

UNIVERZITA KARLOVA
FAKULTA TĚLESNÉ VÝCHOVY A SPORTU

Využití dostupných prostředků pro experimentální měření dynamiky
bublin a mikrobublin.

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

Mgr. David Vondrášek

Vypracovala:

Karolína Spalová

Praha, 2017

Prohlašuji, že jsem závěrečnou bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne

.....

podpis diplomanta

Evidenční list

Souhlasím se zapůjčením své diplomové práce ke studijním účelům. Uživatel svým podpisem stvrzuje, že tuto diplomovou práci použil ke studiu a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno a příjmení:

Fakulta / katedra:

Datum vypůjčení:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Mgr. Davidu Vondráškovi za trpělivost, cenné rady, věnovaný čas a odborné vedení. Dále bych chtěla poděkovat panu Martinu Hrubému za poskytnutí své dílny a pomoc při prvních pokusech měření, Ing. Ondřeji Novákovi, Ph.D. za odborné rady před a během pilotního měření a RNDr. Martinu Vohníkovi, Ph.D. za poskytnutí laboratoře.

Abstrakt

Název: Využití dostupných prostředků pro experimentální měření dynamiky bublin a mikrobublin.

Cíle: Zjistit dostupná zařízení pro použití při jednoduchém experimentu pozorování dynamiky bublin, případně mikrobublin.

Metody: Rešerše literatury v oblasti dekompresní teorie a s ní souvisejících. Matematickofyzikální metody pro teoretické stanovení kritické velikosti bublin. Zajištění dostupných zařízení. Pomocí jednoduchého experimentu změřit velikosti bublin. Sběr dat s následnou analýzou.

Výsledky: Dostupné zařízení bylo využito k jednoduchému experimentu v laboratorních podmínkách. V průběhu experimentu bylo možné pozorovat dynamiku bublin v makroskopických velikostech. Pro měření mikrobublin v jejich kritických oblastech růstu je potřeba využít zařízení s větší zvětšovací schopností.

Klíčová slova: Tlak, kapalina, vzduchová bublina, potápění, dekomprese.

Abstract

- Title:** Use available resources to experimental measurements of the dynamics of bubbles and microbubbles.
- Objective:** Find out available devices for use in simple experiments observing the dynamics of bubbles or microbubbles.
- Methods:** Literature review of decompression theory and related. Mathematics and theoretical methods for determining the critical bubble size. Ensure the available devices. Using simple experiment to measure the bubbles size. Collect of value and analysis.
- Results:** Available devices used for simple experiment in laboratory conditions. During the experiment, it was possible to observe the dynamics of bubbles in macroscopic size. For the measurement of microbubbles in the critical areas of growth is need to use device with a higher magnification.
- Keywords:** Press, liquid, air bubble, scuba diving, decompression.

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická východiska	10
2.1.	Základní pojmy	11
2.2.	Plyny	12
2.2.1.	Ideální a skutečné plyny	13
2.2.2.	Difuze plynů	13
2.2.3.	Inertní plyn.....	14
2.3.	Kapaliny	15
2.4.	Tlak	16
2.4.1.	Atmosférický tlak	16
2.5.	Adiabatický děj	16
2.6.	Rozpustnost plynů v kapalinách.....	17
2.6.1.	Saturace a desaturace	18
2.6.2.	Henryho zákon.....	19
2.6.3.	Fázové rozhraní.....	20
2.7.	Vznik mikrobublin a jejich dopad na organismus.....	21
2.7.1.	Mikronukleace	21
2.7.2.	Kavitace	23
2.7.3.	Tribonukleace	23
2.7.4.	Dekompresní nemoc	24
2.8.	Poločasy sycení	25
2.8.1.	Reduced Gradient Bubble Model (RGBM)	26
2.9.	Předpokládaná dynamika	26
2.10.	Povrchové napětí	28
2.11.	Tlak uvnitř bubliny	30
2.12.	Obecně známá dynamika.....	30
2.13.	Současný stav bádání.....	33
3	Cíle, úkoly	34
4	Metodologie.....	35
4.1.	Postup.....	35
4.2.	Popis sledovaného/výzkumného souboru	35
4.3.	Sběr dat.....	36

4.4.	Analýza dat.....	39
5	Hlavní část.....	40
5.1.	Matematický výpočet pro kritickou velikost bubliny	40
5.2.	Příprava měření	40
5.3.	Postup pilotního měření	41
5.4.	Měření v laboratorních podmínkách	41
5.5.	Sběr dat.....	42
5.5.1.	Bublina č. 1	43
5.5.2.	Bublina č. 2	44
5.5.3.	Bublina č. 3	45
5.5.4.	Bublina č. 4	46
6	Výsledky a srovnání	47
6.1.	Bublina č. 1	48
6.2.	Bublina č. 2	49
6.3.	Bublina č. 3	51
6.4.	Bublina č. 4	53
7	Diskuze.....	54
8	Závěr.....	55
	Seznam zdrojů.....	56

1 Úvod

Se vzduchovou bublinou se v běžném životě setkává každý. Ať už při vaření vody, otevírání limonády, ve vířivce, během mytí špinavého nádobí nebo při foukání bublin z bublifuku. Je to celkem běžný jev, nad kterým se málo kdo pozastaví a přitom je zde spousta otazníků. Jak, kde a proč se bublina vytvoří? Proč bubliny z bublifuku po chvíli prasknou? Proč se při potápěčově výdechu v hloubce několika metrů utvoří dva druhy bublin? Velké a malé? Některé stoupají rychle a spíše než bublinu připomínají klobouk hříbku a jiné, zdánlivě kulaté, stoupají k hladině pomaleji než 3 metry za minutu? Všechny tyto otázky jsou zajímavé a odpovědi jsou již na světě.

V potápěčské praxi jsou však otázky ohledně bublin odbornější a dosud nezodpovězené. Například kde a za jakých podmínek se tvoří bubliny i mikrobubliny a jakým způsobem to zjistit? Právě snahou o přiblížení se k odpovědi této otázky se bude bakalářská práce zabývat. Je známo, že potápěčská dekompresní nemoc vzniká díky výskytu bublin mikroskopických rozměrů v potápěčově těle a to v tkáních s nejvyšším nasycením. Jejím uvolněním a dalším šířením po organismu vzniká vzduchová embolie. To když vzduchová bublina zabrání průtoku krve v krevním řečišti. Kde přesně však tyto mikrobubliny vznikají zatím nelze s jistotou říci i přesto, že v současné době existuje mnoho velice přesvědčivých výzkumů, teorií i hypotéz o variantách jejich vzniku.

Snahou bakalářské práce je ponořit se hlouběji do problematiky dynamiky a chování bublin a mikrobublin. Za pomoci zařízení, které bylo pro tyto účely zkonstruováno, proběhne laboratorní měření, jehož výsledky budou zhodnoceny, znázorněny v grafech a podrobně rozebrány.

2 Teoretická východiska

Kniha „Potápěčská medicína“ (Novomeský, 2013) se mimo jiné zabývá vznikem vzduchových bublin v organismu. O jeho dosud nevyvratitelné teorie se často opírá i tato bakalářská práce:

Vznik plynových bublin v organismu

Fázová separace (transformace) je biofyzikální podmínkou pro vznik geometricky definovaného tělesa, známého jako plynová bublina. Jde o transformaci interního rozpuštěného plynu zpět do fáze plynu volného. Nynější modely vzniku, pohybu a růstu bublin inertního plynu v organismu, již mají přesné matematické vyjádření, ale v oboru medicíny stále chybějí shodující se výsledky. Způsob vzniku bubliny inertního plynu v organismu je pro potápěčskou medicínu, dosud jen v teoretické rovině s vysokou mírou pravděpodobností. Také nebyl objeven jednoznačný model, který by simuloval migraci, chování a zánik plynových bublin v organismu. (Novomeský, 2013)

Během modelování bezpečných dekompresních procedur, z hlediska průzkumu vzniku plynových bublin v organismu, jsou používány tyto metodické postupy:

- **Experimentální hyperbarické expozice** – tzv. „suché“ ponory, probíhající v přetlakových komorách, kde monitoringem sledují osoby (běžně se používá např.: ultrazvuk);
- **Generování plynových bublin** – ve vhodných složkách (gely, želatina atd.), v laboratorních podmínkách;
- **Epikritická analýza** - pravděpodobnost výskytu dekompresní nemoci ve velkých souborech potápěčů;
- **Matematické modelování** - dekompresní postupy a jejich ověřování;
- **Experimentální reálné ponory** – za pomoci telemonitoringu potápěčů;

Mikrobubliny inertního plynu v organismu se podle současných výsledků mohou vytvářet třemi možnými mechanismy: kavitací, mikronukleací a trobonukleací. (Novomeský, 2013)

2.1. Základní pojmy

Pokud má být popsán vznik a dynamika vzduchových bublin je nutno nejprve definovat několik základních pojmů.

Veškeré, na Zemi se vyskytující látky, jsou charakteristické svým skupenstvím. Skupenství jako pojem vyjadřuje fyzikální stav látky v daném prostředí, při určité teplotě a tlaku. Jedná se o stav částic, které látku vytvářejí. Také jsou dány vzájemně působícími silami, vzdáleností molekul a pohybovou energií.

Mezi základní skupenství látek patří:

- Kapalné
- Plynné
- Pevné
- Plazma

Skupenství látky záleží také na:

- Tlaku
- Teplotě
- Vztahu mezi energií, kterou se částice dané látky pohybují a energií, kterou na sebe působí.

Rozhodujícím skupenstvím, z aspektu potápěčské medicíny, je skupenství kapalné (kapalina, v níž se subjekt pohybuje) a skupenství plynné (plyn, který subjekt pod vodou vdechuje).

Tekutost je jednou ze základních vlastností kapalin. Molekuly kapalin po sobě mohou klouzat, čímž jsou schopny měnit svoji polohu a to díky malým přitažlivým silám, které mezi molekulami působí. Kapaliny nedokáží samostatně udržet svůj tvar. Vzhledem k nízkým mezimolekulárním vazebním silám se na podložce roztékají (kapaliny) a na volném povrchu vytvářejí hladinu. A však na rozdíl od plynů dokáží vytvářet kapky jako geometricky definované útvary. Kapaliny se od sebe liší také viskozitou (vazkostí). Jsou minimálně stlačitelné a jejich objem se účinkem vnějšího tlaku mění jen nepodstatně. Platí to především pro hloubky sladkých i slaných vod, v nichž se běžně vykonávají potápěčské činnosti. Voda se všeobecně chová jako izotropní prostředí, což znamená, že ve všech směrech má stejné fyzikální vlastnosti. (Novomeský, 2013)

2.2. Plyny

Plyny a jejich molekuly jsou v neustálém pohybu a vyplňují jim vymezený prostor. Molekuly plynu jsou v prostoru vzdálené od sebe (hlavně při nízkých teplotách), neboť jejich molekuly se vyznačují mimořádně nízkými silami soudržnosti. Tyto molekuly představují asi 1% objemu. Plyny nedokáží vytvářet kapky, protože při vysoké rychlosti pohybu neustále mění svůj tvar. Plyn má ale s kapalinami jednu společnou vlastnost, díky které je možné nazývat plyn kapalinou a to v případě, kdy spontánně unikne (vyteče) z otevřené nádoby. Tlak plynu je vytvořen neustálým vzájemným narážením molekul o sebe i o stěnu nádoby, ve které se nacházejí. Plyny jsou mimo jiné rozpínavé, což znamená, že lehce pronikají do okolí. Je obecně známo, že plyny jsou stlačitelné. Jejich stlačitelnost, nebo-li komprese, je ovlivněna působením vnějšího tlaku, jehož účinkem dochází ke zmenšování vzdálenosti mezi molekulami plynu a současně zmenšování jeho objemu. (Novomeský, 2013)

Jsou známy dvě fyzikální fáze, ve kterých může plyn v živém organismu existovat:

1. Fáze rozpustného plynu (dissolved gas)
2. Fáze volného plynu (free gas)

V tabulce (Tab. 1.) jsou znázorněny základní fyzikální veličiny plynů a příslušné jednotky v soustavě SI.

Veličina	Označení	Jednotka (SI)
Tlak	p	Pa
Objem	V	m ³
Teplota	T	K (Kelvin)
Plynová konstanta	R	J (K . mol)
Látkové množství	n	Mol

Tab. 1. Označení veličin a jednotek SI pro plyny a směsi plynů. (Novomeský, 2013)

2.2.1. Ideální a skutečné plyny

Vzduch, který každý organismus na Zemi dýchá, je směsí více plynů, složený především z kyslíku, dusíku, vodních par, ozonu, helia, argonu a jiných. V objemu je složený ze 78,1% dusíku, 20,9% kyslíku a 1% pro všechny ostatní. Během zkoumání pro usnadnění výpočtů a lepší pochopení procesů je používán tzv. ideální plyn, jehož rozměry molekul jsou zanedbatelné, nevyznačují se žádnými kohezními silami a jakékoliv srážky molekul mezi sebou, či o stěnu nádoby jsou pružné, či-li probíhají bez ztráty kinetické energie. Molekuly tohoto plynu se pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem až do doby srážky s jinou molekulou. Ve své podstatě se ideální plyn od skutečného plynu příliš neliší, jde jen o zjednodušený model skutečného plynu. Je možné říci, že se skutečné plyny blíží svými vlastnostmi ideálnímu plynu a to při nízkých tlacích a vysokých teplotách.

