

Proudění kapalin (SŠ)**Studium proudění vody
v soustavě trubic****Fyzikální princip**

Měření průtoku patří k jedné z nejstarších činností měřicí techniky. V současné době je rozsah použití průtokoměrů velmi široký: od měření průtoku krve až po měření rychlosti proudění říčních toků nebo mořských proudů.

Pohyb reálné kapaliny je velmi komplikovaný. Proto se při numerických výpočtech pracuje s dokonale tekutou a dokonale nestlačitelnou kapalinou, tzv. ideální kapalinou. Ta slouží jako zjednodušený, ale velmi užitečný model pro chování skutečných kapalin.

Vzhledem k tomu, že je ideální kapalina nestlačitelná, nemůže se při proudění v žádném místě trubice hromadit. Při ustáleném proudění ideální kapaliny je součin obsahu průřezu trubice S a rychlosti proudu v v každém místě trubice stejný. Tento výrok vyjadřuje rovnici spojitosti toku neboli rovnici kontinuity, která je dána vztahem

$$S v = konst. \quad (1)$$

Tlak v kapalině vyvolaný hydrostatickou tlakovou silou se nazývá hydrostatický tlak p_h a lze jej vypočítat ze vztahu

$$p_h = h \rho g, \quad (2)$$

kde h odpovídá hloubce pod volným povrchem kapaliny a ρ je hustota kapaliny. Tlak vyvolaný atmosférickou tlakovou silou se nazývá atmosférický tlak p_a .

Tlakoměr ponořený do kapaliny ukazuje hodnotu tlaku p , která odpovídá součtu atmosférického a hydrostatického tlaku:

$$p = p_a + p_h. \quad (3)$$

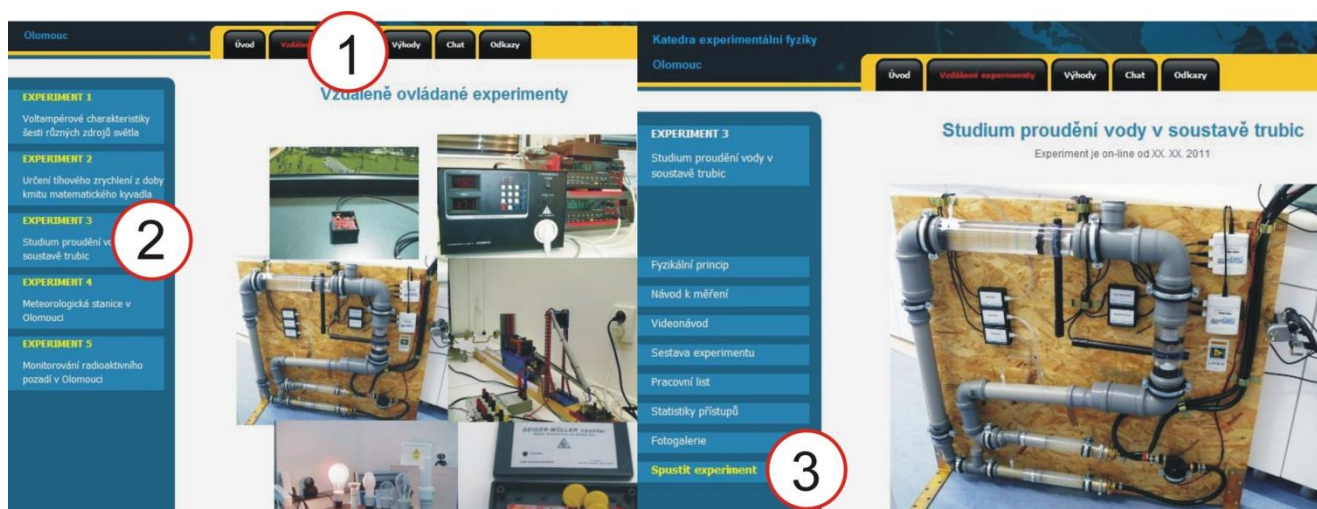
Cíl

1. Seznámit se s vzdáleně ovládaným experimentem *Studium proudění vody v soustavě trubic*.
2. Změřit tlak ve třech různých trubicích pro rychlost proudění $v = 0$ a $v \neq 0$.
3. Ze vztahu (3) vypočítat různé výšky trubic v soustavě.
4. Ze vztahu (1) ověřit platnost rovnice kontinuity.
5. Vypracovat protokol o měření.

