

Въпрос 26

Хидравличен удар в система помпа-напорен тръбопровод

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Хидравличен удар: нестационарни явления, свързани с внезапно изменение на скоростта и налягането в напорни хидравлични системи.
- Хидравличният удар се проявява при рязък преход от един стационарен режим на движение на водата към друг и се изразява в периодични колебания (изменения) на скоростта и налягането в системата.
- Явлението е свързано с вълнообразно разпространение на фронтите на повишено или понижено налягане (ударни вълни), чиято амплитуда постепенно затихва поради триенето в тръбопровода.
- Процесите са съпроводени с характерен шум в напорните тръбопроводи и често стават причина за тяхното разрушаване.
- Хидравличният удар се предизвиква от рязко изменение на скоростта на водата в тръбопровода при бързо манипулиране със затворни органи, при стъпаловидно включване на помпените агрегати в системата или внезапно спиране на електрическия ток.
- Изменението на скоростта и налягането се разпространява от мястото на пораждането му по дължина на тръбопровода с определена скорост **a** .

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Когато челният фронт на това изменение достигне преграда, свободна водна повърхност, разклонение или изменение в диаметъра или еластичността на тръбопровода, той се отразява.
- Отразената вълна се разпространява със същата скорост, както първоначалната.
- Поради триенето в тръбите този процес затихва постепенно до установяване на съответен стационарен режим в системата.
- Формули на Жуковски:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \end{array} \right.$$

където H е водният напор;

v – скоростта на водата;

t – времето;

x – координата по оста на тръбопровода;

g – земното ускорение.

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Положителното направление на скоростта на водата съвпада с положителната посока на оста x . Общият интеграл има вида:

$$H - H_0 = G.(x - a.t) + U.(x + a.t)$$

$$v - v_0 = \frac{g}{a}.[G.(x - a.t) - U.(x + a.t)]$$

където H_0, v_0 са началните стойности на напора и на скоростта;

$G.(x - a.t)$ и $U.(x + a.t)$ – вълнови функции, определени от началните и гранични условия;

Съвместното решаване на уравненията дава израза :

$$H - H_0 = \frac{a}{g}.(v - v_0)$$

- Графичният израз на горното уравнение в координатната система v - H се нарича ударна права и отразява изменението на напора във функция на скоростта.
- Ударната права може да бъде построена и в Q - H система, ако е известна площта на напречното сечение на тръбопровода.

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Функциите G и U изразяват вълновото разпространение на налягането (ударните вълни) и в зависимост от това, дали посоката на тяхното разпространение съвпада с положителната посока на оста x (с посоката на скоростта преди удара), те биват прави (G) и обратни (U).
- Правите и обратни вълни са на повишено или понижено налягане.
- Вълните на повишено налягане или понижено налягане предизвикват съответно увеличение или намаление на първоначалната скорост в тръбопровода в зависимост от посоката на движение на водата.
- Скоростта на потока намалява при разпространение на вълни с повишено налягане по посока на движение на водата (или при разпространение на вълните с понижено налягане в посока, противоположна на движението на водата) и обратно.
- В процесите на разпространение и отразяване на ударните вълни в определени точки от напорната система се създават напори, определени от интерференцията на вълните в даден момент от началото на хидравличния удар.

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Напорът H и скоростта v в произволно сечение от тръбопровода x в произволен момент t може да се представи:

$$H = H_0 + (\varphi - \psi)$$

$$v = v_0 \pm \frac{g}{a} \cdot (\varphi + \psi)$$

където H_0, v_0 са началните стойности на напора и на скоростта в сечение x ;

φ – сумата от всички вълни с повишено налягане, достигнали до сечение x в момента t (по абсолютна стойност)

ψ – сумата от всички вълни с понижено налягане, достигнали до сечение x в момента t (по абсолютна стойност)

- Знакът пред скобите в дясната част на последното равенство е положителен, когато вълните са прави и отрицателен, когато те са обратни.

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Когато правите вълни с понижено налягане достигнат границите на тръбопровода, включващ се в напорен резервоар с голям обем и свободна водна повърхност, те се отразяват и пораждат равни на тях вълни на повишено налягане. Ако пристигащите вълни са с повишено налягане, те се отразяват като вълни с понижено налягане.
- Когато правите вълни с повишено налягане срещнат напълно затворен спирателен кран или фронт на повишено налягане (създаван още от работеща помпа), отразените вълни са с повишено налягане. Ако пристигащите вълни са били с понижено налягане, в този случай и отразените вълни са също с понижено налягане.
- Времето t_ϕ , за което първоначалните (правите) вълни отиват до мястото на отразяване и се връщат като отразени (обратни) в изходното сечение, се нарича фаза на хидравличния удар:

$$t_\phi = \frac{2.L}{a}$$

L – дължина на тръбопровода до мястото на отразяване

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Когато времето за задействане на затворния орган t е по-малко от t_f , хидравличният удар се нарича пряк.
- Когато $t > t_f$, хидравличният удар е непряк.
- Прекият хидравличен удар поражда по-големи налягания в напорния тръбопровод и е по-опасен.
- Скоростта a , с която се разпространяват ударните вълни, зависи от геометричните и механични характеристики на тръбопровода и от свойствата на течността.
- За тънкостенни водопроводи от еднороден материал a може да се определи по формулата на Жуковски:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{g}{r} \cdot E_g}}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_g}{E}}}, m/s$$

