

СІВКО Володимир Йосипович, доктор технічних наук, професор, академік Академії будівництва України

Народився у 1939 р.

Закінчив з відзнакою КІБІ у 1961 р. Працював у військово-промисловому комплексі з 1961 по 1964 рр., в Науково-дослідному інституті будівельних конструкцій (м. Київ) з 1964 по 1968 рр. З 1968 р. – асистент, а з 1970 р. – доцент кафедри ЕРБМ. В 1968 р. захистив кандидатську, а в 1988 р. – докторську дисертацію. З 1992 р. – професор.

Основні напрямки наукової діяльності: напружено-деформований стан будівельних матеріалів в процесах роботи будівельних машин. Досліджував процеси віброущільнення бетонних сумішей, доказав можливість оптимізації напружено-деформованого стану при роботі вібраційних машин з направленою зоною віброущільнення. Розробив основні положення механіки, будівельних матеріалів, базуючись на запропонованій ним залежності між напруженнями і деформаціями (петля гістерезису) для ряду матеріалів (бетонних сумішей ґрунтів, мінеральних добрив і ін.) і математичному апараті динаміки процесів взаємодії робочих органів машин з середовищами. Ним вирішено ряд задач теорії машин: задача процесу віброущільнення бетонних сумішей, задача всебічного статичного ущільнення матеріалу, задача про дію штампa на півпростір і впровадження клина в на півпростір, задача про рух пластичного матеріалу в трубi і ін.

УДК 666.94

НАПРУЖЕНО–ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МАТЕРІАЛУ В РОБОЧИХ ПРОЦЕСАХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

В роботі приведені основні положення теорії деформування будівельних матеріалів і сумішей. Наводяться приклади застосування теорії.

Машини що застосовуються в промисловості будівельних матеріалів, здійснюють цілий ряд технологічних операцій (перемішування, укладання і ущільнення суміші та інше) . Для оцінки ефективності роботи машин необхідно вміти описати процес руху матеріалу, а для визначення навантажень і потужності приводу необхідно знати опір, що створює матеріал на робочі органи машин. Область науки, що займається цими питаннями, називається механікою будівельних матеріалів і сумішей. Вона базується на реології, теорії пружності і пластичності.

Основоположниками загальної реології є :

М. Рейнер (професор Єрусалимського університету, відомий по цілому ряду книжок, переведених на російську мову. Це "Десять лекцій по теоретичній реології" М. 1947; "Деформація і течіння". М. 1953; "Феноменологічна макрореологія". М. 1956), Ф. Ерліх ("Реологія. Теорія і застосування". М. 1962), Р. Хілл ("Математична теорія пластичності". М.1956), Л. Тейлор ("Фізика пружності каучуку". М. 1953).

В області будівельних матеріалів відомим вченими в даній області є : Ребіндер П.А., Ур'єв, Воларович, Круглицький М.М., Третинник В.Ю., Овчинніков П.Ф., Куннос Г.Я., Файтельсон і інші.

Слово реологія походить від грецького "Rew", що означає "текти". Проте воно вживається в більш широкому розумінні. Під ним розуміють розділ фізики, що вивчає деформації матеріалів (напруження).

В залежності від властивостей матеріалу для описання процесу може бути застосована теорія деформацій і теорія течіння. Так в загальному вигляді напружений стан може бути описаний:

рівняннями рівноваги

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0 \text{ або } \left(\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right); \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0 \text{ або } \left(\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right); \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} &= 0 \text{ або } \left(\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

рівняннями сумісності деформацій (геометричними рівняннями)

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}; \end{aligned} \quad (2)$$

і рівняннями стану середовища. Ці рівняння характеризують реакцію середовища на завантаження. Вони зв'язують між собою напруження деформації. В загальному вигляді ці рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= F_1(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}); \\ \sigma_y &= F_2(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}); \\ &\dots\dots\dots \\ \tau_{zx} &= F_6(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}) \end{aligned} \quad (3)$$

В цих рівняннях маємо невідомі:

напруження $\sigma_x(x, y, z), \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$;

деформація $\varepsilon_x(x, y, z), \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$;

переміщення $u(x, y, z), v, w$.

