

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2021)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация научных исследований по широкому спектру проблем в области металлургии,
машиностроения, транспорта, строительства, химической и нефтегазовой инженерии,
производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/FUTF8491>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,344

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомолов Алексей Витальевич - к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна - к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Исаева КуралайСметкановна Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

М. И. Котова¹, *Е. М. Ибраева², А. В. Украинец³

¹Институт математики и математического моделирования,

г. Алматы, Республика Казахстан,

^{2,3}Торайгыров университет,

г. Павлодар, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ТОННЕЛЯ НА ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

На основе решения задачи о действии подвижной синусоидальной нагрузки на бесконечно длинную круговую цилиндрическую полость в упругом полупространстве исследуется напряженно-деформированное состояние породного массива, окружающего неподкрепленный тоннель разной глубины заложения при действии на него данной нагрузки. Движение полупространства описывается динамическими уравнениями теории упругости в подвижной системе координат, для решения которых предложен метод неполного разделения переменных. Решение построено для случая, когда скорость движения нагрузки меньше скорости чем скорость волны Рэлея в рассматриваемой среде. Из анализа результатов расчётов следует, что при глубине заложения тоннеля более четырех его радиусов влияние земной поверхности на его напряженно-деформированное состояние незначительно.

Ключевые слова: упругое полупространство, круговая цилиндрическая полость, подвижная синусоидальная нагрузка, Рэлеевские волны, породный массив, тоннель, глубина заложения тоннеля, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Опыт эксплуатации транспортных подземных сооружений (типа тоннелей метрополитена) в условиях городской застройки показывает, что при их мелком заложении происходит резкое возрастание уровня вибраций в зданиях и сооружениях, расположенных вблизи их проходки. Превышение уровнями вибраций допустимых норм, установленных для зданий, приводит к непригодности последних для жилья. Кроме того, вибрации оказывают неблагоприятные воздействия на различные технологические процессы повышенной точности и людей. В связи с этим необходимо не только обеспечить достаточную надёжность всех элементов подземной конструкции, но и решить вопрос о допустимом приближении к ней наземных сооружений.

Одной из модельных задач, применяемых для исследования динамики тоннелей мелкого заложения под воздействием транспортной нагрузки (нагрузки от движущегося внутритоннельного транспорта), является задача о действии на

упругое полупространство нагрузки, равномерно движущейся по поверхности круговой цилиндрической полости вдоль её образующей, параллельной свободной границе полупространства. В отличие от аналогичной задачи для упругого пространства, моделирующей тоннель глубокого заложения, данная задача является более сложной, так как возникает необходимость учитывать отражаемые границей полупространства волны. Исследованию указанной проблемы посвящен ряд публикаций, охватывающий, в основном, последние годы [1–7]. Используя решение [2, 3], в настоящей работе построено точное аналитическое решение задачи о действии на упругое полупространство равномерно движущейся по поверхности полости синусоидальной нагрузки, и на основе этого решения исследуется влияние глубины заложения тоннеля на его напряжённно-деформированное состояние при действии указанной нагрузки.

Материалы и методы

Метод математического моделирования с привлечением моделей теории упругости.

1 Постановка и аналитическое решение задачи. Используя для исследований модельный подход, представим неподкрепленный тоннель мелкого заложения как бесконечно длинную круговую цилиндрическую полость радиусом $r = R$ в линейно-упругом, однородном и изотропном полупространстве (массиве), отнесенному к неподвижным цилиндрической r, θ, z и декартовой x, y, z системам координат, ось z которых совпадает с осью полости и параллельна свободной от нагрузок горизонтальной границе полупространства (земной поверхности), ось x – перпендикулярна к этой границе: $x \leq h$ (рисунок 1). Физико-механические свойства массива характеризуются следующими постоянными: ν – коэффициент Пуассона, μ – модуль сдвига, ρ – плотность.