E_g – еластичен модул на водата = $2,1 \cdot 10^3$ МПа

E – еластичен модул на материала на тръбата; за стомана = $2 \cdot 10^5$ МПа

за чугун = $1 \cdot 10^5$ МПа, за бетон = $(0,5 - 0,2) \cdot 10^5$ МПа

1) Общи сведения за хидравличен удар

- Когато във водата има разтворен въздух, скоростта а се изменя значително. За метални тръбопроводи:
 - За диаметър до 100 mm – от 600 до 1200 m/s
 - За диаметър от 100 до 600 mm – от 550 до 1100 m/s
 - За диаметър над 600 mm – от 500 до 1000 m/s

2) Хидравличен удар при внезапно изключване на помпените агрегати

- Внезапното изключване на помпените агрегати предизвиква права вълна на понижено налягане ψ , която се разпространява със скорост a по тръбопровода и се отразява от напорния резервоар като обратна вълна на повишено налягане φ .
- Напорът във всяко сечение на тръбопровода зависи от интерференцията на правите и обратните вълни в сечението и се променя във времето.
- Вълните на понижено налягане се пораждат от помпата, която след внезапното изключване на електрозахранването продължава да работи по инерция, намалявайки постепенно дебита и напора си.
- Когато помпата прекрати подаването на вода в първоначалната посока, затваря се обратна клапа, монтирана в помпената станция. В този момент отразените от резервоара обратни вълни на повишено налягане срещат затворния орган и се отразяват от него като вълни на повишено налягане.
- Това налягане е толкова по-голямо, колкото по-ниски стойности е достигнало налягането, определено от интерференцията на правите и обратни вълни в момента на затваряне на обратната клапа.

2) Хидравличен удар при внезапно изключване на помпените агрегати

- В зависимост от теренните условия в определени участъци по трасето на напорния тръбопровод може да се образува вакуум. При стойности на вакуума над 8-9 метра практически може да настъпи разкъсване на водната струя. Това явление е много опасно за целостта на тръбопровода. При срещане на разкъсаните водни струи може да се създаде налягане, значително по-голямо от налягането в най-неблагоприятното сечение при хидравличен удар без разкъсване на струята.
- Възможностите за разкъсване на струята зависят от големината на статичния напор в системата, от инерционния момент на помпените агрегати, от размера и материала на тръбите, от свойствата на водата (разтворен въздух) и особено от надлъжния профил на трасето на тръбопровода.

2) Хидравличен удар при внезапно изключване на помпените агрегати

- При внезапно изключване на електрическия ток характеристиката на помпата се изменя по закон, зависещ от изменението на честотата на въртене на агрегата n .

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{30.M_i}{\pi.J}$$

- M – въртящ момент
- J – инерционен момент на въртящите се части

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

ω – ъглова скорост на въртене

$$\omega = \frac{2.\pi}{60} .n, \text{ rad / s}$$

2) Хидравличен удар при внезапно изключване на помпените агрегати

- Обикновено в каталози се дава маховият момент – $G.D^2$ на ротиращите части на електродвигателя. G и D са съответно теглото и диаметърът.

$$J = \frac{G.D^2}{4.g}$$

- Номиналният въртящ момент M_0 зависи от номиналната честота на въртене и мощност N_0 :

$$M_0 = \frac{N_0}{\omega_0} = \frac{N_0 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_0}$$

- T_0 – време за достигане на номинална работна честота на въртене n_0 и въртящ момент M_0 :

$$T_0 = \frac{\pi \cdot J}{30} \cdot \frac{n_0}{M_0}$$

2) Хидравличен удар при внезапно изключване на помпените агрегати

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{n_0}{T_0} \cdot \frac{M_i}{M_0}$$

$$\frac{M_i}{M_0} = \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^2 = \beta_i^2$$

Интегриране в граници от n_0 до n_i и от 0 до t :

$$t = \frac{1 - \beta_i}{2 \cdot \beta_i} \cdot T_0$$

$$\beta_i = \frac{T_0}{T_0 + 2 \cdot t}$$