Таким чином, при вирішенні системи рівнянь (1), (2), (3) може описаний технологічний процес. Рівняння стану середовища (фізична модель середовища) здійснює прив'язку основних положень теорії пружності і пластичності до механіки будівельних матеріалів і сумішей. Роботами авторів (3) отримано рівняння стану для більшості матеріалів (бетонних і розчинних сумішей, ґрунтів, керамзитобетонних, сумішей, мінеральних добрив і інших). Розроблена методика експериментальних досліджень для отримання рівняння стану в випадках, відсутності даних досліджень. На рис. 1 приведено загальний вигляд рівняння стану для бетонної суміші з В/Ц = 0,4 (Ж= 40...60 с.) при швидкостях навантаження 4, 12 м/с. Як видно така залежність має характер петлі гістерезису. Бона вміщує в собі пружні, пластичні і в'язкісні характеристики.

Більшість технологічних задач промисловості будівельних матеріалів може бути приведена до основних класичних задач механіки:

стиснення будівельної суміші в замкнутому просторі;

вісесиметрична задача;

дія штампа на пружно-пластичний простір;

циліндричний каток на поверхні;

рух кулі в середовищі, що пульсує;

рух середовища в трубі;

втиснення клина в середовище; і інші.

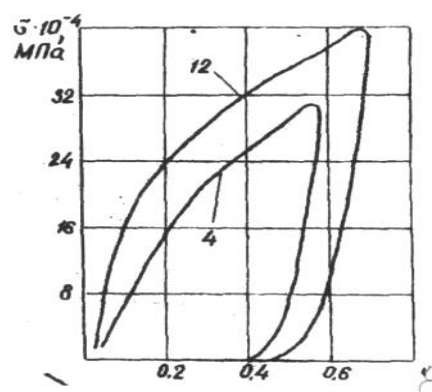


Рис. 1.

Нижче наведені деякі з цих задач:

1. Стиснення будівельної суміші в замкнутому просторі. Схема задачі показана на рис. 2.

Рішення цієї задачі можна отримати в вигляді функції напруження Ері $\varphi(x,y)$. Згідно з теорією пружності [1] функцію напруження вибирають таким чином, щоб диференціальне рівняння рівноваги звелось до тотожності.

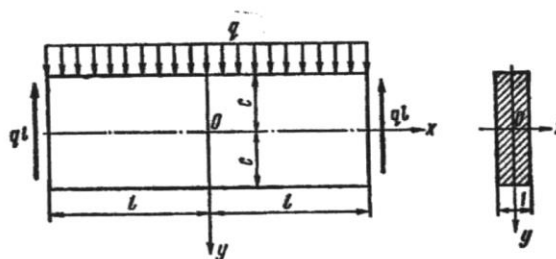


Рис. 2.

Цим умовам можна задовольнити, якщо напруження виразити через функцію Ері $\varphi(x,y)$ наступними співвідношеннями (плоска задача):

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \cdot \partial y} - Xy - Yx. \quad (4)$$

Нами отримано значення функції напруження у вигляді полінома:

$$\varphi = \frac{b_3}{4 \cdot 3} \left(x^4 y - \frac{1}{5} y^5 \right) + \frac{d_5}{2 \cdot 3} \left(x^2 y^2 - \frac{1}{2} y^5 \right) + \frac{b^3}{2 \cdot 1} x^2 y + \frac{d^3}{2 \cdot 3} y^3 + \frac{a_2}{2} x^2 + \frac{c_2}{2} y^2,$$

$$\text{де } a_2 = -\frac{q}{2}; \quad b_3 = -\frac{3q}{4c}; \quad d_5 = -\frac{3q}{4c^3}; \quad d_3 = -\frac{3a}{4c^3} \left(l^2 - \frac{2}{5} c^2 \right); \quad c_2 = 0.$$

Підставляючи знайдені постійні в формулу (4), отримаємо наступну систему напружень:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{3q}{4c^2} (l^2 - x^2) y = \frac{3q}{4c} \left(\frac{2y^2}{3c^2} - \frac{2}{5} \right) y \\ \sigma_x &= -\frac{q}{4^2} \left(\frac{y^3}{c^3} - 3 \frac{y}{c} + 2 \right) \\ \sigma_x &= -\frac{2q}{4c^3} (c^2 - y^2) x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Залежності (5) дають розподіл напружень в середовищі в залежності від зміни x і y . Для визначення деформації необхідно скористатись рівнянням стану.

2. Вдавлювання випуклого штампа.

До цієї задачі може бути зведено задачу роликowego прокату будівельних виробів, взаємодію клина з середовищем, задачу про кулі в клапанах поршневих розчинонасосів.

