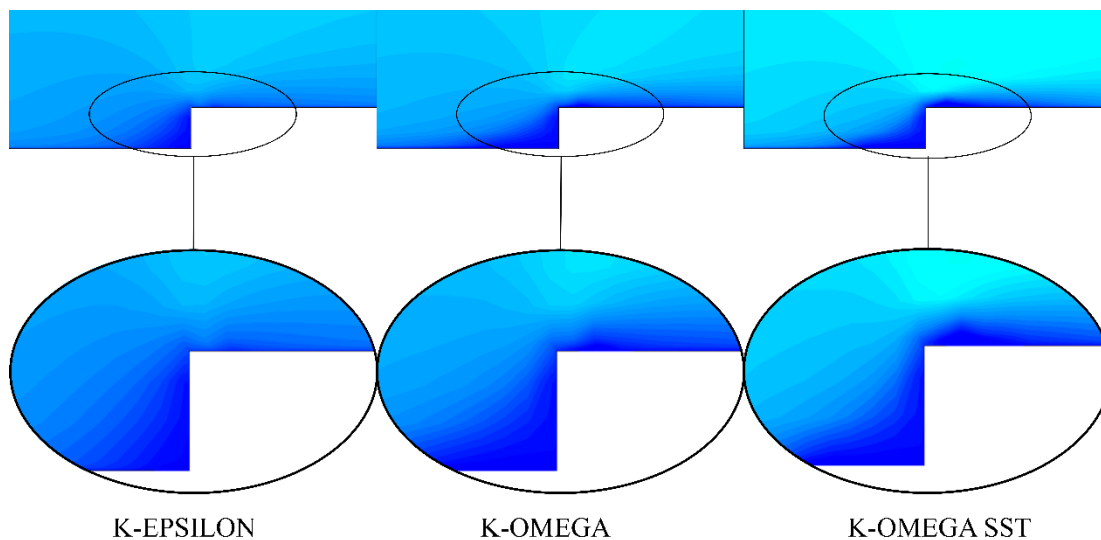
Tabulka 2: Výpočet Reynoldsových čísel

Ztrátová délka [m]	30 m	50 m	80 m	100 m
Průtok [dm ³ ·s ⁻¹]	60	58	51	44
Rychlost [m·s ⁻¹]	18,08	17,48	18,41	15,88
Re [-]	897 174	867 268	590 105	509 110

Z výsledků je zřejmé, že na celé délce hadicového vedení bude proudění v turbulentním režimu, jelikož vypočtená Reynoldsova čísla jsou výrazně vyšší, než je kritická hodnota Reynoldsova čísla 2320, pro přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro numerický výpočet v software ANSYS Fluent byl tedy zvolen turbulentní model.

Výběr konkrétního turbulentního modelu byl proveden ze tří dvourovnicových modelů k-ε, k-ω a k-ω SST. Posouzení vhodnosti modelu pro daný případ proudění v proudnicích bylo provedeno jednak na základě obecných doporučení o vhodnosti jednotlivých modelů, ale bylo také provedeno experimentální ověření nejvhodnějšího turbulentního modelu, kdy byly

provedeny celkem tři simulace proudění se shodnou geometrií, výpočetní sítí a vstupními hodnotami, avšak s rozdílnými turbulentními modely. Na základě těchto simulací byl pro analýzu současných proudnic zvolen model $k-\omega$ SST, a to z důvodu přesnější predikce oddělování proudu a víření ve volném prostoru vzniklém kontrakcí proudu při schodové změně průměru, ke kterému by mělo dle teorie v této oblasti dojít.

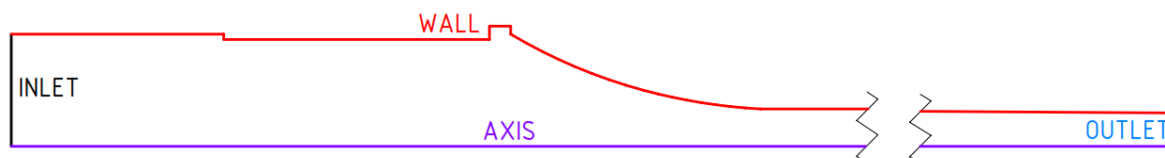


Obr. 17: Porovnání turbulentních modelů [autor]

Problémy byly dále řešeny jako stacionární, tedy neproměnné v čase (Steady State). Pro zjednodušení výpočtu a minimálního ovlivnění výsledků byl také zanedbán vliv gravitace.

3.3. NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Na geometrie byly aplikovány celkem čtyři okrajové podmínky. Jako vstupní okrajová podmínka byla zvolena tlaková podmínka „Pressure inlet“ se vstupní hodnotou tlaku 1 824 000 Pa. Na této okrajové podmínce byly také zvoleny výchozí parametry turbulence, kdy byla ponechána výchozí hodnota intenzity turbulence 5 % (Turbulent intensity) a jako druhý parametr byl definován hydraulický průměr 0,042 m (Hydraulic diameter), což odpovídá průměru hadice na počátku geometrie. Dále byly voleny okrajové podmínky typu „Wall“ pro stěny proudnice, „Axis“ pro osu symetrie pro 2D simulace a „Symmetry“ pro 3D simulace. Jako výstupní podmínka byla zvolena tlaková podmínka „Pressure outlet“ na výstupu z proudnice. Na poslední uvedené podmínce byl nastaven výstup do podmínek atmosférického tlaku, tedy nulové hodnoty přetlaku.



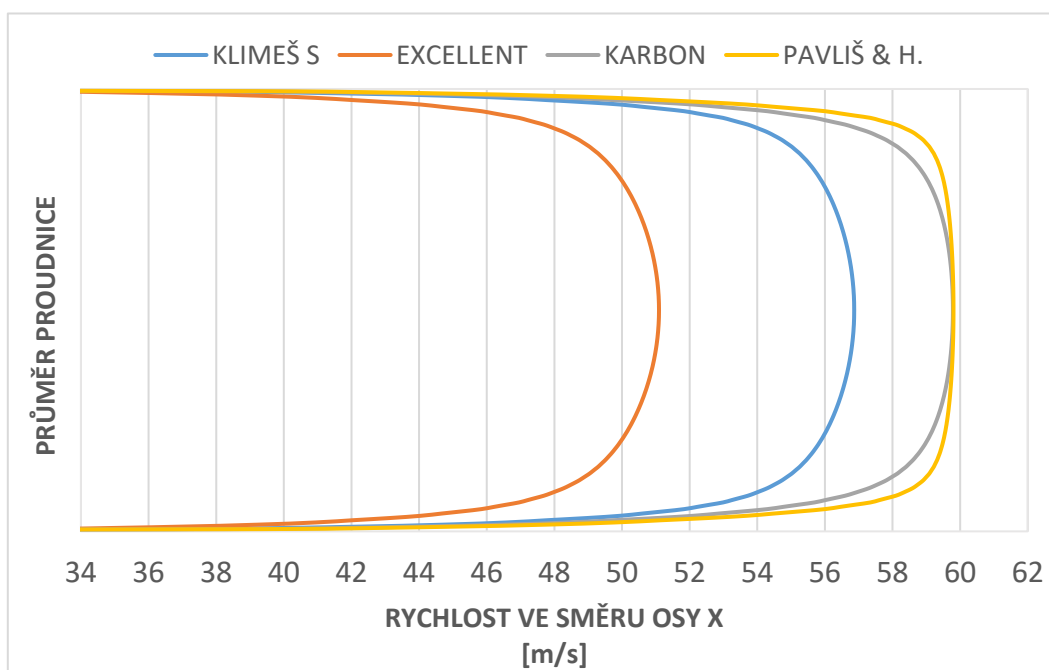
Obr. 18: Schéma okrajových podmínek [autor]

4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SOUČASNÝCH PROUDNIC

Na základě výsledků provedených studií proudění uvnitř proudnic je možné posoudit jednotlivé geometrie na základě několika měřítek. Prvním je rovnoměrnost rozložení výstupních rychlostí proudění po průměru proudnice tak, aby byly rozdíly ve výstupních rychlostech po příčném průřezu co možná nejmenší a tvar rychlostního profilu se blížil pístovému rychlostnímu profilu. Dalším posuzovaným kritériem je dosahovaná rychlost na výstupu z proudnice, kdy je žádané, aby proudění dosahovalo co možná největší rychlosti proudění, což souvisí jednak se snahou závodních týmů o sražení terčů v co možná nejkratším čase a také s parabolickou trajektorií vodního proudu, kdy při nízkých rychlostech dochází k vertikálnímu poklesu proudu.

Třetím posuzovaným kritériem je průběh tlaků po délce proudnice. Křivky tlakových průběhů by měly být hladké, bez zlomů a nemělo by docházet k náhlým změnám tlaků, které zapříčinují jednak vyvedení proudáče z rovnováhy v momentu těsně před výstřikem vody z proudnice, ale také negativně ovlivňují kvalitu výstupního proudu. Pokud jsou již náhlé tlakové změny v proudnici přítomny, je pak vhodné, aby probíhaly co možná nejdále od výstupu z proudnice. Každé kritérium je nutné posuzovat v kontextu s ostatními kritérii daného modelu, jelikož je nutné dosáhnout dobrých výsledků ve všech výše uvedených kritériích.