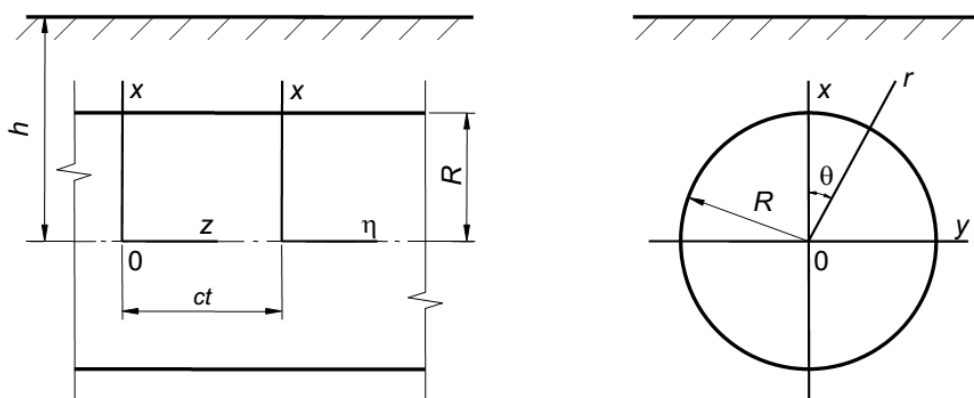


Рисунок 1 – Расчётная схема неподкреплённого тоннеля

Определим реакцию полупространства на движущуюся с постоянной скоростью c по поверхности полости в направлении оси z нагрузку интенсивностью P . Скорость движения нагрузки принимаем дозвуковой, то есть меньше скорости распространения волн сдвига в массиве.

Для этого воспользуемся уравнениями движения упругой среды в векторной форме [8].

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где $\lambda = 2\mu\nu/(1-2\nu)$, \mathbf{u} – вектор смещения упругой среды, ∇^2 – оператор Лапласа.

Поскольку рассматривается установившийся процесс, то картина деформаций стационарна по отношению к движущейся нагрузке. Поэтому можно перейти к связанной с нагрузкой подвижной декартовой $x, y, \eta = z - ct$ или цилиндрической $r, \theta, \eta = z - ct$ системе координат.

Тогда уравнение (1) переписывается в виде

$$\left(M_p^{-2} - M_s^{-2}\right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + M_s^{-2} \nabla^2 \mathbf{u} = \partial^2 \mathbf{u} / \partial \eta^2. \quad (2)$$

Здесь $M_p = c/c_p, M_s = c/c_s$ – числа Маха; $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ – скорости распространения волн расширения-сжатия и сдвига в массиве.

При действии движущейся нагрузки на поверхность полости, имеем

$$\sigma_{rj} \Big|_{r=R} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta, \quad (3)$$

где σ_{rj} – компоненты тензора напряжений в массиве, $P_j(\theta, \eta)$ – составляющие интенсивности подвижной нагрузки $P(\theta, \eta)$ в подвижной цилиндрической системе координат.

Так как граница полупространства свободна от нагрузок, то, при $x = h$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xy} = \sigma_{x\eta} = 0. \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (2), выразив \mathbf{u} через потенциалы Ламе [9, 10]

$$\mathbf{u} = \operatorname{grad} \varphi_1 + \operatorname{rot}(\varphi_2 \mathbf{e}_\eta) + \operatorname{rot} \operatorname{rot}(\varphi_3 \mathbf{e}_\eta), \quad (5)$$

где \mathbf{e}_η – орт оси η .

Из (2) и (5) следует, что потенциалы φ_j удовлетворяют видоизменённым волновым уравнениям

$$\nabla^2 \varphi_j = M_j^2 \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial \eta^2}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Здесь $M_1 = M_p, M_2 = M_3 = M_s$.

Рассмотрим действие на поверхность полости синусоидальной по η движущейся нагрузки с произвольной зависимостью от угловой координаты

$$P(\theta, \eta) = p(\theta)e^{i\xi\eta}, \quad p(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n e^{in\theta}, \tag{7}$$

$$P_j(\theta, \eta) = p_j(\theta)e^{i\xi\eta}, \quad p_j(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{nj} e^{in\theta}, \quad j = r, \theta, \eta,$$

где константа ξ определяет период $T = 2\pi/\xi$ действующей нагрузки.

В установившемся состоянии зависимость всех величин от η имеет вид (7), поэтому

$$\Phi_j(r, \theta, \eta) = \Phi_j(r, \theta)e^{i\xi\eta}. \tag{8}$$

Подставляя (8) в (6), получим видоизменённые уравнения Гельмгольца

$$\nabla_2^2 \Phi_j - m_j^2 \xi^2 \Phi_j = 0, \quad j = 1, 2, 3. \tag{9}$$

Здесь ∇_2^2 – двумерный оператор Лапласа, $m_j^2 = 1 - M_j^2, m_1 = m_p, m_2 = m_3 = m_s$.

