

Počítačové simulace PhET ve výuce fyziky na gymnáziu

ZDENĚK PUCHOLT

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

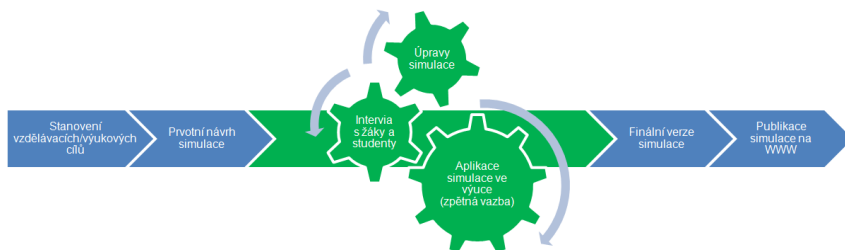
Projekt PhET

V roce 2002 byl pod vedením laureáta Nobelovy ceny Carla Wiemana na University of Colorado Boulder založen celosvětově známý projekt PhET – *Physics Education Technology* [1]. Toto označení není v současné době příliš přesné, jelikož soubor více než stovky simulací pro různé věkové kategorie zahrnuje kromě fyzikální tematiky i experimenty z chemie, biologie, případně simulace vhodné pro integrovaně vyučovaný předmět Science [2].

Projekt získal od doby svého vzniku celou řadu ocenění, např. MERLOT Editor's Choice Award (2006), NSF & Science Magazine's International Science & Engineering Visual Challenge Award (2007), Tech Award and Microsoft Education Award (2011), SIGOL Online Learning Award (2012, 2. místo), WISE Awards (2017), APS Excellence in Physics Education Award (2018), Open Education Award for Excellence: Open Simulation (2019) a mnohá další [1].

Tým autorů simulací původně vedl samotný Carl Wieman, který předal r. 2008 pomyslné žezlo Kathy Perkins. V současné době tvoří vývojářský tým více než dvacítka odborníků z fyziky, chemie, biologie, informatiky či psychologie. Díky pravidelným setkáváním členů týmu a zpětným vazbám od učitelů z praxe, je možné velmi rychle reagovat na problémy, které se mohou při práci se simulacemi objevit. Vzniklo tak velmi flexibilní prostředí pro učitele a akademické pracovníky, kteří se díky projektu mohou zaměřovat na celou řadu (výzkumných) témat z oblasti výuky přírodovědných oborů.

Jak ukazuje obr. 1, prototypy simulací jsou hloubkově a opakovaně testovány, je též kladen důraz na zpětnou vazbu od žáků, příp. studentů (např. v podobě metodicky vedeného rozhovoru), a to vše v rámci obecného zvýšení kvality a dostupnosti interaktivních zdrojů pro vzdělávání (viz koncept STEM [1]).



Obr. 1 Diagram popisující standardní vývojový cyklus každé simulace vyvíjené v projektu PhET [1]

Cílem simulací je také podporovat myšlenku konstruktivismu, tj. kdy je žák aktivním prvkem ve výuce, který objevuje a též činí závěry. Simulace mají za cíl taktéž rozvíjet konceptuální představy o dané problematice jako celku a efektivně odstraňovat případné miskoncepty. Realizované simulace jsou navíc interaktivní – umožňují uživatelský vstup a možnost změn vstupních parametrů a řešit například i takové situace, které je možné v reálné laboratoři jen stěží navodit.

Celá řada reálných objektů z běžného života je v simulacích zjednodušena do podoby modelů. Tyto modely jsou ve shodě s běžně využívanými modely ve výuce, např. modely struktury látek [1]. Kromě běžné vizuální stránky simulace nabízejí i další grafické výstupy, nejčastěji grafy, diagramy, případně i datové výstupy. Jelikož jsou práce s grafy a zpracovávání dat pro žáky velmi problematické [3], ukazují se simulace jako vhodný nástroj pro procvičování [1]. Navíc časté propojení simulace s reálnými objekty navozuje příjemné a hravé prostředí.