4.1. RYCHLOSTNÍ PROFILY JEDNODUCHÝCH GEOMETRIÍ



Obr. 19: Rychlostní profily na výstupu proudnic bez tvarových prvků [autor]

Nejvyšších výstupních rychlostí dosahujících hodnot téměř $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dosahují modely Karbon a Pavliš & Hartmann. Z hlediska rovnoměrnosti rozložení rychlosti po příčném průřezu však lepšího tvaru dosahuje model Pavliš & Hartmann, který je tedy nejvhodnější proudnicí z hlediska tvaru rychlostního profilu a dosahovaných rychlostí.

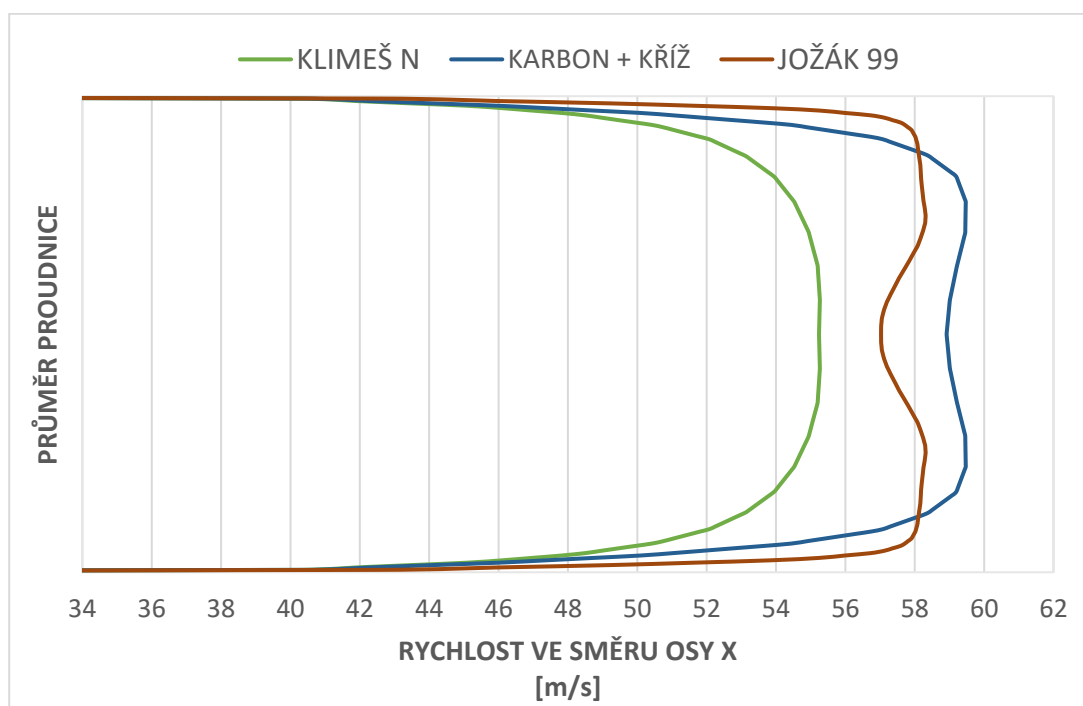
Proudnice s naopak nejhorším rychlostním profilem na výstupu je proudnice Excellent, která dosahuje značně menších rychlostí než ostatní jednoduché proudnice a také má nejméně

rovnoměrné rozložení rychlostí po příčném průřezu, kdy se vzrůstající vzdáleností od stěny rychlost výrazně narůstá.

Křivka modelu Klimeš S leží na rozhraní výše zmíněných modelů, kdy tento model dosahuje výstupních rychlostí v hodnotách pohybujících se pod $57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tvar rychlostního profilu je u modelu Klimeš S spíše nevyhovující, kdy je tvarově v podstatě stejný jako rychlostní profil modelu Excellent pouze s rozdílem vyšších hodnot dosahovaných rychlostí.

S ohledem na výše uvedená zjištění lze tedy říci, že průběh zmenšování průměru proudnice má vliv na velikost výstupní rychlosti, kdy modely s výrazným zúžením již v počáteční části proudnice (modely Klimeš S a Excellent) nedosahují takových rychlostí jako modely s postupným zužováním průměru (model Karbon), nebo modely se zúžením až v jejich koncové části (model Pavliš & Hartmann). Ztráta rychlosti je pak zapříčiněna jednak navýšením třecích tlakových ztrát, kdy se zmenšujícím se průměrem potrubí narůstá rychlost proudění, která má přímý dopad na tlakové ztráty vlivem tření kapaliny o stěny potrubí (viz. rovnice 9). Čím delší je tedy část proudnice, kde proudění probíhá za zvýšených rychlostí, tím větší jsou tlakové ztráty, které následně způsobí i ztráty na rychlosti. Druhým důvodem, proč zejména model Excellent dosahuje výrazně nižších výstupních rychlostí než ostatní modely, je tvar jeho přechodu z velkého průměru na malý, kdy malý poloměr zaoblení tohoto modelu způsobuje kontrakci proudu a zavíření v prostorech uvolněných právě kontrakcí viz. kapitola 1.3.4.

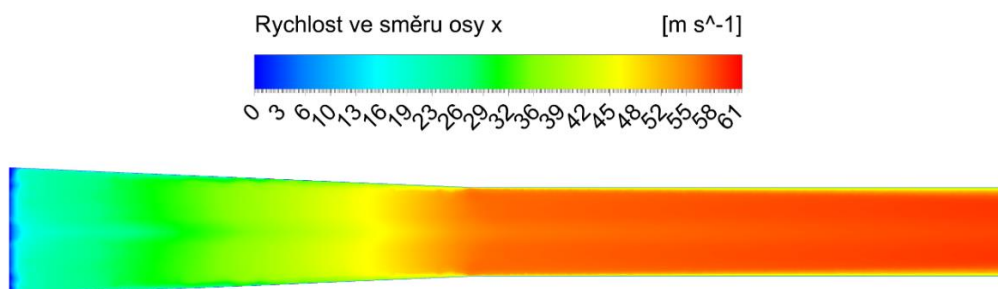
4.2. RYCHLOSTNÍ PROFILY GEOMETRIÍ S TVAROVÝMI PRVKY



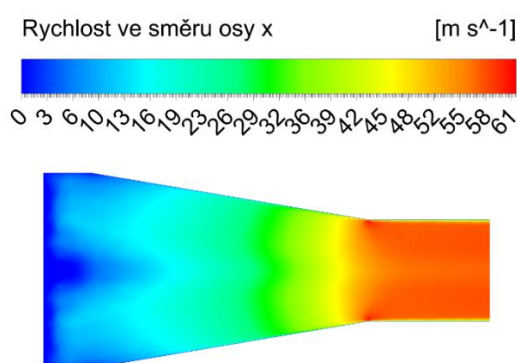
Obr. 20: Rychlostní profily na výstupu proudnic s tvarovými prvky [autor]

Obrázek výstupních rychlostních profilů modelů s tvarovými prvky ukazuje, že hlavním nedostatkem těchto modelů jsou náhlé propady rychlostí ve středu proudu. Prvním důvodem, proč u těchto modelů k těmto nerovnoměrnostem dochází je umístění průsečíku podélných lopatek v ose proudnice, kde proudění dosahuje nejvyšších rychlostí. Náhlá změna směru proudění způsobená obtékáním spojnice podélných lopatek pak způsobí jednak víření ihned po

vstupu do kanálů tvořených podélnými lopatkami, ale také navýšení radiálních rychlostí a narušení rovnoměrnosti rozložení rychlostí po příčném průřezu.



Obr. 21: Kontury rychlostí na výstupu z lopatek – Karbon s křížkem [autor]

