

## ХАРАКТЕР СИЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРУБОПРОВОДУ З РУХОМОЮ РІДИНОЮ ПРИ ШВИДКІСНОМУ РУХУ РІДИНИ

*Досліджено вплив способу закріплення трубопроводу при швидкісній течії рідини на силові і моменти навантаження в місцях закріплення. Показано суттєвий вплив вищих форм коливань на силові характеристики. Розрахунки свідчать, що консольне защемлення сприяє значному зростанню згинних моментів в закріпленнях.*

*Исследуется влияние способа закрепления трубопровода при скоростном течении жидкости на силовые и моментные нагрузки в местах крепления. Показано существенное влияние высших форм колебаний на силовые характеристики. Расчеты показывают, что консольное защемление способствует существенному возрастанию изгибающих моментов в креплениях.*

*We investigate influence of the way of pipeline fixing for high-speed flow of liquid on force and moment loadings at fixing points. Considerable influence of high normal modes on force characteristics was shown. Computations showed that cantilever fixing promotes considerable increase of bending moments at fixing points.*

**Постановка задачі.** Розглядається задача про визначення силових характеристик взаємодії трубопроводу з рідиною з його закріпленням. Розглядалося чотири варіанти закріплення трубопроводу, по якому тече рідина, а саме, варіанти консольне защемлення – вільний край, консольне защемлення – шарнірне закріплення, двобічне консольне защемлення, і двобічне шарнірне закріплення (Рис. 1). Для всіх випадків розглядалися три варіанти швидкості течії рідини з постійною швидкістю, в початковий момент в системі було мале кінематичне за другою формою з амплітудою 0,02.

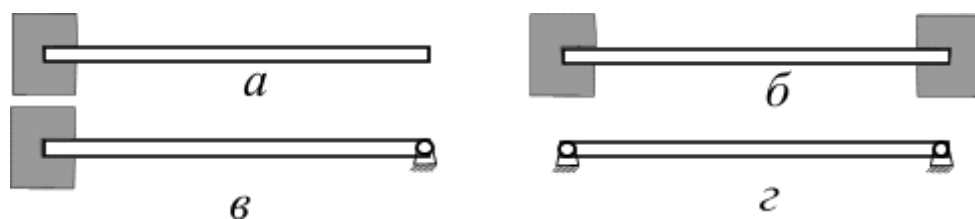


Рис. 1. Загальний вигляд системи: варіанти закріплення трубопроводу

Рух трубопроводу моделюється на основі нелінійної математичної моделі труби на основі балочної моделі, а рідина розглядається як ідеальна, нестиглива, яка рухається із швидкістю  $v = V(t)$ . Поперечні деформації трубопроводу задаються функцією  $u(t, x)$ . Зауважимо, що рух системи моделюється в мішаному ейлерово-лагранжевому описі. Розв'язуюча модель системи будується на основі сукупного використання варіаційного формулювання задачі у вигляді принципу Гамільтона-Остроградського і методу модальної декомпозиції руху

по формах коливань балки  $A_i(x) - u = \sum_i c_i(t)A_i(x)$ , де  $c_i(t)$  – амплітудні параметри коливань, залежні від часу. Для опису системи розглядаються такі механічні параметри:  $EJ$  – згинна жорсткість балки;  $F$  – площа поперечного перерізу труби;  $\rho$  – лінійна густина рідини;  $\mu$  – лінійна густина матеріалу балки;  $P$  – внутрішній тиск у трубі;  $l$  – довжина балки. Розглядається нелінійна динамічна модель системи запропонована в роботі [1]