Na podporu interaktivity a atraktivnosti jsou do PhET simulací začleňovány různé ovládací prvky (tlačítka, zaškrtačací pole, přepínače, posuvníky či vstupní textová pole). Oblíbená je v současné době taktéž metoda tzv. drag & drop, která je v PhET simulacích hojně pro svou intuitivnost využívána. Pro podporu reálnosti měření jsou v simulacích implementovány běžné měřicí přístroje (svinovací metr, multimetr, manometr, ...).

V neposlední řadě je zapotřebí připomenout jistou variabilitu nejenom PhET simulací. Není nutné je striktně využívat pouze jako demonstrační nástroj, ale mohou nalézt uplatnění například v laboratorních cvičeních (v kombinaci s pracovními listy) a stát se doplňkem k tradičním přístupům, případně býti dostupnou učební pomůckou v rámci domácí přípravy [1].

Jelikož je v současné době vývoj webových stránek a přidružených technologií značně progresivní, je nezbytné tento vývoj kopírovat i v oblasti

simulací. Vybrané PhET simulace jsou spustitelné přímo z webového prohlížeče, většina z nich se dá v současnosti taktéž stáhnout a spouštět offline, tedy bez přístupu k internetu. Nicméně doposud fungující applety mimo PhET (implementované zejména v jazyce Java) zaměřené převážně na fyzikální tematiku jsou dnes zastaralou technologií a není předpokládáno, že by se jejich vývoj nadále podporoval. Na internetu lze nalézt celou řadu odkazů na applety, které ale již bohužel nejsou funkční – to je důkazem nezvratného progresu webových technologií. Otázkou však zůstává, co bude v budoucnu tím „ideálním řešením“.

Jak ukazují vývojáři projektu PhET a další autoři webových aplikací, budoucnost lze hledat v novém HTML 5¹⁾ (finální specifikace značkovacího jazyka byla vydána 28. října 2014). HTML 5 navíc obsahuje jeden z významných prvků – tzv. *canvas* (z angl. *plátno*). Tento prvek nabízí pro uživatele maximální možnou míru interakce, grafické výstupy a zejména propojení s JavaScriptem a jeho perspektivní knihovnou jQuery podporující technologii AJAX²⁾. V porovnání s applety má tato nová technologie obrovskou výhodu – není nutné spouštět žádný další software, kromě aktualizovaného webového prohlížeče.

Zdrojové kódy PhET simulací jsou veřejně přístupné. Každý uživatel má možnost si kód simulace stáhnout a modifikovat jej. Samotný projekt PhET je neziskový, nicméně je možné přispět libovolnou částkou na jeho činnost. Kromě technických aspektů je zapotřebí zmínit i dostupnost jazykových mutací. Každá ze simulací jich nabízí v současnosti několik, včetně češtiny. Doplňující informace k projektu je možné nalézt také v publikovaných článcích samotného zakladatele C. Wiemana [4].

Počítačové simulace vs. reálné měření

Často si nejenom vyučující fyziky, ale obecně vyučující přírodních věd a matematiky kladou otázku, do jaké míry jsou počítačové simulace přínosné ve vzdělávacím procesu a jakým způsobem je možné jejich efektivnost měřit. Nejenom autoři PhET simulací čelili a stále čelí četným otázkám, z nichž například uveďme tyto:

- *Mohou simulace nahradit měření v běžných laboratořích (hands-on labs)?*

Na základě studií provedených PhET týmem bylo zjištěno, že efek-

¹⁾HTML (Hypertext Markup Language). Verze značkovacího jazyka sloužícího pro tvorbu webových stránek.

²⁾AJAX (Asynchronous JavaScript and XML). Obecné označení pro technologie interaktivních webových aplikací, které mění obsah svých stránek bez nutnosti jejich kompletního znovunačítání.

tivnější v získávání konceptuálních znalostí jsou simulace v porovnání s tradičním přístupem (tj. měřením v reálné laboratoři). Nicméně je nutné upozornit, že simulace nedokážou žáka naučit specifické laboratorní činnosti, např. práci s konkrétními přístroji a jejich nastavením, obratnost při sestavování laboratorní aparatury, atp. Je tedy vždy nutné důsledně specifikovat vzdělávací cíle pro danou aktivitu [1].