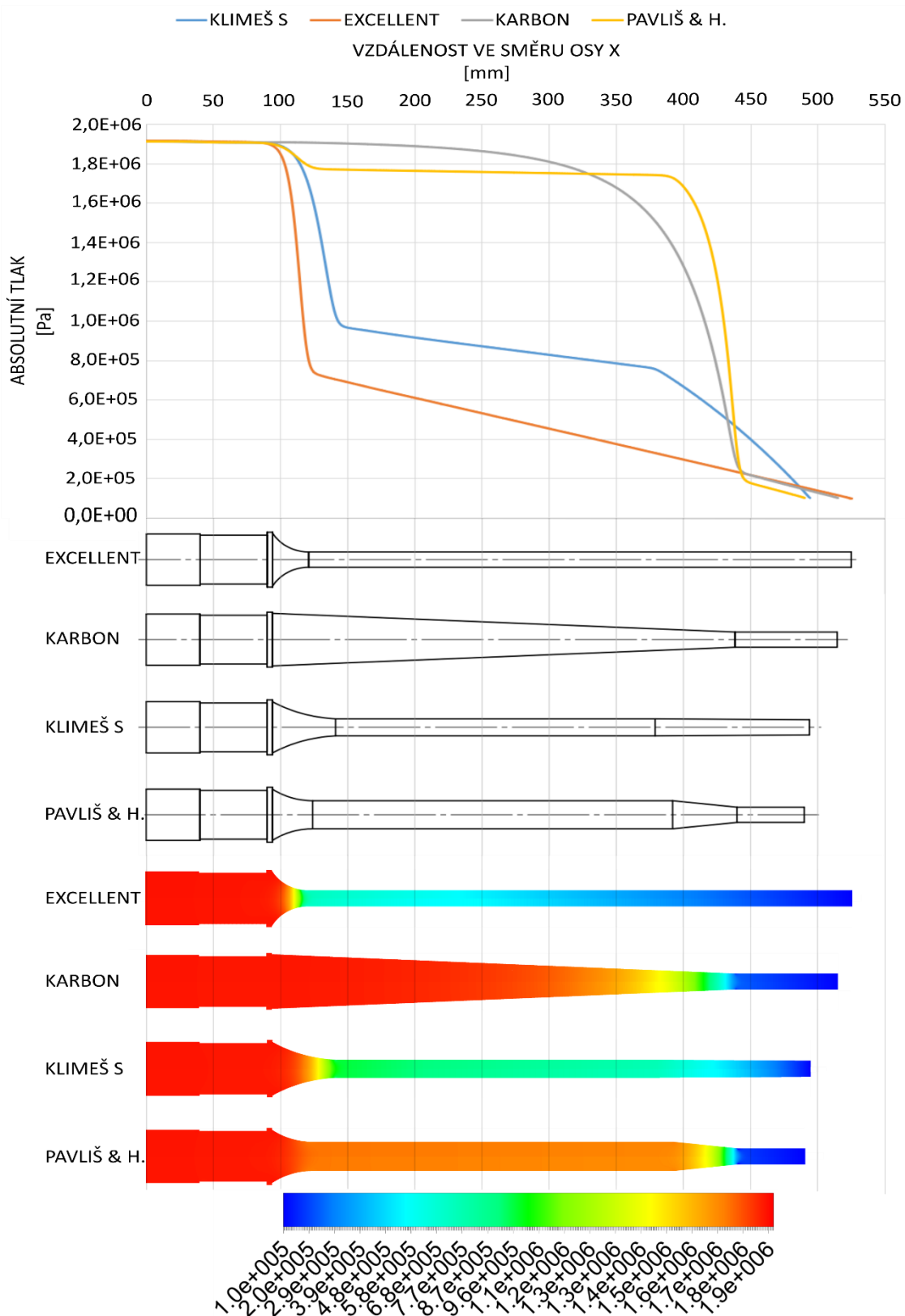


Obr. 22: Kontury rychlostí na výstupu z lopatek – Jožák 99 [autor]

Podobná situace nastává také na výstupu z kanálů, kde dochází k opětovnému zvětšení průtočného průřezu a proud vody přirozeně zaplní prázdňé místo vzniklé za hranami a spojnicí lopatek. Toto vyplnění volného prostoru způsobí opět náhlou změnu směru proudění a výrazné víření. Víření je nejvýraznější právě za spojnicí podélných lopatek, kde se o vyplnění prázdňého prostoru snaží proudy ze všech kanálů a dochází zde tedy k výraznému vzájemnému působení proudů a s tím spojené silné turbulenci. Význam tloušťek stěn podélných lopatek můžeme vidět při porovnání Obr. 22 a Obr. 21, kdy v případě proudnice Karbon s křížkem s tloušťkami podélných lopatek 0,2 mm dochází k výrazně menšímu víření za ukončením tvarového prvku ve srovnání s modelem Jožák 99, kde je tloušťka lopatek 1 mm. Druhým důvodem propadu na výstupním rychlostním profilu je nedostatečná vzdálenost od ukončení tvarového prvku po výstup z proudnice, kdy se takto zdeformovaný rychlostní profil již nestihne vyrovnat.

Z výše uvedených zjištění lze tedy říci, že použití tvarových prvků se spojnicí na středu je krajně nevhodné. Také platí, že žádný ze současných modelů, který tvarové prvky obsahuje, těmito prvky výstupní rychlostní profil nevylepší, spíše naopak. V případě, že mají být tvarové prvky použity, je vhodné, aby tloušťka jejich stěn byla co možná nejmenší.

4.3. TLAKOVÉ PRŮBĚHY JEDNODUCHÝCH GEOMETRIÍ



Obr. 23: Tlakové průběhy jednoduchých modelů proudnic [autor]

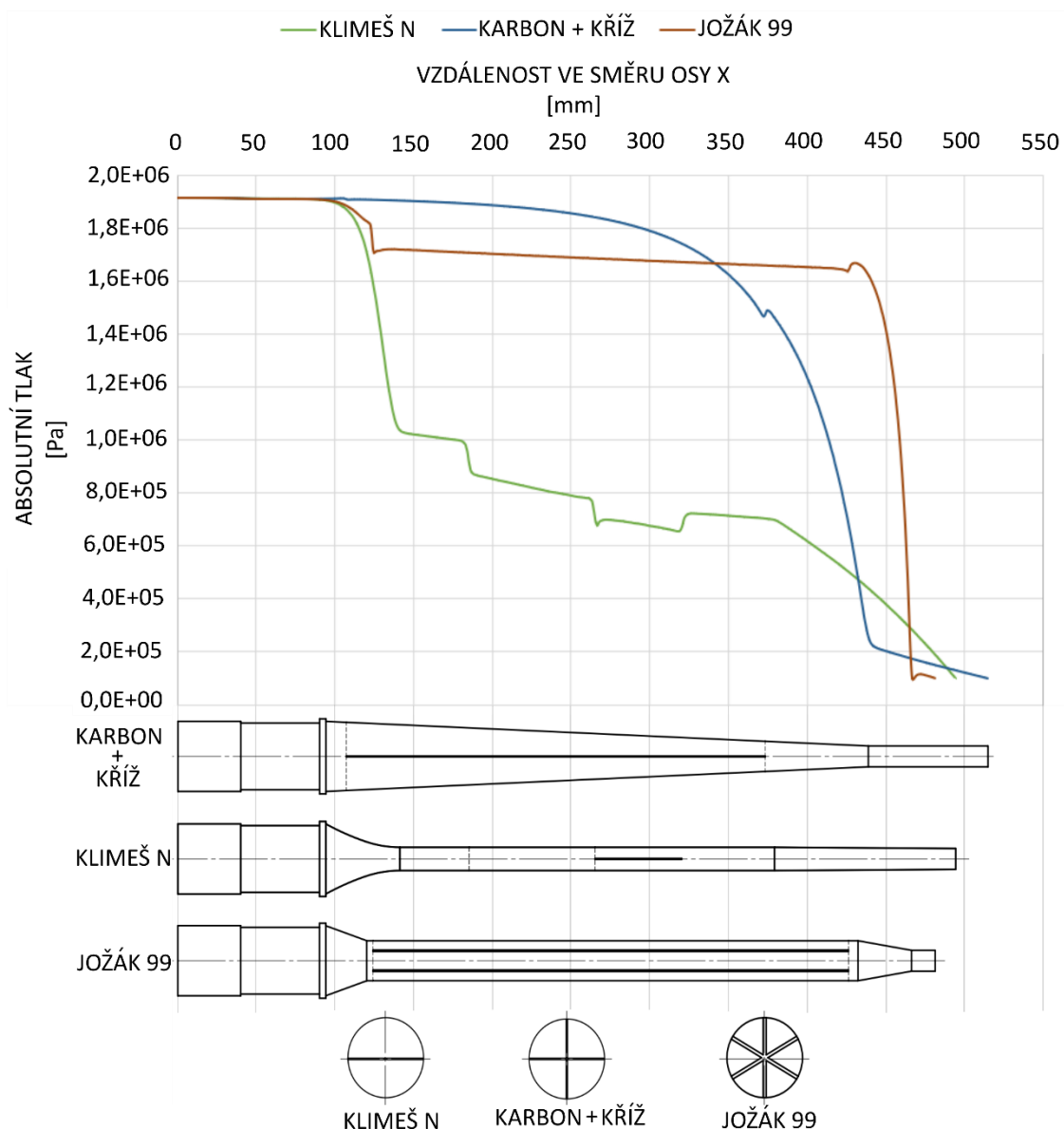
Na základě Obr. 23 lze říci, že nejpříznivější tlakový průběh nabízí model Karbon, který díky svému kuželovému zúžení, které tvoří téměř celou délku proudnice, snižuje tlak plynule a s téměř hladkým průběhem. Problémová část se u tohoto modelu nachází v jeho koncové části, kde dochází k přechodu kuželové části do části válcové a je zde tedy přítomen zlom v tlakovém průběhu, který sice není tak výrazný jako u ostatních modelů, avšak je stále přítomný. Tato tlaková změna je navíc přítomna v místě těsně před výstupem vody z proudnice, což není, jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, vhodné místo pro výraznou tlakovou změnu. U modelu Pavliš & Hartmann by se na první pohled mohlo zdát, že jeho tlakový průběh je podobný jako u modelu Karbon, avšak tlakový spád modelu Pavliš & Hartmann je mnohem výraznější, a především je z obou stran uveden zlomem, což není v žádném případě žádanou vlastností. V případě tohoto modelu dochází nejprve k zúžení na průměr 24 mm, tedy asi dvojnásobek výstupního průměru. Válcová část s tímto průměrem zabírá většinu délky celé proudnice, a proto je i tlakový průběh téměř vodorovný, kdy malý tlakový spád způsobuje pouze tření o stěny vnitřního kanálu proudnice. Částí zodpovědnou za nejvýraznější změnu v tlaku je kuželové zúžení v koncové části proudnice, kde má kužel zúžení délku pouhých 48 mm při vrcholovém úhlu kužele $12,5^\circ$, což nutí proud rychle změnit směr proudění.

V podstatě opačným modelem k předchozímu modelu je model Excellent, kde je zúžení na hodnotu výstupního průměru provedeno již v ústí proudnice a celá zbývající délka již setrvává na tomto průměru. Proto tedy můžeme vidět na tlakovém průběhu tohoto modelu výrazný tlakový spád ihned po vstupu do těla proudnice a následný pozvolný pokles až na hodnotu atmosférického tlaku. Tato geometrie tedy také není nejvhodnější, jelikož křivka tlakového průběhu opět obsahuje výrazný tlakový pokles a zlomy.