Pomůcky

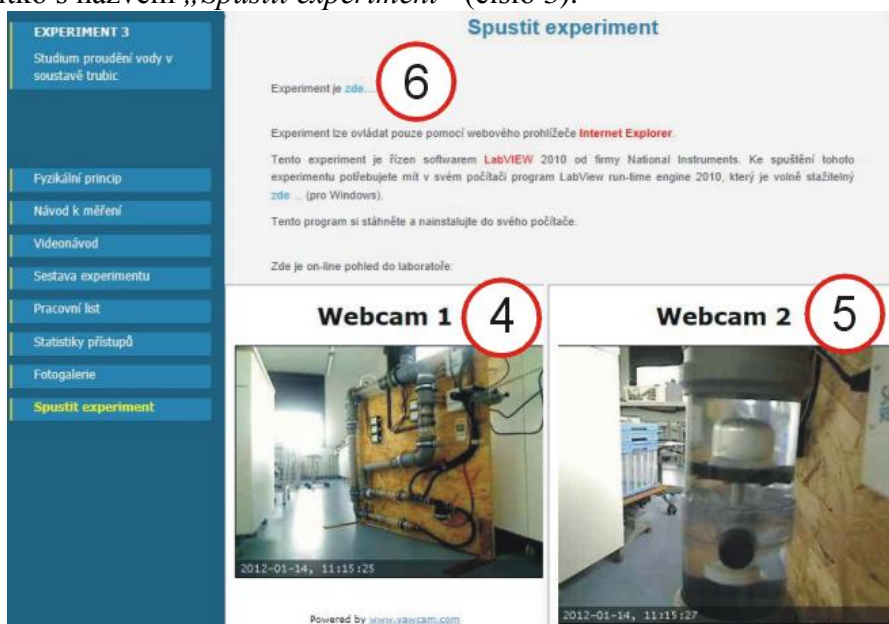
Počítač s připojením na internet.

Schéma



Obr. 1: Webová stránka, z které lze experiment vzdáleně ovládat.

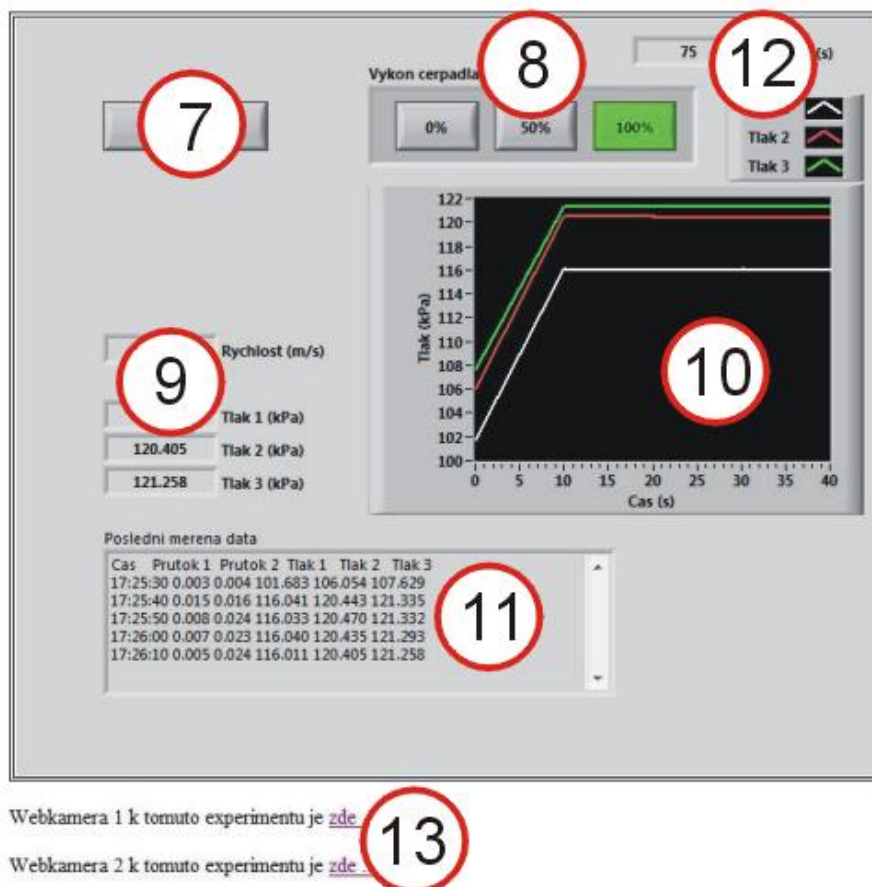
Na webové stránce <http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/> (viz obr. 1) se můžete v horním panelu seznámit s výhodami tohoto typu experimentování, také jsou v této liště např. odkazy na další vzdálené pokusy (jak české, tak zahraniční). Pokud chcete přejít k vzdálenému měření, klikněte na tlačítko s červeným nápisem "Vzdálené experimenty" (číslo 1) a poté si vyberte třetí experiment "Studium proudění vody v soustavě trubic" (číslo 2). Na další webové stránce si můžete přečíst fyzikální princip daného měření, návod a videonávod, jak experiment ovládat. Lze si také prohlédnout fotogalerii a seznam přístrojů, z kterých je experiment složen. Pokud chcete přejít přímo k měření, zvolte žluté tlačítko s názvem „Spustit experiment“ (číslo 3).