Stanová rovnice:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Stanová rovnice reálného plynu podle van der Waasla:

$$(p + n^2 \cdot a/V^2) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T$$

(Ideální plyn, [1999?]; Dvořák, 2010)

2.2.2. Difuze plynů

Jde o tepelně neuspořádaný náhodný pohyb částic. Rychlost penetrace a rozptýlení z místa vysoké koncentrace molekul plynu do maximálního prostoru, kterého mohou dosáhnout a postupně vyrovnání koncentrace. Během tohoto rozptýlení v prostoru není spotřebovávána žádná energie. V difuzi jde o umožnění látkové výměny pohybem molekul uvnitř buněk. Jedná se o tepelně aktivovaný, spontánní, nevratný děj. Rychlost difuze je ovlivněna velikostí molekul, vlastnostmi okolního prostředí a teplotou. (Difuze, 2015)

Difuze plynu v kapalinách je díky kinetické energii kapalin pomalejší než difuze v plynném prostředí. Difuzi v kapalném prostředí jde krásně sledovat například na sáčku čaje v horké vodě, kdy čas postupně obarví vodu bez použití mechanického míchání. (Difuze, 2015)

2.2.3. Inertní plyn

Inertními plyny jsou plyny vzácné (Ne, He, Ar, Xe, Kr, Rn). Dříve se těmto plynům říkalo inertní prvky, protože se nepředpokládalo, že by mohli tvořit sloučeniny. Jde o plyny, které za normálních podmínek svými vlastnostmi nijak nevystupují ze svého okolí. (Inertní plyn, [1999?]; Pehal, 2008)

Z inertních plynů lze v potápěčské praxi využít helium a vodík. Vodík díky vlastnosti nejlehčího prvku je oproti heliu rychleji vylučován. Bohužel při jeho míchání s kyslíkem hrozí vysoké riziko výbuchu, proto se helium jeví jako nejlepší inertní plyn pro potápění. Bez poškození tkání organismu může být helium dýcháno až několik měsíců. Helium je mimo jiné nejméně narkotickým plynem pod tlakem, což je výhodou. (Pehal, 2008)

Rychlost saturace a desaturace inertních plynů je nepřímo úměrná druhé odmocnině jejich atomových hodnot. Sycení a desaturace vodíkem je přibližně 3,7 krát rychlejší než dusíkem, sycení a desaturace heliem je přibližně 2,7 krát rychlejší než dusíkem. (Pehal, 2008)

Množství různého inertního plynu rozpuštěného v tkáních, udává vznik a velikost bublin, z tohoto důvodu závisí na rozpustnosti. Větší bubliny jsou způsobeny větší rozpustností. Z lehkých plynů je tedy nejvýhodnější helium a z těžkých dusík. Rozpustnost neonu je přibližně na stejné úrovni jako dusík. (Pehal, 2008)

2.3. Kapaliny

Pod pojmem nejběžnější kapalina, si zřejmě každý představí vodu jako nenahraditelné medium pro udržení života. Voda sladká či slaná, ale představuje pro potápěče prostředí, ve kterém po různou dobu a v různých hloubkách vykonávají svoji činnost.

Snad nejzákladnější fyzikální veličina charakterizující vodu je hustota. U plynů i kapalin je hustota určena stavebními molekulami a jejich různou hmotností, ovlivňuje ji především teplota. V závislosti na teplotě se voda může objevovat ve třech skupenstvích:

1. Kapalném – teplotní rozmezí 0°C – 100°C, nejběžnější skupenství,
2. Pevném – teplota pod 0°C, led,
3. Vodní pára – teplota nad 100°C, přeměna probíhá varem.

Molekuly kapalin jsou přitahovány vnitřními kohezními silami a díky hustotě kapalin se vzájemně téměř dotýkají. Také konají kmitavý pomalý pohyb kolem měnících se rovnovážných poloh.

Kapaliny jsou téměř nestlačitelné, což znamená, že zachovávají svůj objem, ale nedokáží zachovat tvar.

Hustotu kapalin lze zjistit pomocí:

- Pyknometru a vzorce: $P = m/V$ [kg . m⁻³]
- Hustoměru
- Mohrovy-Westphalovy váhy

(Dvořák, 2010)

Povrchové napětí vody zůstává relativně stálé i při změnách teploty a jeho hodnoty jsou velmi vysoké (72,75 mJ/m²). V oblasti potápěčské medicíny má voda a její povrchové napětí význam pro funkci intraalveolárního surfaktantu (intraalveolární – uvnitř aveol, surfaktant - látka snižující povrchové napětí v plicích. Zvyšuje poddajnost plic snížením povrchového napětí na rozhraní tekutina-vzduch). Podobně jako u vzájemného působení krevní plazmy s plynovými bublinami během saturace a desaturace inertními plyny v těle potápěče. (Novomenský, 2013; Sufrakant, 2016)

2.4. Tlak

2.4.1. Atmosférický tlak

Tlak je zřejmě nejdůležitější fyzikální veličinou v potápěčské praxi. Pro jakékoliv počítání tlaku a jeho změn pod vodní hladinou je základním parametrem zjištěná hodnota atmosférického tlaku (p_{atm}). Matematicky je tato veličina vyjádřena jako tíže atmosféry či-li vzduchového obalu Země, jejíž počátek se dotýká hladiny moře a sahá až k horní hranici atmosféry, což způsobuje podmínění atmosférického tlaku (p_{atm}) gravitačním působením Země. V soustavě jednotek SI je tlakovou jednotkou Pascal (Pa) $= 1\text{N/m}^2$. (Novomeský, 2013)

U hladiny moře je hodnota atmosférického tlaku 101325 Pa. Může se stát, že dojde k přetlaku či podtlaku. Jde o jevy, kdy je tlak při přetlaku vyšší a při podtlaku nižší než aktuální atmosférický tlak. Vyjádření hodnoty tlaku v literatuře je různé i přes ustálené užívání jednotek soustavy SI. Následující schéma uvádí alternativy jeho vyjádření:

$$\begin{aligned}\text{Atmosférický tlak } (p_{\text{atm}}) &= \text{cca } 101,3 \text{ kilo Pascalu (kPa)} \\ &= 0,103 \text{ mega Pascalu (MPa)} \\ &= 1,013 \text{ atm} \\ &= 1,013 \text{ bar} \\ &= 1,033 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 14,696 \text{ lbs/in}^2 \text{ (psi)} \\ &= 760 \text{ mm Hg} = 760 \text{ Torr} \\ &= 10,00 \text{ (10) metrů vodního sloupce sladké vody (mfw)}.\end{aligned}$$

(Novomeský, 2013)

2.5. Adiabatický děj

Adiabatický děj je dějem termodynamickým, při kterém nedochází k výměně tepla mezi plynem a prostředím. Probíhá při naprosté tepelné izolaci. Za adiabatický děj lze pokládat takový děj, který proběhne tak rychle, že se výměna tepla s okolím nestačí uskutečnit. (Novomeský, 2013)

2.6. Rozpustnost plynů v kapalinách

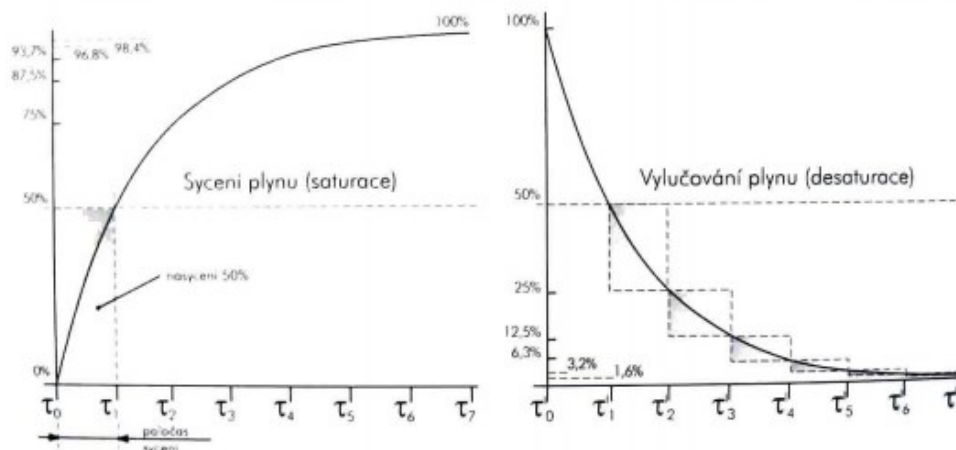
V kapalině rozpuštěný plyn a jeho množství je závislé na parciálním tlaku plynu nad hladinou kapaliny. Plyn se v kapalině rozpouští tak dlouho, dokud jeho tlak nad kapalinou není shodný se svým tlakem v kapalině. Podle koeficientu rozpustnosti lze přesně určit přírůstek plynu v kapalině. (Pehal, 2008)

	Dusík	Neon	Helium
Krev	0,0130	0,0093	0,0088
Voda	0,0123	0,0096	0,0086
Olej	0,0670	0,0199	0,0159

Tab. 2. Koeficient rozpustnosti plynů při teplotě 37°C. Ukazuje navýšení plynu v ml, během změny tlaku o 1 bar. (Pehal, 2008)

Rychlost rozpuštění plynů v kapalině je dána schopností kapaliny plyn rozpouštět a rychlostí difuze plynu. Kapalina schopna pojmout větší množství plynu se bude sytit déle. Z tabulky (Tab. 2.) je zřejmé, že z uvedených plynů je nejrychleji rozpustným dusík rozpuštěný v oleji a to až 5,5 krát více než ve vodě se zachováním stejných objemů kapalin. (Pehal, 2008)

Navýšení plynu v kapalině má exponenciální časový průběh, což znamená, že čím blíže je kapalina k nasycení, tím menší je přírůstek plynu. Tento exponenciální průběh lze popsat i takto: čas, po který se rozpustí $\frac{1}{2}$ plynu potřebného k rovnováze, bude označen jako poločas syčení. Po uplynutí 2x tak dlouhé doby se rozpustí 75% z celého množství plynu, což je polovina plynu zbývajících a za další dvojnásobek této doby bude rozpuštěno 87,5% celkového množství atd. Průběh je možný vidět na obrázku (Obr. 1). (Pehal, 2008)



Obr. 1. Znárodnění saturace a desaturace tkáně v závislosti na čase a procentu rozpuštěného plynu. (Pehal, 2008)

2.6.1. Saturace a desaturace

V potápěčské praxi je zapotřebí sycení i uvolnění inertního plynu odhadnout co možná nejpřesněji. Vzhledem k fyziologickým faktorům je však velmi těžké uskutečnit přesný odhad. S přístupem podle Haldana (Novomeský, 2013) je však tuto problematiku možné vyřešit tím, že se na lidské tělo bude pohlížet jako na soustavu tkání s odlišným poločasem sycení tzv. kompartment. Význam tohoto přístupu je nakládat s organismem a jeho sycením a uvolňováním plynu, jako by šlo pouze o fyzikální děje. Nejrychleji saturovanými budou ledviny, mozek a srdeční sval. (Pehal, 2008)

Zákonitosti řídící rozpouštění plynu v kapalinách řídí i jeho uvolnění, což znamená, že doba nutná k nasycení organismu při zvýšeném tlaku by měla odpovídat i době vydání přebytku plynu, při uvolnění tlaku. Ukázalo se však, že příjem plynu je rychlejší než jeho výdej. (Pehal, 2008)

2.6.2. Henryho zákon

Henryho zákon definuje plyn a jeho rozpouštěcí proces v kapalině. Při konstantní teplotě, je podle Henryho zákona, množství fyzikálně rozpuštěného plynu v kapalině přímo úměrné tlaku nad kapalinou, což znamená, že k dalšímu rozpuštění plynu v dané kapalině, dojde při zvýšení tlaku, jenž je v kontaktu s kapalinou. Matematicky je Henryho zákon vyjádřen pomocí vzorce:

$$V = \alpha \cdot p \cdot 1000 \cdot p_{\text{atm}}^{-1}$$

kde:

V = absorpční koeficient = objem plynu rozpuštěného v kapalině α (alfa)

p = tlak plynu (v prostoru nad kapalinou)

p_{atm} = atmosférický tlak

Proces rozpouštění plynu v kapalině je tedy fyzikálně limitován:

- Teplotou;
- Druhem kapaliny, v níž se má plyn rozpustit a plynem;
- Daným plynem a jeho parciálním tlakem.

