

ISSN 0536-1028

Известия
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЫХОДИТ ЕЖЕМЕСЯЧНО

4/91

Выпускаемые в настоящее время регулируемые по подаче насосы имеют время сброса подачи $t_{сб}$ порядка 0,7...0,8 с.

Как следует из зависимостей рис. 2, при столь больших временах сброса подачи $t_{сб}$ требуется весьма значительное снижение эквивалентной жесткости гидравлического канала в режиме стопорения. Однако столь существенное снижение жесткости гидравлического канала связано с необходимостью применения гидропневмоаккумуляторов повышенного объема и габаритных размеров.

Повышение быстродействия регулируемых по подаче насосов обеспечивает достижение заданного уровня ограничения стопорных динамических нагрузок при меньших объемах гидропневмоаккумуляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сильвестров Э. Е., Каминская Д. А., Ольховиков Б. В., Розенцвайг А. Б. Оптимальное демпфирование упругих колебаний объемного гидропривода двигателем насоса / Пневматика и гидравлика.— М.: Машиностроение, 1986.— Вып. 12.— С. 126—132.
2. Условия существенного влияния статизма механической характеристики двигателя насоса на динамическую жесткость объемного гидропривода / Оксененко А. Я., Каминская Д. А., Лурье З. Я. и др // Пневматика и гидравлика.— М.: Машиностроение, 1989.— Вып. 15.— С.
3. Волков Д. П., Каминская Д. А. Динамика электромеханических систем экскаваторов.— М.: Машиностроение, 1971.

Рекомендована кафедрой

Поступила в редакцию
04.06.90

УДК 622.625.1 : 539.4

НЕСТАЦИОНАРНАЯ РЕАКЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ НА ДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

Проф. В. И. ПОЖУЕВ, инж. М. ЖИБИГАЙ
(Запорожский индустриальный институт)

Рассмотрим нестационарное поведение трубопровода конечной длины в грунте, вызванное движением вдоль его оси осесимметричной радиальной нагрузки, и алгоритм, основанный на разложении всех заданных и искомых величин в ряды Фурье по осевой координате и использовании при интегрировании дифференциальных уравнений для каждой гармоники численного метода Рунге — Кутты.

Движение трубопровода описывается уравнениями теории оболочек, основанными на гипотезах Кирхгофа — Лява:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu/R \frac{\partial w}{\partial x} &= \rho \frac{1 - \nu}{2G} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \nu/R \frac{\partial u}{\partial x} + h^2/12 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + w/R^2 &= -\rho \frac{1 - \nu}{2G} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{1 - \nu}{2Gh} (q_c - p), \end{aligned} \quad (1)$$

где u , w — осевое и радиальное перемещения срединной поверхности; R — радиус трубопровода; h — толщина стенки; G , ρ , ν — модуль сдвига, плотность и коэффициент Пуассона; p — интенсивность подвижной нагрузки; q_c — нормальная реакция со стороны грунта на колебания оболочки.

Грунт принимается однослойным и однородным по толщине, и для описания его движения привлекается двухпараметровая модель Власова — Пастернака [1] в модификации [2]. Эта модель основана на

интегральных условиях динамического равновесия элемента основания, понимаемых как принцип возможных перемещений. При этом для осесимметричной задачи прогиба оболочки и реакция со стороны грунта связаны зависимостью

$$-2c_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_0 w + m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q_c, \quad (2)$$

где k_0 , c_0 — интегральные характеристики работы основания на сжатие и сдвиг; m_0 — приведенная погонная масса основания толщиной H ;

$$k_0 = \frac{E_0}{1-\nu_0^2} \int_R^{R+H} \psi'^2(r) dr; \quad c_0 = \frac{E_0}{4(1+\nu_0)} \int_R^{R+H} \psi^2(r) dr; \\ m_0 = \bar{m} \int_R^{R+H} \psi^2(r) dr; \quad (3)$$

$E_0 = \text{const}$ — постоянный по глубине модуль упругости грунта; \bar{m} — постоянная по глубине плотность основания; ν_0 — коэффициент Пуассона; $\psi(r)$ — функция, определяемая в зависимости от характера воздействия заданной нагрузки на основание.