Диференційні рівняння рівноваги мають вигляд (об'ємні сили відсутні):

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

і умова пластичності [2] (Сен-Венана):

$$\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 = k^2, \quad (7)$$

де k - зв'язність середовища.

Це система трьох рівнянь, що вміщують три компоненти напруження $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ (система пластичної рівноваги).

Вона може бути розглянута незалежно від компонент переміщення (і рівняння сумісності деформації). Схема рішення наведена на рис. 3.

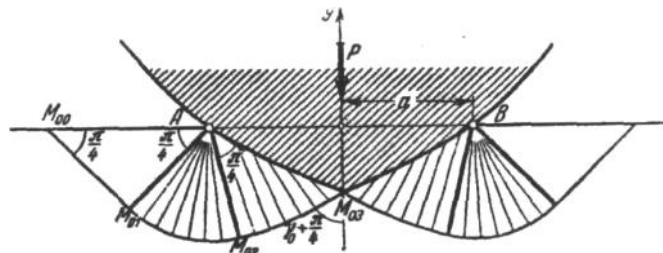


Рис. 3.

В площині x - y розрізняють три області: трикутник $AM_{00}M_{01}$, круговий сектор $AM_{01}M_{02}$ і криволінійний трикутник $AM_{01}M_{02}$. В трикутнику $AM_{00}M_{01}$ і в круговому секторі $AM_{01}M_{02}$ напружений стан визначається залежностями:

$$x - \frac{1}{2}, \quad \varphi - \frac{\pi}{2}, \quad \text{і} \quad x + \varphi = \xi_0, \quad \varphi = \frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} \frac{y}{x+a},$$

де x - безрозмірна перемінна, яка внесена наступним чином:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = k, \quad \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = 2kx - \sigma_0,$$

причому σ_0 - постійна величина a .

Сітка характеристик в першій області складається з двох сімейств паралельних прямих, нахилених до осі x під кутами $\frac{\pi}{4}$, а в другій області утворена сімействами концентричних кіл з центрами в точці A і пучком прямих, що проходять через ту ж точку.

В криволінійному трикутнику $AM_{02}M_{03}$ може бути застосований інтеграл [2]

$$x = -\varphi + \xi_0, \quad y = x \cdot \operatorname{tg} \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) + \psi(\varphi), \quad \frac{\partial y}{\partial \varphi} = \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \frac{\partial x}{\partial \varphi}, \quad (8)$$

де $\psi(\varphi)$ - довільна функція.

Остаточно мають місце рівності:

$$x + \varphi = \xi_0, \quad y = x \cdot \operatorname{tg} \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) = y(\varphi) - x(\varphi) \cdot \operatorname{tg} \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) - \alpha,$$

а сітка характеристик утворена кривими, які знаходяться шляхом інтегрування рівнянь (8) і непаралельними прямими $\varphi = \text{const}$, що перетинають лінію контакту під кутами $\frac{\pi}{4}$

Напруження в точках перетину ліній сітки:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{matrix} \right\} = \sigma_0 + k(2x \pm \cos \varphi), \quad \tau_{xy} = k \cdot \sin 2\varphi.$$



Дослідження напруженого стану під штампом дозволяє визначити опір вдавлюванню і рух штампа відносно середовища.

$$x = -\frac{1}{2}, \quad \varphi = 0 \quad \text{або} \quad \sigma_x = \tau_{xy} = 0, \quad \sigma_y = -2k.$$

3. Протягування матеріалу через отвір (щілину). Задача може бути застосована при дослідженні руху розчину в трубах.

Рішення задачі наведено на рис. 4.

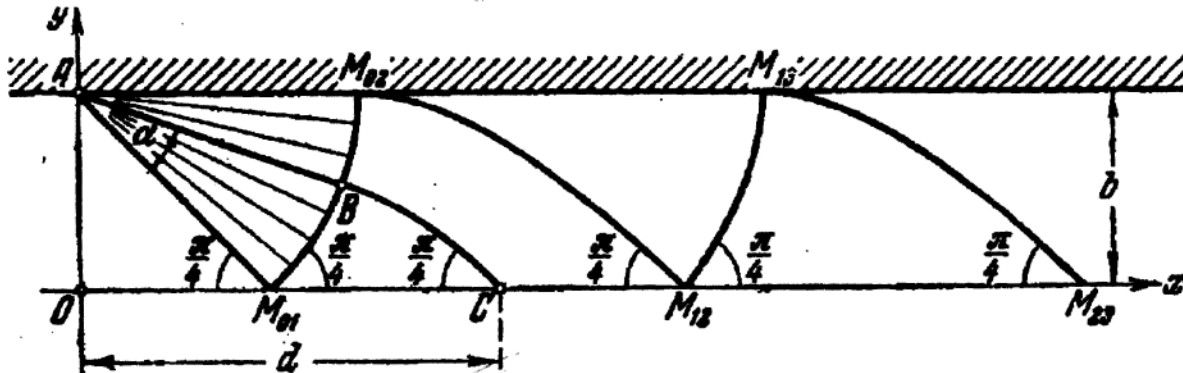


Рис. 4.