Solubilita, nebo-li rozpustnost plynů, závisí na druhu kapaliny, v níž se mají plyny rozpustit. Jedná se především o základní plyny používané během potápěčských ponorů. (Novomeský, 2013)

Při pokusu s olivovým olejem, který modeloval lidské tukové tkáně, bylo zjištěno, že dusík se právě v nich skvěle rozpouští. To znamená, že během přetlaku se dusíku rozpustí přibližně pětinasobně víc v lidských tukových tkáních, než v krvi. (Novomeský, 2013)

Jestliže se ze směsi plynů v prostoru nad kapalinou rozpouští jeden plyn v kapalině, pak objem rozpuštěného plynu bude průměrný k jeho parciálnímu tlaku. Molekuly kapalin jako první přitahují nejbližší molekuly plynu, nacházející se těsně nad povrchem kapaliny, narážejí na její povrch a zachytávají se v jejích vrstvách. (Novomeský, 2013)

Do hlubších vrstev kapaliny pomocí difuze putují molekuly plynu právě odtud. Exponenciální z počátku rychlý průběh mají molekuly plynu při saturaci (procesu sycení) kapaliny. Proces saturace se zpomaluje až do úplného zastavení při nárůstu stupně nasycení kapaliny plynem. V momentě, kdy se parciální tlak plynu v prostoru nad kapalinou rovná parciálnímu tlaku plynu v kapalině rozpuštěného, dochází k úplné saturaci (vytvoření rovnovážného stavu). Klesající tlakový gradient je rozdíl mezi parciálním tlakem plynu v kapalině již rozpuštěném a parciálním tlakem plynu nad kapalinou, který způsobuje zpomalování saturace kapaliny daným plynem. (Novomeský, 2013)

Pro porozumění procesů desaturace a saturace lidského organismu inertními plyny (heliem, dusíkem) je principiálním fyzikálním zákonem Henryho zákon. (Novomeský, 2013)

2.6.3. Fázové rozhraní

Fázové rozhraní je místo doteku dvou složek. V případě této bakalářské práce se jedná o kapalinu a plyn, tedy doteku dvou skupenství. Při fázovém napětí záleží na velikosti plochy doteku dvou složek. Například: jestliže bude hladina vody zčeřená s vlnami, bude tak i větší plocha fázového rozhraní, tedy i rychlejší sycení kapaliny. Pokud se vzduch s kapalinou setká v hadičce o průměru 2,5 mm, bude fázové rozhraní velmi malé. To znamená, že sycení kapaliny bude probíhat mnohem déle. Děj, při němž se zvyšuje koncentrace molekul rozpuštěné látky, oproti koncentraci v roztoku je nazýván adsorpce. (Dvořák, 2010)

2.7. Vznik mikrobublin a jejich dopad na organismus

2.7.1. Mikronukleace

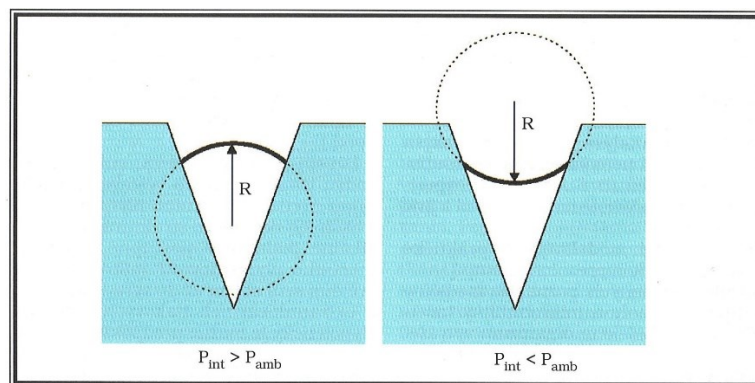
Mikronukleace je mechanismus vzniku bublin mikroskopických rozměrů inertního plynu v lidském organismu. Mohou vznikat již za relativně nízkých hodnot přesycení organismu inertním plynem. Tento mechanismus funguje na základě předpokladu, že každý lidský organismus již má v sobě plynové zárodky mikrojádra, která před zánikem odolávají díky svému povrchovému napětí. Vůči okolí jsou v takzvané metastabilní (téměř rovnovážné) hydrostatické a difuzní (rozptýlené) rovnováze. To znamená, že mikrojádra plynu nepodléhají kompresi okolním tlakem a také difuzí nepřibírají žádný plyn, takže nezvětšují svůj objem. I přes rovnovážný stav je v dutině mikrojádra lehký podtlak vůči okolí. (Novomeský, 2013; Chappell, 2005)

Během ponoru jsou mikrojádra vystavena přetlaku inertního plynu, což způsobuje postupné pronikání plynu dovnitř mikrojader a ty pak až do vyrovnání tlaků zvětšují svůj objem. Dá se předpokládat, že ve fázi pobytu v neměnicí se hloubce se ojedinelá mikrojádra transformují na mikrobubliny. V případě, že mikrobubliny v těle potápěče vzniknou v izobarickém tlaku, bude se jednat o ojedinelý případ. Svým počtem a celkovým objemem budou z hlediska kinetického zanedbatelné. (Novomeský, 2013; Chappell, 2005)

Ve chvíli potápěčova vynořování se situace obrátí, dojde-li v jeho organismu k překročení hranice tolerované supersaturace. Mikrojádra začnou být podstatně vyšším parciálním tlakem, než je tlak plynu v mikrojádru, obkloповána rozpuštěnými inertními plyny (kontinuálně narůstajícími během postupu k hladině). Naruší se tak metastabilní rovnováha a mikrojádra pomocí difuze začnou přijímat mnohem větší množství inertních plynů. Rychlost difuze bude úměrná tlakovým gradientům uvnitř i v blízkosti mikrojádra. V mikrojádře dojde k fázové separaci inertního plynu (desaturační proces) z fáze plynu rozpuštěného, do fáze plynu volného. Plynové mikrojádru se stane nestabilním, plynové rozhraní se zvětšuje a nabývá vypouklých tvarů a tlak plynu v dutině mikrojádru stále narůstá. Mikronukleace vznikne vytvořením plynové mikrobubliny v místě překročení tlakově-objemové kapacity mikrojádru. Plynová mikrojádru v organismu lze nazvat prekurzory volné fáze plynových bublin. (Novomeský, 2013)

Ani s použitím elektronových mikroskopů s extrémním přiblížením, vzhledem k ultramikroskopickým rozměrům, nedošlo k vizualizaci plynových mikrojadér. Jejich přítomnost však byla dokázána na pokusech ve vhodných médiích, např.: v želatině kde mikrobubliny vznikly na nečistotách ultramikroskopických rozměrů. Stejně tak v sycených tekutinách (minerálky, sekt atd.) vznikají po dekompresi (po jejím otevření) proudy mikrobublin. I zde se počítá s povrchovými nerovnostmi nádoby. Základní teorémou pro mnoho matematických dekompresních algoritmů je fakt existence předem vytvořených mikrojadér v organismu. Pomocí experimentu bylo zjištěno, že v hloubce 80m (okolní tlak 900kPa) se vzhledem ke změně povrchového napětí mikrojadér zpomalí transport inertního plynu do jejich středu. Permeabilita (propustnost) se zatím z neznámých důvodů zhorší, proto se ponory hlubší 80m vypočítávají lehce odlišnými dekompresními postupy. (Novomeský, 2013)

Další fyzikální možností je vytváření mikrobublin v supersaturevaném roztoku bez předchozí difuze plynu do mikrojadér. Tato fázová separace plynu k vytvoření bubliny je možná, ale v potápění nereálná, vzhledem k potřebě extrémního stupně plynem přesyceného roztoku. Tvorba dusíkových bublin je experimentem potvrzena v hodnotách supersaturace kolem 18,8MPa/190 barů, bohužel v potápěčské praxi těchto saturací nelze dosáhnout. Proces mikronukleace je možný vidět na obrázku (Obr. 2.) (Novomeský, 2013; Chappell, 2005)



Obr. 2. Mikronukleace, plynové mikrojádro ve štěrbině (Novomeský, 2013)

Vlevo - průnik okolního plynu do mikrojádra, vpravo – již po vytvoření mikrobubliny.

Na obrázku (Obr. 2.) platí:

P_1 = tlak plynu uvnitř mikro jádra

P_{amb} = tlak okolního plynu

R = poloměr mikrobubliny

2.7.2. Kavítace

Kavítace je další možný způsob vzniku plynových bublin v lidském organismu. Vzniká během proudění kapaliny přes zúžená místa na hranách překážek nebo těsně za nimi, v místech vysokého turbulentního proudění kapaliny a zároveň dochází k extrémním tlakovým změnám. (Novomeský, 2013)

2.7.3. Tribonukleace

Tribonukleace je dalším (třetím) biofyzikálním jevem. Vzniká prudkým od sebe odtržením dvou vzájemně adheujícími viskoelastických ploch (laminárně navrstvených ploch). Během rychlého odtržení dvou ploch od sebe, rychle vzniká mohutný podtlak, který vytváří vakuové kavity (dutiny). Do těchto kavit je nasáván okolní plyn a tak v těchto prostorech vznikají mikrobubliny. Tento jev se týká především pomalých vláken v lidském organismu. Díky tomuto fenoménu by potápěč po ponoru, zvláště do větších hloubek, neměl vykonávat žádnou fyzickou námahu, protože i po ponoru se

v tkáních nachází stále velké množství inertního plynu a fyzická námaha s rychlými pohyby mohou snadno vyvolat nežádoucí tribonukleační jevy. (Novomeský, 2013)

2.7.4. Dekompresní nemoc

Dekompresní tzv. Kesonova nemoc (dále jen DCS) je označení mnoha příznaků. Jde o nemoc způsobenou rozpuštěným dusíkem v krvi potápěče.

Bubliny v organismu vzniklé při zahájení výstupu na hladinu jsou nebezpečnější, než bubliny vzniklé později. Po každém potápěčově vynoření na hladinu se v organismu vyskytují bubliny. Pokud potápěč dodržel všechny zásady bezpečného výstupu k hladině, nezpůsobí dekompresní choroby. Těmto bublinám se říká tiché bubliny. Původně tiché bubliny, ale při ponoru do větších hloubek začínají „šeptat“. Podle Boyle – Mariottova zákona je tímto důvodem expanze bublinek při výstupu k hladině. Z předpokladu, že se bublina v čase nerozpustí, bude objem bubliny vzniklé v hloubce 30m v 10m dvojnásobný. (Sládek, 2004; Novomeský, 2013)

Jde o jedno z nejnebezpečnějších onemocnění při potápění s dýchacím přístrojem. Vznik nemoci je způsoben rychlou změnou tlaku a nedostatečným vysycením dusíku z organismu. Tento stav přichází ve chvíli, kdy potápěč nedodrží bezpečnou rychlost výstupu k hladině, dochází ke skokovému poklesu tlaku okolí a v tkáních se nahromadí velké množství plynu, který nestihl být desaturován. Toto způsobuje vytváření bublin dusíku v tkáních, jako jsou mozek, orgány, cévy. Díky těmto bublinám často dochází k nedokysličení tkání, emboliím či trombózám. Měkké tkáně mohou být i trhány. (Sládek, 2004; Štefánek, [2011?])

Příznaky této nemoci jsou: vyrážky, mramorování kůže, bolest velkých kloubů, brnění, poruchy citlivosti, bolesti břicha a hrudi, dušnost, křeče, porucha hybnosti, ztráta vědomí, bolest hlavy. Srdce, plíce, mozek a trávicí trakt jsou orgány s největším prokrvením a bývají tedy nejvíce poškozeny. (Sládek, 2004; Štefánek, [2011?])

2.8. Poločasy sycení

V průběhu ponoru působí na potápěčovo tělo několik faktorů. Se změnou hloubky se mění i okolní tlak a tlak dýchaného média s tímto přichází i sycení a vysycování organismu inertním plynem.