Представив компоненты напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива через потенциалы Ламе можно получить выражения для перемещений u_l и напряжений σ_{lm} в декартовой $(l, m = x, y, \eta)$ и цилиндрической $(l, m = r, \theta, \eta)$ системах координат как функции от Φ_j . Дальнейшее решение задачи сводится к интегрированию уравнений (9) при выполнении граничных условий (3), (4). Для определения компонент НДС массива необходимо определить Φ_j .

При дозвуковой скорости движения нагрузки $M_s < 1$ ($m_s > 0$), и решения уравнений (9) можно представить через суперпозиции поверхностных цилиндрических $\Phi_j^{(1)}$ и плоских $\Phi_j^{(2)}$ волн [1, 3]

$$\Phi_j = \Phi_j^{(1)} + \Phi_j^{(2)}, \tag{10}$$

$$\Phi_j^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} K_n(k_j r) e^{in\theta}, \quad \Phi_j^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \exp\left(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}\right) d\zeta,$$

где $K_n(k_j r)$ – функции Макдональда, $k_j = |m_j \xi|$; $a_{nj}, g_j(\xi, \zeta)$ – неизвестные коэффициенты и функции, подлежащие определению, $j = 1, 2, 3$.

Как показано в [1, 3], представление потенциалов в форме (10) с использованием условий (3) и (4), при скоростях нагрузки меньших, чем скорость волны Рэлея c_R в рассматриваемой среде, приводит к системам линейных алгебраических уравнений с определителями $\Delta_n(\xi, c)$ относительно неизвестных коэффициентов a_{nj} , для решения которых может быть использован метод последовательных отражений.

Если определители $\Delta_n(\xi, c)$ не равны нулю, определив коэффициенты a_{nj} , можно вычислить компоненты напряжённо-деформированного состояния среды.

Как показали исследования указанных определителей, их обращение в ноль возможно только при скоростях нагрузки не меньшей, чем скорость рэлеевской волны, которая несколько ниже скорости волн сдвига в среде [11].

Заметим, что исключая из постановки задачи граничные условия (4) и исключая из (10) $\Phi_j^{(2)}$, получим решение аналогичной задачи для упругого пространства, моделирующей тоннель глубокого заложения.

2 Численный анализ НДС породного массива. Исследуем напряжённо-деформированное состояние окружающего тоннель радиусом $R = 1$ м породного массива при разной глубине его заложения h в случае действия на него движущейся с постоянной скоростью $c = 100$ м/с нормальной осесимметричной синусоидальной нагрузки $P_r = P$ с амплитудой P_A (Па) и периодом $T = 2\pi$ (м), оказывающей наибольшее давление на поверхность тоннеля в начале подвижной системы координат ($\eta = 0$). Окружающая тоннель порода – алевролит ($\nu = 0,2$, $\mu = 2,535 \cdot 10^9$ Па, $\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_s = 1006,4$ м/с, $c_R = 917$ м/с).

В таблицах 1 – 4 приведены результаты расчётов НДС окрестности тоннеля при разной глубине его заложения. В таблицах приняты следующие обозначения: $u_r^* = u_r \mu / RP_A$, $u_\theta^* = u_\theta \mu / RP_A$, $\sigma_{rr}^* = \sigma_{rr} / P_A$, $\sigma_{\theta\theta}^* = \sigma_{\theta\theta} / P_A$, $\sigma_{\eta\eta}^* = \sigma_{\eta\eta} / P_A$, $\sigma_{r\theta}^* = \sigma_{r\theta} / P_A$.

Таблица 1 – Компоненты НДС окрестности тоннеля при $\eta = y = 0$.

