

**Список використаної літератури**

1. Lazarev A.V. Puti tehničeskogo progressa v torfobriketnom proizvodstve/ A.V. Lazarev// Trudy VNII torf. promyshlennosti: Proizvodstvo i ispol'zovanie torfa v narodnom hozjajstve. – 1976. – Vyp. 36. – S. 115-132.
2. Gurvich L.L. Avtomatizacija podgotovitel'nogo otdelenija torfobriketnogo zavoda s usrednjajushhej ustanovkoj/ L.L. Gurvich, V.V. Rusakov, A.M. Mjagkov// Respublikanskij mezhvedomstv. sbornik Belorusskogo politehn. in-ta. «Mashiny i tehnologija torfjanogo proizvodstva». – 1976. – Vyp. 6. – S. 72-78.
3. Veber R.Ja. Briketirovanie torfa / R.Ja. Veber – M.: Gosjenergoizdat, 1957. – 188 s.
4. Naumovich V.M. Raboty Kalininskogo politehnicheskogo instituta po sovershenstvovaniju torfobriketnogo proizvodstva/ V.M. Naumovich //Nauchno-tehnicheskij sb.: Intensifikacija proizvodstva torfjanyh briketov. – 1975. – S. 13-31.
5. Naumovich V.M. Stabilizacija vlazhnosti sushjonki – nadjozhnyj sposob povyshenija kachestva torfjanyh briketov/ V.M. Naumovich// Torfjanaja promyshlennost'. – 1976. - №10. - S. 9-12.
6. Eliseeva A.I. O kachestve sushki frezernogo torfa v parovyh trubchatyh sushilkah Cemag/ A.I. Eliseeva// Torfjanaja promyshlennost'. – 1970. – №12 – S. 17-20.
7. Ivanov B.N. Vlijanie kachestva podgotovki i sushki torfa na process briketirovanija/ B.N. Ivanov, V.A. Zav'jalov, L.I. Medvedev// Torfjanaja promyshlennost'. – 1956. – №1 – S.11-14.
8. Beshelev S.D. Jekspertnye ocenki / S.D. Beshelev, F.G. Gurvich – M.: Nauka, 1973. – 246 s.
9. Petrovskij B.C. Poisk jekstremuma funkicii pri zadannyh ogranichenijah. / V.S. Petrovskij// Krasnojarsk: Trudy SibTI. – 1965. – №10 – S. 26-36.

*Стаття надійшла до редакції 23.12.2013 р.*

УДК 624.21 + 624.19(066)

**С. П. Шевчук, д. т. н., Н. А. Шевчук, С. В. Зайченко (НТУУ «КПІ»), к. т. н., В. Г. Городецький к. ф.-м. н. (НТУУ «КПІ»)**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ  
КРІПЛЕННЯ ТУНЕЛЮ ГНУЧКИМ ВІБРАЦІЙНИМ РОБОЧИМ  
ОРГАНОМ З ПОПЕРЕЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ**

**S. P. Shevchuk, doctor of technical science, N. A. Shevchuk, S. V. Zaychenko, cand. sc. (tech.) (NTUU «KPI»), V. H. Horodetskyi, candidate of physical and mathematical sciences (NTUU «KPI»)**

**INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FASTENING SURFACE  
SEAL FLEXIBLE VIBRATING CURVED TUNNEL WORKING BODY**

*Технічні і експлуатаційні характеристики тунелю залежать від якості ущільнення матеріалів кріплення. Досвід ущільнення монолітних споруд вібраційним поверхневим методом при зведенні іригаційних і гідромеліоративних споруд можливо використати при будівництві транспортних тунелів. Процес вібраційного поверхневого ущільнення гнучким вібраційним органом представлено у вигляді колювання криволінійного стрижня з врахуванням опору будівельної суміші в вигляді приєднаної маси і коефіцієнту гістерезисних втрат.*