Pomyslnou střední cestou mezi těmito modely je opět proudnice Klimeš, kdy dochází v ústí proudnice opět ke zúžení, avšak v tomto případě na 14 mm, což je výrazně blíže výstupnímu průměru proudnice, než je tomu u modelu Pavliš & Hartmann. Toto zúžení má opět za následek tlakovou změnu, která však není tolik výrazná jako u modelu Excellent, čemuž přispívá také fakt, že poloměr zaoblení tohoto přechodu je výrazně vyšší, než je tomu právě u modelu Excellent. Tento vliv velikosti poloměru zaoblení přechodové části na příkrost tlakového spádu lze vidět při porovnání tlakových průběhů právě těchto dvou modelů. Za zaoblením následuje válcová část, ve které dochází na celé její délce k pozvolnému poklesu tlaku vlivem tření o stěny vnitřního kanálu. Proudnice je zakončena pozvolným kuželovým zúžením, jehož úhel je, oproti kuželovému zúžení modelu Pavliš & Hartmann, velmi malý. Přestože je tato část proudnice zužující se, dochází zde již jen k pozvolnému poklesu tlaku, což je dáno malým vrcholovým úhlem a k tomu přiměřenou délkou kužele, na kterém zužování probíhá.

Z výsledků této kapitoly lze tedy vyvodit několik závěrů. Prvním je, že v případě použití kuželového zúžení, je vhodné, aby úhel tohoto zúžení byl co možná nejmenší a zároveň byl kužel co možná největší délky. Dále lze také říci, že pro přechody průměrů zaoblením je vhodné volit co možná největší poloměr zaoblení, čímž je možné redukovat příkrost tlakového spádu. Při návrhu geometrie proudnice je také vhodné se vyvarovat prudkým změnám v průměru vnitřního kanálu, kdy při dosahovaných rychlostech mají takové změny velmi výrazný vliv na tlakové průběhy.

4.4. TLAKOVÉ PRŮBĚHY GEOMETRIÍ S TVAROVÝMI PRVKY



Obr. 24: Tlakové průběhy modelů s tvarovými prvky [autor]

Na obrázku výše jsou zachyceny tlakové průběhy modelů s tvarovými prvky. Tvarové prvky vyvolávají tlakové změny již svou přítomností, kdy zmenšují průtočný průřez proudnice a tím způsobují tlakové fluktuace na jejich vstupu a výstupu. Tlakové průběhy modelů Karbon s křížem a Klimeš N jsou velmi podobné průběhům jednoduchých modelů, ze kterých vycházejí, tedy Karbon a Klimeš S. Jediným rozdílem oproti jednoduchým modelům jsou tlakové změny způsobené redukcemi průtočných průřezů samotnými tvarovými prvky. Nejmenší takové změny dosahuje model Karbon s křížem, a to z důvodu velmi tenkých stěn tvarových prvků, jejichž tloušťky zde dosahují asi jen 0,2 mm. Geometrie modelu Jožák 99 vykazuje naopak velmi výrazné tlakové změny, kdy bezprostředně za kuželovým zúžením v ústí proudnice následuje tvarový prvek, čímž dochází k první náhlé změně tlaku. Tloušťka stěn podélných lopatek je u tohoto modelu 1 mm, což tuto změnu dále navyšuje. Podélné lopatky pak pokračují po téměř celé délce proudnice. Přestože je tato geometrie téměř shodná s jednoduchou geometrií Pavliš & Hartmann, vznikají v této části o poznání znatelnější ztráty,

než je tomu právě u modelu Pavliš & Hartmann. Příčinou tohoto jevu je zvětšení třecích ploch o plochy podélných lopatek, tak jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1. Po výstupu z lopatek následuje krátká válcová část, kde dochází k drobnému nárůstu tlaku, vlivem opětovného zvětšení průtočného průřezu. Následné kuželové zúžení pak způsobuje velmi výrazný tlakový skok, ke kterému navíc dochází těsně před výstupem vody z těla proudnice, na nejméně vhodném místě. Podobně jako u jednoduchého modelu Pavliš & Hartmann je tlaková změna způsobena velkým vrcholovým úhlem kužele zúžení a jeho krátkou délkou.

Pokud tedy mají být v kanálu proudnice použity tvarové prvky, je vhodné, aby stěny těchto prvků měli co nejmenší tloušťku. Negativní dopad na tlakový průběh mají i délky tvarových prvků, kdy se ve všech současných požárních proudnicích s tvarovými prvky používají lopatky zabírající téměř celou délku proudnice, čímž dochází k navyšování tlakových ztrát vlivem tření, jelikož je násobně zvětšena třecí plocha.

5 NÁVRH OPTIMALIZOVANÝCH GEOMETRIÍ

Na základě poznatků získaných z analýzy současných proudnic a dostupných studií, týkajících se tvarování trysek, bude v této kapitole navrženo několik geometrií, které se jednak vyvarují nedostatků současných proudnic a také aplikují současné poznatky z oblasti vodních trysek. Navržené geometrie budou následně podrobeny numerickým výpočtům s nastavením z kapitoly 3. Výchozí délka těla proudnice pro návrhy je volena 400 mm a vstupní průměr 42 mm dle průměru hadice.

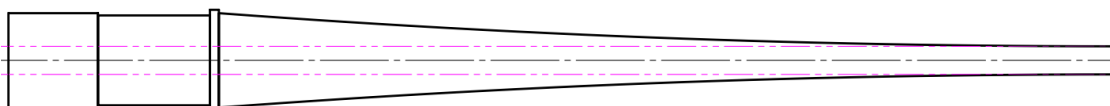
5.1. PRVNÍ SKUPINA NÁVRHŮ

První a druhý návrh vychází ze studie [14], ve které bylo, za využití numerických výpočtů v počítačovém software, porovnáváno pět jednoduchých geometrií trysek z hlediska reakčních sil a výstupních rychlostí, což jsou hodnotící kritéria i pro proudnice v této práci. I přesto, že pracovní tlaky, při kterých byly v této studii numerické výpočty prováděny jsou asi o 6 kPa nižší a rozměry geometrií jsou asi o řád vyšší, než je tomu u proudnic pro požární sport, poměry vstupních a výstupních průměrů jsou podobné. Z tohoto důvodu se autor rozhodl aplikovat zjištění v této studii i na geometrie proudnic pro požární sport.

Z výsledků této studie vyplývá, že nejvyšších axiálních rychlostí na výstupu dosahuje kuželová tryska s vrcholovým úhlem kužele 40° . S těsným odstupem za kuželovou tryskou dosáhla vysokých hodnot rychlostí také geometrie obrácené Peltonovy trysky (konvexní tvar), která navíc způsobuje nejnižší reakční síly.

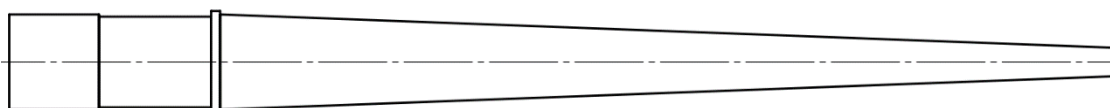
Z důvodu výborných výsledků v obou hodnocených kritériích podstatných i pro proudnice pro požární sport, byly pro návrhy použity oba výše zmíněné druhy trysek.

Návrh s geometrií obrácené Peltonovy trysky je tvořen křivkou spojující počáteční průměr 42 mm a koncový průměr 12,5 mm. Tyto křivky jsou tečné na přímky rovnoběžné s osou proudnice a procházející body na obvodu výstupního průměru (dvojitě čerchovaná čára na schématu).



Obr. 25: 1. Návrh 1 - schéma obrácené Peltonovy proudnice [autor]

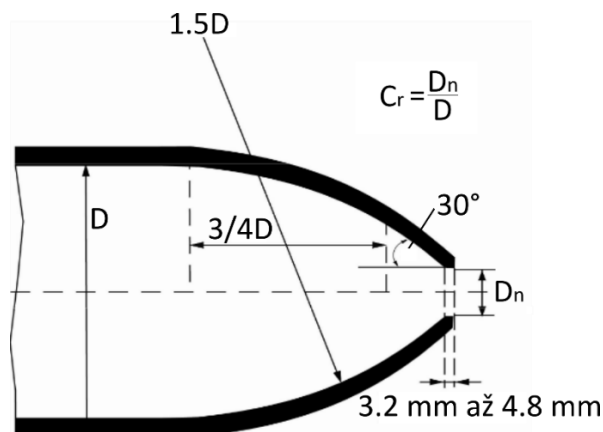
Návrh kuželové trysky je řešen obdobně pouze s rozdílem, že křivky spojující vstup a výstup proudnice jsou přímé bez zakřivení.



Obr. 26: 2. Návrh 2 - schéma kuželové proudnice [autor]

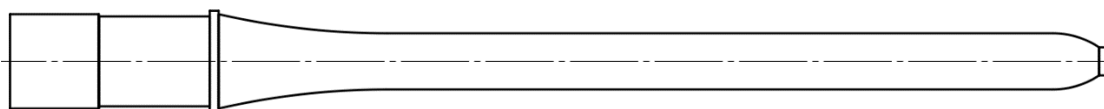
Třetí návrh vychází ze studie [15], zabývající se koherentní délkou vodního paprsku v oboru tryskání. Jelikož na trysky v tomto oboru je kladen požadavek na co nejvíce kompaktní proud a s tím spojenou maximální sílu proudu, je možné využít tyto poznatky i pro proudnice pro požární sport.