Poločas sycení lidského těla je složitý proces. Lidské tělo obsahuje velké množství jemnocitných morfologických struktur, které samostatně a s vlastní dynamikou přijímají a vylučují inertní plyn. To znamená, že pro každou tkáň lidského těla je charakteristický jiný poločas sycení pro daný inertní plyn. Což představuje problém pro dekompresní kalkulace. Aby bylo možné vytvořit matematické modely dekompresních algoritmů, bylo potřeba tyto tkáňové systémy lidského organismu rozdělit do několika komplexních tkáňových systémů (kompartment). John Scott Haldane vytvořil pět fiktivních teoretických tkání pro počítání dekompresních algoritmů. V dnešní době se již celosvětově počítá s osmi fiktivními tkáněmi. (Sládek, 2004; Novomeský, 2013)

Avšak všechny typy tkání mají exponenciální charakter nasycování inertním plynem. Což znamená, že proces nasycování tkání inertním plynem z počátku probíhá velmi rychle, ale s přibývajícím množstvím přijatého inertního plynu se proces saturace zpomaluje, dokud nedojde k úplnému nasycení dané tkáně. (Sládek, 2004; Novomeský 2013)

Poločas sycení je doba, po kterou se tkáň inertním plynem nasytí na poloviční hodnotu své úplné saturace. Prvním poločasem saturace je tedy myšleno přijetí inertního plynu na 50% své saturace pro danou tkáň daným inertním plynem. Druhý poločas má však mnohem pomalejší dynamiku. Za tuto dobu se tkáň nasytí o dalších 25% či-li o polovinu ze zbylých 50% (v tuto chvíli je tkáň nasycena na 75%). V průběhu třetího časového úseku bude nasycena na 87,5%. (Sládek, 2004; Novomeský, 2013)

Tento jev poukazuje na fakt, že čím blíže je tkáň k úplné saturaci daným inertním plynem, tím pomalejší je saturační proces. Pro různé tkáně lidského těla je poločas sycení odlišný. Jeho délka je od několika minut (pro tzv. rychlé tkáně) až po dobu několika hodin (pro tzv. tkáně pomalé). K úplnému nasycení všech lidských tkání jakýmkoliv inertním plynem však dojde přibližně za 12 hodin. (Novomeský, 2013)

2.8.1. Reduced Gradient Bubble Model (RGBM)

Jedná se o jeden z bublinových modelů, který na rozdíl od klasických potápěčských dekompresních modelů počítá se vznikem bublin v těle během vysycování kdy je dekompresní postup určen počtem maximální velikosti a množství bublin v potápěčově těle po ukončení ponoru. (Pehal, 2008)

Tento bublinový model vyšel z Varying Permeability Model (VPM). Gradient, na kterém je závislá rychlost vzniku bublinky, je definován rozdílem mezi parciálním tlakem vdechovaného inertního plynu a plynu rozpuštěného v tkáni. Tento model vychází z předpokladu, že bubliny s poloměrem menším než 0,8 tisícín milimetru se rozpouštějí a s poloměrem větším rostou. Dále je gradient redukován třemi faktory:

- Krátkodobý opakovací faktor
- Dlouhodobý opakovací faktor
- Faktor reverzního profilu

(Pehal, 2008)

2.9. Předpokládaná dynamika

Bublina je malé plynové těleso ponořené do kapaliny nebo obklopené pevnou látkou či plynem. Za předpokladu zkoumání vzduchové bubliny v kapalině se tato definice týká pouze jedné vzduchové bubliny, kde nedochází k interakci s ostatními bublinami a kdy má zanedbatelný vliv na okolní kapalinu. Použité veličiny budou odlišeny indexy například:

- označení bublin - „b“ (např.: vnitřní hustota bubliny = ρ_b)
- označení okolního prostředí - „k“ (dynamická viskozita kapaliny – μ_k)
- užívaný průměr pro velikost bubliny (d_b) či poloměr (r_b) související s objemem bubliny (V_b) kde se předpokládá kulovitý tvar bubliny. (Münster, 2016)

Následný vztah mezi těmito veličinami:

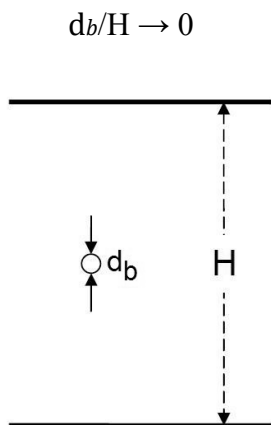
$$V_b = 4/3\pi r_b^3 \quad [m^3]$$

$$d_b = 2 \cdot r_b(6V_b / \pi)^{1/3} \quad [m]$$

Dle vztahu níže se vypočte povrch bubliny (S_b) kulového tvaru:

$$S_b = 4\pi r_b^2 \quad [m^2]$$

Prostředí hloubky bude označováno indexem H . Pro pohyb bubliny o zanedbatelné velikosti je toto základní parametr viz obrázek (Obr. 3.). (Münster, 2016)



Obr. 3. V porovnání, rozměr okolí vůči vzduchové bublině (Münster, 2016)

K definici hustoty bubliny poslouží její objem a hmotnost (m_b):

$$\rho_b \equiv \frac{m_b}{V_b} \quad [kg.m^{-3}]$$

Poměr hustoty okolní kapaliny (ρ_k) ku hustotě bubliny jako relativní hustotě ρ^* :

$$\rho^* = \frac{\rho_b}{\rho_k} \quad [-]$$

Vhledem k tomuto poměru lze rozlišit částice s relativní hodnotou nízkou, kde platí $\rho^* \ll 1$ částice s relativní hodnotou vysokou, zde platí $\rho^* \gg 1$. Bubliny jsou částice s relativní hustotou nízkou a jejich pohyb v kapalině je proti směru síly tíhové. Bubliny stoupají, zatímco pevné částice a kapky v plynu mají relativní hustotu vysokou, je tedy jejich pohyb ve směru síly tíhové, padají. (Münster, 2016)

Viskozita jakožto další velice důležitý parametr je definována jako:

$$\mu^* = \frac{\mu_b}{\mu_k} \quad [-]$$

kde:

μ_b - dynamická viskozita bubliny

μ_k - dynamická viskozita okolní kapaliny.

Pro vzduchové bubliny v kapalině platí $\rho^* \ll 1$ a $\mu^* \ll 1$, pro kapky a pevné částice v plynu platí $\rho^* \gg 1$ a $\mu^* \gg 1$. Pro oboje platí, že relativní hustota a relativní viskozita se chová podobně. (Münster, 2016)

Tlaky jsou dalšími parametry:

- Tlak okolní kapaliny v místě bubliny (p_k)
- tlak uvnitř bubliny (p_b).

(Münster, 2016)

2.10. Povrchové napětí

Při efektu povrchového napětí (σ) se povrch kapalin snaží získat stav s co možná nejmenší hladkou plochou. Svým chováním může připomínat elastickou fólii. Jedná se o snahu dosáhnout stavu s minimální energií. Čím „kulatější“ je kapička kapaliny, tím větší je povrchové napětí a obráceně. (Münster, 2016)

Na vnitřní tlak bublin má vliv právě povrchové napětí dokonce může ovlivnit i jejich tvar. Mezimolekulární síly kapalin jsou příčinami vzniku povrchového napětí. Rozhraní kapalin se může zdát jako potažené tenkou napjatou vrstvou, vzhledem k tomu se kapaliny chovají jinak ve svém objemu než při kontaktu na svém rozhraní s jinou látkou. Molekuly kapalin jsou uvnitř i na povrchu stejné. Jediný rozdíl je mezi molekulami kolem nich. Uvnitř je každá molekula obklíčena stejnými molekulami kde se vyrovnají jejich přitažlivé síly (F_m), kdežto na povrchu (na rozhraní) jsou obklopeny z jedné strany jinými molekulami. Což způsobuje, že na rozhraní ve směru kolmém nejsou mezimolekulární síly vyrovnány. Vypovídá o tom obrázek (Obr. 4.). Jelikož mezimolekulární síly působí na vzdálenost velmi malou, je jen ve velmi tenké vrstvě kapaliny projevována nerovnost. Touto tenkou vrstvou je myšleno rozhraní, které je

široké jen jednu až dvě molekulární vrstvy. energii lze změnit vnitřní rovnováhou sil, která dosáhne až na rozhraní pomocí přemístění vrstvy. (Münster, 2016)

Definicí povrchového napětí (σ) je vrstva molekul kapaliny (E_{pn}) a jejich energie na rozhraní s jinou látkou. Vztahuje se na plochu rozhraní (S_{pn}):

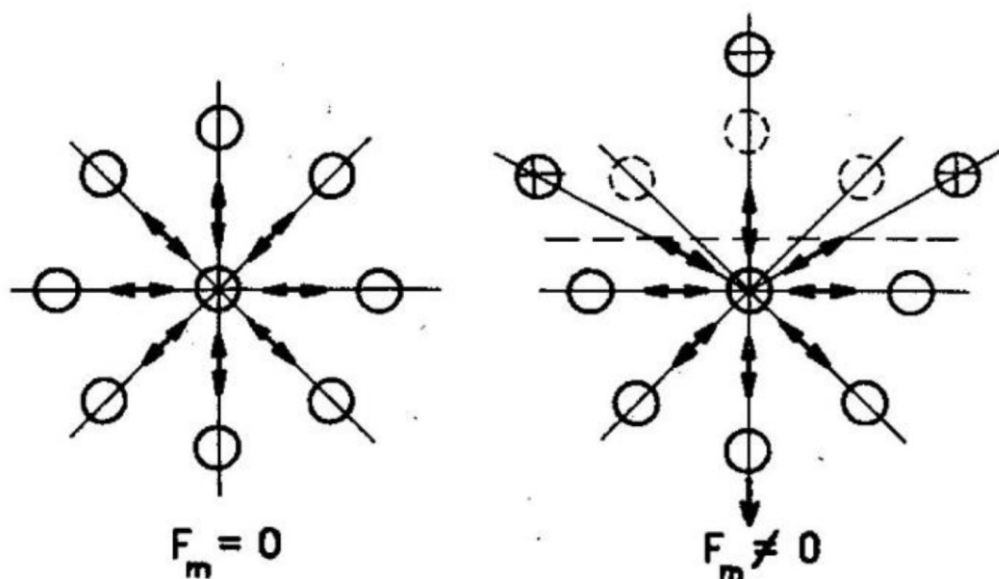
$$\sigma = \frac{E_{pn}}{S_{pn}} \quad [J.m^{-2} = N.m^{-1}]$$

(Münster, 2016)

Další definice hovoří o povrchovém napětí jako o výsledném účinku kohezních sil F_{pn} nacházejících se mezi molekulami kapaliny a jinou látkou, Vztahuje se na jednotku délky rozhraní l :

$$\sigma = \frac{F_{pn}}{l} \quad [N.m^{-1}]$$

(Münster, 2016)



Obr. 4. Síly mezimolekulární uvnitř a vně bubliny. (Münster, 2016)

2.11. Tlak uvnitř bubliny

Zvýšení tlaku uvnitř bubliny způsobuje povrchové napětí na zakřiveném povrchu bubliny. Obecně je tato změna dána Young-Laplaceovou rovnicí, která se označuje jako Laplaceův tlak:

$$p_b - p_k = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad [\text{Pa}]$$

kde:

r_1 a r_2 = poloměry ve dvou kolmých osách tělesa. (Münster, 2016)

V případě kulové bubliny:

kde:

$r_1 = r_2 = r$ pro zvýšení tlaku uvnitř bubliny platí:

$$p_b - p_k = x = \frac{2\sigma}{Rb} \quad [\text{Pa}]$$

(Münster, 2016)

2.12. Obecně známá dynamika

Aby mohla být tato bakalářská práce dokončena, je třeba uskutečnit měření, při kterém bude zkoumán především vznik bubliny a její následné chování při navýšení okolního tlaku.

Snad v každé učebnici pro začínající potápěče je graf či obrázek s balonkem napuštěným vzduchem. Tento balonek zjednodušeně představuje chování bubliny. V prvním případě je balonek napuštěný na hladině a následně ponořen do hloubky až několika desítek metrů. V případě druhém se balonek naplní v hloubce několika desítek metrů pod hladinou a poté vypustí k hladině.

1. Příklad - Zvyšující se tlak

Balonek na hladině naplněný vzduchem a následně ponořený do hloubky je vystaven stále se zvyšujícímu tlaku přímo úměrný s narůstající hloubkou.

Tento stav popisuje Boyleho – Mariottův zákon viz obrázek (Obr. 5.), který hovoří o izotermickém ději plynu, kdy teplota plynu zůstává konstantní. Jestliže se počítá se stálou teplotou plynu, pak ze stavové rovnice vyplývá, že tlak plynu je nepřímo úměrný

svému objemu. Což znamená, že při dvojnásobném zvýšení tlaku plynu se jeho objem zmenší na polovinu svého původního objemu. V blízkosti hladiny pak probíhají největší objemové změny. (Novomeský, 2013)

Tento zákon vycházející ze stavové rovnice ideálních plynů je matematicky vyjádřen:

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

nebo

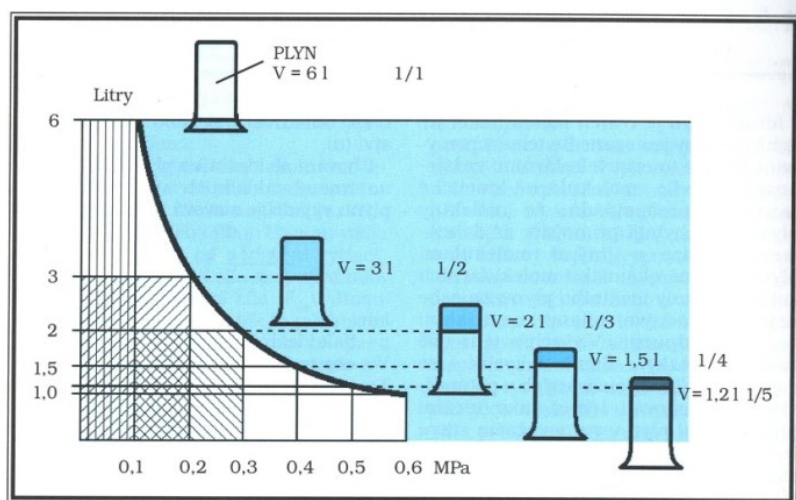
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

p = tlak plynu

V = objem plynu

Při izotermickém ději je objem plynu v závislosti na tlaku vyjádřen v tlakově – objemovém diagramu rovnoosou hyperbolou, jež se nazývá izoterma.