Принимая на торцах оболочки условия шарнирного опирания, запишем: при $x = 0, L$

$$w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Начальные условия задачи принимаются нулевыми, так что при $t = 0$

$$u = \frac{\partial u}{\partial t} = w = \frac{\partial w}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Перейдем в уравнениях (1) — (4) к безразмерному виду, вводя следующие относительные величины:

$$\{u', w'\} = 1/h \{u, w\}; \quad x' = x/R; \quad \tau = c_s t/R; \quad c_s = (G/\rho)^{1/2}; \quad \delta = L/R; \\ \kappa = h/R; \quad G' = G_0/G; \quad m'_0 = \bar{m}_0/\rho; \quad H' = H/R, \quad (6)$$

где c_s — скорость распространения волн сдвига в материале трубопровода; δ , κ — относительные длина и толщина оболочки; τ , x' — относительная временная и осевая координаты; G' , m'_0 — отношение модулей сдвига и плотностей грунта основания и материала трубопровода; H' — относительная толщина динамически активного слоя основания.

Решение задачи ищем в виде рядов Фурье по осевой координате, предполагая, что заданная нагрузка и реакция со стороны основания также могут быть представлены в виде указанных рядов:

$$u'(x', \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(\tau) \cos\left(\frac{n\pi}{\delta} x'\right); \quad w'(x', \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(\tau) \sin\left(\frac{n\pi}{\delta} x'\right); \\ p(x', \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n(\tau) \sin\left(\frac{n\pi}{\delta} x'\right); \quad q_c(x', \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} q_{c,n}(\tau) \sin\left(\frac{n\pi}{\delta} x'\right). \quad (7)$$

Предполагая, что элемент основания, прилегающий к поверхности оболочки, деформируется вместе с ней, и учитывая, что функция поперечного распределения перемещений $\psi(r)$ подбирается в зависимости от граничных условий задачи и от приложенной к оболочке нагрузки, примем, следуя [2], для $E_0 = \text{const}$, $\bar{m}_0 = \text{const}$ такой закон изменения:

$$\psi(r) = \cos \frac{\pi}{2H} (r - R). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (3), а затем переписывая уравнение (2), с учетом представлений (7), получаем зависимость между гармониками реакции основания и перемещения оболочки:

$$q_{c,n} = [1/2 \cdot G_0 H' \kappa n^2 \pi^2 \delta^2 + G_0 \pi^2 \kappa / (4H' (1 - \nu_0))] \omega_n + 1/2 \cdot m_0' H' \kappa G (d^2 \omega_n / d\tau^2). \quad (9)$$

Подставляя представление (7) с учетом зависимости (9) в уравнение (1), получаем для определения коэффициентов Фурье систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_n}{d\tau^2} &= -\frac{2n^2 \pi^2}{\delta^2 (1 - \nu)} u_n + \frac{2\nu n \pi}{\delta (1 - \nu)} \omega_n; \\ \frac{d^2 \omega_n}{d\tau^2} &= \frac{2\nu n \pi}{\delta (1 - \nu) \varepsilon} u_n - \frac{2}{(1 - \nu) \varepsilon} \varphi(n) \omega_n - \frac{1}{G \kappa^2 \varepsilon} p_n; \\ \varphi(n) &= 1 + \frac{\kappa^2 \pi^4 n^4}{12 (1 - \nu) \delta^4} - \frac{n^2 \pi^2 G' H' (1 - \nu)}{4 \kappa \delta^2} - \frac{\pi^2 G' (1 - \nu)}{8 \kappa H' (1 - \nu_0)}; \quad \varepsilon = 1 - m_0' H' / (2 \kappa). \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (10) обычным путем приводятся к системе дифференциальных уравнений первого порядка, которая затем интегрируется с нулевыми начальными условиями на ЭВМ по методу Рунге — Кутты. Полученные в результате интегрирования массивы данных $u_n(\tau)$, $\omega_n(\tau)$ для всех необходимых моментов времени запоминаются, что позволяет использовать их затем многократно при подстановке в ряды вида (7) для различных значений x' и строить картины распределения перемещений и напряжений в трубопроводе по его длине в любой момент времени.