**Ключові слова:** вібраційний орган, ущільнення, кріплення тунелю, приєднана маса.

*Технические и эксплуатационные характеристики тоннеля зависят от качества уплотнения материалов крепления. Опыт уплотнения монолитных сооружений вибрационным поверхностным методом при возведении ирригационных и гидромелиоративных сооружений возможно использовать при строительстве транспортных тоннелей. Процесс вибрационного поверхностного уплотнения гибким вибрационным органом представляется в виде колебания криволинейного стержня с учетом сопротивления строительной смеси в виде присоединенной массы и коэффициента гистерезисных потерь.*

**Ключевые слова:** вибрационный орган, уплотнение, крепление тоннеля, присоединенная масса.

*Technical and operational characteristics of the tunnel depends on the quality of the seal material attachment. Experience Monolithic seal vibrating surface method in the construction of irrigation and drainage structures may be used in the construction of transport tunnels. Process vibrating surface seal flexible vibrating body is represented as a curved bar with fluctuations into account the resistance mortar in the form of added mass coefficient and hysteresis losses.*

**Keywords:** vibrating body, sealing, mount tunnel, mass.

**Вступ.** Зведення транспортних і колекторних тунелів - є будівельними виробництвами з підвищеною трудомісткістю і собівартістю. Для будівництва тунелів закритим способом в умовах міста з метою зменшення осадки поверхні використовують прохідницькі щити з камерою гідропривантажувача, що дозволяє будувати тунелі з комбінованим кріпленням великих діаметрів. Зовнішній шар кріплення утворюється шляхом первинного і вторинного нагнітання без ущільнення цементно-піщаної суміші за трубний простір, що потребує значних витрат ручної праці і перевитрат в'язучих компонентів для надання суміші необхідних технологічних параметрів. Одним з шляхів інтенсифікації і механізації процесу зведення зовнішнього шару кріплення тунелю являється застосування вібраційної поверхневої технології ущільнення.

**Аналіз стану проблеми.** Поверхневі вібраційні машини для ущільнення бетонних сумішей відрізняються тим, що робочий орган у вигляді жорсткої плити, яка коливається, діє на поверхню виробу або елементу конструкції. Такі машини широко використовуються для підготовки бетонних і ґрунтових основ, фундаментів споруд, при будівництві цементно-бетонних і асфальтобетонних покриттів доріг, при будівництві армоцементних конструкцій, в будівництві іригаційних і гідромеліоративних споруд [1, 2]. Незважаючи на широке застосування поверхневого безперервного формування, його використання в гірському будівництві обмежено окремими випадками зведення монолітного

кріплення тунелів за допомогою переставної опалубки. Причиною обмеженого застосування поверхневого формування є складності пов'язані з утриманням тиксотропно-перетвореної бетонної суміші.

При зведенні тунелів прохідницькими щитами можливе вібраційне ущільнення приконтурного шару комбінованого кріплення поверхневим ковзаючим вібраційним робочим органом, що дозволяє використовувати бетонні суміші з високими техніко-економічними показниками і підвищувати експлуатаційні показники підземної споруди. Схема роботи роторного прохідницького щита з поверхневим ковзаючим вібраційним робочим органом представлена на рис. 1. Секція прохідницького щита з поверхневим ковзаючим вібраційним робочим органом розділена три частини: I - зона подачі бетонної суміші; II - зона вібраційного поверхневого ущільнення монолітного шару кріплення; III - зона зведення збірного кріплення. Відмінною особливістю є наявність гнучкого криволінійного(кругового) вібраційного робочого органу, що здійснює поперечні коливання.