- *Jak nejlépe začlenit PhET simulace do mé výuky?* Způsob začlenění simulací může být velmi variabilní – od prosté demonstrace simulace, resp. vybraného jevu, přes domácí úlohu, projekty, semináře, workshopy až k laboratorním úlohám. Například v rámci laboratorní úlohy mají žáci možnost se simulací aktivně pracovat a sami objevovat. Jak autoři uvádějí, cílem bylo vytvořit intuitivní simulace s jednoduchým ovládáním a minimem textu. Součástí projektu nejsou žádné rozsáhlé manuály, jak konkrétní simulaci ovládat, pouze lze na stránkách projektu u každé simulace nalézt vytvořené pracovní listy a náměty na laboratorní úlohy od učitelů z praxe, které se liší v několika aspektech – obecně kvalitou (materiály lze na stránkách hodnotit), časovým rozsahem, náročností, věkovým zaměřením či stylem vedení žáka. Většina materiálů je bohužel dostupná výhradně v angličtině [1].
- *Jsou žáci schopni se něco naučit, když jim jenom řeknete, ať jdou domů a hrají si sami se simulacemi?* Podle zkušeností PhET nelze u všech žáků vzbudit zájem a nadšení v simulacích, byť jsou často motivováni známkou, případně jiným evaluačním nástrojem. Jak sami autoři doslovně uvádí: „Simulations. . . they’re fun, but not that fun³⁾.“ Pro vytěžení maximálního potenciálu simulací je proto nutné co nejvhodnějším způsobem simulace do domácí přípravy začlenit [1].

Pokud bychom se podívali na dosavadní výzkumy týkající se měření efektivnosti počítačových simulací v porovnání s tradičním přístupem, nalezneme poměrně mnoho vědeckých článků (např. na Web of Science). Obecně však tyto studie podávají rozporuplné informace o efektivnosti simulací. Není pravdou, že by každá studie prokázala pozitivní přínos simulací. Některé prokázaly srovnatelnou efektivnost simulací, jiné simulace zhodnotily nadměrně pozitivně, některé i negativně. Proto je nezbytné nečinit rychlé závěry a na jednotlivé studie se blíže podívat. Lze tak zjistit, že v jednotlivých případech byly stanoveny zcela rozdílné podmínky – časová dotace práce se simulací, poměr doby strávené tradiční výukou a výukou

³⁾Simulace. . . jsou zábavné, ale není to ta „pravá“ zábava.

se simulací, metody vyhodnocení studií (kvalita závisí i na počtu respondentů výzkumu), způsoby začlenění simulací do výuky (typ pracovního listu, resp. styl vedení při výuce) a další. Můžeme tak nalézt celou řadu dalších parametrů, které mohou výsledky studií ovlivnit.

Jeden ze zdrojů [5] především pojednává o možnostech pre-testování u laboratorních cvičení. Autor ukazuje, že kromě tradiční možnosti, tj. testování pomocí pre-testu, lze používat i jiný způsob – studentův písemný popis způsobu měření úlohy, kterou budou v praktiku měřit. Hodnocení je poté třístupňové, tj. žádná znalost způsobu měření úlohy, částečná a vynikající. Tento způsob hodnocení je v článku porovnáván s možnostmi přípravy s využitím počítačových online simulací a testování. Autor provedl detailní výzkum, který prokázal pozitivní vliv simulací na připravenost studentů univerzity před začátkem měření v běžné laboratoři. Aktuální problematika je doplněna vlastními animacemi, které jsou bezplatně online dostupné.

Další studie [6] je zaměřena na analýzu a rešerši prací zabývajících se počítačovými simulacemi v přírodovědných předmětech. V úvodu autor klade otázky „Jak lze obohatit klasické vyučování využitím počítačových simulací?“, „Jak lze počítačové simulace co nejlépe využít ve výuce?“ a definuje pojem *počítačová simulace* jako program znázorňující model reálného systému nebo procesu. Zdrojem článků pro rešerši byly tři databáze – ERIC, Scopus a ISI Web of Knowledge, které byly využívány od r. 2009 do r. 2011. Vybírány byly studie zaměřené na žáky od 12 do 20 let.