В прямокутному трикутнику АОМ₀₁ має місце рівномірний напружений стан, який визначається так :

а сітка характеристик утворена двома ортогональними сімействами

паралельних прямих, нахилених до осі Х під кутами $\frac{\pi}{4}$

В круговому секторі АМ₀₁М₀₂ з центральним кутом $\frac{\pi}{4}$ мають місце рівняння

$$x + \varphi = -\frac{1}{2}, \quad \varphi = \frac{\pi}{4} - \operatorname{arctg} \frac{b-y}{x},$$

а сітка характеристик складається з сімейства концентричних кіл з центрами в т. А і пучка прямих, що проходять через ту ж точку цієї області.

4. Ущільнення бетонних сумішей

Характер протікання процесу ущільнення бетонних сумішей може бути оцінений характером розподілення щільності по габаритах виробу:

$$\rho = f(x, y, z). \quad (9)$$

Вигляд цієї функції визначається параметрами вібраційної машини (коливальною масою m і площею робочого органу F), режимом віброущільнення (амплітудою коливань x_0 і частотою коливань f) і механічними властивостями бетонної суміші.

Знаходження цієї функції теоретичним шляхом полягає в дослідженні задачі про залишкові деформації ε_0 після ряду послідовних імпульсів вібраційної машини. Перехід від залишкових деформацій до щільності відображує формула:

$$\rho = \rho_0 / (1 - \varepsilon_0). \quad (10)$$

Для вивчення динамічних процесів, що виникають при віброущільненні бетонних сумішей, розглядається динамічна система "робочий орган - бетонна суміш". Під дією змушуючої сили $Q \sin(\omega t)$ робочий орган масою m діє на бетонну суміш. Диференціальне рівняння руху суміші в напрямку координати x за час t буде мати вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \rho \frac{d^2 u}{dt^2}. \quad (11)$$

Для рішення цього рівняння необхідно мати залежність між напруженнями і деформаціями для бетонної суміші. Ця залежність, як показано в дослідженнях В.Й.Сівка має вигляд петлі гістерезису і містить в собі пружну і в'язку складові опору:

$$\sigma = f(E, \eta, f), \quad (12)$$

де E і η - динамічний модуль пружної деформації і коефіцієнт динамічної в'язкості; f - коефіцієнт сухого тертя.

Рівняння (11) і (12) повинні вирішуватись спільно і таким чином можна описати процес поширення хвиль в середовищі.

Задача про взаємодію робочого органу і середовища надзвичайно складна, якщо її вирішувати в строгій постановці. По-перше, середовище в процесі віброущільнення змінює свої фізичні властивості і відповідно змінюються параметри E , η , f . По-друге, робочий орган знаходиться під впливом опору середовища, що теж змінюється. Тому така задача може бути вирішена двома способами. Перший спосіб полягає в моделюванні властивостей середовища однією з відомих реологічних моделей і в спільному вирішенні рівнянь (11) і (12). Другий спосіб полягає в представленні петлі гістерезисна кусочно - лінійною функцією і розв'язку рівнянь (11) і (12) чисельними способами.

Диференційне рівняння руху суміші (11) - використовуючи метод характеристик приводиться до системи рівнянь в формі кінцевих різниць:

$$\begin{aligned} (x_{k,e} - x_{k,e-1}) \cdot (V_{k,e-1} + C_{k,e-1}) \cdot (t_{k,e} - t_{k,e-1}) &= 0; \\ (x_{k,e} - x_{k-1,e}) \cdot (V_{k-1,e} - C_{k-1,e}) \cdot (t_{k,e} - t_{k-1,e}) &= 0; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{S}{C_{k,e-1}} (\sigma_{y_{k,e}} - \sigma_{y_{k,e-1}}) + \rho(\sigma_y)_{k,e-1} (V_{k,e} - V_{k,e-1}) + \left[\frac{2f_{k,e-1}}{\alpha} \sigma_{y_{k,e-1}} + g\rho(\sigma_y)_{k,e-1} \right] \cdot (t_{k,e} - t_{k,e-1}) = 0; \quad (14)$$