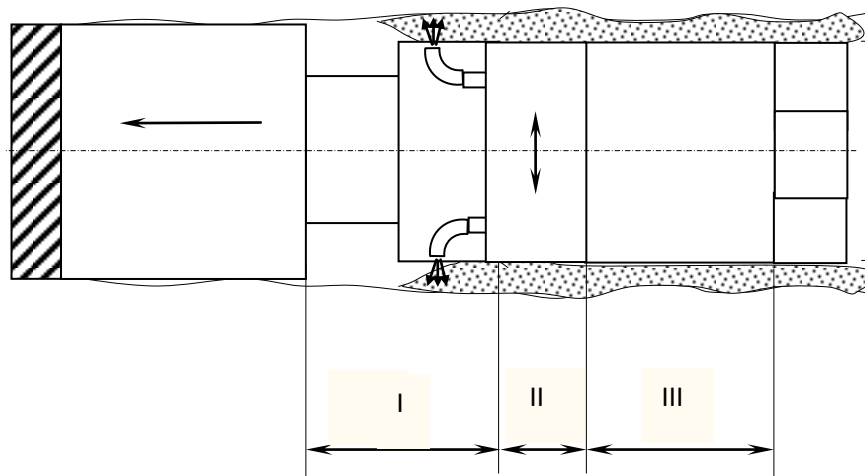


Рис. 1. Схема роторного прохідницького щита з поверхневим ковзаючим вібраційним робочим органом

**Мета роботи.** Для створення вібраційних бетоноформуєчих машин необхідне створення методики розрахунку, яка дозволяє врахувати геометричні і механічні параметри робочих органів. Існуючі методи розрахунку процесів вібраційного ущільнення ґрунту ґрунтувані на розгляді поведінки елемента бетонної суміші у вигляді пружного стержня при одновісному стискуванні, на який діє абсолютно жорсткий плоский робочий орган. Використання цього підходу обмежене умовами проведення робіт зведення тунелю вібраційним методом, особливістю якого є криволінійність і гнучкість робочих органів. Крім того, моделювання середовища в елементі бетонної суміші у вигляді пружного стержня при одновісному стискуванні не відповідає в'язко-пластичній поведінці середовища при його ущільненні в умовах гірничої виробки.

**Матеріали і результати досліджень.** Для моделювання поведінки робочих органів при взаємодії з тиксотропно-перетвореною бетонною сумішшю можливе використання принципів гідродинаміки[3]. Особливістю

моделювання руху тіл при використанні вищезгаданих принципів є врахування середовища у вигляді приєднаної маси. Таким чином, процес ущільнення гнучким криволінійним вібраційним робочим органом, що здійснює поперечні коливання, справедливо представити у вигляді коливання дуги з початковим радіусом  $R$  з приєднаною масою при дії навантаження, що підкоряється гармонійному закону  $P = P_0 \cos(\theta t)$ .

Розрахункова схема визначення основних параметрів процесу криволінійним вібраційним робочим органом представлена на рис. 2.

При дослідженні руху робочого органу використовуємо статичний метод дослідження динаміки стержнів будівельної механіки. При цьому систему з розподіленими параметрами представимо як систему із зосередженими рівними масами:

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = \frac{m_p + m_6}{5}, \text{ де:}$$

$m_p$  - маса робочого органу;  $m_6$  - приєднана маса бетону.