Kromě tradičních simulací lze zapojit další smysly a vytvořit tzv. *haptické počítačové simulace* [7]. Uživatel v rámci tohoto typu simulací zasahuje do jejího průběhu s využitím vhodné počítačové periferie, např. joysticku. Simulace tak dostává další „rozměr“. Zřejmou nevýhodou takového typu simulací je bezesporu cena těchto periférií.

Vhodně sestaveným didaktickým experimentem lze efektivnost měřit v delším časovém období. Tento způsob měření je popsán například v další publikaci [8], kde autor poukazuje na značnou úspěšnost v řešení konceptuálních otázek s důrazem na vysvětlování a argumentaci u experimentální skupiny využívající počítačové simulace v porovnání se skupinou vzdělanou tradičním způsobem, tj. bez simulací. Další provedený výzkum [9] například ukázal již zmíněnou nejednoznačnost v efektivnosti počítačových simulací ve výuce.

To, do jaké míry mohou být simulace efektivní, může ovlivnit styl pracovního listu (pokud je využíván) [10]. Jak je ukázáno, je možné vytvářet

tzv. „cook-book“, tedy jakési kuchařky s přesným postupem, co provádět, nebo vytvářet takové pracovní listy, které podporují konstruktivistický přístup a vybízejí žáka k aktivitě a vlastnímu zkoumání daného jevu [11].

Aplikace simulací na školách v ČR

V našich podmínkách nejsou simulace příliš využívány. Vyučující přírodních věd si mohou sami sobě položit otázku, jak často a jakým způsobem je využívají. Pokud ano, nejčastěji se jedná pouze o demonstrační funkci, minimum našich vyučujících simulace využívá jako propracované laboratorní úlohy.

Zkusme proto na konkrétní ukázce popsat, možná i jako motivaci pro čtenáře, jak lze simulace do výuky začlenit v rámci laboratorní úlohy. Přesunme se do hodin hydromechaniky a využijme již zmíněnou PhET simulaci *Fluid Pressure and Flow* [1]. Pojmy jako objemový průtok či rychlost proudění tekutiny jsou poměrně intuitivní a lze je proto bez větších obtíží objasnit. Naopak rovnice kontinuity, Bernoulliho rovnice či hydrodynamický paradox jsou na vysvětlení značně komplikovanější.

Nejčastěji máme na gymnáziu dvě možnosti – celá třída je vyučována v počítačové učebně (ideálně má každý z žáků k dispozici počítač), případně výuka probíhá v několika oddělených skupinách (nejčastěji dvě skupiny v rámci cvičení z fyziky).

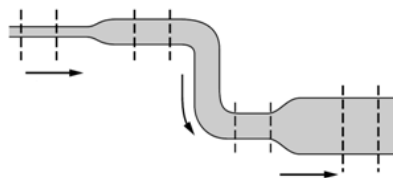
Abychom mohli pozorovat pokrok žáků v dané tematické oblasti, je vhodné sestavit dvojici testů – pre-test a post-test. Pre-test ověřuje míru dosavadních vědomostí a miskonceptů, se kterými žáci před výukou daného tematického celku přicházejí. Typický a častý miskoncept v hydromechanice lze například nalézt u hydrostatického (hydrodynamického) paradoxu. Naopak post-test ověřuje získané vědomosti, ať už konceptuálního rázu, případně z typizovaných úloh probíraných ve výuce. Ideálně shodnou náročností obou testů (např. lze pozměnit zadání úloh, číselné údaje, pořadí distraktorů a jiné) můžeme měřit progres u každého žáka a pokud máme dvojice odpovídajících si úloh z pre-testu a post-testu, můžeme dokonce zjišťovat, zda došlo k odstranění miskonceptů či nikoliv.

Další alternativou může být porovnání dvou rozdílných přístupů ve výuce – jednu část třídy je možné vyučovat běžným postupem (*kontrolní skupina*) a se zbývajícími žáky využívat simulace (*experimentální skupina*). Při dodržení základních pravidel, mezi které patří například shodná časová dotace výuky pro obě skupiny, je možné měřit úspěšnost jednotlivých přístupů.

