

УДК 622.011.4; 622.023+539.3

*Ж. К. МАСАНОВ, Л. Б. АТЫМТАЕВА, Г. С. МЫРЗАХМЕТОВА, Б. Е. ЯГАЛИЕВА, Б. АКТАНОВА*

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ КРУГОВЫХ ВЫРАБОТОК МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ С ЖЕСТКОЙ ОБДЕЛКОЙ В АНИЗОТРОПНОМ МАССИВЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ ДИФРАКЦИИ СДВИГОВЫХ ВОЛН**

Работа посвящена анализу исследований по определению напряженно-деформированного состояния упругого транстропного массива с наклонной плоскостью изотропии, содержащем серию круговых выработок не-глубокого заложения, подкрепленных недеформируемой крепью при стационарной дифракции упругих SH-волн сдвига. В работе на основании строгих аналитических решений задач динамики анизотропного много-связного полупространства получены новые эффекты и закономерности распределения напряжений и перемещений на контурах мелко заложенных выработок, показано влияние дневной поверхности, физико-механические параметры среды и падающих волн на их напряженно-деформированное состояние.

Анализ напряженно-деформированного состояния подземных сооружений во взаимодействии с окружающей породной толщей является актуальной проблемой в вопросах динамической устойчивости подземных конструкций, особенно в условиях разрушительных воздействий землетрясений, промышленных взрывов и любой другой сейсмической активности.

Выделение сооружений мелкого заложения вызвано особым характером проявления сейсмических, динамических воздействий на напряженно-деформированное состояние вблизи них. Это связано главным образом с тем, что расчет сооружений на сейсмостойкость необходимо вести на действие не только объемных сейсмических волн, но и поверхностных. При этом нередко появляется необходимость учета волн, отраженных от дневной поверхности. Здесь возникает ряд задач, обусловленных динамическим взаимодействием подземных и наземных сооружений. Так, например, глубина заложения тоннелей метрополитенов подбирается с точки зрения не только необходимой их прочности и устойчивости, но и допустимой величины уровня вибраций в зданиях и сооружениях, расположенных вблизи этих тоннелей. Уточнение сейсмичности сооружений мелкого заложения в зависимости от глубины их расположения, по-видимому, играет важную роль для районов, характеризующихся малой глубиной гипоцентров землетрясений.

Для исследования вопросов дифракции волн на подземных сооружениях необходимо учитывать модели породной толщи, в которой данные

подземные сооружения заложены. Существует широкий выбор моделей массивов, содержащих неоднородности (выработки, полости), начиная с изотропного (наиболее изученного) и заканчивая анизотропной моделью массива с усложненными физико-механическими свойствами. Реальный породный массив не является изотропным. Различные способы залегания слоев породного массива, методы их напластования предопределяют анизотропную модель массива. Реально удовлетворяющей анизотропным свойствам массива является модель транстропного массива с наклонной плоскостью изотропии, характеризующей складчатые слои пород. Анизотропная (транстропная) модель складчато-слоистого массива с наклонными плоскопараллельными слоями вблизи подземного сооружения дает возможность подразделять горизонтальные выработки, в зависимости от пространственной ориентации, на штреки (пройденные вкrest простириания), квершлаги и так называемые диагональные выработки, которые занимают промежуточное положение между штреками и квершлагами [1]. Такие подземные сооружения находят применение в системе подготовительных и капитальных горных выработок. Если мощность каждого слоя породного массива, по крайней мере, на порядок меньше характерного поперечного размера протяженной горной выработки, такой массив может быть представлен трансверсально-изотропным (транстропным) телом с плоскостью изотропии, совпадающей с плоскостью простириания слоев. В подобном породном массиве неодно-

родности (выработки, полости), моделирующие подземные сооружения, в большинстве случаев, имеют горизонтальную протяженность.

В зависимости от горно-геологического строения и физико-механических свойств слагающих горных массивов подземные выработки подкрепляются различными обделками. Для того, чтобы оптимально улучшить их эксплуатационные качества, необходимо рассматривать динамические контактные задачи для выработок с подкреплением в транстронном массиве.

В данной статье рассматривается анализ напряженно-деформированного состояния штрекообразных горизонтальных выработок не-глубокого заложения, подкрепленных абсолютно жесткой обделкой, пройденных в транстронном массиве вкрест наклонной плоскости изотропии.

Для проведения динамического анализа были получены расчетные формулы на основе теории обобщенной суперпозиции, метода возмущения формы, метода изображений [2, 3], а также теории цилиндрических функций, методов теории функций комплексных переменных, путем аффинных преобразований и методов переразложения цилиндрических функций на контурах выработок. В результате аналитических исследований были получены бесконечные системы линейных алгебраических уравнений относительно цилиндрических функций Ханкеля и Бесселя, решаемые методом редукции [4].

Для получения численных результатов рассматривались круговые выработки, подкрепленные недеформируемой крепью, пройденные в транстронном массиве (алевролит) с упругими характеристиками:  $E_1 = 1,074 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>,  $E_2 = 0,523 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>,  $G_2 = 0,12 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>,  $v_1 = 0,413$ ,  $v_2 = 0,198$ ; волна распространяется под углом  $\alpha$  к горизонтальной оси  $Ox_1$ ; изменение частот берется в диапазоне от 1 до 100 Гц, изменение угла наклона плоскости изотропии  $\varphi$  от 0° до 180°.