(Novomeský, 2013)



Obr. 5. Znárodnění Boyleho-Mariottova zákona. Hyperbarická křivka nádoby ponořené do vody s otevřeným dnem. V nádobě dochází k největším změnám objemu při poklesu hydrostatického tlaku (nejvíce v malých hloubkách). (Novomeský, 2013)

V tabulce (Tab. 3.) je znázorněn zvyšující se celkový tlak (narůstající s hloubkou ponoru) při kterém dochází k exponenciálnímu poklesu objemu plynu v nádobě s otevřeným dnem či s pružnými stěnami (např. balonek) a současně díky kompresi zvyšování hustoty plynu. Dochází ke zkracování vzdálenosti mezi molekulami plynu. (Novomeský, 2013)

Hloubka vody v metrech	Celkový tlak v MPa	Objem plynu	Hustota plynu
0	0,10	objem 100 jednotek	1,0
10	0,20	redukce na ½	2,0
20	0,30	redukce na 1/3	3,0
30	0,40	redukce na ¼	4,0
40	0,50	redukce na 1/5	5,0
50	0,60	redukce na 1/6	6,0
60	0,70	redukce na 1/7	7,0

Tab. 3. *Vzájemné vztahy mezi tlakem, objemem a hustotou plynu.* (Novomeský, 2013)

2. Příklad – Snižující se tlak

V případě, že nádoba s pružnými stěnami (balonek) či otevřeným dnem bude naplněna pod vodou v hloubce 60m a následně vypuštěna směrem k hladině, bude se její objem se zmenšujícím se okolním tlakem zvětšovat. K největším změnám objemu plynu v nádobě, dojde v malých hloubkách. Jde o opačný jev než, když nádobu s pružnými stěnami (balonek) nebo nádobu s otevřeným dnem naplníme plynem již na hladině.

Bohužel vzhledem k velikosti bubliny, která bude měřena, není možné s jistotou určit, zda se bude chovat stejně jako balonek, nádoba s otevřeným dnem či s pružnými stěnami. Předpokladem je chování odlišné. Vzhledem k její velikosti bude záležet

především na čase, tlaku a povrchovém napětí bubliny. Je možné předpokládat, že se mikrobublina zrodí, ale její dynamika bude o poznání pomalejší.

2.13. Současný stav bádání

Jedním z hlavních omezení potápění je dekompresní nemoc (DCS), způsobená vznikem a dynamikou bublin v tkáních, přesycených inertními plyny po dekompresi vysokým tlakem. Aby se bublina mohla vyvíjet, je nutné přesáhnout kritickou (minimální) velikost. Bubliny menší než tato kritická velikost zaniknou (rozpustí se), vzhledem k vysokému tlaku okolí a nízkému povrchovému napětí. V tom případě, pokud se má bublina dále rozvíjet, musí mít jádro poloměr o minimální velikosti ještě před, či během dekomprese potápěče. (Arieli a Marmur, 2012).

Jako dlouhotrvající hypotéza se uvádí, že bubliny vznikající a uvolňující se v důsledku dekomprese a svůj původ mají ve stabilních plynových mikrojádrech. Během posledního půlstoletí bylo spekulováno, že mikrojádra jsou tvořena kavitací, či-li oddělením dvou pevných povrchů v kapalině. Dále se hovořilo o mikronukleaci, kde je předpokladem přítomnost mikrojadra v hydrofobních štěrbinách. (Arieli a Marmur, 2011).

V posledních letech se prokázalo, že v lidském těle mohou mikrojádra vzniknout i na hydrofobním rovném povrchu. Pomocí mikroskopických atomárních sil je prokázáno, že malé ploché plynové bubliny, měřící 3-50nm, se tvoří spontánně na hladkém (téměř uni-molekulárním) hydrofobním povrchu, ponořeném ve vodě obsahující rozpuštěný plyn. Tato existence nanobublin na hydrofobním povrchu je obecně přijímána, ale mechanismus spouštějící jejich vývoj je stále diskutován. Ve studii prováděné v Izraelském institutu Naval Medical (Arieli a Marmur, 2011) se zabývají vývojem a dynamikou bublin a mikrobublin za pomoci pokusů s hladkými křemíkovými deskami. Cílem bylo dokázat vznik nanobublin jako původce dekompresní nemoci i na hladkém povrchu bez stabilních plynových mikrojadra. Křemíkové destičky byly pokryté hydrofobní látkou a zbaveny všech nečistot. Tyto destičky byly vnořené do misky s destilovanou vodou a podrobeny dekompresi. Bylo zjištěno, že s rostoucí hydrofobií materiálu byl počet bublin po dekompresi vyšší. (Arieli and Marmur, 2013)

3 Cíle, úkoly

Cílem této bakalářské práce je zjistit dostupná zařízení pro použití při jednoduchém experimentu pozorování dynamiky bublin, popř. mikrobublin.

Úkoly práce:

- analyzovat vybranou literaturu potřebnou pro měření
- sestavit vhodné zařízení pro měření bublin i mikrobublin a experimentálně ověřit funkčnost
- zvolit vhodné měřicí zařízení
- uskutečnit laboratorní měření sestaveného zařízení
- shromáždění naměřených dat s následnou analýzou
- na základě laboratorního měření sledovat dynamiku bublin, naměřené hodnoty vložít do grafu a sestavit regresní křivku

Vědecká otázka

Je možné s použitými měřicími prostředky sledovat vývoj bublin a mikrobublin?

4 Metodologie

4.1. Postup

Bakalářská práce byla vypracována tímto postupem:

1. Zjištění současného stavu v oblasti tvorby a dynamiky bublin, dekompresní teorie a s ní souvisejících.
2. Zjištění matematickofyzikální metody pro teoretické stanovení kritické velikosti bublin.
3. Vytvoření vhodného zařízení pro sledování dynamiky bublin a mikrobublin.

4.2. Popis sledovaného/výzkumného souboru

K vytvoření použitelného zařízení pro podmínky laboratorního měření je využito těchto materiálů:

- Hadička o průměru 2,5mm – pro spojení středtlaké hadice a výzkumné hyperbarické komůrky
- 2 rychlospojky – jako koncovky hadičky
- Rychlospojka tvaru T – pro regulaci tlaku
- 2x olejoznak - využitý jako průzor, odolný vysokým tlakům
- 1x silnostěnné hliníkové pouzdro - vyrobeno svépomocí

Pro realizaci pilotního a následně laboratorního měření je využito těchto zařízení, přístrojů a pomůcek:

- Vlastní sestavené zařízení = výzkumná hyperbarická komůrka pro zkoumání bubliny, viz fotografie (Obr. 6.)
- Digitální fotoaparát
- Destilovaná voda
- Sodová voda – díky jejímu nasycení již není potřeba sytit výzkumnou hyperbarickou komůrku. Zvýšením tlaku se pouze rozpustí plyn již obsažený v kapalině
- Potápěčská tlaková lahev

- První stupeň plicní potápěčské automatiky
- Středotlaká hadice
- Dioda – pro podsvícení výzkumné hyperbarické komůrky
- Svěrák – slouží jako fixace výzkumné hyperbarické komůrky
- Několik hliněných plíšků - pro podklad diody a vypodložení fotoaparátu
- 2 klíče o velikosti 27 – pro uzavření výzkumné hyperbarické komůrky



Obr. 6. Výzkumná hyperbarická komůrka pro zkoumání bublin. (Vlastní archiv)

4.3. Sběr dat

Sběr dat je dlouhodobý proces. Nejprve je zapotřebí prozkoumat literaturu zabývající se vznikem a dynamikou bublin, mikrobublin a dekompresních teorií. Po shromáždění těchto informací je důležité zpracovat matematickofyzikální vzorce pro teoretické výpočty vzniku a chování mikrobublin i bublin, která byla vypracována v kapitole 2. Teoretická východiska.

Dalším krokem je shromáždění dat z pilotního i laboratorního měření. Během obou měření probíhá fotodokumentace, zapisování a dokumentace měřeného zařízení. Součástí práce je sběr materiálu (videozáznamů) pořízeného v laboratoři, pomocí mikroskopu s připojenou kamerou. Tímto materiálem jsou myšleny hodnoty bublin a mikrobublin, jejich vznik i dynamika v průběhu sycení a vysycení hyperbarické komůrky.

Pro zjednodušení měření a následné ulehčení zpracování a srovnání, bylo sjednoceno měřítko přiblížení na použitém mikroskopu Olympus SZX12 s kamerou Nikon DS-Fi2 (software NIS-Elements AR 4.11) a to na 1 mm nebo-li 1000 μ m.

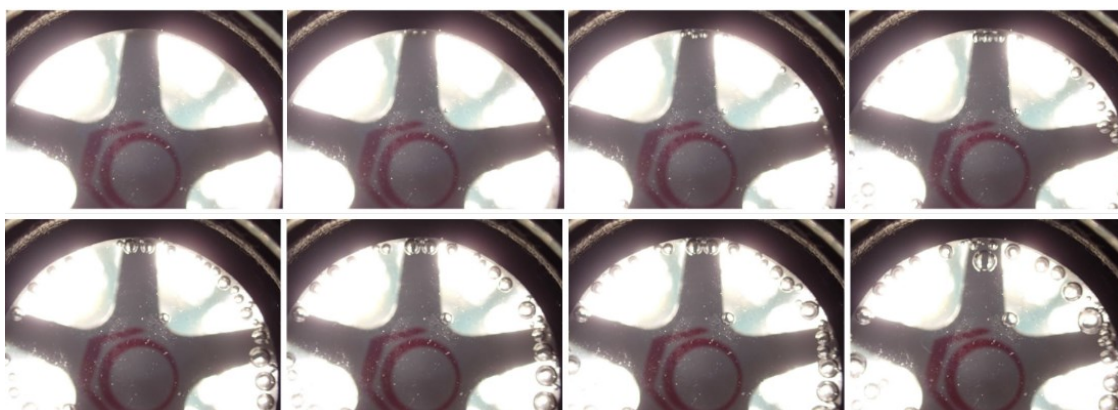
Na fotografiích (Obr. 7. – 12.) je možné vidět okolí měřené hyperbarické komůrky během pilotního i laboratorního měření.



Obr. 7. Mechanické zařízení s externími pomůckami. (Pilotní měření – vlastní archiv)



Obr. 8. Zmenšování bubliny při sycení. (Napojení na vzduchovou lahev – vlastní archiv)



Obr. 9. Vznik bublinek při uvolnění tlaku. (Vlastní archiv)



Obr. 10. Mikroskop Olympus SZX12 s kamerou Olympus DP70 (software Quick PHOTO Micro 2.3). (Vlastní archiv)



Obr. 11. Hyperbarická komůrka pod mikroskopem Mikroskop Olympus SZX12 a kamerou Nikon DS-Fi2 (software NIS-Elements AR 4.11). (Vlastní archiv)



Obr. 12. Potápěčská tlaková lahev s prvním i druhým stupněm plicní automatiky, manometrem a středotlakou hadicí pro připojení a natlakování výzkumné hyperbarické komůrky. (Vlastní archiv)

4.4. Analýza dat

Analýza dat shromážděných v průběhu laboratorního měření probíhala následujícím způsobem:

1. Po pořízení videozáznamu z laboratorního měření probíhalo hledání vhodného přehrávače, který by dokázal pozastavit záznam s přesností na desetiny vteřiny. Za nejvhodnější program byl zvolen Microsoft Movie Maker verze 2.6.
2. V programu Adobe Premiere Pro CC 2015 bylo do videozáznamů vloženo měřítko.
3. Na základě zjištění, která bublina je v záběru po celou nebo alespoň většinu doby trvání záznamu, byly v programu Microsoft Movie Maker 2.6 pořízené záběry několikrát sledovány.
4. Poté byly záznamy znovu přehrávány, každá bublina znovu pozorována a několikrát přeměřována v programu Adobe Premiere Pro CC 2015, za pomoci vloženého měřítka. Ručně byla zaznamenána data pro následné přepočítání reálných velikostí. Tento způsob byl vyhodnocen jako nejefektivnější.
5. Na základě přepočítání naměřených hodnot byly sestaveny tabulky každé pozorované bubliny.

