

Д.Є.Сінат-Радченко, канд. техн. наук,
НУХТ, каф. теплоенергетики та хододильної техніки
НУХТ

D.Sinat-Radchenko

А.В.Форсюк, канд. техн. наук, каф. теплоенергетики
та хододильної техніки НУХТ

A.Forsyuk

С.М.Василенко, С.М.Василенко, докт. техн. наук,
каф. теплоенергетики та хододильної техніки НУХТ

S.Vasylenko

ЗРОСТАННЯ ТИСКУ В РІДИНІ ПРИ ГІДРАВЛІЧНОМУ УДАРІ

Описано методику визначення максимального підвищення тиску в рідині при гідравлічному ударі. Представлено потрібні допоміжні матеріали, наведено числові приклади..

Ключові слова: *гідравлічний удар, швидкість рідини, швидкість звуку, густина рідини, модулі пружності, підвищення тиску.*

Описана методика определения максимального повышения давления в жидкости при гидравлическом ударе. Представлены необходимые дополнительные материалы, приведены числовые примеры.

Ключевые слова: *гидравлический удар, скорость жидкости, скорость звука, плотность жидкости, модули упругости, повышение давления.*

A technique for determining the maximum pressure rise in the liquid water hammer. Predstaleny necessary additional materials, numerical examples are given.

Key words: *hydraulic shocks, velocity of the liquid, velocity of sound, the density of the fluid, the elastic moduli, raise pressure.*

За раптового зменшення швидкості руху рідини в напірному трубопроводі (наприклад, при швидкому перекриванні трубопроводу запірним пристроєм) відбувається різке підвищення тиску в рідині – гідравлічний удар [1].

Підвищення тиску поширюється трубопроводом у вигляді пружної хвилі зі швидкістю c , м/с. Його визначають за формулою М.Є.Жуковського

$$\Delta p = \rho c (w_0 - w),$$

де Δp – зростання тиску, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; w_0 і w – середні швидкості рідини в трубопроводі до і після його перекриття, м/с.

В сталевих водопровідних трубах $c = 1000 \dots 1350$ м/с і, наприклад, при $c = 1200$ м/с, $\rho = 1000$ кг/м³, $w_0 = 2$ і $w = 0$ м/с, одержимо $\Delta p = 1000 \cdot 1200 \cdot 2 = 2,4 \cdot 10^6$ Па = 2,4 МПа .

При абсолютно жорстких стінках труби і нестисливій рідині швидкість ударної хвилі дорівнює швидкості звуку в рідині $c_{зв}$. Швидкість звуку використовується в ряді приладів (наприклад, ультразвукові віскозиметри). По її значеннях можна оцінювати стан молекул в рідині. За присутності в рідині пухирчиків пари чи повітря швидкість звуку падає. Рідина хоча й трохи, але стислива (під впливом тиску скорочується об'єм пустот, молекули розміщуються компактніше), а стінки трубопроводу є дещо пружними, такими, що деформуються. З цієї причини швидкість ударної хвилі менша швидкості звуку. Зменшення швидкості оцінюють поправковим коефіцієнтом k_p ($c = k_p c_{зв}$), що враховує реальні характеристики рідини і трубопроводу

$$k_p = \left[(E_p / E_m) (d / \delta) + 1 \right]^{-0,5},$$

де E_p та E_m – модулі об'ємної пружності рідини та матеріалу стінок труби відповідно, ГПа; d – діаметр трубопроводу, мм; δ – товщина стінки трубопроводу, мм.

Модуль об'ємної пружності рідини – величина обернена до коефіцієнта ізотермічної стисливості $\beta_T = -\rho[\partial(1/\rho)/\partial p]_T$ [2]. Для води і гліцерину E_p відповідно 2,1 та 4 ГПа.