Obr. 2: Webová stránka, z které lze experiment vzdáleně ovládat.

Na nové stránce (viz obr. 2) se dozvíte, které programy si musíte nainstalovat do svého počítače pro bezproblémové ovládní vzdáleného pokusu. Tento experiment je vytvořen na platformě LabVIEW a proto před jeho spuštěním si musíte z webové stránky stáhnout a nainstalovat program LabVIEW Run Time-Engine (40,7 MB). Na této stránce jsou také zobrazeny dva on-line přenosy ze dvou webových kamer. Jedna kamera (číslo 4) zabírá celkový pohled na laboratoř s experimentem, druhá kamera (číslo 5) snímá detail sondy na proudění vody. Pro ovládní tohoto experimentu musíte použít

prohlížeč **Internet Explorer**. Pokud máte všechno připraveno lze přejít přímo k ovládacímu panelu (číslo 6). Na stránce s ovládacím panelem (viz obr. 3) nejprve kliknete na tlačítko „Spustit“ (číslo 7), poté můžete nastavit výkon čerpadla 0%, 50% nebo 100% (číslo 8). Aktuálně měřené hodnoty se zobrazují v číselné podobě (číslo 9) a hodnoty tlaků i v grafické podobě (číslo 10). Tyto údaje se aktualizují každých 10s a odpovídají průměrné hodnotě za posledních 10s. Z tabulky (číslo 11) lze naměřená data kopírovat např. do Excelu. Celkový čas na měření je 120s, ale při aktivní práci s experimentem se časový limit vždy nastaví na maximální hodnotu (číslo 12). On-line přenos z webových kamer není na stejné stránce jako ovládací panel experimentu, ale ve spodní části stránky lze otevřít novou stránku s těmito kamerami.



Obr. 3: Webová stránka, z které lze experiment vzdáleně ovládat.

Postup měření

1. Zapněte počítač a připojte se na internet. Experiment je umístěn na webové stránce <http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/> (viz obr. 1-3) a pro jeho ovládání je třeba použít prohlížeč *Internet Explorer*.
2. Nejprve si z webové stránky naistalujte program *LabVIEW Run Time-Engine* (40,7 MB).
3. Pokud je vše připraveno lze přejít k měření. V záložce „Sestava experimentu“ si najdete údaje o průměrech tří trubic (d_1 , d_2 a d_3) a spočítejte obsah kruhového průřezu těchto tří trubic (S_1 , S_2 a S_3). Hodnoty dosaďte do tab. 5 (1. a 2. sloupec). Budou ještě využity k dalším výpočtům.
4. V záložce „Sestava experimentu“ klikněte na nápis „Teplota v laboratoři: zde ...“. Dostanete se na novou stránku, kde je on-line snímána aktuální teplota v laboratoři. Tento údaj si opište do tab. 1.

Tab. 1

On-line teplota v laboratoři:

5. Nyní otevřete hlavní ovládací panel (viz obr. 3). Zde nejprve klikněte na tlačítko „Spustit“ a sledujte hodnoty tlaků, které se budou ukládat do tabulky na webové stránce (aktualizují se každých 10s). Vyčkejte, než se uloží minimálně 7 hodnot (tj. cca 70s) a hodnoty tlaků z tabulky si

zkopírujte např. do Excelu. Důležité je smazat první a poslední řádek naměřených hodnot, protože tyto data mohou být ovlivněna předcházejícím nebo následným měřením. Uložené hodnoty si poté přepište do tab. 2. Hodnoty zaokrouhlete na 3 desetinná místa.

Tab. 2

	$p_1 = \text{tlak 1 (kPa)}$	$p_2 = \text{tlak 2 (kPa)}$	$p_3 = \text{tlak 3 (kPa)}$
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
průměr	$p_1 =$	$p_2 =$	$p_3 =$

6. Hodnoty p_1 , p_2 a p_3 z tab. 2, odpovídají součtu atmosférického a hydrostatického tlaku:

$$p_1 = p_a + h_1 \rho g, \quad (4)$$

$$p_2 = p_a + h_2 \rho g, \quad (5)$$

$$p_3 = p_a + h_3 \rho g. \quad (6)$$

Z těchto naměřených hodnot p_1 , p_2 a p_3 nejprve odhadněte, který ze tří senzorů tlaku je umístěn v horní části soustavy trubek, který v dolní části a který uprostřed. Z rovnic (4-6) přesně spočítejte rozdílné výšky h_1 , h_2 a h_3 jednotlivých trubek. K výpočtu můžete využít předvyplněnou tab. 3.

