

### Хидравличен удар

Задавали ли сте си въпроса с каква скорост се движи водата по тръбите на водопровода? А какви сили действат върху крановете в момента на спиране на водата?

Отговор на първия въпрос можете да намерите сами чрез следния прост опит. Вземете съд с известен обем  $V$ , развъртете крана на чешмата и измерете времето  $t$ , за което съдът се пълни с вода. Ако означим с  $S$  площта на напречното сечение на отвора на тръбата, по която тече водата, това означава, че за време  $t$  през крана изтича водата, заемаща участък от тръбата с дължина  $L = V/S$ . И тъй като времето за изтичане е  $t$ , скоростта на водата е:

$$(1) \quad v = \frac{L}{t} = \frac{V}{St}.$$

За да намерим скоростта остава да определим площта  $S$ . Трябва да имате предвид, че вътрешните диаметри на тръбите са стандартни и се измерват в извънсистемната единица **цол**. Един цол е равен на един дюйм, т.е. на 2,54 cm. В домашните водопроводни инсталации обикновено се използват тръби с диаметър 1/2 цол и 3/4 цола. За да определите диаметъра на тръбата във вашия случай, обвийте хартиена лента около нея и измерете дължината  $l$  на участъка от лентата, който обхваща тръбата. Ако  $l \approx 7$  cm, то външният диаметър на тръбата е  $l/\pi \approx 7/3,14 \approx 2,2$  cm. Тъй като дебелината стената на тръбата е около 1,5 mm, за вътрешния диаметър получаваме  $d = 2,2 - 2 \cdot 0,15 = 1,9$  mm, което представлява 3/4 цола. (Всички тези манипулации стават излишни, ако разполагате с шублер и парче от тръбата, върху което можете да извършите измерването на диаметъра.)

По такъв начин площта на напречното сечение на тръбата става известно –  $S = \pi d^2/4$  и за търсената скорост от формула (1) получаваме:

$$v = \frac{4V}{\pi d^2 t}.$$

Ако например сте напълнили тенджерата с обем 3 l за 15 s през тръба с диаметър 1,9 cm, по тази формула за скоростта на водата в тръбата получаваме  $v \approx 70$  cm/s.

А сега да преминем към втория от поставените в началото два въпроса. За да спрем водата, трябва да ѝ въздействаме с определена сила. Според третия принцип на динамиката, със същата сила действа и водата върху крана, с който я спирате. Следващата задача дава представа за порядъка на силите, които действат в подобни случаи.

**Задача.** Вода тече по водопроводна тръба със скорост  $v = 0,7$  m/s. Намерете максималното налягане на водата върху крана при спирането ѝ. Скоростта на звука във вода е  $c = 1400$  m/s.

**Анализ.** Течащата вода притежава определен импулс (маса по скорост). За да спре течението е необходимо да ѝ бъде приложена определена сила с насочен в обратна посока импулс на силата (сила по интервал време). Според втория принцип на динамиката импулсът на течащата вода и импулсът на силата трябва да бъдат равни. Търсената сила ще бъде максимална, когато времето за спиране на водата е минимално. Ние ще разгледаме идеализирания случай на моментално затваряне на крана.

### Решение

Ако водата бе абсолютно несвиваема, целият поток би спрял моментално и това би предизвикало безкрайно голяма сила върху спиращата го преграда (помислете защо!). Водата обаче притежава известна, макар и малка свиваемост – тъкмо благодарение на тази свиваемост във водата могат да се разпространяват звукови вълни. Скоростта на звука във водата всъщност представлява скорост на разпространение на промените на плътността, т.е. на налягането във водата. Следователно за един малък интервал време  $\Delta t$  ще успее да спре само воден стълб с дължина  $c\Delta t$ . Ако означим с  $\rho$  плътността на водата, а с  $S$  – напречното сечение на тръбата, масата на този стълб е  $\rho cS\Delta t$ , а импулсът му –  $\rho cvS\Delta t$ . В същото време импулсът на търсената сила е  $F\Delta t$ . Като приравним тези два израза, за силата намираме:

$$F = \rho cvS,$$

а като разделим на  $S$  – намираме и търсеното налягане:

$$(2) \quad p = \rho cv.$$

Като заместим  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 1400 \text{ m/s}$  и  $v = 0,7 \text{ m/s}$ , намираме  $p = 980 \text{ kPa} \approx 10 \text{ atm}$ .