h/R	Комп. НДС	x/R											
		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	
		1,0	-1,0	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8	-2,0	-2,2	-2,4	-2,6	-2,8	-3,0
2,0	u_r^*	0,764 0,368	0,695 0,293	0,646 0,237	0,614 0,194	0,593 0,160	0,550 0,134	-	-	-	-	-	-
	σ_{rr}^*	-1,013 -0,993	-0,702 -0,735	-0,417 -0,567	-0,191 -0,443	-0,028 -0,344	0,057 -0,255	-	-	-	-	-	-
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,388 0,629	0,451 0,404	0,449 0,273	0,481 0,186	0,586 0,120	0,920 0,063	-	-	-	-	-	-
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,795 -0,407	-0,420 -0,258	-0,150 -0,158	0,084 -0,091	0,325 -0,045	0,614 -0,015	-	-	-	-	-	-
3,0	u_r^*	0,444 0,379	0,371 0,305	0,316 0,248	0,275 0,204	0,245 0,169	0,222 0,140	0,205 0,117	0,194 0,097	0,186 0,082	0,181 0,069	0,170 0,059	
	σ_{rr}^*	-1,001 -1,000	-0,735 -0,743	-0,547 -0,574	-0,406 -0,453	-0,296 -0,364	-0,208 -0,295	-0,136 -0,240	-0,077 -0,195	-0,030 -0,159	0,003 -0,128	0,006 -0,102	
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,589 0,622	0,407 0,407	0,289 0,278	0,213 0,196	0,164 0,141	0,133 0,103	0,117 0,076	0,112 0,056	0,120 0,041	0,142 0,029	0,195 0,020	
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,512 -0,424	-0,325 -0,269	-0,202 -0,167	-0,118 -0,099	-0,058 -0,053	-0,012 -0,024	0,028 -0,005	-0,067 0,007	0,113 0,013	0,171 0,016	0,248 0,017	

Таблица 2 – Компоненты НДС окрестности тоннеля при $\eta = 0, r/R = 1$.

h/R	Комп. НДС	θ , град.									
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
2,0	u_r^*	0,764	0,696	0,554	0,432	0,368	0,351	0,358	0,366	0,368	0,368
	u_θ^*	0,0	-0,138	-0,189	-0,157	-0,096	-0,044	-0,015	-0,005	-0,003	0,0
	σ_{rr}^*	-1,013	-1,008	-0,994	-0,990	-0,998	-1,006	-1,008	-1,005	-0,999	-0,993
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,388	0,626	1,003	1,121	1,017	0,844	0,692	0,616	0,617	0,629
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,795	-0,720	-0,575	-0,473	-0,429	-0,421	-0,426	-0,426	-0,415	-0,407
3,0	u_r^*	0,444	0,434	0,412	0,391	0,379	0,375	0,376	0,377	0,379	0,379
	u_θ^*	0,0	-0,023	-0,032	-0,029	-0,019	-0,009	-0,003	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-1,001	-1,001	-1,000	-0,999	-1,000	-1,000	-1,001	-1,001	-1,000	-1,000
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,589	0,621	0,679	0,707	0,696	0,669	0,646	0,632	0,625	0,622
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,512	-0,499	-0,472	-0,448	-0,434	-0,427	-0,425	-0,424	-0,424	-0,424
4,0	u_r^*	0,399	0,390	0,386	0,382	0,380	0,379	0,379	0,380	0,380	0,380
	u_θ^*	0,0	-0,004	-0,006	-0,005	-0,004	-0,002	-0,001	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,621	0,626	0,637	0,643	0,641	0,636	0,632	0,629	0,627	0,627
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,443	-0,440	-0,434	-0,429	-0,426	-0,424	-0,423	-0,423	-0,423	-0,423
5,0	u_r^*	0,382	0,382	0,381	0,381	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380
	u_θ^*	0,0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000	-1,000
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,627	0,628	0,630	0,631	0,630	0,630	0,629	0,628	0,628	0,628
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,427	-0,426	-0,425	-0,424	-0,423	-0,423	-0,423	-0,423	-0,423	-0,423

Таблица 3 – Компоненты НДС окрестности тоннеля при $\eta = 0$, $r/R = 2$.