Návrh z této studie vychází z geometrie typu Rouse, která byla původně navržena pro použití jednotkami požární ochrany při hašení požárů.



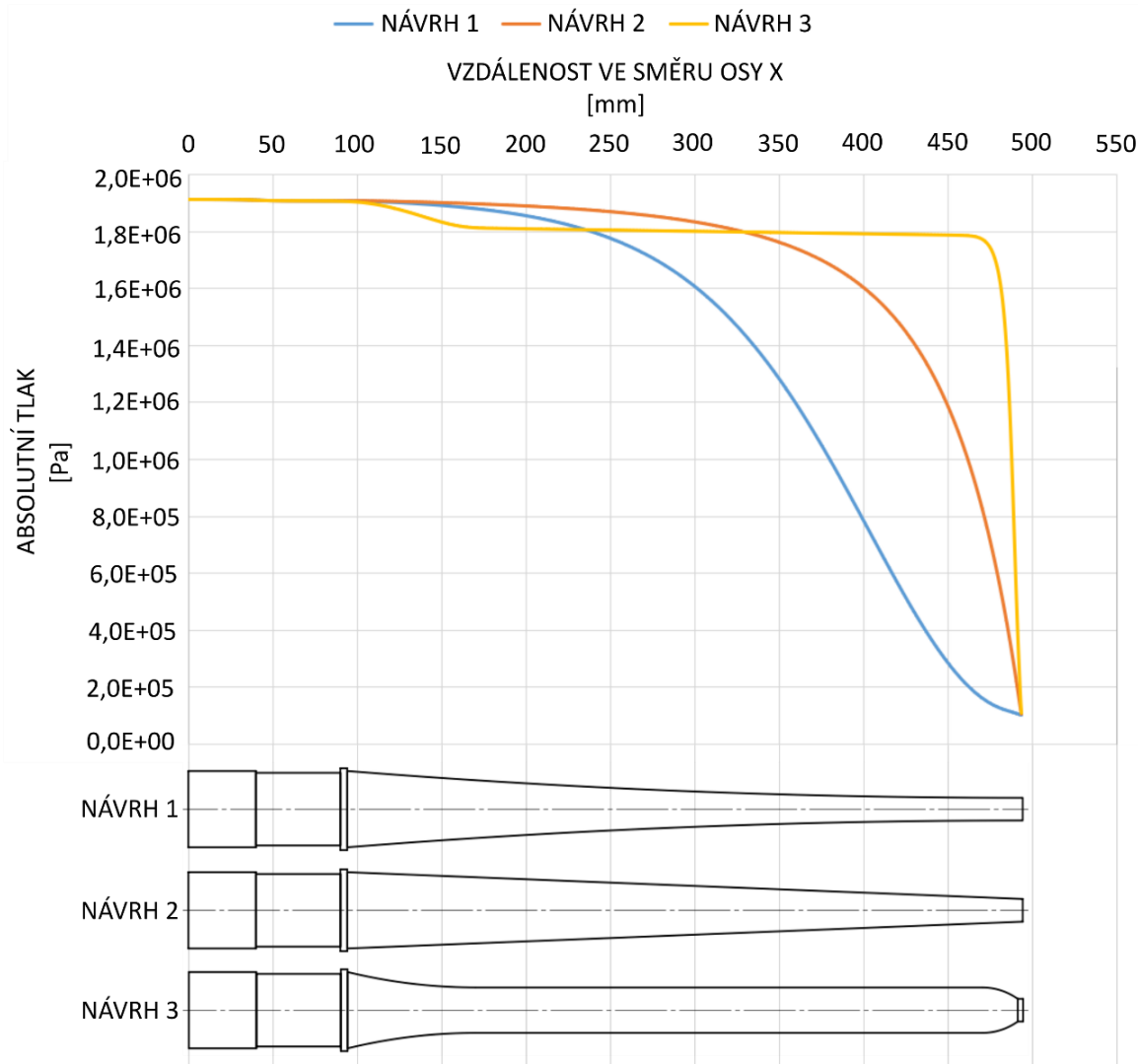
Obr. 27: Geometrie trysky typu Rouse [15]

Při návrhu byly zachovány geometrické poměry dle Obr. 27, dle výstupního průměru proudnice předepsaného pravidly požárního sportu. Pro přechod mezi průměrem hadice a průměrem D z Obr. 27 byl zvolen přechod zaoblením o dostatečně velkém poloměru. U této geometrie lze předpokládat, že její tlakový průběh bude podobný modelu Pavliš & Hartmann, jelikož zúžení na výstupní průměr probíhá až těsně před výstupem z proudnice. I přes tento předpoklad se autor rozhodl tuto geometrii do výběru zařadit, a to za účelem údajně velmi dobré kompaktnosti výstupního proudu, kdy je tento druh geometrie často používán právě v oblasti tryskání.



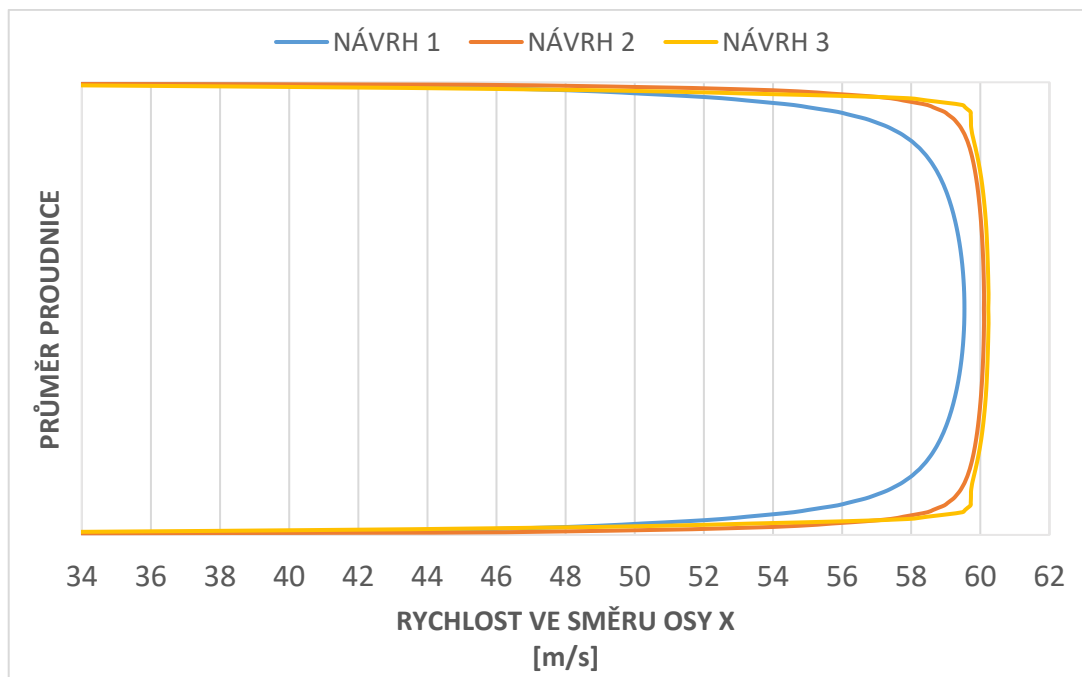
Obr. 28: Návrh 3 - schéma proudnice typu Rouse [autor]

5.2. ZHODNOCENÍ PRVNÍ SKUPINY NÁVRHŮ



Obr. 29: Tlakové průběhy první skupiny návrhů [autor]

Výše uvedený obrázek ukazuje tlakové průběhy v první skupině navržených geometrií. Nejvhodnější tlakový průběh nabízí návrh 1 s geometrií obrácené Peltonovy trysky, následovaný geometrií s kuželovým zúžením. Toto zjištění odpovídá poznatkům ze studie [14], odkud návrhy pochází, kde bylo zjištěno, že nejmenší reakční sílu vyvolává právě geometrie obrácené Peltonovy trysky. Tlakový spád návrhu 2 s kuželovým zúžením je již velmi strmý, a proto spolu s návrhem 3 nejsou tyto geometrie vhodné pro použití v požárním sportu, zvláště pak návrh 3, kde je tlakový spád velmi výrazný, a navíc se nachází blízko výstupu z proudnice.



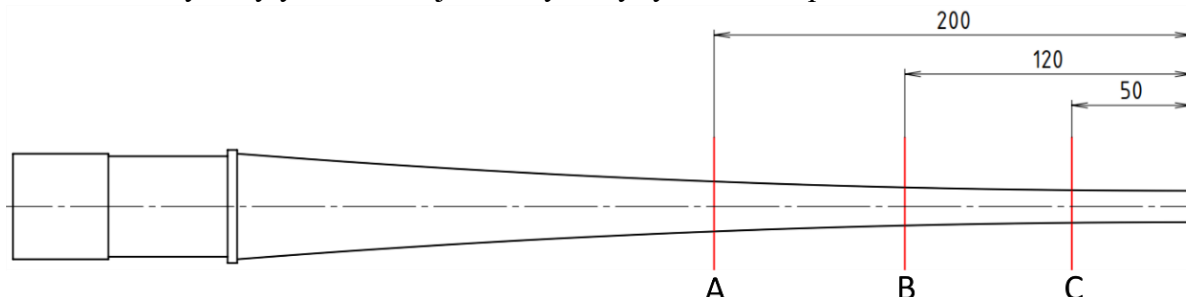
Obr. 30: Rychlostní profily na výstupu z modelů první skupiny návrhů [autor]

Při zhodnocení tvarů výstupních rychlostních profilů je situace zcela opačná, kdy geometrie návrhu 1 dosahuje oproti dvěma zbývajícím návrhům značně horší kvality výstupního rychlostního profilu. Oproti tomu návrh 3 dosahuje na výstupu téměř pístového rychlostního profilu, avšak v kombinaci s krajně nevhodným tlakovým průběhem je i přesto tento model nevyhovující pro účely požárního sportu.