$$\begin{aligned} \ddot{c}_r = & -\frac{EJ}{\rho + \mu} \kappa_r^4 c_r + \frac{7}{2} \frac{\rho V^2}{(\rho + \mu) N_r} \sum_i c_i \beta_{ir}^2 + \frac{2\rho V}{(\rho + \mu) N_r} \sum_i \dot{c}_i (\beta_{ri}^1 - \beta_{ir}^1) \\ & - \frac{PF}{(\rho + \mu) N_r} \sum_i c_i \beta_{ir}^2 - \frac{2\rho \dot{V}}{(\rho + \mu) N_r} \sum_i c_i \beta_{ir}^2 - \frac{13}{4} \frac{\rho V^2}{(\rho + \mu) N_r} \sum_{ijk} c_i c_j c_k d_{ijk}^4 - \\ & - \sum_{ijk} \dot{c}_i \dot{c}_j c_k \frac{1}{N_r} \left( d_{jkir}^2 - \frac{1}{2} d_{krij}^2 \right) - \frac{EJ}{(\rho + \mu) N_r} \sum_{ijk} c_i c_j c_k d_{ijkl}^6 - \\ & - \frac{2EF}{(\rho + \mu) N_r} \sum_{ijk} c_i c_j c_k d_{ijk}^3 - \frac{1}{2N_r} \sum_{pjk} c_j c_k \left( -\frac{EJ}{(\rho + \mu)} \kappa_p^4 c_p + \right. \\ & + \frac{7}{2} \frac{\rho V^2}{(\rho + \mu) N_p} \sum_i c_i \beta_{ip}^2 + \frac{2\rho V}{(\rho + \mu) N_p} \sum_i \dot{c}_i (\beta_{pi}^1 - \beta_{ip}^1) - \\ & \left. - \frac{PF}{(\rho + \mu) N_p} \sum_i c_i \beta_{ip}^2 - \frac{2\rho \dot{V}}{(\rho + \mu) N_p} \sum_i c_i \beta_{ip}^2 \right) \end{aligned}$$

Коефіцієнти  $N_i$ ,  $d_{ijkl}^2$ ,  $d_{ijkl}^3$ ,  $d_{ijkl}^4$ ,  $d_{ijkl}^6$ ,  $\beta_{ij}^1$ ,  $\beta_{ij}^2$  визначаються через квадратури від форм коливань системи [1]. Розрахунки проводилися на основі моделі, в якій бралось до уваги перші десять форм коливань системи. Система рівнянь інтегрувалася на основі методу Рунге-Куты з попереднім пониженням порядку.

**Чисельне моделювання.** Чисельно було розглянуто всі 12 варіантів поведінки системи (три варіанти течії і чотири різних форми закріплення). Порівняння поведінки трубопроводу свідчить про те, що найбільші амплітуди коливань спостерігаються для випадку трубопроводу з вільним кінцем. Проте більш важливою є інформація про величини згинних моментів і перерізуючих сил, які визначають границю можливого руйнування трубопроводу. Для всіх прикладів момент і сила розглядалися на лівому кінці (Рис. 1, а, б, в) крім випадку (Рис. 1, д), для якого розглядалося значення цих характеристик в середині трубопроводу. Як було показано раніше, через механізм дії сил Коріоліса швидко відбувається збудження всіх форм коливань.

Головним предметом дослідження в цій роботі були згинний момент і перерізаюча сила. На Рис. 2 – 4 приведено зміну в часі згинного моменту та перерізаючої сили для випадків «консольне заземлення – вільний край», «двобічне консольне заземлення» та «двобічне шарнірне закріплення». При цьому рисунки з індексом *a* відповідають згинному моменту, а з індексом *b* – перерізаючій силі. На рисунках розглядаються три випадки значень швидкості течії рідини в залежності від значення першої критичної швидкості: 25% відповідає тонкій лінії на малюнках, 50% – штрих-пунктирна лінія, 75% – товста лінія.