Zvolme například poslední uvedenou možnost a popišme si, jak může probíhat práce v jednotlivých skupinách (vycházíme ze skutečného průběhu vyučování na gymnáziu). Cílem samotné vyučovací hodiny bude zopakovat vlastnosti kapalného skupenství; vybrané pojmy (ideální tekutina, reálná tekutina, viskozita tekutin); definovat objemový průtok a odvodit jeho jednotku; odvodit rovnici kontinuity a diskutovat její význam; vysvětlit hydrodynamický paradox a jeho důsledky v praxi.

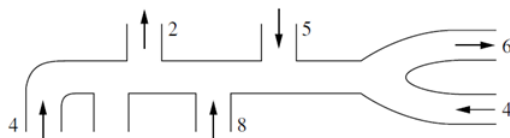
V pre-testu, jehož výsledky žáci nesmí znát dříve, než po ukončení výuky celého tematického celku, odpovídají nejčastěji na úlohy s uzavřenými odpověďmi s cca 4–6 distraktory. Pre-test absolvují v běžné hodině fyziky, tj. před výukou v oddělených skupinách. Jako možné otázky k pre-testu (post-testu) uveďme například:

- Na obr. 2 je zakreslena část vodorovného potrubí (pohled shora), kterým protéká ideální kapalina. Rozhodněte, ve kterém místě (označeno číslem) je velikost tlaku kapaliny v potrubí nejvyšší [12].
- Na obr. 2 je zakreslena část vodorovného potrubí (pohled shora), kterým protéká ideální kapalina. Rozhodněte, ve kterém místě (označeno číslem) je rychlost průtoku kapaliny nejvyšší [12].



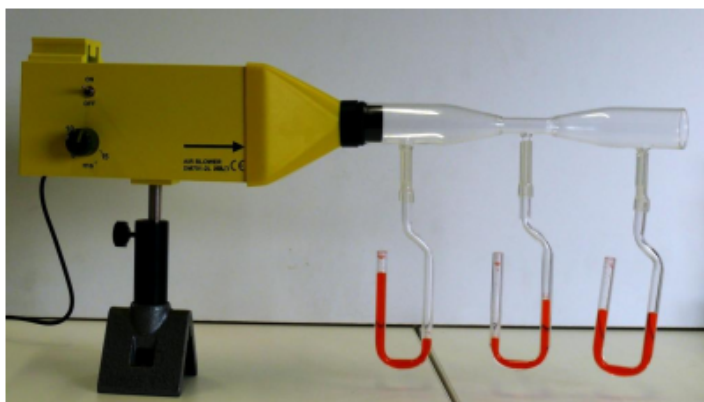
Obr. 2 Ilustrace úlohy pro evaluační testy z hydromechaniky (1) [12]

- Na obr. 3 je znázorněno vodorovné rozvětvené potrubí (pohled shora). Šipkami je značen směr toků ideální kapaliny v jednotlivých větvích a čísla udávají množství kapaliny, které těmito větvemi proteče. U jedné větve oba údaje (šipka a hodnota) chybí, doplňte je [12].



Obr. 3 Ilustrace úlohy pro evaluační testy z hydromechaniky (2) [12]

Obě skupiny budou postupně odděleně vyučovány 45 minut stejným vyučujícím. Kontrolní skupina má ve třídě k dispozici běžné vybavení – tabuli s křídami, žáci mají sešity, psací potřeby a kalkulačky, učebnice a sbírku úloh. Na začátku výuky jsou ideálně formou brainstormingu zopakovány výše uvedené poznatky o tekutinách a učiněny závěry. Na základě zkušeností z pozorování v běžném životě lze formou indukce, tj. z dílčích případů a situací, definovat objemový průtok a odvodit i jeho jednotku (pozorování proudění vody v řece, zužování koryta). S tím související i rovnice kontinuity může být odvozena obdobným způsobem (laicky řečeno: „Co přiteče, i odeče.“). Odtud lze získat známá vyjádření rovnice kontinuity. Aerodynamický paradox můžeme v hodině demonstrovat například pomocí Venturiho trubice (viz obr. 4), případně skleněnou aparaturou, kterou protéká voda (hydrodynamický paradox) a žáci sledují výstup vody v jednotlivých kapilárách a posléze stanovují závěry z pozorování.