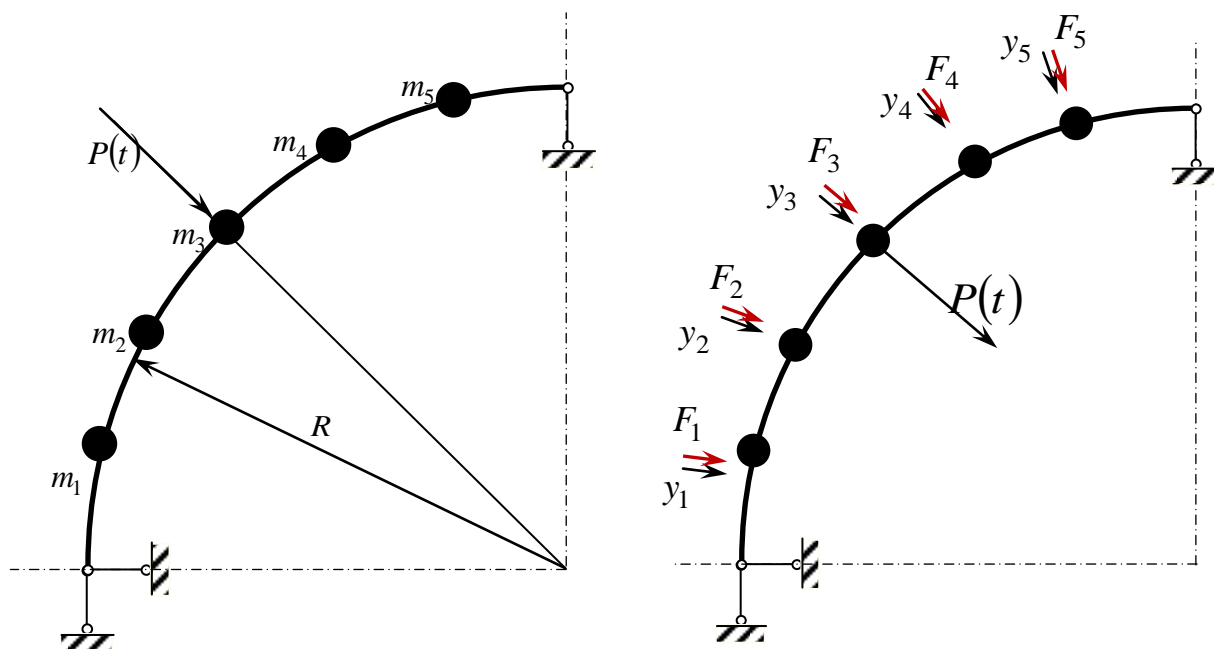


Рис. 2. Розрахункова схема дослідження динаміки криволінійного робочого органу

Представлена система має десять динамічних ступенів свободи з розрахунку по дві на кожну зосереджену масу. Зробимо припущення про відносно невеликі переміщення зосереджених мас уздовж осі робочого органу в порівнянні з поперечними переміщеннями при коливанні. При цьому кількість ступенів свободи можливо скоротити в двоє. Використовуємо умову рівноваги Даламбера, додаючи до системи сили інерції:

$$F_1 = -m_1 \ddot{y}_1 = -\frac{m}{8} \ddot{y}_1; F_2 = -m_2 \ddot{y}_2 = -\frac{m}{8} \ddot{y}_2; F_3 = -m_3 \ddot{y}_3 = -\frac{m}{8} \ddot{y}_3;$$

$$F_4 = -m_4 \ddot{y}_4 = -\frac{m}{8} \ddot{y}_4; F_5 = -m_5 \ddot{y}_5 = -\frac{m}{8} \ddot{y}_5.$$

На підставі принципу незалежності дії сил складемо повні переміщення мас як суму переміщень від дії кожної сили окремо (рис. 2):

$$\begin{aligned} y_1 &= \delta_{11}F_1 + \delta_{12}F_2 + \delta_{13}F_3 + \delta_{14}F_4 + \delta_{15}F_5 + \delta_{1P}P(t); \\ y_2 &= \delta_{21}F_1 + \delta_{22}F_2 + \delta_{23}F_3 + \delta_{24}F_4 + \delta_{25}F_5 + \delta_{2P}P(t); \\ y_3 &= \delta_{31}F_1 + \delta_{32}F_2 + \delta_{33}F_3 + \delta_{34}F_4 + \delta_{35}F_5 + \delta_{3P}P(t); \\ y_4 &= \delta_{41}F_1 + \delta_{42}F_2 + \delta_{43}F_3 + \delta_{44}F_4 + \delta_{45}F_5 + \delta_{4P}P(t); \\ y_5 &= \delta_{51}F_1 + \delta_{52}F_2 + \delta_{53}F_3 + \delta_{54}F_4 + \delta_{55}F_5 + \delta_{5P}P(t), \text{ де:} \end{aligned} \quad (1)$$