Tab. 3

rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	tlak (kPa)	výška (m)
$v_1 = 0$	$p_1 = p_a =$	$h_1 = 0$
$v_2 = 0$	$p_2 =$	$h_2 =$
$v_3 = 0$	$p_3 =$	$h_3 =$

7. Nyní nastavte výkon čerpadla na 100% a opět vyčkejte, než se uloží minimálně 7 hodnot. (tj. cca 70s) a hodnoty z tabulky (rychlost proudění v nejširší trubici a hodnoty tlaků) si zkopírujte např. do Excelu. Důležité je opět smazat první a poslední řádek naměřených hodnot. Uložené hodnoty si poté přepište do tab. 4. Hodnoty zaokrouhlete na 3 desetinná místa.

Tab. 4

	$v_1 = \text{rychlost 1 (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$p_1 = \text{tlak 1 (kPa)}$	$p_2 = \text{tlak 2 (kPa)}$	$p_3 = \text{tlak 3 (kPa)}$
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
průměr	$v_1 =$	$p_1 =$	$p_2 =$	$p_3 =$

8. Z hodnoty rychlosti v_1 můžete, s využitím rovnice kontinuity $S v = \text{konst.}$, vypočítat rychlost proudění vody v dalších trubicích v_2 a v_3 . Tyto hodnoty napište do tab. 5 (3. sloupec).
9. Rozhodněte, zda je proudění ve třech měřených místech laminární nebo turbulentní. Kritériem, které rozhoduje, zda je proudění laminární nebo turbulentní, je velikost Reynoldsova čísla Re , které lze pro kruhové potrubí vypočítat ze vztahu:

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\eta}, \quad (8)$$

kde d je průměr potrubí, v rychlost vody v dané trubici, ρ hustota proudící kapaliny a η dynamická viskozita kapaliny (hodnoty ρ a η pro danou teplotu si vyhledejte v tabulkách nebo na internetu). Laminární proudění v uzavřených trubicích nastává, jestliže $Re \leq 2000$. Turbulentní proudění nastává pro $Re \geq 4000$. Hodnoty Reynoldsova čísla v rozmezí 2000-4000 jsou označovány jako přechodná oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním.

Tab. 5

	$S = \pi \frac{d^2}{4}$	$S \cdot v = konst.$	$R_e = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\eta}$
$d_1 =$ m	$S_1 =$ m ²	$v_1 =$ m · s ⁻¹	$R_{e1} =$
$d_2 =$ m	$S_2 =$ m ²	$v_2 =$ m · s ⁻¹	$R_{e2} =$
$d_3 =$ m	$S_3 =$ m ²	$v_3 =$ m · s ⁻¹	$R_{e3} =$
	$\rho_{H_2O} =$	kg · m ⁻³	
	$\eta_{H_2O} =$	Pa · s	

- Odůvodněte, k jakým změnám tlaku dochází při zapnutí čerpadla.
- Vypracujte protokol o měření, který má standardní části: Úvod, Teoretická část, Experimentální část (naměřená data, grafy, výpočty a tabulky), Závěr a Zhodnocení měření.

Doplňující otázky

- Jaké faktory musíme vzít v úvahu, jestliže v trubících neproudí ideální kapalina, ale reálná kapalina? Jaké vlastnosti má ideální kapalina?
- V zúžené části trubice má kapalina větší nebo menší rychlost? Proč?
- Co vyjadřuje objemový průtok a v jakých jednotkách jej měříme?
- Vysvětlete pojmy turbulentní a laminární proudění a pojem Reynoldsovo číslo.
- Kterými přístroji měříme objem vody a objem plynu, které protečou potrubím?

Použitá literatura

- Bednařík, M., Šíroká, M.: *Fyzika pro gymnázia. Mechanika*. Prometheus, Praha, 2000.
- Látal, F.: *Vzdáleně ovládaná laboratoř* [online]. [cit. 2011-11-1]. Vzdáleně ovládané experimenty. Dostupné z WWW: <<http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/>>.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika. Část 2. Mechanika – Termodynamika*. VUTIUM, Brno, 2006.
- Bajer, J.: *Mechanika 3*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2006.
- Brater, E. – King, H. – Lindell, J. – Wei, C.: *Handbook of hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- Ďaďo, S. – Bejček, L. – Platil, A.: *Měření průtoku a výšky hladiny*. BEN – technická literatura, Praha, 2005.