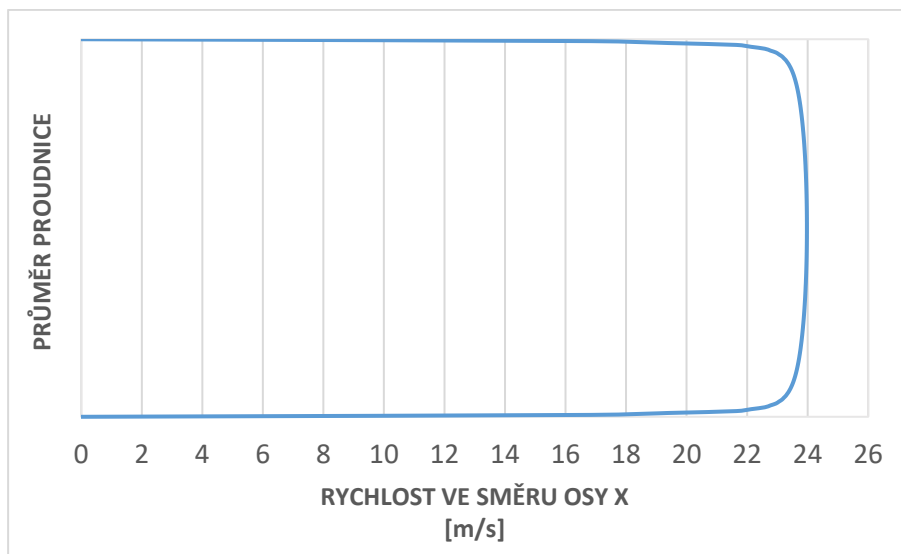
5.3. OPTIMALIZOVANÝ NÁVRH

Čtvrtý návrh vychází z poznatků získaných z numerických výpočtů první skupiny, kdy by bylo vhodné najít takovou geometrii, která by byla kompromisem mezi návrhy jedna a dva. Tedy najít geometrii, jejíž tlakový průběh se bude blížit tlakovému průběhu prvního návrhu a tvar výstupního rychlostního profilu bude co nejvíce podobný rychlostnímu profilu druhého návrhu. Z výše uvedeného vyplývá, že křivka stěny takové geometrie bude ležet mezi křivkami prvních dvou modelů.

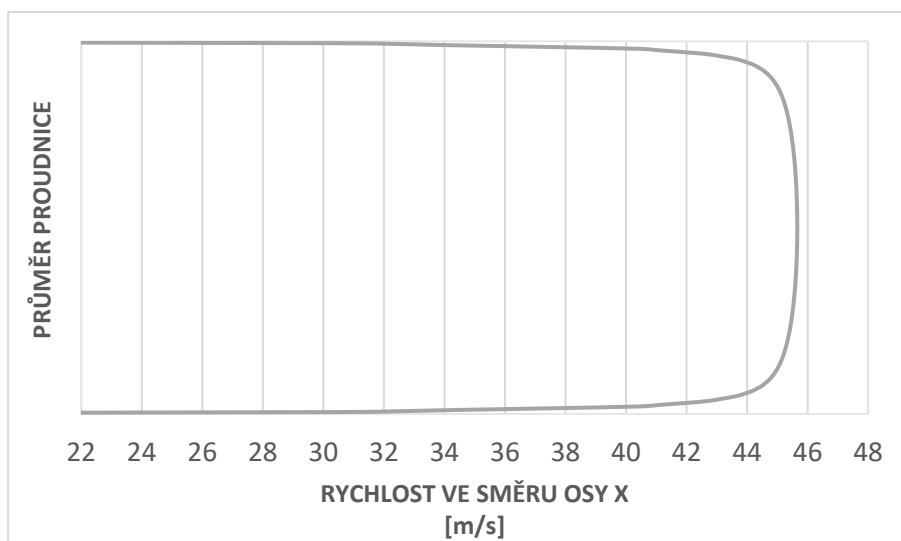
Pro určení poloměru takové křivky bylo nejprve nutné zjistit, jak se v geometrii návrhu 1 vyvíjí rychlostní profil. Pro tento účel bylo provedeno několik řezů právě na geometrii prvního návrhu, na kterých byly následně zjišťovány tvary rychlostních profilů.



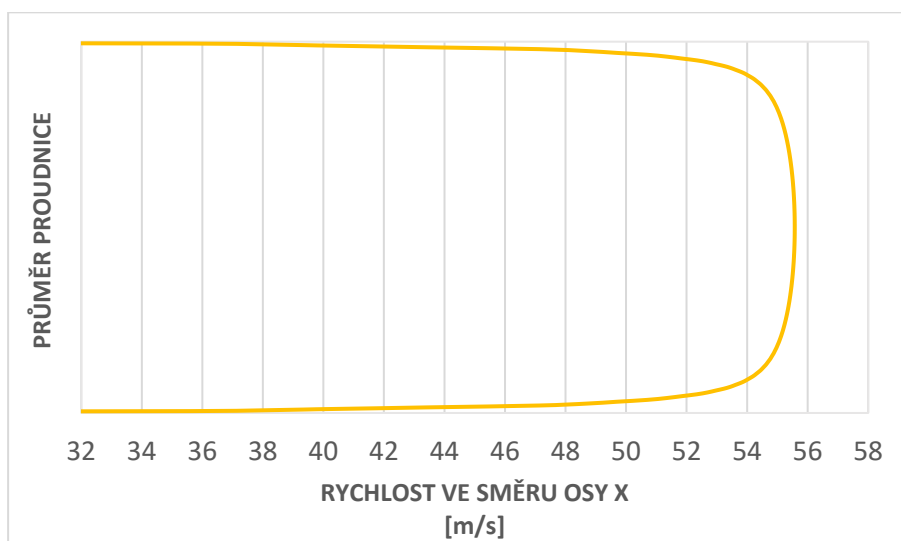
Obr. 31: Schéma řezů geometrií prvního návrhu s rozměry [autor]



Obr. 32: Rychlostní profil v řezu A [autor]

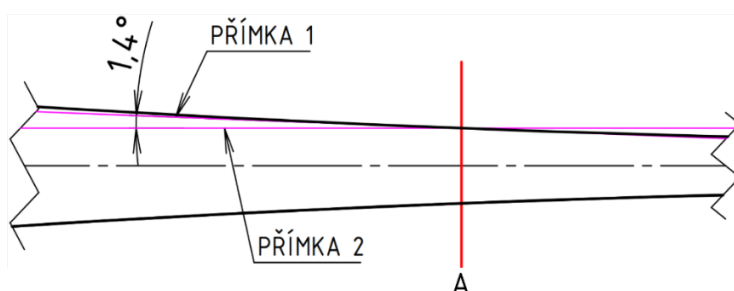


Obr. 33: Rychlostní profil v řezu B [autor]



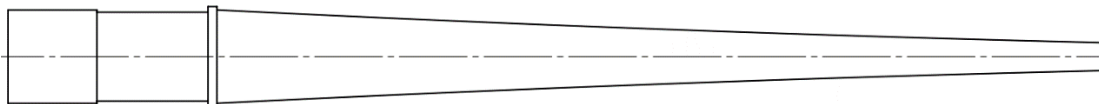
Obr. 34: Rychlostní profil v řezu C [autor]

Obrázky výše ukazují postupnou deformaci rychlostního profilu, kdy v řezu A je přítomný téměř pístový rychlostní profil. V řezech B a C však již dochází k deformaci rychlostního profilu, kdy dochází k postupnému zvětšení rozdílu v rychlostech mezi středem a okraji proudu. Optimálním řešením by bylo tedy trysku zkrátit tak, aby její délka dosahovala pouze do vzdálenosti místa řezu A. Takové zkrácení by však způsobilo strmější tlakový spád, jelikož by tento spád musel proběhnout na kratší vzdálenosti, což by vedlo opět k nevyhovujícímu modelu. Z tohoto důvodu byla ve vzdálenosti řezu A bodem na obvodu proložena přímka tečná na stěnu původní geometrie návrhu 1. Tímto bodem byla následně proložena druhá přímka rovnoběžná s podélnou osou těla proudnice. Následně byl změřen úhel mezi těmito dvěma přímkami.