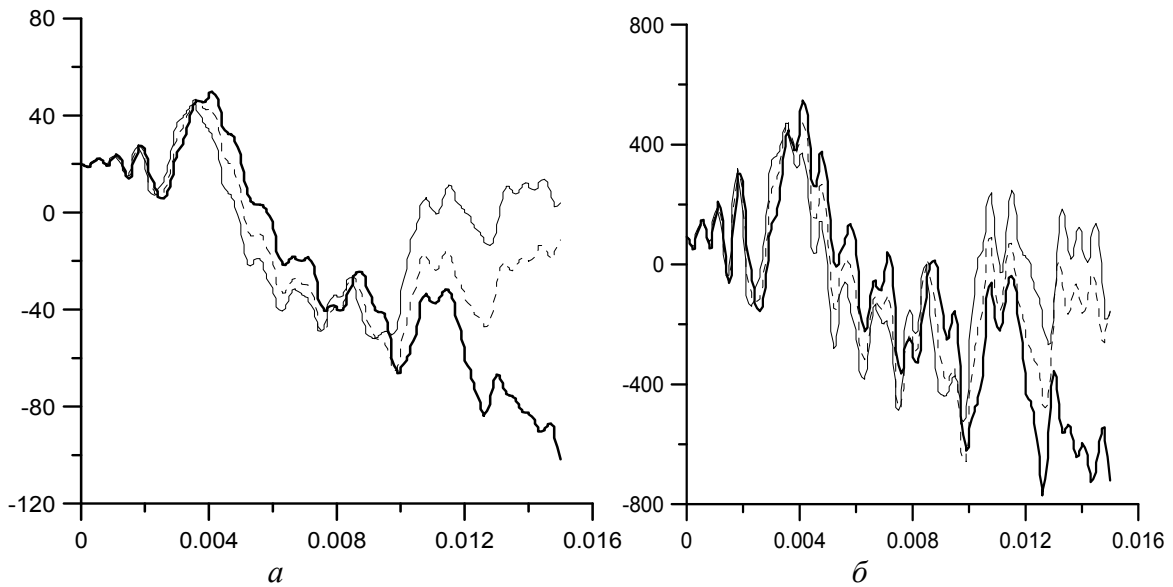


Рис. 2. Залежність в часі згинного моменту і перерізаючої сили для закріплення типу консольне защемлення – вільний край.

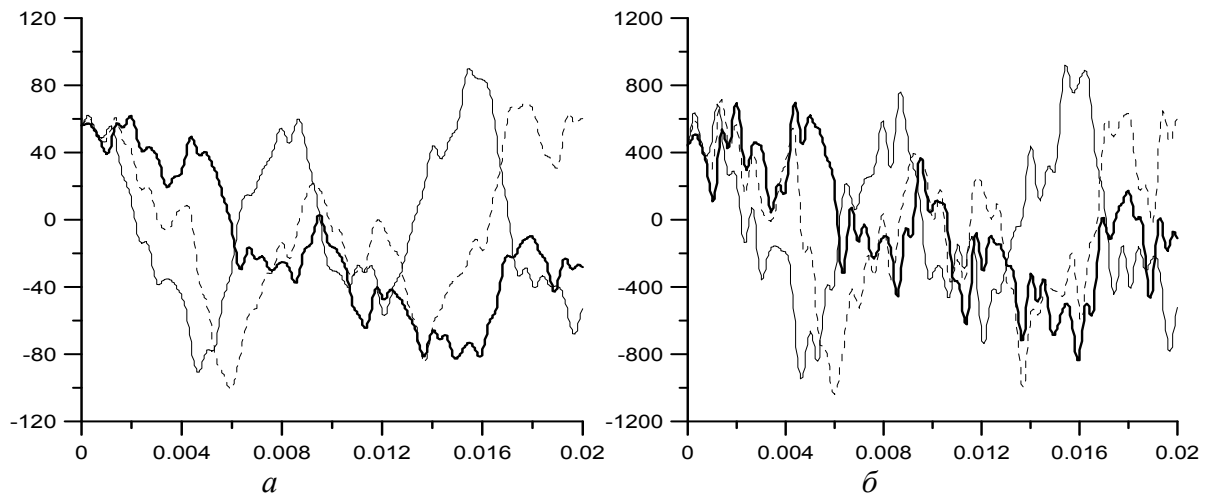


Рис. 3. Залежність в часі згинного моменту і перерізаючої сили для закріплення типу двобічне консольне защемлення.

Привертає на себе увагу головна тенденція поведінки трубопроводу при швидкісній течії рідини: чим більш жорстким є закріплення трубопроводу, тим більшим є значення згинного моменту. В той же час вплив способу закріплення на значення перерізаючої сили не є суттєвим. З графіків залежності силових і моментних характеристик помітний суттєвий вплив вищих форм коливань, які суттєво спотворюють основну тенденцію зміни силових характеристик з частотою, близькою до першої форми коливань. При цьому, внесок вищих гармонік зростає разом із зростанням швидкості течії рідини.