$$\frac{S}{C_{k,e-1}} (\sigma_{y_{k,e}} - \sigma_{y_{k-1,e}}) + \rho(\sigma_y)_{k-1,e} (V_{k,e} - V_{k-1,e}) + \left[\frac{2f_{k-1,e}}{\alpha} \sigma_{y_{k-1,e}} + g\rho(\sigma_y)_{k-1,e} \right] \cdot (t_{k,e} - t_{k-1,e}) = 0, \quad (15)$$

де $t_{k,e}$, $x_{k,e}$ - координати (час, положення), в яких шукаються значення параметрів; $\sigma_{k,e}$, $V_{k,e}$ - пошукові параметри напруженого стану (радіальне напруження, швидкість деформації); $x_{k,e-1}$, $t_{k,e-1}$, $\sigma_{k,e-1}$, $V_{k,e-1}$, $x_{k-1,e}$, $t_{k-1,e}$, $\sigma_{k-1,e}$, $V_{k-1,e}$, параметри середовища у відомих точках (знаходяться із початкових і граничних умов); $C_{k,e-1}$, $C_{k-1,e}$ - швидкість руху хвиль в відомих точках відповідно з густиною середовища; $\rho(\sigma_y)_{k,e-1}$, $\rho(\sigma_y)_{k-1,e}$ - густина середовища; g - прискорення вільного падіння; f - коефіцієнт тертя суміші по бортах форми; a - ширина виробу; S - величина, обернена коефіцієнту бокового розпору ($= 2; 2,5$).

Рівняння (13) описують звукові хвилі в середовищі, а рівняння (14) визначають напружено-деформований стан, обумовлений хвильовими процесами.

Для вирішення задач віброущільнення необхідні дві початкові і дві граничні умови.

А - початкові умови: при $t = 0$

$$1) \sigma_y = \sigma_{y_0} = \sigma_y(x, 0);$$

$$2) V = V_0 = V(x, 0).$$

- закони розподілення горизонтального тиску і модуля вектора швидкості по висоті виробу в початковий момент часу;

Б - граничні умови:

$$1) \text{ при } x = x_0(t) \quad \sigma_y[x_0(t), t] = 0;$$

$$2) \text{ при } x = h \quad F[\sigma_y(h, t); V(h, t)] = 0.$$

Суть першої граничної умови - рівність нулю σ_y на поверхні виробу (при станковому способі формування). Суть другої граничної умови - певна залежність між

функціями σ_y і V в зоні контакту робочого органу і середовища. Вид цієї залежності визначається режимом роботи робочого органу.

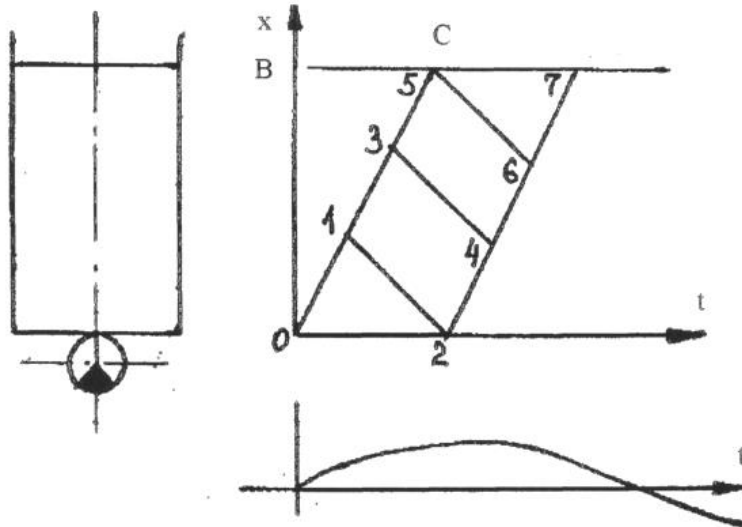


Рис. 5.