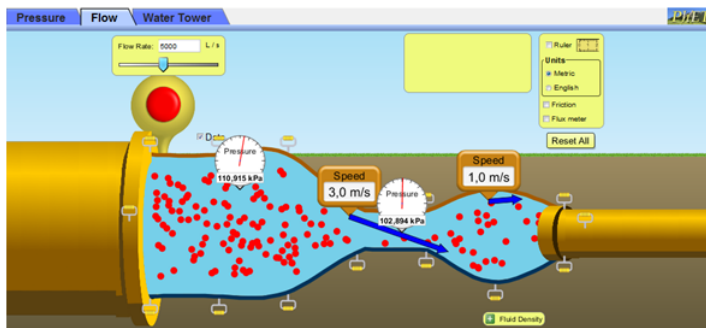


Obr. 4 Venturiho trubice s U-trubicemi pro měření tlaku protékající tekutiny

Jak je patrné z obr. 4, získáváme ne příliš uspokojivý výsledek u právě U-trubice, který je způsoben poklesem tlaku vlivem předčasného ukončení Venturiho trubice a úniku tekutiny do volného prostoru. Tento jev je možné s žáky taktéž diskutovat. Demonstraci paradoxu lze docílit i se dvěma volně svěšenými listy papíru, kdy fouknutím mezi ně pozorujeme jejich přiblížení. Na základě realizovaných experimentů poté dochází k formulaci závěru a specifikaci hydrodynamického (aerodynamického) paradoxu.

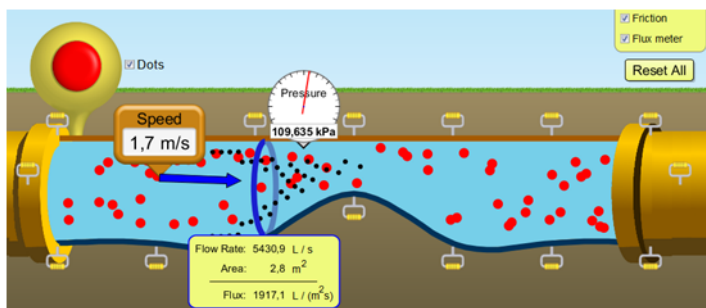
Členové experimentální skupiny pracují s počítači a zmíněnou simulací. Buď mohou pracovat s pracovními listy, které je simulací provádí nebo je

simulace žáky průběžně využívána. Zvolme tentokrát druhou možnost. Na začátku hodiny jsou stejně jako u kontrolní skupiny formou brainstormingu zopakovány poznatky o tekutinách. Následuje krátké seznámení se simulací a jejím ovládáním.



Obr. 5 Prostředí simulace Fluid Pressure and Flow [1]

Takto by měli být žáci schopni popsat význam funkcí na kartě Flow (viz obr. 5): Na kartě je potrubí, kterým protéká kapalina. V horní části simulace jsou ovládací prvky, jako Flow Rate (objemový průtok; nutno využít slovník), měřidla rychlosti průtoku (Speed) a tlaku kapaliny (Pressure), včetně volby jednotek a aktivace funkce Flux meter. Kliknutím na velké červené tlačítko u levého okraje potrubí dojde ke vpuštění „proudnic“ (funkce Dots), kterými lze znázornit tok kapaliny potrubím – buď ideální nebo reálné (nutná je aktivace funkce Friction). Využitím úchytků podél potrubí lze vytvořit jeho zcela libovolný tvar (viz obr. 6).



Obr. 6 Aktivace funkcí Flux meter, Speed, Pressure a Dots [1]

Jak je patrné, už při popisu prvků simulace se žáci seznámí s veličinou objemový průtok. Ten je zde uveden v jednotkách litř/s . Nástrojem Flux meter lze pozorovat, že je objemový průtok ve všech místech stejný. Modifikací tvaru potrubí žáci zjišťují, že je opět průtok stálý a dochází k závěru, že bez ohledu na tvar potrubí je objemový průtok v celém potrubí konstantní, což je v podstatě slovní formulace rovnice kontinuity. Na základě poznatku žáků je zformulována rovnice kontinuity a vyjádřena v odpovídajících tvarech jako u kontrolní skupiny.