5 Hlavní část

5.1. Matematický výpočet pro kritickou velikost bubliny

Před laboratorním měřením byla matematicky spočítána kritická velikost vzduchové bubliny ve vodě, etanolu a olivovém oleji. Tyto výsledky jsou pouze orientační, jelikož bylo počítáno pouze s přibližnými hodnotami. Počítání bylo provedeno z důvodu lepší představitivosti o velikosti vzniku bubliny. Hodnoty dosazené do vzorce vycházejí z Matematicko fyzikálních a chemických tabulek pro střední školy (Mikulčák,2012). Dosazenými hodnotami do vzorce jsou:

- povrchové napětí – σ [$10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$]
- atmosférický tlak – p_n [Pa]
- poloměr bublinky – r [m]

Vzorec: $r = \sigma / p_n$

Pro vodu platí kritická velikost bubliny: $r = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Pro etanol platí kritická velikost bubliny: $r = 2,17 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Pro olivový olej platí kritická velikost bubliny: $r = 3,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

5.2. Příprava měření

Příprava tohoto měření je velice náročná nejen z hlediska času. Je zapotřebí i značná dávka představivosti a manuální zručnosti, neboť zařízení pro toto měření musí být navrhnuo, upraveno a sestaveno.

Po sestavení, za pomoci poskytovatele dílny a jejího vybavení, kde bylo toto zařízení zhotoveno je proveden pokus o pilotní měření. Zhotovení a první pilotní pokus je prováděn v soukromé dílně pana Martina Hrubého. Pilotní měření se provádí z důvodu případného výskytu možných komplikací, či nesrovnalostí, které jsou po tomto měření dále řešeny. Na obrázku (Obr. 7) je vidět celý mechanismus zhotoveného zařízení, s dalšími externími pomůckami, pro usnadnění a vyzkoušení měření (svěrák, digitální fotoaparát aj.)

5.3. Postup pilotního měření

Zhotovená hyperbarická komůrka pro zkoumání bublin (dále jen hyperbarická komůrka) je naplněna destilovanou vodou (na další pokus sodovou vodou, díky svému nasycení se zvýšením tlaku plyn obsažený v kapalině pouze rozpustí a není třeba dále sytit) až po okraj tak, aby při jejím zavření nebyla vidět hladina, či vzduchová bublina. Plnění probíhá v misce naplněné vodou (destilovanou, následně sodovou) právě pro zamezení výskytu hladiny, či bubliny, před začátkem měření. Následně se na potápěčskou tlakovou lahev připevní první stupeň plicní automatiky (vysoký tlak, především v případě, že je tlaková lahev naplněna na 150-200 barů redukuje na 8 barů), na který navazuje středotlaká hadice. Ke středotlaké hadici je připevněna hadička k hyperbarické komůrce. Poté se hyperbarická komůrka vloží do diodou podsvíceného svěráku, fotoaparát nastavený na rychlé snímání je položen těsně nad hyperbarickou komůrkou. Po spuštění režimu rychlého snímání je vše připraveno a může být otevřena potápěčská tlaková lahev, pro zvýšení a následné snížení tlaku v hyperbarické komůrce.

V pilotním měření se dbá na bezpečnost a funkčnost sestaveného zařízení. Bezpečnost i funkčnost je posuzována podle aktuálního stavu zařízení během zvyšování i snižování tlaku. Je důležité, aby veškeré části hyperbarické komůrky zůstaly nehnuté, např.: veškeré závitky se nepovolily ani neutáhly, sklíčka po obou stranách nebyla vypuklá či nepraskla apod.

Po naplnění zařízení sodovou vodou, lze po zvýšení tlaku, v průběhu jeho snižování, pouhým okem pozorovat vzniklé bubliny. Veškeré záznamy z průběhu snižování i zvyšování tlaku jsou následně nahrány do počítače, kde jsou prohlíženy a srovnávány, zda v sestaveném zařízení opravdu dochází ke změnám velikosti bublin.

Po tomto pilotním měření je provedena rychlá úprava v podobě zkrácení těla hyperbarické komůrky o 6mm. Její současná výška činí 39mm. Tato úprava byla provedena z důvodu lepšího usazení pod mikroskop.

5.4. Měření v laboratorních podmínkách

Měření v laboratorních podmínkách probíhá velice podobně jako měření pilotní. Hyperbarická komůrka je v kádince plněna, v ponořeném stavu nejprve, destilovanou vodou, následně vodou sodovou. Po naplnění je utažena klíči, připojena k potápěčské

tlakové lahvi, tlakována a vložena pod mikroskop. Tato měření probíhají v laboratořích Biologického ústavu akademie věd, pod odborným dohledem pana RNDr. Martina Vohníka, Ph.D. a jeho kolegy. Ti poskytli přístup k mikroskopům, využívaných pro tuto práci. Po nastavení mikroskopu probíhá fáze odpočtu, aby kamera i odpojení hyperbarické komůrky od potápěčské tlakové lahve proběhlo současně. Po dokončení několika těchto měření je voda vylita a vyměněna za vodu sodovou. Měření se sodovou vodou probíhá pod oběma mikroskopy.

V průběhu měření není možné vzniklé bubliny pozorovat pouhým okem. Díky mikroskopům je však možné pozorovat jejich dynamiku prakticky hned od začátku měření.

5.5. Sběr dat

V průběhu opakování experimentu v laboratorním prostředí probíhá také sběr dat a to za pomoci kamery připevněné k mikroskopu, která nahrává průběh snížení tlaku v hyperbarické komůrce. Během celého dne stráveného v laboratoři je shromážděno několik minut záznamu. Zdokumentováno bylo také prostředí laboratoře (*Obr. 10.-12.*). Videozáznamy pořízené během experimentů byly převedeny do počítače, kde v programu Microsoft Movie Maker 2.6 byly několikrát sledovány a následně podrobeny analýze, kdy se po sekvencích videozáznam zastavoval, aby bylo možno videozáznam rozdělit na jednotlivé fotografie, které byly následně otevřeny v programu Adobe Premiere Pro CC 2015, kde se ke každému snímku vložilo měřítko, podle něhož se měřila velikost bublin. Tato práce byla časově velice náročná. Každý videozáznam byl několikrát pečlivě sledován ve zpomaleném přehrávání, kde byla hodnocena především kvalita pořízeného záznamu.

V průběhu dne se mezi experimenty musela vyměnit sodová voda v hyperbarické komůrce a několikrát se měnilo i ukotvení hyperbarické komůrky. V rámci zvyšování a snižování tlaku docházelo k lehkým posunům komůrky stranou. Tento problém byl opakovaně řešen. Posuny totiž způsobily zhoršenou kvalitu videozáznamu.

Po vybrání čtyř nejkvalitnějších videozáznamů proběhla analýza každého z nich. Bubliny byly jednotlivě sledovány, měřeny a jejich hodnoty následně převedeny do tabulek a grafů.

5.5.1. Bublina č. 1

Protože první bublina byla v hyperbarické komůrce zanechána úmyslně již před začátkem měření, byla u ní pozorována pouze její dynamika v závislosti na čase. Vše bylo zaznamenáno do tabulky (Tab. 4).

Bublina 1	
Čas [s]	skutečná velikost [mm]
0,10	2,833
0,94	4,417
1,42	4,750
1,81	5,250
2,30	5,417
2,78	5,917
3,15	5,917
3,50	5,917
4,06	6,083
4,40	6,333
5,06	6,417
5,75	7,167
6,09	7,583
6,20	7,917
6,71	8,417
7,22	8,333
7,64	8,333
8,13	8,583
8,47	8,583
9,32	9,167
9,50	9,250
9,80	9,583

Tab. 4. Bublina 1., naměřené hodnoty – velikost bublinky v závislosti na čase

5.5.2. Bublina č. 2

Druhá bublina byla zaznamenána až ve čtvrté vteřině. Není však znám přesný čas jejího vzniku, neboť na pořízeném záznamu je patrné její stoupání proti tíhové síle, což značí, že bublina vznikla již dříve hlouběji v zařízení. Opět jsou veškeré hodnoty uvedeny do tabulky (Tab. 5.).

Bublina 2	
Čas [s]	Skutečná velikost [mm]
4,06	0,833
4,4	1,083
5,06	1,000
5,75	1,667
6,09	2,000
6,2	2,250
6,71	2,333
7,22	4,250
7,64	4,417
8,13	4,583
8,47	5,083
9,32	4,917
9,5	4,333
9,8	4,417

Tab. 5. Bublina 2., naměřené hodnoty - velikost bublinky v závislosti na čase

5.5.3. Bublina č. 3

U této bubliny není zaznamenán přesný čas ani místo vzniku. Na záznamu je možné pozorovat až již vzniklou bublinku a to v čase 3,4s. Její hodnoty jsou uvedené v tabulce (Tab. 6.).

Bublina 3	
Čas [s]	Skutečná velikost [mm]
3,4	1,667
3,87	2,083
4,19	2,500
4,72	2,583
5,24	2,583
5,62	3,000
6,17	2,750
6,51	3,417
7,13	3,500
7,27	3,583
8,01	3,583
8,29	3,833
8,61	4,000
9,1	4,167
9,61	4,333
9,93	5,250

Tab. 6. Bublina 3., naměřené hodnoty - velikost bublinky v závislosti na čase

5.5.4. Bublina č. 4

Ani u čtvrté bubliny není zaznamenán vznik, ale její dynamický záznam je od ostatních zcela odlišný. Vzhledem k nepřesnosti kamerového záznamu není zcela jasné, zda se v průběhu své dynamiky nespojila s jinou bublinou. Tato dynamika je zaznamenána v tabulce (Tab. 7).

Bublina 4	
Čas [s]	skutečná velikost [mm]
3,40	0,750
3,87	1,083
4,19	1,167
4,72	1,250
5,24	1,250
5,62	2,167
6,17	2,167
6,51	3,500
7,13	3,500
7,27	3,667
8,01	3,667
8,29	4,167
8,61	4,167
9,10	4,083
9,61	4,083
9,93	5,000

Tab. 7. Bublina 4, naměřené hodnoty - velikost bublinky v závislosti na čase

6 Výsledky a srovnání

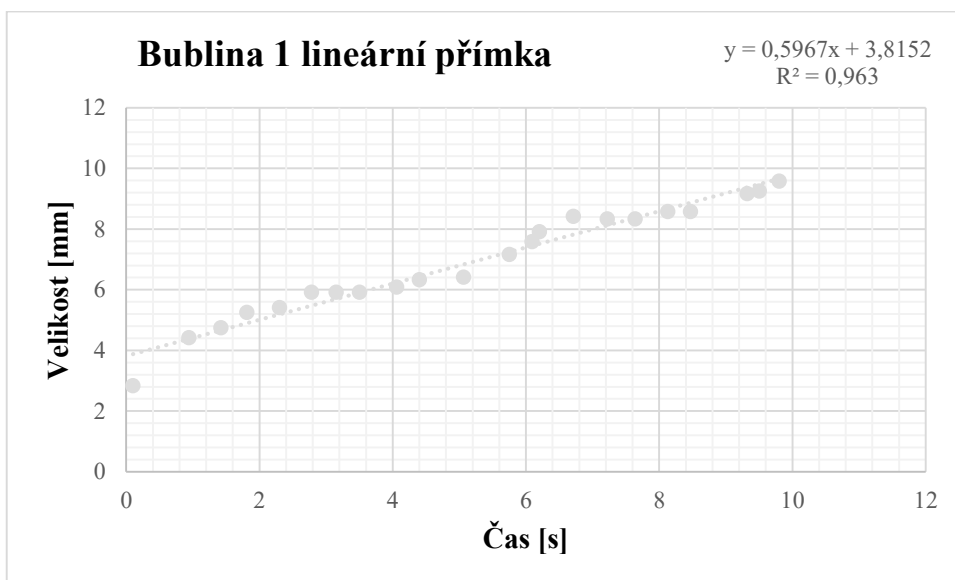
Všechny měřené bubliny byly zkoumány ve stejný den za stejných podmínek. Během celodenního měření se povedlo zaznamenat několik bublin a jejich dynamiku. Následně budou graficky rozebrány 4 z nich. Všechny tyto rozebírané bubliny byly vytvořené v sodové vodě s obsahem CO₂ 5g/1l. Sodová voda byla vyhodnocena jako vhodnější pro využití při experimentálním měření. Díky svému nasycení nebylo třeba hyperbarickou komůrku sytit, zvýšením tlaku se pouze znovu rozpustil plyn, který kapalina již obsahovala.