h/R	Комп. НДС	θ , град.									
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
2,0	u_r^*	0,550	0,483	0,315	0,196	0,128	0,110	0,122	0,136	0,121	0,134
	u_θ^*	0,0	-0,030	-0,079	-0,088	-0,062	-0,031	-0,005	-0,013	-0,004	0,0
	σ_{rr}^*	0,057	-0,047	-0,222	-0,240	-0,290	-0,288	-0,279	-0,238	-0,350	-0,255
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,920	0,439	0,268	0,204	0,216	0,164	0,129	0,065	0,151	0,063
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	0,614	0,370	0,094	-0,017	-0,033	-0,031	-0,031	-0,027	-0,013	-0,015
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	0,023	-0,042	-0,036	0,012	0,029	0,079	-0,027	0,011	0,0
3,0	u_r^*	0,222	0,205	0,174	0,151	0,140	0,136	0,137	0,138	0,139	0,140
	u_θ^*	0,0	-0,022	-0,027	-0,022	-0,014	-0,007	-0,003	-0,001	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-0,208	-0,240	-0,281	-0,293	-0,293	-0,293	-0,292	-0,295	-0,296	-0,295
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,133	0,145	0,153	0,142	0,129	0,118	0,109	0,107	0,105	0,103
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,012	-0,020	-0,031	-0,035	-0,033	-0,030	-0,027	-0,025	-0,024	-0,024
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	-0,037	-0,029	-0,010	0,001	0,007	0,005	0,002	0,003	0,0
4,0	u_r^*	0,156	0,153	0,147	0,142	0,140	0,139	0,139	0,140	0,140	0,140
	u_θ^*	0,0	-0,005	-0,006	-0,005	-0,003	-0,002	-0,001	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-0,279	-0,284	-0,293	-0,297	-0,297	-0,296	-0,297	-0,297	-0,297	-0,298
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,107	0,110	0,114	0,113	0,109	0,107	0,106	0,105	0,104	0,104
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,029	-0,029	-0,028	-0,027	-0,025	-0,024	-0,023	-0,023	-0,022	-0,022
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	-0,008	-0,008	-0,003	0,0	0,001	0,001	0,001	0,0	0,0
5,0	u_r^*	0,143	0,143	0,142	0,141	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
	u_θ^*	0,0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-0,294	-0,295	-0,297	-0,297	-0,297	-0,297	-0,297	-0,297	-0,297	-0,297
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,105	0,105	0,106	0,106	0,105	0,105	0,105	0,104	0,104	0,104
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	-0,024	-0,024	-0,024	-0,023	-0,023	-0,023	-0,022	-0,022	-0,022	-0,022
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	-0,002	-0,002	-0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 4 – Компоненты НДС окрестности тоннеля при $\eta = 0, r/R = 3$.

h/R	Комп. НДС	$\theta, \text{град.}$									
		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
4,0	u_r^*	0,084	0,077	0,065	0,058	0,056	0,055	0,055	0,056	0,056	0,055
	u_θ^*	0,0	-0,007	-0,008	-0,005	-0,002	-0,001	0,0	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-0,072	-0,085	-0,106	-0,114	-0,112	-0,112	-0,114	-0,112	-0,113	-0,114
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,038	0,039	0,040	0,035	0,030	0,028	0,027	0,026	0,026	0,027
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	0,028	0,024	0,019	0,018	0,019	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	-0,011	-0,009	-0,001	0,001	0,0	0,001	0,001	0,0	0,0
5,0	u_r^*	0,062	0,060	0,058	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
	u_θ^*	0,0	-0,002	0,002	-0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	σ_{rr}^*	-0,104	-0,107	-0,112	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113
	$\sigma_{\theta\theta}^*$	0,027	0,028	0,029	0,028	0,027	0,027	0,026	0,026	0,026	0,026
	$\sigma_{\eta\eta}^*$	0,019	0,019	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
	$\sigma_{r\theta}^*$	0,0	-0,003	-0,002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Результаты и обсуждение

Данная статья рассмотрена, одобрена и рекомендована к изданию на заседании кафедры «Архитектура и дизайн» НАО «Торайгыров университет».

Из анализа результатов следует, что при $h/R \geq 4,0$ компоненты НДС тоннеля практически мало отличаются от одноименных компонент НДС тоннеля, расположенного в неограниченной среде. С уменьшением глубины заложения тоннеля ($h/R \leq 4,0$), изменения компонент в основном происходит в интервале $0 \leq x \leq h$.

С удалением от полости, как правило, наблюдается затухание компонент НДС массива (табл. 1 – 4). Однако, при малых h , $\sigma_{\theta\theta}^*$ и $\sigma_{\eta\eta}^*$ (в силу своего волнообразного характера изменения) на земной поверхности могут оказаться больше, чем на поверхности тоннеля. Так, при $\eta = y = 0$ и $h/R = 2,0$, $\sigma_{\theta\theta}^*$ на земной поверхности в два с лишним раз больше, чем на поверхности тоннеля (табл. 1).

Выводы

При глубине заложения тоннеля $h/R \geq 4,0$ влияние земной поверхности на его напряженно-деформированное состояние несущественно. В этом случае для его динамического расчета при действии подвижной нагрузки можно использовать более простое решение задачи, моделирующей тоннель глубокого заложения.