Žáci zpravidla se simulací pracují velmi rychle a zkouší sami nové prvky, které doposud nevyužili. Zřejmě vyučujícího předstihnou a sami využijí nástroje pro měření rychlosti průtoku a tlaku kapaliny. Když vyučující položí otázky typu „V jakých částech potrubí je rychlost protékající kapaliny nejvyšší?“ nebo „V jakých částech potrubí je tlak kapaliny nejvyšší?“, žáci zpravidla odpověď znají, nicméně si neuvědomují, že tyto odpovědi jsou zcela v rozporu s jejich původními předpoklady (to lze ověřit v rámci pretestu). Poté, co vyučující upozorní na tento paradox, žáci dále se simulací pracují a uvědomují si jej; zjišťují například tyto závěry:

- průtok kapaliny je ve všech místech potrubí stejný;
- se zmenšujícím se průřezem potrubí se zvyšuje rychlost proudící kapaliny;
- se zmenšujícím se průřezem potrubí se tlak kapaliny snižuje;
- se zvyšujícím se ponořením manometru do potrubí, se zvyšuje výsledná velikost tlaku (započítáním hydrostatického tlaku).

Při práci se simulací je zapotřebí žákům nechat jistou volnost – nechat je objevovat a prozkoumávat. To je i jedna z myšlenek tvůrců projektu PhET. Žák je tím, kdo sám objevuje. Bez složitého ovládnání se tak dá velmi efektně ukázat celá řada jevů, nejenom z oblasti hydromechaniky.

Závěr

Počítačové simulace nabízejí vyučujícím přírodovědných oborů nepřehledné množství funkcí. Je na zvážení každého vyučujícího, do jaké míry simulace do výuky začlení. S rostoucí oblibou výpočetní techniky je tak možné, ne příliš oblíbené předměty o něco více zatraktivnit. V žádném případě simulace nenahrazují běžné školní experimenty, ale lze je například i využívat tam, kde není možné z jakýchkoliv důvodů klasické experimenty realizovat (finanční stránka, časové možnosti, ...).

Reference

- [1] PhET Interactive Simulations: Interactive Simulations for Science and Math [online]. [cit. 8. července 2020]. Dostupné z: <http://phet.colorado.edu>.
- [2] Wikipedia: PhET Interactive Simulations [online]. [cit. 8. července 2020]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/PhET_Interactive_Simulations.
- [3] *Maries, A. et al.*: Performance of graduate students at identifying introductory students' difficulties related to kinematics graphs. In: 2014 Physics Education Research Conference Proceedings, American Association of Physics Teachers, 2015, s. 171–174. DOI: 10.1119/perc.2014.pr.039.
- [4] *Wieman, C. E. et al.*: Teaching Physics Using PhET Simulations. *The Physics Teacher*, 48 (2010), č. 4, s. 225–227. DOI: 10.1119/1.3361987.
- [5] *Paetkau, M. et al.*: Measuring the Effectiveness of Simulations in Preparing Students for the Laboratory. *The Physics Teacher*, 51 (2013), č. 2, s. 113–115. DOI: 10.1119/1.4775536.
- [6] *Rutten, N. et al.*: The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58 (2012), č. 1, s. 136–153. DOI: 10.1016/j.compedu.2011.07.017.
- [7] *Han, I. et al.*: Incorporating haptic feedback in simulation for learning physics. *Computers & Education*, 57 (2011), č. 4, s. 2281–2290. DOI: 10.1016/j.compedu.2011.06.012.
- [8] *Zacharia, Z. C. et al.*: Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction*, 21 (2011), č. 3, s. 317–331. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2010.03.001.
- [9] *Steinberg, R. N.*: Computers in teaching science: To simulate or not to simulate? *American Journal of Physics*, 68 (2000), s. 37–41. DOI: 10.1119/1.19517.
- [10] *Windschitl, M. et al.*: Using computer simulations to enhance conceptual change: The roles of constructivist instruction and student epistemological beliefs. *Journal of Research in Science Teaching*, 35 (1998), č. 2, s. 145–160.
- [11] *Adams, W. K. et al.*: What Levels of Guidance Promote Engaged Exploration with Interactive Simulations? AIP Conference Proceedings, 2008, s. 59–62. DOI: 10.1063/1.3021273.
- [12] *Halliday, D. et al.*: Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk, Prometheus, Praha, 2006.