Naměřené hodnoty byly uvedeny v tabulkách (*Tab. 4. - 7.*) a grafech (*Gr. 1. -8.*). Tato práce předkládá dva grafy ke každé bublině s regresním průběhem a to s lineárním průběhem a logaritmickou křivkou. Vývoj bublin by měl probíhat exponenciálně a tedy shodovat se pouze s křivkou logaritmického průběhu, ale vývoj těchto bublin v makroskopické části jejich růstu má i lineární průběh, který souvisí s tím, že poslední část logaritmické křivky je prakticky lineární. Také hodnoty směrnice u lineárního růstu bubliny se liší jen minimálně (stejně tak i v oblasti logaritmické křivky jsou hodnoty růstu podobné). V hodnotách rozptylu [R^2] se od sebe jednotlivé zkoumané bubliny liší jen minimálně.

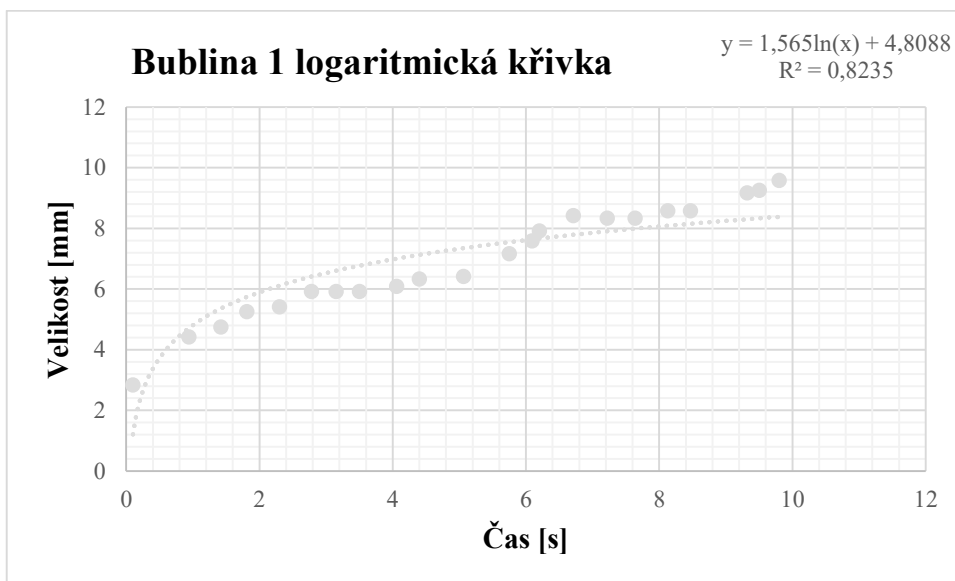
Dostupné zařízení bylo využito k jednoduchému experimentu v laboratorních podmínkách. V průběhu experimentu bylo možné pozorovat pouze dynamiku bublin makroskopických rozměrů, nikoliv jejich vznik. Pro měření mikrobublin v jejich kritických oblastech růstu je potřeba využít zařízení s větší zvětšovací schopností.

6.1. Bublina č. 1

Z grafů (Graf 1. – 2.) vytvořených podle naměřených hodnot první bubliny vyplývá, že bublina roste téměř rovnoměrně a bez náhlých změn chování. Lineární křivka ukazuje rovnoměrný růst bubliny.



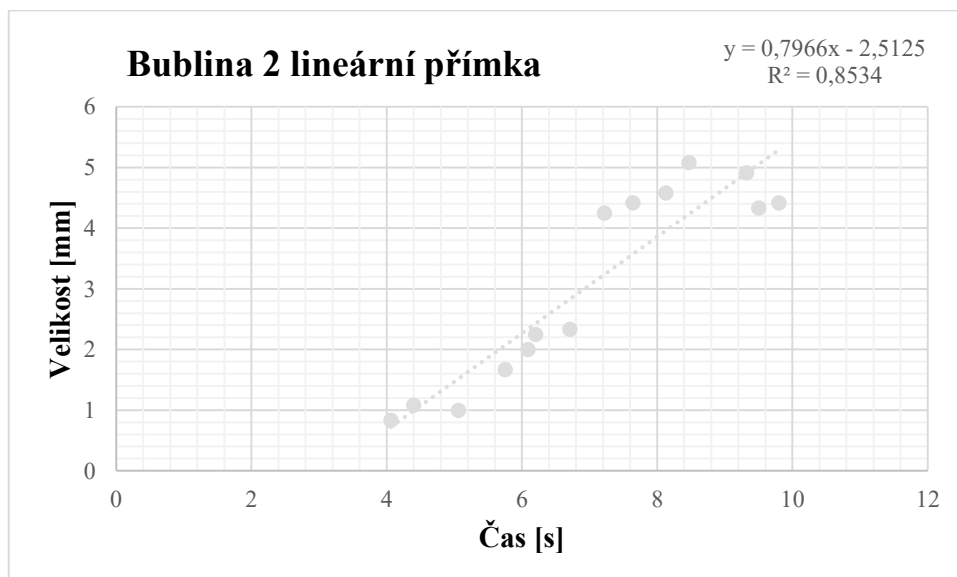
Graf 1. Grafický záznam růstu 1. měřené bubliny proložený regresní lineární přímkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.



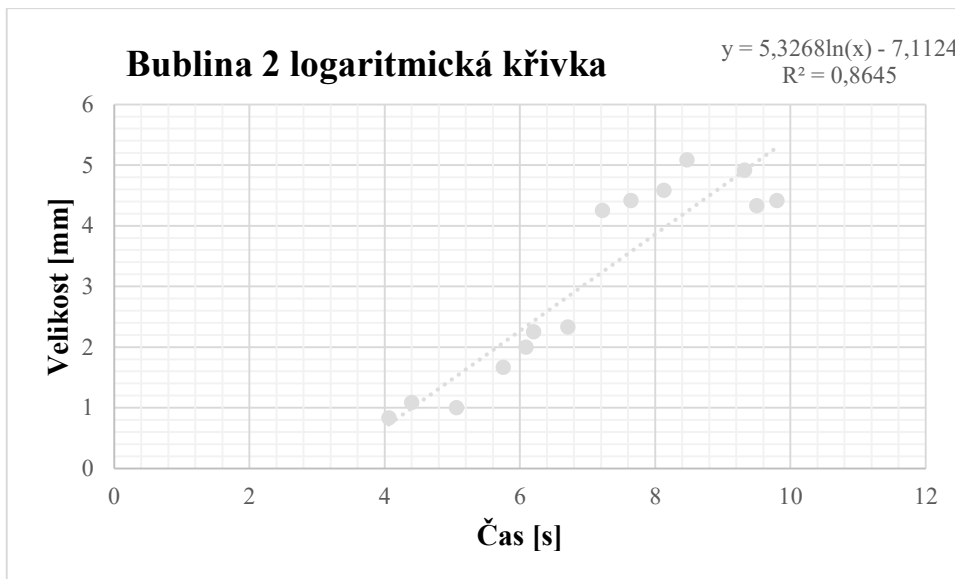
Graf 2. Grafický záznam růstu 1. měřené bubliny proložený regresní logaritmickou křivkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.

6.2. Bublina č. 2

Tato bublina se na videozáznamu objevila až v čase 4,06s. Bohužel nejde s určitostí říci, v jakém čase vznikla. Vzhledem k zaostření mikroskopu nebyl její vznik zpozorován. Její pohyb je však graficky (*Graf 3. – 4.*) zaznamenán. Prudké změny velikosti mezi 6,71s a 7,22s, kdy téměř raketově narostla, zapříčinilo spojení se s jinou bublinou. Naopak pokles na velikosti zaznamenaný v čase 8,47s až 9,50s je zapříčiněno nerovnoměrným růstem. Předpokládá se, že právě v tomto čase bublina nerostla do šířky (v osách X, Y), ale do třetího rozměru, který na sestaveném zařízení není možný pozorovat a tím je výška bubliny (osa Z).



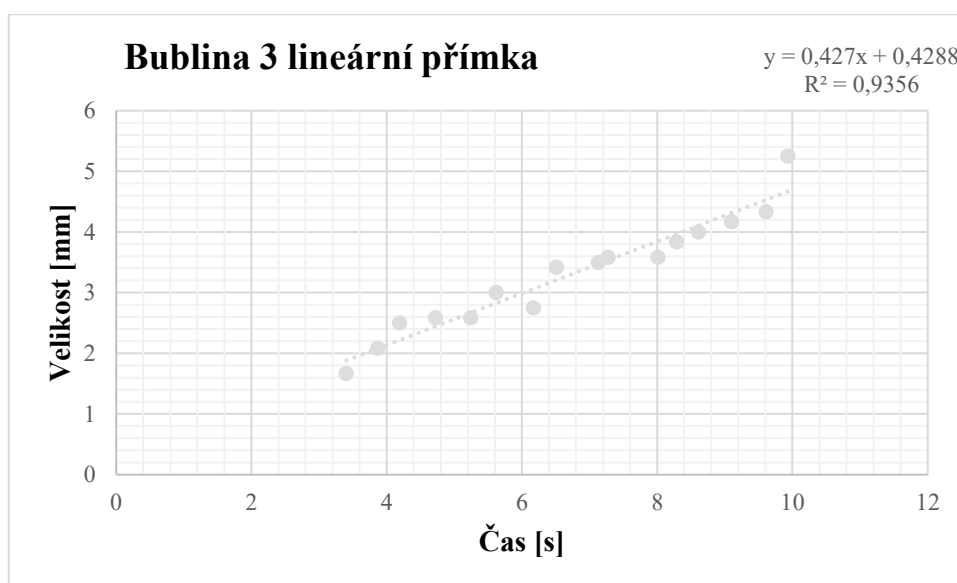
Graf 3. Grafický záznam růstu 2. měřené bubliny proložený regresní lineární přímkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.



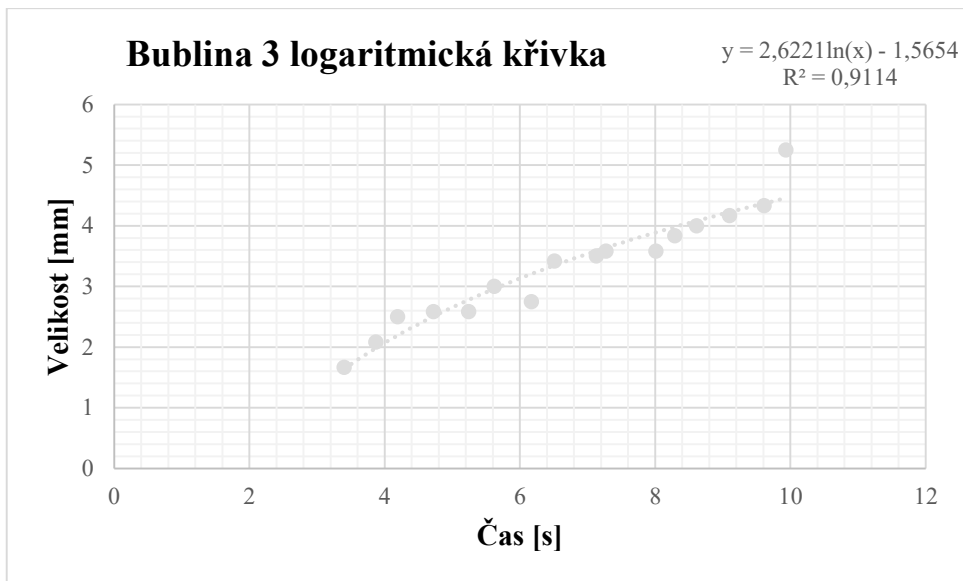
Graf 4. Grafický záznam růstu 2. měřené bubliny proložený regresní logaritmickou křivkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.

6.3. Bublina č. 3

Níže graficky (*Graf 5. – 6.*) znázorněná bublina, stejně jako bublina předchozí, nebyla zachycena v době svého vzniku. Má však v čase 5,24s až 6,51s znatelné velikostní rozdíly, prudký pokles na velikosti je zřejmě, stejně tak jako u bubliny č. 2, způsobený její změnou růstu nikoli do šířky, nýbrž do výšky. Vzhledem k faktu, že na záznamu bylo spojení s jinou bublinou patrné až v čase 9,61 je možné předpokládat, že skokový nárůst několika milimetrů v čase 6,17-6,51 je způsoben opětovným nárůstem bubliny do šířky.