Список использованных источников

- 1 **Ержанов, Ж. С., Айталиев, Ш. М., Алексеева, Л. А.** Динамика тоннелей и подземных трубопроводов. – Алма-Ата : Наука, 1989. – 240 с.
- 2 **Украинец, В. Н.** Реакция упругого полупространства на бегущую вдоль оси периодическую нагрузку // Математический журнал. – Алматы. – 2005. – № 3. – С. 96–102.
- 3 **Украинец, В. Н.** Динамика тоннелей и трубопроводов мелкого заложения под воздействием подвижных нагрузок. – Павлодар : Издательство Павлодарского государственного университета, 2006. – 123 с.
- 4 **İrfan Coşkun and Demirhan Dolmaseven.** Dynamic Response of a Circular Tunnel in an Elastic Half Space, Journal of Engineering. – Vol. 2017, Article ID 6145375. – 12 p. – 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6145375>.
- 5 **Cao, Z., Sun, S., Yuan, Z., Cai, Y.** Analytical Study on the Effect of Moving Surface Load on Underground Tunnel. In: Wu W., Yu HS. (eds) Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. – Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. – Springer, Cham. 2018.
- 6 **Dwivedia, J.P., Singha, V. P.** Radha Krishna Lalb, Sakshi Devia. Dynamic Response of Lined Circular Tunnel in Linear Viscoelastic Medium Due to Moving Ring load. – Materials Today: Proceedings. – Volume 4. – Issue 2. – Part A. – 2017. – P. 3767–3775.
- 7 **Shunhua Zhou.** Dynamics of Rail Transit Tunnel Systems. – Academic Press, 2019. – 276 p.
- 8 **Слепян, Л. И.** Нестационарные упругие волны. – Л. : Судостроение, 1972. – 374 с.
- 9 **Новацкий, В.** Теория упругости. – М. : Мир, 1975. – 872 с.
- 10 **Гузь, Л. И., Кубенко, В. Д., Черевко, М. А.** Дифракция упругих волн. – Киев : Наукова думка, 1978. – 308 с.
- 11 **Тимошенко, С.П., Гудьер, Дж.** Теория упругости. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

References

- 1 **Erzhanov, Zh. S., Ajtaliev, Sh. M., Alekseeva, L. A.** Dinamika tonnelej i podzemny`x truboprovodov. [Dynamics of tunnels and underground pipelines] – Alma-Ata : Nauka, 1989. – 240 p.
- 2 **Ukrainecz, V. N.** Reakciya uprugogo poluprostranstva na begushhuyu vdol` osi periodicheskuyu nagruzku [Reaction of an elastic half-space to a periodic load running along the axis] // Matematicheskij zhurnal. – Almaty`. – 2005. – № 3. – P. 96–102.
- 3 **Ukrainets, V. N.** Dinamika tonnelej i truboprovodov melkogo zalozhenija pod vozdejstviem podvizhnyh nagruzok [Dynamics of shallow tunnels and pipelines under the influence of moving loads] (Pavlodar, Izdatel`stvo Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006. – 123 p.).

4 **İrfan Coşkun and Demirhan Dolmaseven.** Dynamic Response of a Circular Tunnel in an Elastic Half Space [İrfan Coşkun and Demirhan Dolmaseven. Dynamic Response of a Circular Tunnel in an Elastic Half Space], – Journal of Engineering. – Vol. 2017. – Article ID 6145375. – 12 p. – 2017. – <https://doi.org/10.1155/2017/6145375>.

5 **Cao, Z., Sun, S., Yuan, Z., Cai, Y.** Analytical Study on the Effect of Moving Surface Load on Underground Tunnel. [Cao Z., Sun S., Yuan Z., Cai Y. Analytical Study on the Effect of Moving Surface Load on Underground Tunnel] In: Wu W., Yu HS. (eds). – Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. – Springer, Cham. 2018.

6 **Dwivedia, J. P., Singha, V. P.** Radha Krishna Lalb, Sakshi Devia. Dynamic Response of Lined Circular Tunnel in Linear Viscoelastic Medium Due to Moving Ring load. [J.P. Dwivedia, V.P. Singha, Radha Krishna Lalb, Sakshi Devia. Dynamic Response of Lined Circular Tunnel in Linear Viscoelastic Medium Due to Moving Ring load] – Materials Today: Proceedings. – Volume 4. – Issue 2. – Part A. – 2017. – P. 3767–3775.