Предложенный алгоритм позволяет проводить расчеты для любых законов изменения заданной нагрузки во времени. При этом будет изменяться только вид функций $p_n(\tau)$ в уравнении (10). В качестве примера численные результаты получены для кольцевой нагрузки с неизменной во времени интенсивностью, которая начинает свое движение с левого торца трубопровода в момент времени $t=0$ и перемещается вдоль оси оболочки с постоянной скоростью $v = v_0$, тогда

$$p(x', \tau) = p_0 \delta(x' - M_s \tau); \quad M_s = v_0 / c_s, \quad (12)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака; M_s — отношение начальной скорости движения нагрузки к скорости распространения волн сдвига в материале трубопровода. В случае такого нагружения функция

$$p_n(\tau) = (2p_0 / \delta) \sin\left(\frac{n\pi}{\delta} M_s \tau\right), \quad (13)$$

причем время схода нагрузки с оболочки $\tau_k = \delta / M_s$.

Расчеты проведены при следующих значениях безразмерных параметров: $\kappa = 0,004$; $\delta = 3,0$; $\nu = \nu_0 = 0,3$; $M_s = 0,1$; $G' = 10,0$; $H' = 3,0$; $m_0 = 1,0$. Результаты выдавались для различных моментов времени, соответствующих характерным положениям нагрузки на оболочке. Сходимость рядов Фурье и точность решения задачи Коши для каждой гармоники контролировались численными экспериментами. Количество членов ряда определялось на ЭВМ автоматически по достижении заданной относительной погрешности.

На рис. 1, а показано распределение безразмерных прогибов трубопровода ($\omega^* = \omega G \kappa / p_0$) для различных моментов времени, при этом кривая 1 соответствует моменту времени, когда нагрузка прошла четверть длины оболочки, кривая 2 построена для нагрузки, находящейся в середине трубопровода, для кривой 3 $\tau = 3\tau_k / 4$, кривая 4 соответствует моменту схода давления с оболочки. Максимальные по модулю радиальные перемещения возникают в момент прохождения кольцевой

нагрузкой половины длины трубопровода. Аналогичные кривые для безразмерного изгибающего момента ($M^* = Mr_0^{-1}h^{-2}$) приведены на рис. 1, б. Как и для прогибов, наибольший изгибающий момент появляется при $\tau = 0,5\tau_k$, затем происходит уменьшение амплитуд и перемещений и напряжений в трубопроводе. Предложенный алгоритм по-