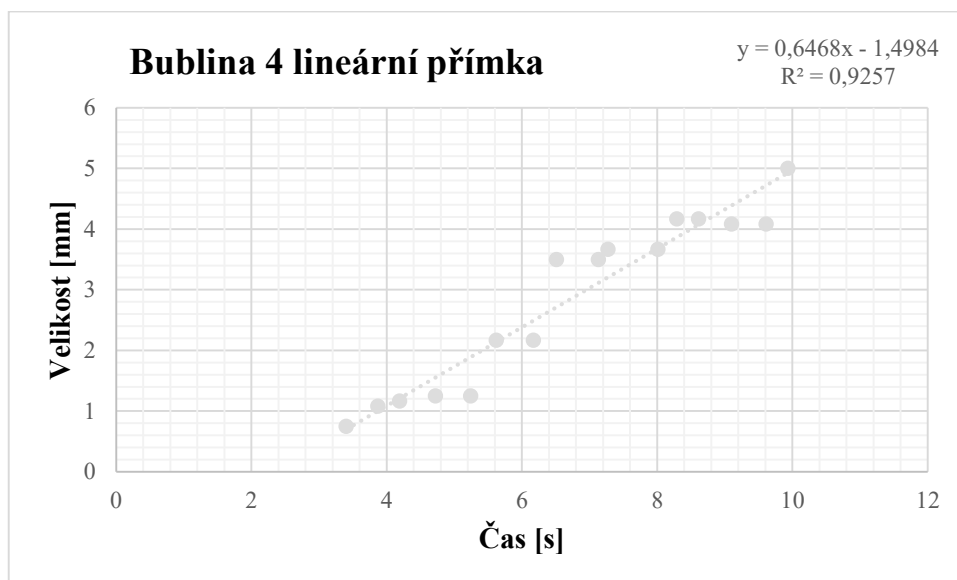
Graf 5. Grafický záznam růstu 3. měřené bubliny proložený regresní lineární přímkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.



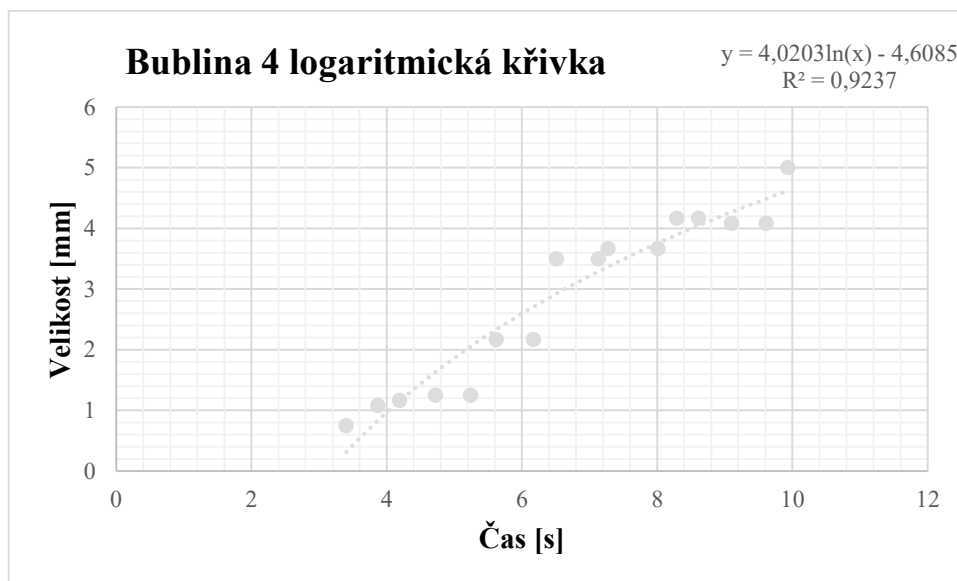
Graf 6. Grafický záznam růstu 3. měřené bubliny proložený regresní logaritmickou křivkou. Velikost bubliny v závislosti na čase

6.4. Bublina č. 4

U bubliny číslo 4 také nebyl pozorovaný vznik. Na jejím grafickém záznamu (Graf 7. – 8.) jsou patrné velké skokové změny velikostí. Tyto změny odpovídají sloučení s jinou bublinou a změnám růstu v osách X, Y a Z (tedy změnám růstu v šířce a výšce).



Graf 7. Grafický záznam růstu 4. měřené bubliny proložený regresní lineární přímkou. Velikost bubliny v závislosti na čase.



Graf 8. Grafický záznam růstu 4. měřené bubliny proložený regresní logaritmickou křivkou. Velikost bubliny v závislosti na čase

7 Diskuze

Měřené bubliny byly zachyceny až v poslední fázi jejich růstu, na což poukázaly grafy proložené regresivní lineární přímkou. V případě, že by bylo možné dosáhnout většího přiblížení, neodpovídaly by lineární přímce.

Bohužel vzhledem k nedostatku financí nemohla být zvolena vhodnější konstrukce k tomuto měření. Z důvodu konstrukce hyperbarické komůrky, jejíž výška je 39mm a šířka průzoru 15mm, mikroskop nemohl změřit počátek vzniku mikrobubliny. Dle Wienkeho Reduced gradient bubble model (RGBM) se kritická velikost bubliny pohybuje okolo 0,8 tisícín milimetru a na takovéto přiblížení bohužel používaný mikroskop přiblížit nedokázal.

Dalším nedostatkem při měření byl lidský faktor. Veškerá měření prováděli vždy dva lidé. Počátek natáčení s upouštěním tlaku z tlakové lahve a následné měření a zhodnocení velikosti bublin v daných časech. Počátek nahrávání společně s upouštěním tlaku z hyperbarické komůrky sice byl ve všech případech odpočítáván, ale vzhledem k dlouhé hadičce, vedené do hyperbarické komůrky a nepatrným zpožděním kamery na mikroskopu, nelze s určitostí říci, zda počátek natáčení a změna tlaku proběhly ve stejný čas.

Také rychlost záznamu neodpovídá požadavkům. V případě dalšího měření bude vyhledána kamera se záznamem alespoň 60-100 snímků za vteřinu.

V případě lepších finančních prostředků je toto téma možné dále zkoumat. Bylo by možno sestavit zařízení, které by se vešlo pod mikroskopy tak, aby mohlo být zaostřené na menší rozměry a přitom pokrýt větší prostor. Za spolupráce techniků by se mohlo realizovat sestavení zařízení „automatické spouště“, kdy by se jedním tlačítkem mohlo ovládat vpouštění tlaku do zařízení současně s počátkem pořizování videozáznamu.

Co se týče pozorování dynamiky bublin je možné v tomto zařízení sledovat jen dvě osy růstu (osa X a Y), což v tomto případě značí velikost bublin do šířky. Pro výpočty reálných velikostí bublin je zapotřebí znát i osu třetí (osa Z), značící výšku bubliny.

8 Závěr

Je možné s použitými měřicími prostředky sledovat vývoj bublin a mikrobublin?

S použitými měřicími prostředky je možné sledovat vývoj bublin makroskopických rozměrů, bohužel vývoj bublin rozměrů mikroskopických, či dokonce jejich vznik sledovat nelze.

Měřené bubliny byly zachyceny až v poslední fázi jejich růstu, na což poukázaly grafy proložené regresivní lineární přímkou. V případě, že by bylo možné dosáhnout většího přiblížení, neodpovídaly by lineární přímce.

Měření pro tuto bakalářskou práci však lze hodnotit úspěšně. Díky použitým prostředkům bylo možno sledovat a porovnat vývoj bublin. Zásluhou stejných prostředků však nebylo možné pozorovat jejich vznik ani menší velikost. Výzkumná hyperbarická komůrka sestavená za účelem zkoumání dynamiky bublin a mikrobublin tedy částečně dosáhla svým účelům. Hodnoty pořízené během experimentálního měření v laboratorních podmínkách byly zpracovány a následně graficky znázorněny. Na základě těchto grafů je možné tvrdit, že u bubliny o velikosti makroskopických rozměrů lze také předpokládat rovnoměrný růst.

Pro další zkoumání stejného, či podobného tématu, je třeba navrhnout nové pokusné zařízení pro zkoumání dynamiky bublin. Snahou bude sestavit zařízení, v němž bude možno pozorovat nejen dynamiku bublin ale i vznik mikrobublin a jejich chování.

Seznam zdrojů

Advanced diver magazine [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z:

<http://www.advanceddivermagazine.com/articles/RGBM/RGBM.html>

ARIELI, R. a A. MARMUR. Dynamics of gas micronuclei formed on a flat hydrophobic surface, the predecessors of decompression bubbles. *Respiratory Physiology & Neurobiology* [online]. 2013, 185(3), 647-652 [cit. 2017-03-28]. DOI: 10.1016/j.resp.2012.11.020. ISSN 15699048. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569904812003631>

ARIELI, R. a A. MARMUR. Evolution of bubbles from gas micronuclei formed on the luminal aspect of ovine large blood vessels. *Respiratory Physiology & Neurobiology* [online]. 2013, 188(1), 49-55 [cit. 2017-03-28]. DOI: 10.1016/j.resp.2013.04.013. ISSN 15699048. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569904813001183>

ARIELI, R. a A. MARMUR. *Decompression sickness bubbles: Are gas micronuclei formed on a flat hydrophobic surface?*. DOI: 10.1016/j.resp. 2011.02.013. ISBN 10.1016/j.resp.2011.02.013. Dostupné také

z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569904811000814>

Deep diving manual. 3rd ed. Fort Collins, CO: Scuba Schools International, c2004. ISBN 1880229870.

Dekompresní nemoc. *Medicina, nemoci, studium na 1. LF* [online]. 2011 [cit. 2016-8-6]. Dostupné z: <http://www.stefajir.cz/?q=dekompresni-nemoc>

Dekompresní teorie a praxe. *Strany potápěčské* [online]. 1999 [cit. 2016-6-5]. Dostupné z: <http://www.stranypotapecske.cz/teorie/deco.asp>

CHAPPELL, M.A. a S.J. PAYNE. A physiological model of the release of gas bubbles from crevices under decompression. *Respiratory Physiology & Neurobiology* [online]. 2006, 153(2), 166-180 [cit. 2016-08-02]. DOI: 10.1016/j.resp.2005.10.006. ISSN 15699048. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S156990480500265X>

Ideální plyn. *Fyzika 007* [online]. [cit. 2016-9-15]. Dostupné z:
<http://www.fyzika007.cz/struktura-a-vlastnosti-latek/idealni-plyn>

Inertní plyny. *Vítejte na zemi* [online]. [cit. 2016-9-26]. Dostupné z:
<http://www.vitejtenazemi.cz/slovník/index.php?article=330>

Izobarický děj. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/601-izotermicky-dej>

Kesonova nemoc, dekompresní nemoc, nemoc potápěčů – příznaky, projevy, symptomy. *Příznaky nemoci* [online]. [cit. 2016-9-14]. Dostupné z:
<http://www.priznaky-projevy.cz/nezarazene-nemoci/kesonova-nemoc-dekompresni-nemoc-nemoc-potapecu-priznaky-projevy-symptomy>

Kesonová nemoc. *Velký lékařský slovník* [online]. [cit. 2016-9-12]. Dostupné z:
<http://lekarske.slovníky.cz/pojem/kesonova-nemoc>

MIKULČÁK, J. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 978-80-7196-345-5.

MÜNSTER, F. *Chování bublin ve sloupci kapaliny*. Brno, 2016. 66 s. Bakalářská práce na Vysokém učení technickém v Brně Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

NOVOMESKÝ, F. *Potápěčská medicína*. Martin: Osveta, 2013. ISBN 978-80-8063-397-4.

Pascal. *Jednotky.cz* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z:
<http://www.jednotky.cz/tlak/pascal/?hodnota=101325>

Pascalův zákon - Fyzika. *Učitel.Net* [online]. [cit. 2016-9-18]. Dostupné z:
<http://www.ucitel.net/fyzika/pascaluv-zakon>

PEHAL, J. *Potápěčská dekomprese*. Brno, 2008, 64 s. Diplomová práce na MASARYKOVA UNIVERZITA Fakulta sportovních studií Katedra Kineziologie. Vedoucí práce Doc. MUDr. Jan Novotný, CSc.

POWELL, M. *Deco for divers: a diver's guide to decompression theory and physiology*. Reprinted. Essex: Aquapress, 2008. ISBN 9781905492077.

Reduced Gradient Bubble Mode. *Ns. suunto* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: http://ns.suunto.com/pdf/Suunto_RGBM.pdf

Skupenské stavy hmoty. *Cit. vfu*. [online]. [cit. 2016-11-5]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:dtJTpFe-r2YJ:cit.vfu.cz/biochemie/tezef1.ppt+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>

Surfaktant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-10-21]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php>

WIENKE B.R.: Decompression theory. Los Alamos National Laboratory, World Wide Web: http://www.oceanwreckdivers.com/images/decompression_theory.pdf

Začarovaný kruh bublin. *Strany potápěčské* [online]. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.stranypotapecske.cz/teorie/kruhpubl.asp?str=200411071734210>

Zákony plynů (Boyleův - Mariottův). *Is.muni.cz* [online]. [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2015/UPV_0019/32_31_17Zakony_plynu__Boyleuv_-_Mariottuv_.pdf