7 **Shunhua Zhou.** Dynamics of Rail Transit Tunnel Systems. [Shunhua Zhou. Dynamics of Rail Transit Tunnel Systems] – Academic Press, 2019. – 276 p.

8 **Slepyan, L. I.** Nestacionarny`e uprugie volny. [Slepyan, L.I., Non-stationary elastic waves.] – L. : Sudostroenie, 1972. – 374 p.

9 **Novaczkiy, V.** Teoriya uprugosti. [Novatsky V. Theory of elasticity.] – Moscow : Mir, 1975. – 872 p.

10 **Guz', L. I., Kubenko, V. D., Cherevko, M. A.** Difrakciya uprugix voln. [L. I. Guz', V.D. Kubenko, M.A. Cherevko. Diffraction of elastic waves] – Kiev: Naukova dumka, 1978. – 308 p.

11 **Timoshenko, S.P., Gud`er Dzh.** Teoriya uprugosti. [Timoshenko S. P., Goodyear J. Theory of elasticity.] – M. : Nauka, 1979. – 560 p.

Материал поступил в редакцию 15.06.21.

М. И. Котова¹, *Е. М. Ыбыраева², А. В. Украинаец³

¹Математика және математикалық модельдеу институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

^{2,3}Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал 15.06.21 баспаға түсті.

ЖЫЛЖЫМАЛЫ ПЕРИОДТЫ ЖҮКТЕМЕ ӘСЕРІНЕН ТУННЕЛЬ ТЕРЕҢДІГІНІҢ ОНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ КҮЙІНЕ ӘСЕР

Серпінді жарты кеңістіктегі шексіз ұзын дөңгелек цилиндрлік қуысқа қозғалмалы синусоидалық жүктің әсер етуі туралы есепті шешуге негізделген, әр түрлі тереңдіктегі қолдау көрсетілмеген туннельді қоршап тұрған жыныс массасының кернеулі-деформациялық күйі оған осы жүктеме әсерінен зерттеледі. Жарты кеңістіктің қозғалысы қозғалмалы координаттар

жүйесіндегі серпімділік теориясының динамикалық теңдеулерімен сипатталады, оны шешу үшін айнымалыларды толық емес бөлу әдісі ұсынылады. Шешім жүктің жылдамдығы қарастырылатын ортадағы Рэлей толқынының жылдамдығынан аз болған жағдайда құрылады. Есептеу нәтижелерін талдаудан туннельдің тереңдігі оның радиусының төртеуінен артық болғанда, жер бетінің оның кернеулік-деформациялық күйіне әсері шамалы болмайтындығы шығады.

Кілтті сөздер: серпімді жарты кеңістік, дөңгелек цилиндрлік қуыс, қозғалмалы синусоидалы жүктеме, Рэлей толқындары, тау массасы, туннель, туннель тереңдігі, кернеулер-деформация күйі.

M. I. Kotova¹, *Ye. M. Ibrayeva², A. V. Ukrainets³

¹Institute of mathematics and mathematical modeling,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan⁶ Pavlodar.

Material received on 15.06.21.

INFLUENCE OF THE TUNNEL DEPTH ON ITS STRESS-STRAIN STATE UNDER THE ACTION OF A MOVING PERIODIC LOAD

Based on the solution of the problem of the action of a moving sinusoidal load on an infinitely long circular cylindrical cavity in an elastic half-space, the stress-strain state of the rock mass surrounding an unsupported tunnel of different depth of laying under the action of this load is investigated. The motion of the half-space is described by the dynamic equations of the theory of elasticity in a mobile coordinate system, for the solution of which the method of incomplete separation of variables is proposed. The solution is developed for the case when the velocity of the load is less than the velocity of the Rayleigh wave in the medium under consideration. From the analysis of the calculation results, it follows that when the depth of the tunnel is more than four of its radii, the influence of the earth's surface on its stress-strain state is insignificant.

Keywords: elastic half-space, circular cylindrical cavity, mobile sinusoidal load, Rayleigh waves, rock mass, tunnel, tunnel depth, stress-strain state.

Теруге 15.06.21 ж. жіберілді. Басуға 29.06.21 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
3,99 Мб RAM
Шартты баспа табағы 13,9. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген З. С. Искакова
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3809

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
nitk.tou.edu.kz