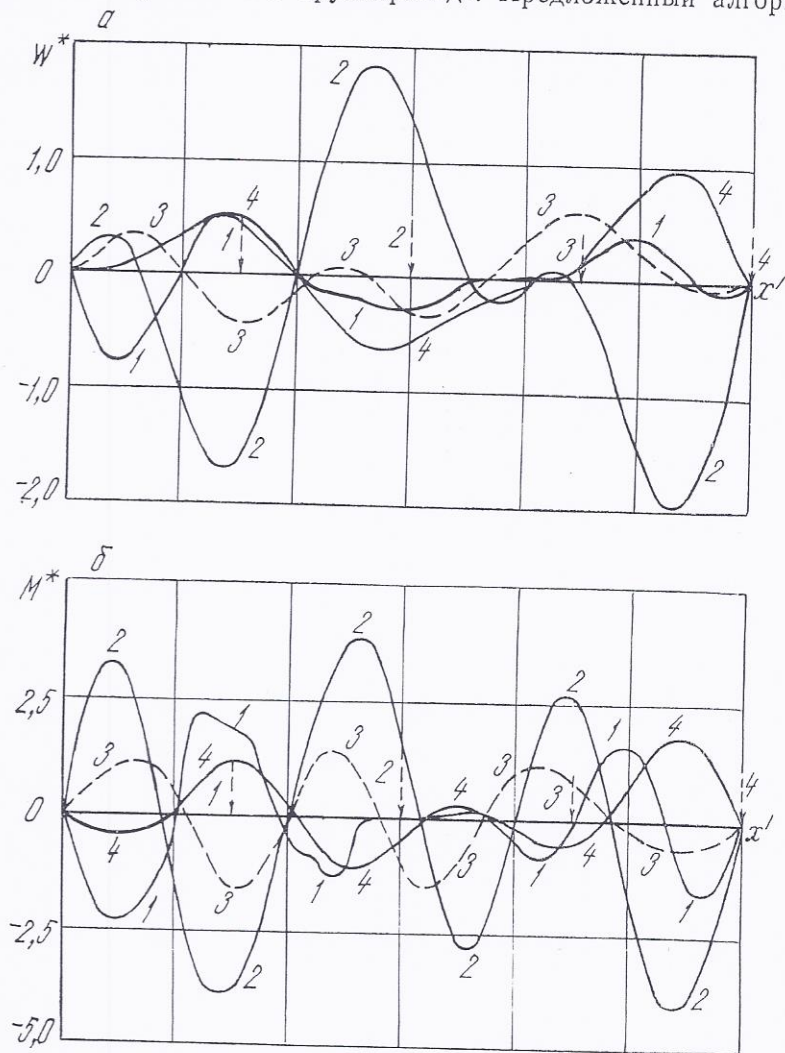


Рис. 1. Распределение безразмерных прогибов (а) и изгибающего момента (б) для различных моментов времени

зволяет производить расчеты на динамическую прочность различного рода подземных цилиндрических сооружений, исследовать переходные процессы и определять места возникновения максимальных напряжений и моменты времени, когда эти максимумы появляются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов В. З., Леонтьев Н. Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании.— М.: Физматгиз, 1960.— 492 с.
2. Львовский В. М. К определению приведенной массы и упругих характеристик однослойных и многослойных обобщенных оснований с постоянными и переменными модулями упругости // Изв. вузов. Строительство и архитектура.— 1971.— № 3.— С. 38—46.

Рекомендована кафедрой
теоретической механики ЗИИ

Поступила в редакцию
05.06.90

Сорокин Л. А. Энергетическая оценка технических средств карьерного транспорта	88
Механизация горных работ. Горные машины и комплексы	
Ермеков Т. Е. Эффективность селективной выемки угольных пластов выемочными манипуляторами	94
Вернер В. Н., Полкунов Ю. Г., Соколова Е. К., Хорешок А. А. Экспериментально-теоретические предпосылки прогнозирования крупности кусков при разрушении массива дисковым инструментом	99
Сапожников А. И., Штейнцайг В. М., Власов А. И., Каминская Д. А. Выбор оптимальной жесткости гидропневмоаккумулятора копающих механизмов экскаватора	102
Горная механика	
Пожуев В. И., <u>Жибигай М.</u> Нестационарная реакция подземного трубопровода конечной длины на действие подвижной нагрузки	105
Электрификация горных работ	
Попов А. Н. Влияние регулируемых параметров двигателя на упругие механические колебания в электроприводе	109
Цапенко Ю. Е. Дополнительный ток в цепи замыкания на землю в сети с нейтралью, заземленной через резистор	113
Чикулаев С. А., Гафиятуллин Р. Х. Формирование электромеханических характеристик электропривода бурового станка	115
Автоматизация производственных процессов	
Верховский Я. М., Топорков А. А., Ильюша А. В. Выбор рационального соотношения скоростей крепления и подачи комбайна в автоматизированных очистных комплексах	119
Крошка А. С., Гницевич А. В., Бабец Е. К., Рыбалко Б. И. Решение задачи о минимальном маршруте загрузки секций бункеров на обогатительных фабриках	124
Рудоподготовка и обогащение полезных ископаемых	
Леонов С. Б., Иоффе С. В. Графо-аналитическое решение уравнения динамики технологического процесса обогащения полезных ископаемых	128
Рефераты	134