Значення критичних швидкостей для таких способів закріплення відповідно будуть: консольне защемлення – вільний край — 20,9 м/с; двобічне консольне защемлення — 82,1 м/с; консольне защемлення – шарнірне закріплення — 58,0 м/с; двобічне шарнірне закріплення — 54,4 м/с. При цьому ці тестові розрахунки виконувалися для випадку труби з алюмінію довжиною 1 м, з внутрішнім радіусом 1 см, товщиною труби 0,2 мм. Зміни критичних швид-

костей повністю узгоджуються з загальними принципами аналітичної механіки по властивостях частот в залежності від накладених на систему в'язей. Відповідно, з точки зору наближення до критичних швидкостей у випадку двобічного консольного защемлення можна перекачати більші об'єми рідини без суттєвого зростання амплітуд коливань.

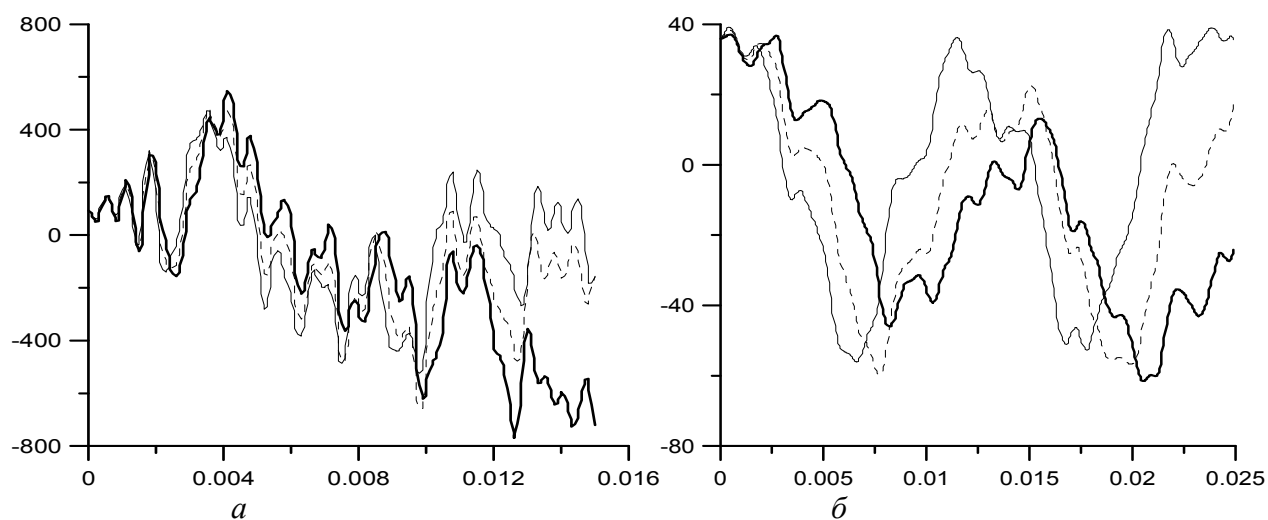


Рис. 4. Залежність в часі згинного моменту і перерізаючої сили для закріплення типу двобічне шарнірне закріплення.

**Висновки.** Загальна поведінка трубопроводу з рідиною повністю узгоджується з результатами попередніх досліджень, викладених в [1,2]. Показано, що незалежно від способів закріплення вирішальним в поведінці системи трубопровід – рідина є ступінь наближення швидкості течії до значення першої критичної швидкості. Показано, що чим більш жорстким є закріплення трубопроводу, тим більшим є значення згинних моментів в точках закріплення. В той же час вплив способу закріплення на значення перерізаючої сили не є суттєвим. Одержані результати свідчать про доцільність використання закріплень трубопроводів з пружними і демфуючими елементами.

#### Література

1. Василевский Ю.Е., Лимарченко О.С. Нелинейная модель динамики трубопровода при скоростном течении жидкости // Комплексний аналіз і течії з вільними границями, Збірник праць Інституту математики НАН України. – Київ: Інститут математики НАН України. —2006. — 2, №4. — С.322-334.
2. Бондарь Н.Г. Нелинейные автономные задачи механики упругих систем. – Киев, Будивельник, 1971. –140 с.