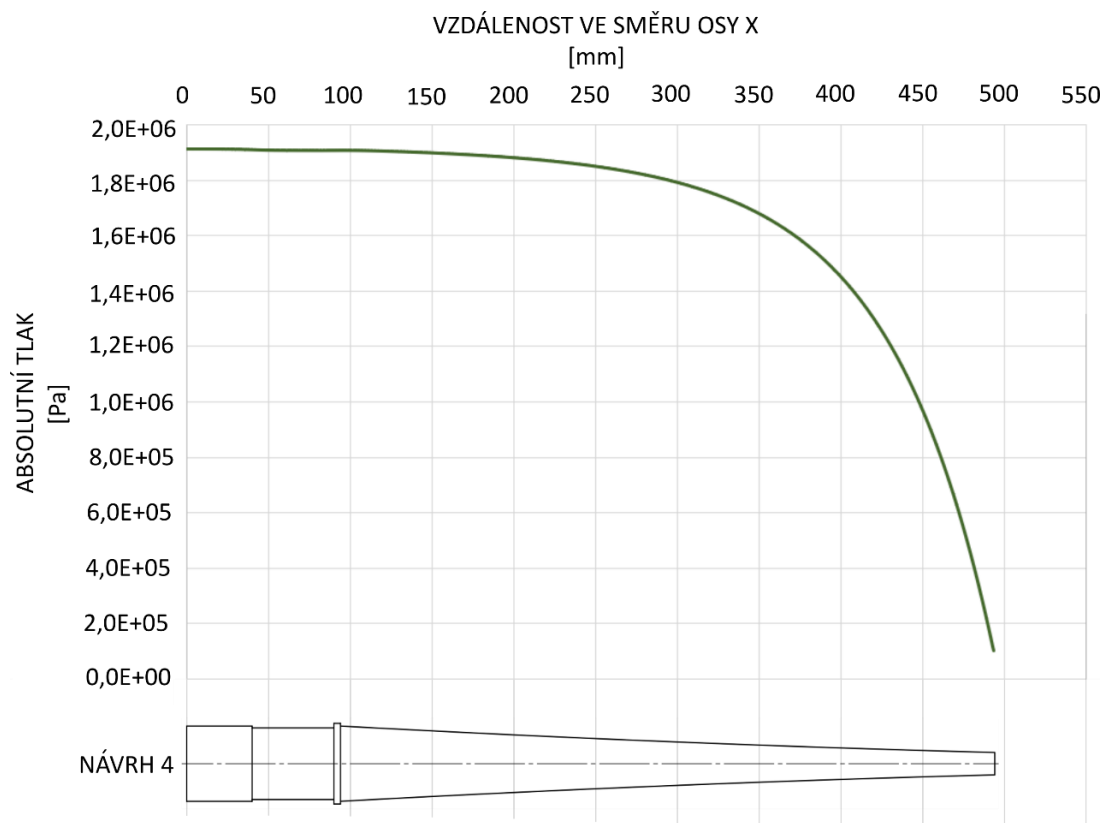
Obr. 35: Schéma měření úhlu tečny [autor]

Geometrie návrhu 1 byla poté upravena tak, aby křivka stěny svírala na výstupu tentýž úhel jako je úhel naměřený na obrázku výše tedy $1,4^\circ$. Tímto bylo tedy docíleno zachování stejné délky proudnice jako v návrhu 1 a zároveň byla nalezena křivka stěny vnitřního kanálu proudnice ležící mezi křivkami stěn návrhu 1 a 2, čímž by tato geometrie měla být kompromisem mezi plynulým hladkým tlakovým průběhem a rovnoměrným rozložením rychlostí na výstupu z proudnice.



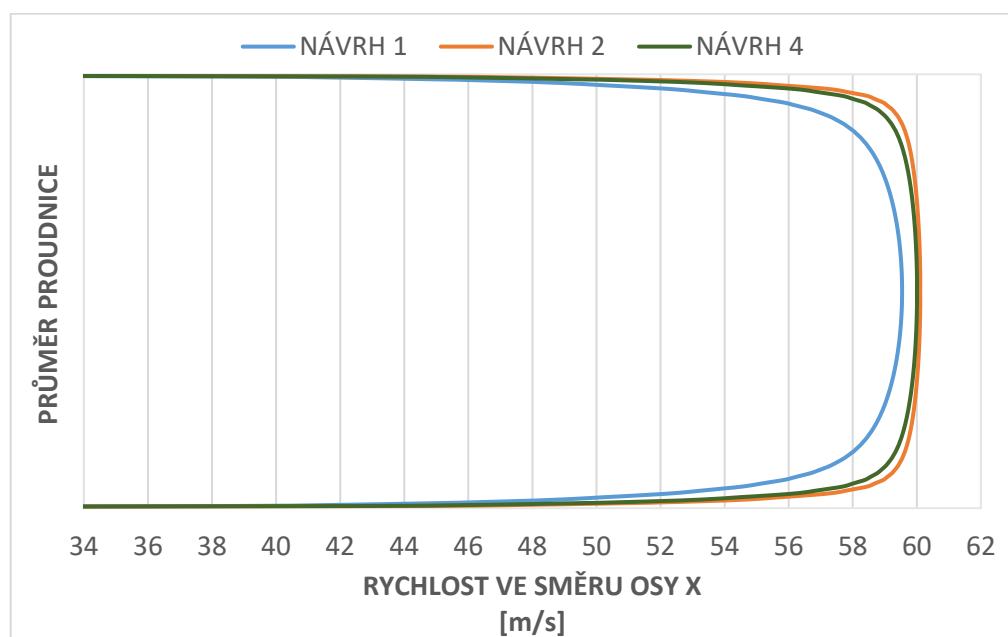
Obr. 36: Návrh 4 - kombinovaná geometrie [autor]

5.4. ZHODNOCENÍ OPTIMALIZOVANÉHO NÁVRHU



Obr. 37: Návrh 4 - tlakový průběh [autor]

Křivka tlakového průběhu čtvrtého návrhu je mezistupněm mezi návrhem prvním a druhým, kdy tlakový spád není tak strmý, jako je tomu u geometrie s kuželovým zúžením, ale zároveň není tolik pozvolný, jako je tomu u spádu 1 návrhu.



Obr. 38: Rychlostní profily na výstupu optimalizovaných geometrií [autor]

Co se týče tvaru rychlostního profilu, je optimalizovaná geometrie návrhu 4 velmi podobná geometrii s kuželovým zúžením z druhého návrhu, tedy vyhovující. Dá se tedy předpokládat, že výstupní proud tohoto modelu bude i při použití v reálných podmínkách kompaktnější, než je tomu u současných modelů dostupných na trhu.

Nově navržená geometrie tedy splňuje cíle, které byly stanoveny na začátku této práce, kdy dosahuje rovnoměrného rozložení rychlostí po příčném průřezu na výstupu z proudnice a zároveň je její tlakový průběh plynulý, bez výrazných tlakových změn, či prudkých tlakových spádů. Nevýhodou nově navržené geometrie je případná vyrobiteľnosť pomocí konvenčních metod obrábění, kdy vzhledem k celkové délce a malému průměru nebude možné tuto součást soustružit či vrtat. Téměř kuželový tvar geometrie také ztěžuje případnou výrobu z více částí a jejich následné spojení, kdy vzhledem k požadavku na lehkou a malou konstrukci nelze použít spojení jednotlivých dílů pomocí závitového spojení, jelikož válcové závity by výrazně navýšily rozměry a hmotnost celé konstrukce. Jednou z proveditelných možností výroby je zhotovení jednoúčelového tvarového nástroje s vnějším profilem ve tvaru vnitřního kanálu proudnice, pomocí kterého se otvor vystruží. Druhou možností je zhotovení formy a následná výroba pomocí tlakového lití kovu. Obě výše zmíněné metody jsou však výhodné až při sériové výrobě, kdy je pro ekonomičnosť výroby nutné zaplatit výrobu nástroje či formy. Třetí možností je využití metod rapid prototyping, kde však hrozí problém s dosažením dostatečně kvalitní struktury povrchu a rozměrové přesnosti při zachování konkurenceschopnosti, kdy s přesnějšími metodami výrazně narůstá cena výrobku. V případě výroby tohoto modelu je tedy nutné se technologií výroby dále zabývat.

ZÁVĚR

První rešeršní část bakalářské práce popisuje disciplínu požárního sportu, požárním útok. Požární proudnice, jedna z armatur používaných právě při požárním útoku, je hlavním předmětem této práce. V rámci této úvodní části je popsáno provedení disciplíny, hydraulické ztráty přítomné při této disciplíně a používané technické vybavení. Druhá polovina rešeršní části práce se zabývá požárními proudnicemi, a to jak zásahovými, tak proudnicemi určenými pro použití v požárním sportu, kde je uveden jejich přehled a požadavky, které jsou na proudnice kladeny.

V praktické části byla nejprve provedena analýza a porovnání současných modelů proudnic dostupných na trhu. Pro tyto účely bylo využito počítačového modelování proudění v software ANSYS FLUENT. Za účelem získání co možná nejvíce autentických výsledků byla navázána spolupráce s Ing. Karlem Gábou a Kamilem Nevřelou, kteří se aktivně zabývají úpravami přenosných motorových stříkaček pro požární sport. Tito úpravci poskytli naměřená data, která byla následně použita jako vstupní parametry pro numerické výpočty. Dále bylo také provedeno rozměrové měření současných modelů proudnic, dle kterých byly následně vytvořeny CAD modely geometrií v software SOLIDWORKS 2016. Po kompletaci všech dat nutných k provedení numerických výpočtů byly provedeny samotné numerické výpočty. V práci jsou prezentovány výsledky pouze pro vzájemně odlišné tvary geometrií, numerické výpočty však byly provedeny pro všechny současné proudnice dostupné na trhu, tedy i pro modely Firesport Elox a Flídr Kamila. Autor se rozhodl tyto modely ve výsledcích vynechat, jelikož model Firesport Elox je geometricky téměř shodný s modelem Pavliš & Hartmann a model Flídr Kamila s modelem Klimeš S, kdy i výsledné tvary rychlostních profilů a tlakových průběhů byly téměř identické s výše zmíněnými modely.