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Проф. А. Е. Троп (главный редактор),
доц. В. Г. Симанов (зам. главного редактора),
проф. К. Н. Адилев, проф. А. И. Арсентьев, проф. В. Ф. Бызов,
проф. Г. А. Багаутинов, проф. Н. Ф. Гращенко, проф. А. Н. Данияров,
проф. И. В. Дементьев, проф. В. З. Козин, проф. В. Н. Корнилов,
проф. А. А. Кулешов, проф. А. М. Мальцев, проф. Д. Е. Махно,
проф. Б. А. Носырев, проф. Л. Я. Парчевский, проф. Г. Г. Пивняк,
проф. В. Л. Попов, чл.-кор. АН СССР Н. М. Проскураков, проф. Ю. И. Протасов,
проф. Л. А. Пучков, акад. АН СССР В. В. Ржевский, проф. К. Ф. Сапицкий,
проф. Э. М. Соколов, проф. Г. И. Солод, проф. В. Е. Стровский,
проф. Ю. И. Туринцев, проф. В. П. Франчук, проф. В. С. Хохряков,
проф. В. И. Щуцкий, проф. В. А. Ярцев

Ответственный секретарь редакции Р. К. Бродягина

Старший редактор С. М. Кошелева Редактор А. В. Беляева
Технический редактор Н. Д. Чубарова Корректор О. Г. Пихтовникова

Сдано в набор 29.11.90. Подп. в печать 05.03.91.
Формат 70×108¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Печать высокая.
12,0 усл. печ. л. 12,0 усл. кр.-отт. 12,6 уч.-изд. л.
Тираж 1250. Заказ 273. Цена 1 р. 40 к.
Редакция «Изв. вузов. Горный журнал»,
620219, г. Свердловск, Университетский пер., 9, ГСП-678, тел. 22-46-04.
Типография изд-ва «Уральский рабочий»,
620151, г. Свердловск, пр. Ленина, 49.

Article 2 : La réaction non stationnaire d'une conduite souterraine de longueur finie, soumise à l'action d'une charge mobile

Dans le présent article, nous avons étudié le comportement dynamique à l'étape des vibrations turbulentes d'une conduite souterraine de longueur finie lorsque cette dernière est soumise à l'action de charges radiales uniformément répartie sur le pourtour de la section et qui se déplacent le long de la conduite.

L'algorithme de résolution est basé sur la décomposition de toutes les données et variables en séries de Fourier suivant la coordonnée axiale et sur l'utilisation de la méthode de Rung-Kutta pour l'intégration des équations différentielles.

Les équations caractéristiques de la conduite sont obtenues à partir des équations de la théorie des coques fondées sur les hypothèses de Kirchhoff Love.

Le massif de fondation a été considéré monocouche et uniforme sur toute son épaisseur. Son équation caractéristique correspond au modèle de Vlassov-Pasternak suivant la modification proposée par Lvovski. Ce modèle est basé sur les conditions intégrales d'équilibre dynamique de l'élément de fondation, vues sous l'angle du principe des déplacements possibles.

Les conditions aux limites de la conduite et les conditions initiales du problème sont considérées nulles.

L'algorithme de calcul qui reste valable pour n'importe quelle loi de chargement a permis d'obtenir des résultats numériques pour un système de charges cylindriques constantes dans le temps et se déplaçant du bord gauche de la conduite vers la droite avec une vitesse constante.

La convergence des séries des Fourier et la précision de calcul du problème de Cauchy ont été contrôlées grâce à de multiples expériences numériques sur ordinateurs. Le nombre de termes dans les séries a été déterminé automatiquement sur ordinateur par rapport à la précision relative fixée pour le calcul.

Des graphiques des déplacements et des moments fléchissants en fonction de la coordonnée axiale, on peut retenir que les plus grandes valeurs sont enregistrées après le passage par la charge mobile du milieu de la conduite.

Le présent algorithme permet de conduire les calculs de résistance dynamique de différents ouvrages cylindriques souterrains, d'étudier les processus de transition entre les différents régimes de vibration, de définir les sections dangereuses du point de vue contrainte ainsi que les moments pendant lesquels elles (les contraintes) apparaissent.