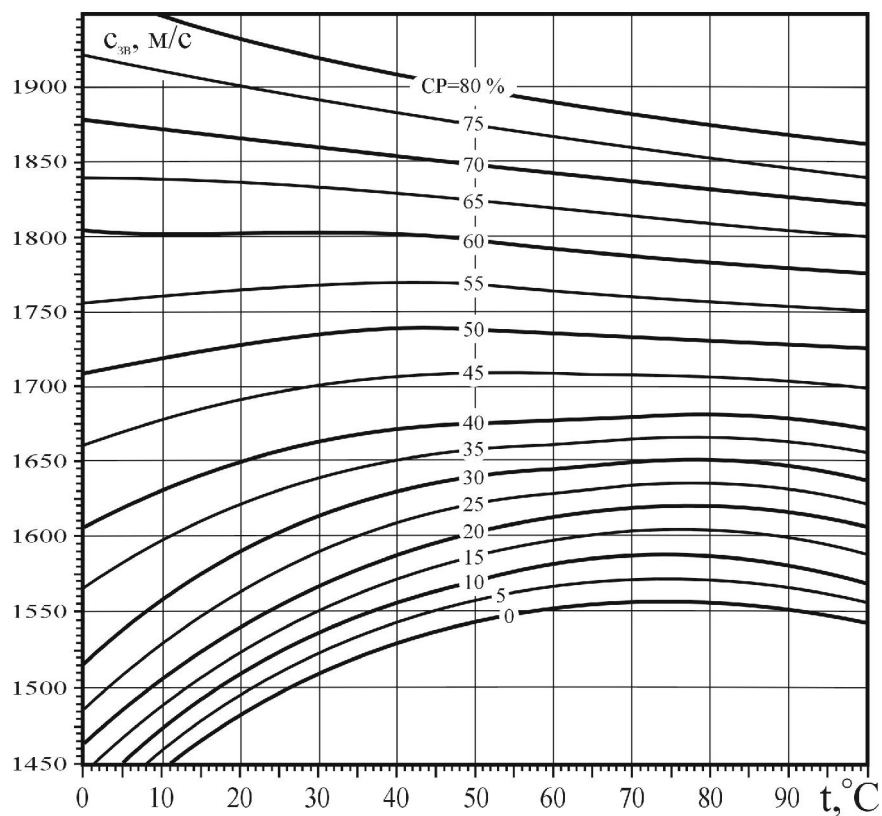


Рис.1. Залежність швидкості звуку в цукрових розчинах від масової концентрації сухих речовин та температури