$\delta_{ik}$  - переміщення у  $k$  напрямку від дії  $i$  і  $P$  сили (рис. 2, 3):

$$\begin{aligned} \delta_{ik} &= \sum_0^l \int \frac{M_i(x)M_k(x)}{EI} dx = \frac{1}{EI} \left( \int_0^{\frac{\pi Ri}{12}} \cos\left(\frac{\pi}{12}i\right) R \sin\left(\frac{x}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \sin\left(\frac{x}{R}\right) dx + \right. \\ &+ \left. \int_{\frac{\pi Ri}{12}}^{\frac{\pi Rk}{12}} \sin\left(\frac{\pi}{12}i\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \sin\left(\frac{x}{R}\right) dx + \int_{\frac{\pi Rk}{12}}^{\frac{\pi R}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{12}i\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) \sin\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) dx \right); \\ \delta_{kP} &= \sum_0^l \int \frac{M_k(x)M_P(x)}{EI} dx = \frac{1}{EI} \left( \int_0^{\frac{\pi Rk}{16}} \left( \cos\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \sin\left(\frac{x}{R}\right) P \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) R \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right) dx + \right. \\ &+ \left. \int_{\frac{\pi Rk}{16}}^{\frac{\pi R}{4}} \sin\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) P \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) R \sin\left(\frac{x}{R}\right) dx + \int_{\frac{\pi R}{4}}^{\frac{\pi R}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{12}k\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) P \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) R \cos\left(\frac{x}{R}\right) dx \right) = \\ &= \frac{\sqrt{2}PR^3}{64} \left( 4\pi \sin\left(\frac{\pi}{12}k\right) - 12 \sin^3\left(\frac{\pi}{12}k\right) + \cos\left(\frac{\pi}{12}k\right) \left( \pi n + 5 \sin\left(\frac{\pi}{5}n\right) \right) \right). \end{aligned}$$

Розрахункова схема визначення переміщень представлена на рис. 3.

З системи рівнянь можливо знайти форми коливань і частоти вільних коливань робочих органів. Для робочого органу радіусом  $R = 3\text{м}$ , загальною масою  $m_p + m_6 = 90\text{кг}$  та з жорсткістю  $EI = 2.352 \times 10^5 \text{Нм}$  частота вільних коливань і форми коливань:

$$\omega = 1.2 \times 10^3; 896.7; 505; 217; 43,$$

$$\begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.866 \\ 1 \\ 0.866 \\ 0.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1.707 \\ 1.924 \\ -1.626 \\ 0.924 \end{pmatrix}.$$

Визначення значень матриць форм і частот коливань являється підґрунтям для розрахунку переміщень від дії сили  $P(t)$ . Детальний алгоритм розрахунку коливань стержневих систем приведений в роботі [4]. Особливість приведеної методики дозволяє врахувати втрати енергії, що витрачається на

ущільнення бетону у вигляді коефіцієнта гістерезисних втрат. Встановивши амплітуду переміщення зосередженої маси 3 (рис. 2, 3), до якої прикладена сила  $P_0$  можливо знайти необхідну потужність процесу ущільнення [1]:

$$N = \frac{1}{2} P_0 x_3 \theta, \text{ де:}$$

$P_0$  і  $\theta$  – амплітуда і кутова швидкість сили;  $x_3$  – амплітуда коливань точки прикладення сили.