Схему рішення задачі наведено на рис. 5. Лінія OB – лінія початкових умов, на якій задаються значення σ_{y0} і $V0$. (середовище нерухоме, а горизонтальний тиск розподіляється за законом трикутника $\sigma_{y0} = \frac{g\rho x}{2.5}$. Вточках 1, 3, 5 значення параметрів будуть $\sigma_{y0} = \frac{g\rho x}{2.5}$;

$$V_0 = 0; \sigma_1 = \frac{2g\rho x}{3 \cdot 2.5}; V_1 = 0; \sigma_3 = \frac{2g\rho x}{2.5 \cdot 3}; V_3 = 0; \sigma_5 = 0; V_5 = 0. \quad (16)$$

На початку, коли середовище нерухоме, від робочого органу поширюється пружна хвиля з швидкістю $C_0 = \sqrt{d\sigma_x/d\rho} = \sqrt{E_0/\rho}$. Значення модуля пружності для різних середовищ вибирають з [3]. Лінія OC проводиться під кутом $\alpha = h/t = C_0$.

Параметри напруженого стану в точці 2 визначались аналітичним шляхом.

В точці 7 параметри напруженого стану:

$$(x_7 - x_6) - (V_6 + C_6)(t_7 - t_6) = 0 \quad x_7 = h; \quad (17)$$

$$\frac{S}{C_6}(\sigma_7 - \sigma_6) - \rho_6(V_7 - V_6) + \left[\frac{2f_6}{\alpha} \sigma_6 + g\rho_6 \right] \cdot (t_7 - t_6) = 0; \quad \sigma_{y7} = 0. \quad (18)$$

В проміжних точках параметри напруженого стану визначаються рівняннями (13) і (14) в яких перші рівняння визначають параметри руху і напруженого стану від прямих хвиль, а другі рівняння – від зворотних хвиль.

Література

1. Самуль В.И. Основы теории упругости та пластичности. - М.: Высшая школа, 1970.
2. Соколовський В.В. Теория пластичности. - М.-Л.: Гостехиздат, 1950.
3. Сівко В.Й. Основы механики вибруемых бетонных смесей. - К.: Высшая школа, 1987. - 168с.

Основні праці:

1. Сівко В.Й. Механічне обладнання підприємств будівельних виробів. Підручник. - К.: Вища школа, 1994. - 358 с.
2. Сівко В.Й. Обладнання і технологічні комплекси підприємств важких речовин. Підручник. - К.: Вища школа. 2003. (в друку)

3. Сівко В.И. Основы механики вибруемых бетонных смесей. - К.: Высшая школа, 1987. - 168 с.
4. Сівко В.И. Расчеты напряженно-деформированного состояния материала в рабочих процессах вибрационных машин. - К.: Высшая школа, 1986. - 44с.
5. Сівко В.И. Оптимизация режимов формирования бетонных смесей с использованием ЭЦВМ. - К.: Будівельник, 1978. - 39 с.
6. Сівко В.Й. Технічна механіка будівельних матеріалів. - К.: Будівельник, 1994. - 128 с.
7. Сівко В.Й. Дослідження процесів віброущільнених бетонних сумішей. Автореферат канд. дисертації. - К.: Техніка, 1968. - 32 с.
8. Сівко В.Й. Оптимизация процессов виброуплотнения бетонных смесей. Автореферат докт. дисертации. - М.: ВЗИСИ, 1988. - 48 с.
9. Сівко В.Й. Енергетичні параметри процесу віброущільнення бетонних сумішей. - Рівне, РДТУ, 2001. - 123 с.
10. Сівко В.Й. Технічні і технологічні аспекти підвищення ефективності робіт касетних установок. - Рівне, РДТУ, 2001. - 154 с.
11. Сівко В.Й. Динаміка касетних установок. В зб.наукових праць Харківського нац. автодорожного університету. - Харків, 1999. – С.61-68.
12. Сівко В.Й., Скубак Е.О., Нестеренко М.П. Взаємодія гнучких робочих органів вібраційних машин з середовищем. Вібротехнологія-98. - Одеса, НПО „Вотум”, 1998. – С.15-24.
13. Сівко В.Й. Теорія деформування будівельних матеріалів і сумішей// Техніка будівництва. – 2001. - №10.
14. Сівко В.Й., Голубничий А.М. і ін. Складування, зберігання та транспортування матеріалів і напівфабрикатів. Терміни і визначення. ДСТУ-Б.А. 1-75-95. Система стандартів та нормування в будівництві. - Київ, Держстандарт, 1997. - 70 с.
15. Сівко В.Й., Скубак Е.О. Гнучкі робочі органи вібраційних машин// Теорія і практика процесів подрібнення. - Одеса, ОДМА, 1997. С.37-45.