**Коментар. 1.** Ако умножим полученото налягане с площта на напречното сечение на тръба с диаметър  $3/4$  цола, ще получим, че при моментално затваряне на крана той изпитва въздействие на сила от порядъка на  $280 \text{ N}$ , т.е. почти колкото е силата на тежестта, действаща на дете с маса около  $30 \text{ kg}$ . Появата на такава значителна по големина сила се нарича **хидравличен удар**. Представете си какви налягания и сили ще се пораждат в големите хидротехнически съоръжения, в които и диаметърът на тръбите, и скоростта на водата могат да бъдат значително по-големи! Затова в тези случаи се вземат специални мерки за плавно спиране на водните потоци.

**2.** Ако водата бе абсолютно несвиваема, скоростта на звука в нея би била безкрайно голяма (можете ли да си обясните защо?) и от формула (2) се вижда, че в този случай наистина върху спирателния кран би действала безкрайно голяма сила.

#### А какво налягане упражнява непрекъснатата струя течност?

Да си представим, че тръбата, по която тече водата, не е затворена с кран и струята, която изтича, удря поставена непосредствено пред отвора преграда, след което се разтича встрани (представяме си, че преградата е перпендикулярна на тръбата). Не е трудно да пресметнем и в този случай какво налягане упражнява водата върху преградата.

Наистина, като използваме вече въведените означения, количеството вода, което достига преградата за време  $\Delta t$  е  $\Delta m = \rho vS\Delta t$ , а импулсът на тази вода:  $v\Delta m = \rho v^2S\Delta t$ . След удара в преградата тази вода се разтича встрани и смятаме, че и енергията, и импулсът ѝ са нула. Според втория принцип на динамиката, за да изгуби водата импулса си, за времето  $\Delta t$  трябва да ѝ действа сила  $f$ , чиито импулс да

е равен на импулса<sup>1</sup> на водата, т.е. трябва да е изпълнено равенството  $f\Delta t = \rho v^2 S \Delta t$ . Отгук за налягането на водната струя получаваме израза:

$$(3) \quad p_0 = \rho v^2.$$

Направеният извод и резултатът (3) не може да не ви се стори познат, ако вече сте чели материалите за движението на топка, хвърлена нагоре и за пестене на енергия при движение на автомобил – приликата не е случайна.

### **Капка срещу струя – кое е по-страшно?**

От формули (2) и (3) следва, че отношението между налягането, което упражнява върху преградата течността при хидравличен удар и налягането на водна струя със същата скорост е:

$$(4) \quad \frac{p}{p_0} = \frac{c}{v}.$$

Тъй като в огромното болшинство важни за практиката случаи скоростта  $c$  на звука във водата многократно превишава скоростта  $v$  на течението в тръбите, то при хидравличния удар налягането може да превиши стотици и даже хиляди пъти налягането, упражнявано от водната струя.

Направеният извод обяснява някои на пръв поглед странни явления. Наблюденията показват например, че водни капки, които падат върху твърд материал (асфалт, бетон, камък), го разрушават много по-бързо, отколкото ако върху него от същата височина тече водна струя. Наистина, падането на капката върху преградата предизвиква хидравличен удар (както при бързото затваряне на крана на тръбата). Ако капката пада примерно от височина метър и нещо, тя достига земята със скорост около 5 m/s, която е почти 300 пъти по-малка от скоростта на звука във водата. От (4) следва, че упражненото от капката при удара налягане е 300 пъти по-голямо от това, което би упражнила непрекъснатата струя, изтичаща от същата височина. И нищо чудно да се окаже, че налягането на струята предизвиква само еластични деформации в преградата, докато 300 пъти по-голямото налягане от капките може да превишава границата на еластичните деформации и материалът да започне да се руши.

Съществува стар начин за измъчване на жертви, който в някои източници се нарича “китайска капка”, в други се приписва на инквизицията, в трети – на североамериканските индианци. Не е изключено и трите вида източници да са достоверни, както не е изключено и методът да е прилаган и другаде. Същността му е следната: жертвата се привързва така, че главата ѝ да е неподвижна и върху нея се оставя (на едно и също място!) да капе вода. Резултатът бил ужасяващ. При това хората, които са измислили това мъчение, със сигурност не са имали представа от теорията на хидравличните удари...

<sup>1</sup> Тук вече особено ясно се проявява неудобството от факта, че терминът “импулс” използваме за две **различни** величини – импулс на сила ( $ft$ ) и импулс на тяло ( $mv$ ). Все си мисля дали не направихме грешка, когато се отказахме от термина “количество движение” – макар и по-дълъг, той не допускаше двусмислие.