Z výsledků získaných numerickými výpočty byly vyvozeny závěry týkající se vlivu jednotlivých tvarových prvků proudnic na tlakové průběhy, tvary rychlostních profilů a dosahované rychlosti na výstupu z proudnice. Na základě právě těchto závěrů a odborných studií týkajících se tvarování trysek pro koherentní výstupní proud byly následně navrženy tři nové geometrie, které byly také podrobeny numerickým výpočtům se stejnými parametry proudění jako tomu bylo u simulací proudění v současných proudnicích. Bohužel bylo zjištěno, že ani jedna z navržených geometrií nesplňuje požadavky takovým způsobem, aby bylo možné její použití při požárním útoku s výhodou oproti současným proudnicím. Nově navržené modely dosahovaly buď dobrého výstupního rychlostního profilu, avšak nepříznivého tlakového průběhu, nebo naopak dosahovaly vhodného tlakového průběhu, ale postrádaly kvalitní tvar výstupního rychlostního profilu. Z tohoto důvodu byl navržen čtvrtý návrh, který spojoval prvky z předchozích návrhů takovým způsobem, aby byl kompromisem mezi prvními optimalizovanými geometriemi. Po provedení numerických výpočtů bylo zjištěno, že tato geometrie skutečně spojuje to nejlepší z předchozích návrhů a dosahuje rovnoměrnějšího rozložení rychlostí na výstupu, než je tomu u kterékoliv ze současných proudnic. Takového rychlostního profilu navíc dosahuje za velmi příznivého tlakového průběhu.

Dle nově navržené geometrie byl pomocí 3D tisku vyroben skutečný model proudnice, na kterém byly testovány parametry výstupního proudu a velikost zpětného rázu vznikajícího v důsledku tlakového spádu. Dále byly tyto výsledky porovnávány se současnými modely proudnic. Během výroby zkušební vzorku bylo zjištěno, že navržená geometrie je obtížně výrobitelná pomocí konvenčních metod obrábění a to kvůli konkávnímu tvaru vnitřního kanálu

proudnicí. Z tohoto důvodu byla také pro výrobu zvolena technologie 3D tisku, kde je možné vyrobit i tvarově složité povrchy. Při praktickém testování bylo potvrzeno, že proudnice dle navržené geometrie výrazně redukuje zpětný ráz vznikající v důsledku prudkého tlakového spádu. Vliv geometrie na kompaktnost výstupního proudu bohužel nebylo možné ověřit vzhledem k nedostatečné kvalitě povrchu vnitřního kanálu proudnice v důsledku výroby pomocí 3D tisku. Výroba a testování v této práci již nejsou detailně popsány z důvodu jejich rozsáhlého obsahu.

Problematiku zkoumanou v této práci by bylo v budoucnu vhodné dále rozšířit také pro ženskou kategorii, kde z důvodu kratšího hadicového vedení dochází při výstupu vody z proudnice k výraznějším tlakovým spádům a s tím spojeným zpětným rázům.

Dalším možnou oblastí rozšíření této práce jsou také tvarové prvky, sloužící k relaminarizaci proudění, kdy se v této práci ukázalo, že současné tvarové prvky používané v proudnicích pro požární sport mají na charakter výstupního proudu a zpětné rázy spíše negativní účinek. Je tedy žádoucí, aby byl v této oblasti proveden další výzkum a byly navrženy takové tvarové prvky, které ovlivní proudění pozitivně. Posledním podnětem k dalšímu výzkumu je také úprava nově navržené geometrie tak, aby byla snadněji vyrobitelná, přičemž by tato upravená geometrie zachovávala současné tlakové průběhy a tvary výstupních rychlostních profilů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VELIČKO, V. M, S. I TIMOŠENKO a J. I PANKOV. *Současný požární sport*. Praha: TEPS, 1989. Knižnice požární ochrany (Tisková ediční a propagační služba). ISBN 80-7065-016-8.
- [2] LOŠÁK, Jiří. *Technické prostředky požární ochrany: mobilní*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 1994. ISBN 80-707-8260-9.
- [3] PROCHÁZKA, Arnold. *Proudění tekutin potrubím a kanály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [4] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Bratislava: Alfa, 1987.
- [5] DROZDÍK, Lukáš. *Problematika dopravy vody hadicemi*. Ostrava, 2006. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Miloš Kvarčák.
- [6] MACHT, Karel. *Hašení vodou, vodní proudy, proudnice: hasební prostředky*. Praha: Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2004. Požární taktika. ISBN 80-86640-22-1.
- [7] JÁNOŠÍK, Ladislav. *Technické prostředky požární ochrany*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-3908-0.
- [8] *Technická příloha pravidel požárního sportu* [online]. 2018 [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/predpisy-a-pravidla-724022.aspx?q=Y2huZW09Mg%3d%3d>
- [9] Přenosná motorová stříkačka PS 12. *POŽÁRY.cz* [online]. 2008 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: www.pozary.cz/clanek/9664-prenosna-motorova-strikačka-ps-12/
- [10] Nová PS 12 s motorem. *NEVRELA.com* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: www.nevrela.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=14&Itemid=38
- [11] Ventily regulační. *Armatury-Topas.cz* [online]. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <https://www.armatury-topas.cz/ventily-regulacni>
- [12] Karbonová proudnice s křížkem. *VYZBROJNA.cz* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.vyzbrojna.cz/cz/3224/3297/karbonova-proudnice-s-krizkem.html>
- [13] How a Flow Conditioner Works – Flow Conditioning Basics. *INSTRUMENTATIONTOOLBOX.com* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.instrumentationtoolbox.com/2016/01/how-flow-conditioner-works-flow.html>
- [14] *A Numerical Investigation of the Flow in Water Jet Nozzles* [online]. 2015 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280697887_A_Numerical_Investigation_of_the_Flow_in_Water_Jet_Nozzles
- [15] *On the Coherent Length of Fluid Nozzles in Grinding* [online]. 2009 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.577.2291&rep=rep1&type=pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma rozloženého čerpadla přenosných požárních stříkaček [2].....	13
Obr. 2: Přenosná motorová stříkačka pro požární sport [10]	14
Obr. 3: Vřetenový ventil [11]	15
Obr. 4: Kulový kohout [11]	15
Obr. 5: Schéma sklopného terče [autor]	15
Obr. 6: Schéma požárního útoku [8]	16
Obr. 7: Schéma potrubí pro výpočet rychlosti z rovnice kontinuity [autor].....	18
Obr. 8:Náhlá změna směru proudění [3]	20
Obr. 9: Pozvolné zúžení potrubí [3]	20
Obr. 10: Ztráty náhlým zúžením [3].....	21
Obr. 11: Ztráty náhlým rozšířením [3]	21
Obr. 12: Řez proudnicí C 52 [7].....	23
Obr. 13: Řez clonovou proudnicí C52 [7]	23
Obr. 14: Proudnice Karbon a P&H [12].....	24
Obr. 15: Tvarové prvky běžně používané v průmyslu [13].....	25
Obr. 16: Schéma přidané geometrie [autor]	28
Obr. 17: Porovnání turbulentních modelů [autor]	30
Obr. 18: Schéma okrajových podmínek [autor]	30
Obr. 19: Rychlostní profily na výstupu proudnic bez tvarových prvků [autor]	31
Obr. 20: Rychlostní profily na výstupu proudnic s tvarovými prvky [autor].....	32
Obr. 21: Kontury rychlostí na výstupu z lopatek – Karbon s křížkem [autor].....	33
Obr. 22: Kontury rychlostí na výstupu z lopatek – Jožák 99 [autor].....	33
Obr. 23: Tlakové průběhy jednoduchých modelů proudnic [autor]	34
Obr. 24: Tlakové průběhy modelů s tvarovými prvky [autor]	36
Obr. 25: 1. Návrh 1 - schéma obrácené Peltonovy proudnice [autor].....	38
Obr. 26: 2. Návrh 2 - schéma kuželové proudnice [autor]	38
Obr. 27: Geometrie trysky typu Rouse [15]	39
Obr. 28:Návrh 3 - schéma proudnice typu Rouse [autor].....	39
Obr. 29: Tlakové průběhy první skupiny návrhů [autor]	40
Obr. 30: Rychlostní profily na výstupu z modelů první skupiny návrhů [autor]	41
Obr. 31: Schéma řezů geometrií prvního návrhu s rozměry [autor].....	41
Obr. 32: Rychlostní profil v řezu A [autor]	42
Obr. 33: Rychlostní profil v řezu B [autor]	42
Obr. 34: Rychlostní profil v řezu C [autor]	42
Obr. 35: Schéma měření úhlu tečny [autor]	43
Obr. 36: Návrh 4 - kombinovaná geometrie [autor].....	43
Obr. 37: Návrh 4 - tlakový průběh [autor]	44
Obr. 38: Rychlostní profily na výstupu optimalizovaných geometrií [autor]	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled současných proudnic pro požární sport.....	26
Tabulka 2: Výpočet Reynoldsových čísel	29

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres geometrie Klimeš S
Příloha 2	Výkres geometrie Klimeš N
Příloha 3	Výkres geometrie Karbon
Příloha 4	Výkres geometrie Karbon s křížkem
Příloha 5	Výkres geometrie Excellent
Příloha 6	Výkres geometrie Pavliš & Hartmann
Příloha 7	Výkres geometrie Jožák 99