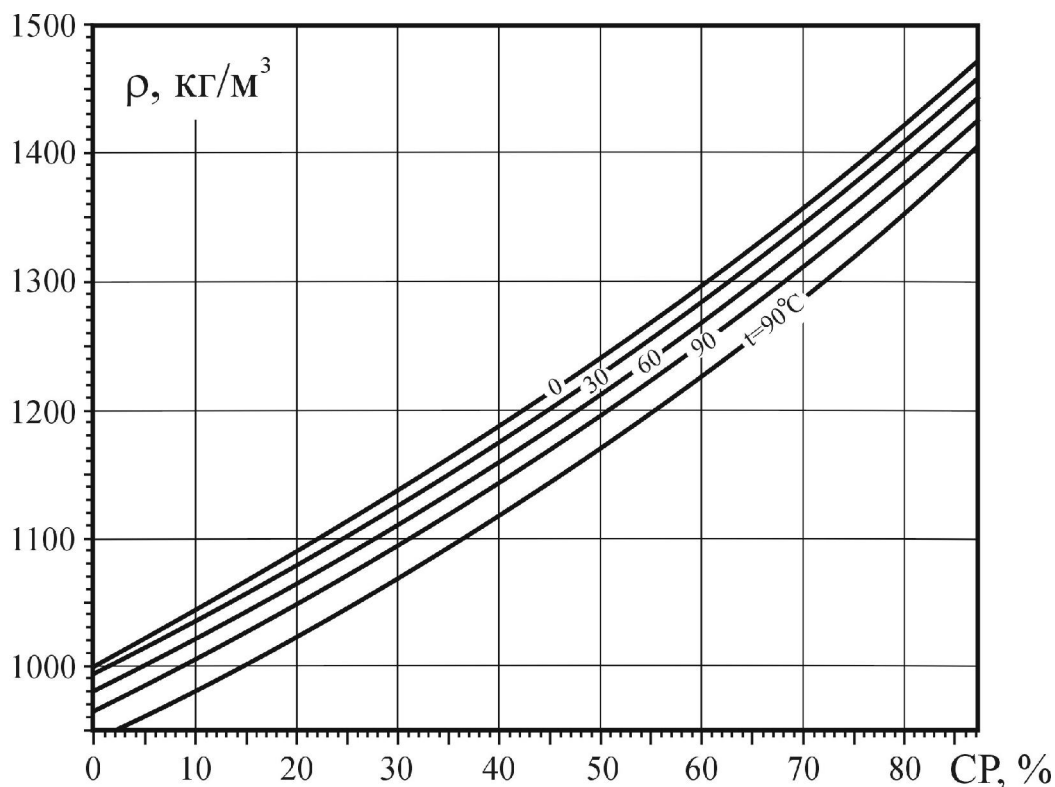


Рис.2. Залежність густини цукрових розчинів від масової концентрації та температури

Модуль пружності матеріалу стінок труби E_m залежить від хімічного складу та попередньої термічної і механічної обробки. Для сталі, міді, алюмінію та скла E_m становить відповідно 205, 120, 70 і 56 ГПа [3].

Через короткий проміжок часу після гідравлічного удару збурення в трубопроводі вщухають через втрату енергії на тертя та деформацію стінок.

Швидкість звуку у воді при температурах 0, 40 і 80 °С становить відповідно 1403, 1529 і 1555 м/с [3]. Швидкість звуку в цукрових розчинах в залежності від масової концентрації сухих речовин CP , % і температури t , °С можна знайти за допомогою рис.1. Дані про густину цукрових розчинів різної концентрації і температури наведено на рис.2.

Для оцінки величини модуля об'ємної пружності цукрових розчинів при $t < 90$ °С і $CP < 80$ % можна скористатися формулою

$$E_p = \left(0,36 - 2,5 \cdot 10^{-3} CP + 3 \cdot 10^{-4} T\right)^{-1},$$

де T – абсолютна температура розчину, К.

Розглянемо приклад. В сталевій трубі діаметром $d = 50$ мм і $\delta = 5$ мм зі швидкістю $\omega_0 = 1$ м/с тече цукровий розчин з концентрацією $CP = 50$ % і середньою температурою 60 °С. Знайти зростання тиску Δp у випадку раптової зупинки розчину.

При $t = 60$ °С і $CP = 50$ % з рис.1 $c_{зв} = 1730$ м/с, а з рис.2 $\rho = 1210$ кг/м³. Модуль пружності сталі $E_m = 205$ ГПа, модуль об'ємної пружності розчину $E_p = \left(0,36 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 50 + 3 \cdot 10^{-4} (60 + 273)\right)^{-1} = 3,0$ ГПа.

Поправковий коефіцієнт до швидкості звуку $k_p = \left[\left(3/205\right)(50/5) + 1\right]^{-0,5} = 0,934$.

Швидкість поширення пружної хвилі: $c = 0,934 \cdot 1730 = 1616$ м/с.

Максимальне підвищення тиску за формулою Жуковського:

$$\Delta p = 1210 \cdot 1616 (1 - 0) = 1,96 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 2 \text{ МПа}.$$

Гідравлічний удар може викликати руйнування трубопроводу або арматури. Для зменшення сили гідравлічного удару необхідно збільшувати час закривання запірного пристрою, зменшувати довжину трубопроводу

перед запірним пристроєм, приєднувати до трубопроводу повітряні ковпаки, встановлювати запобужні клапани.

Висновки. Наведені номограми для густини цукрових розчинів і швидкості звуку в них, а також проста формула оцінки величини модуля об'ємної пружності розчинів дозволяють швидко визначити максимальне підвищення тиску в рідині при гідравлічному ударі, яке може сягати 2 МПа і більше.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика: учебник / Р.Р. Чугаев.— Л.: Энергоиздат.— 1982.— 672 с.
2. Синат-Радченко Д.Е. Некоторые термодинамические коэффициенты сахарных растворов / Д.Е. Синат-Радченко // Сахарная промышленность.— 1983.— №12.— С.20-22.
3. Физические величины: Справочник / А.П. Бабучев., Н.А. Бабушкина., А.М. Братковский и др.— М.: Энергоатомиздат.— 1991.— 1232 с.