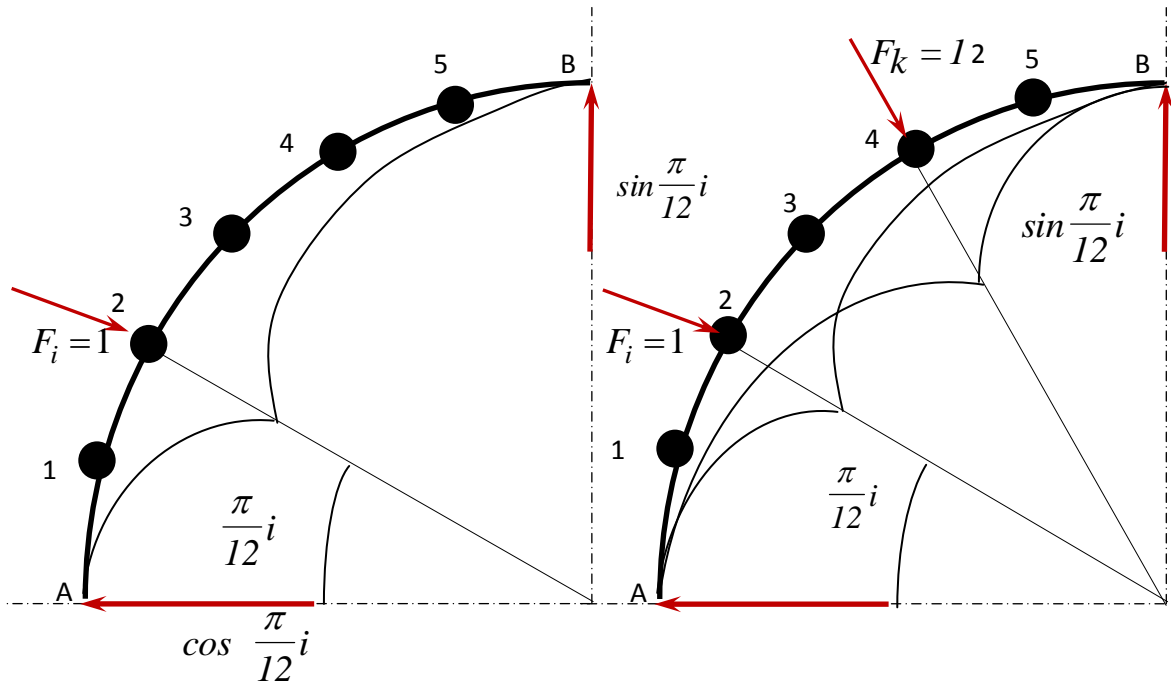


Рис. 3. Розрахункова схема визначення переміщень

Для розглянутої системи при дії навантаження, що підкоряється гармонійному закону, при  $P_0 = 1000 \text{ Н}$  з кутовою швидкістю  $314 \text{ с}^{-1}$  амплітуда коливань точки прикладення вібраційної узагальненої сили  $x_3 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ м}$ , що складе 204 Вт. Реальне значення потужності приводу необхідно коригувати з урахуванням особливостей приводу і конструкції вібратора.

### Висновки

Приєднана маса бетонної суміші залежить, як від її фізико-механічних параметрів, так від геометрії і частоти коливання робочого органу і може визначатись за теорією вільних коливань стрижнів у рідині [5].

Створена методика розрахунку основних силових і енергетичних параметрів вібраційної поверхневої бетоноформуєчої секції ущільнення приконтурного шару кріплення тунелю дозволяє врахувати геометричні і механічні параметри робочих органів при створенні машин подібного класу.

**Список використаних джерел**

1. Chubuk, Yu. F. Vibratsionnyie mashinyi dlya uplotneniya betonnyih smesey / Yu. F. Chubuk, I. I. Nazarenko, V. N. Garnets. - Kiev : Vischa shkola, 1985. - 167 s.
2. Nazarenko I.I. Mashini dlya virobnitstva budivelnih materialiv – K.: KNUBA, 1999. – 488 s.
3. Landau L. D. Teor eticheskaya fizika : ucheb. posobie dlya fiz. spets. un-tov : v 10 t. / L. D. Landau, E. M. Lifshits ; red. L. P. Pitaevskiy. - M. : FIZMATLIT, 2001 - T. 6 : Gidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshits. - Izd. 4-e, ispr. - 2001. - 736 s.
4. Bazhenov V. A. Stroytel'naya mekhanyka. / V. A. Bazhenov, H. M. Ivanchenko, O. V. Shyshov. - K.: Karavella, 2000. - 343 s.
5. Palyunas V.A. Svobodne kolebanyya sterzhney v zhydkosty/ V.A. Palyunas, A.Y. Palyunene. – Vylnyus: Mokslas, 1978. - 127 s.

*Стаття надійшла до редакції 14.03.2014 р.*