В соответствии с теоретическим решением для количественного и качественного анализа напряженно-деформированного состояния круговых выработок, пройденных на глубине  $\delta$ , в транстронном массиве, разработан алгоритм и составлен пакет прикладных программ в среде Matlab 7.0.

С целью тестирования составленной программы по анализу закономерности распределения упругих напряжений и перемещений вблизи круговых выработок в полуплоскости от воздействия

SH-волн сдвига задача была решена (при аналогичных исходных параметрах) для случая, когда глубина  $\delta \geq 12 R$ , т.е. считалось, что выработка пройдена глубоко. Сравнительный анализ значений касательных контурных напряжений и продольных перемещений для плоскости и полуплоскости ( $\delta = 12 R$ ) приведены в таблице. Берутся значения для левой выработки, в случае правой выработки значения идентичны.

Результаты расчета касательных напряжений  $|\sigma_{\theta 3}|$  и продольных перемещений  $u_3$  на контуре круговых полостей получены на базе решения системы [4], в которой удерживалось не более 16 уравнений. Это позволило удовлетворить граничным условиям с погрешностью менее 1% для продольных перемещений  $u_3$  в отраженной волне, по отношению к амплитудным значениям перемещений  $u_3^*$  в падающей волне.

На рис. 1 приведены значения касательных напряжений  $|\sigma_{\theta 3}|$  и продольных перемещений  $u_3$  при падении на выработки под углом  $\alpha = 0^\circ$  плоской SH – волны, когда расстояние от выработок до плоской границы составляет 3 радиуса окружности выработок. На графике показано влияние угла наклона плоскости изотропии  $\varphi$  на амплитудные характеристики касательных напряжений  $|\sigma_{\theta 3}|$ , отнесенные к максимальным напряжениям  $|\sigma_{\theta 3}^*|$  в падающей волне, и продольных перемещений  $u_3$ , отнесенные к максимальным значениям перемещений в падающей волне. Частота волны берется сейсмическая  $\omega = 15$  Гц. Угол падения волны  $\alpha$  изменялся от 0° до 90°, угол наклона плоскости изотропии  $\varphi$  изменялся от 0° до 90° с шагом 30°. На графике (рис. 1) показаны графики распределения напряжений и перемещений на правой и левой выработках.

Как видно, изменение угла наклона плоскости изотропии пород  $\varphi$  существенно влияет на качественную и количественную картину распределения напряжений и перемещений на контуре выработок.

Можно отметить, что при угле наклона плоскости изотропии  $\varphi = 60^\circ$  наблюдаются максимальные распределения напряжений. Значения перемещений симметричны относительно плоскости изотропии.

Проанализируем закономерности распределения динамических напряжений  $|\sigma_{\theta 3}|$  на контуре подкрепленных недеформируемой обделкой выработок в зависимости от величин частот падающей

**Сравнительный анализ значений касательных контурных напряжений и продольных перемещений  
для плоскости и полуплоскости ( $\delta_i = 12 R$ )**

Угол на контуре, $\theta$ , в град	Продольные перемещения $u_3 / u_{3}^{*}$ , на левой выработке		Касательные напряжения, $ \sigma_{\theta 3}  /  \sigma_{\theta 3}^{*} $ , на левой выработке	
	полуплоскость, $\delta = 12 R$	плоскость	полуплоскость, $\delta = 12R$	плоскость
0	0,77414753	0,781889005	1,38788814	1,376785035
10	0,89149569	0,900410647	0,34005872	0,33733825
20	1	0,99	1,50879673	1,496726356
30	0,87657256	0,885338286	1,37454531	1,363548948
40	0,62143606	0,627650421	0,80969326	0,803215714
50	0,39305643	0,396986994	0,44831669	0,444730156
60	0,2392879	0,241680779	0,29500296	0,292642936
70	0,14835897	0,14984256	0,15108328	0,149874614
80	0,10133236	0,102345684	0,14161877	0,14048582
90	0,08681709	0,087685261	0,16612654	0,164797528
100	0,10133236	0,102345684	0,19519358	0,193632031
110	0,14835897	0,14984256	0,36366553	0,360756206
120	0,2392879	0,241680779	0,49323093	0,489285083
130	0,39305643	0,396986994	0,69109903	0,685570238
140	0,62143606	0,627650421	0,90422368	0,896989891
150	0,87657256	0,885338286	0,79094377	0,78461622
160	1	0,99	1,03388954	1,025618424
170	0,89149569	0,900410647	3,23292337	3,207059983
180	0,77414753	0,781889005	0,39393286	0,390781397
190	0,99080838	1,000716464	0,93303589	0,925571603
200	0,98090141	0,990710424	2,55393729	2,533505792
210	0,62554162	0,631797036	1,95386456	1,938233644
220	0,33812709	0,341508361	1,33413542	1,323462337
230	0,22012616	0,222327422	1,01360248	1,00549366
240	0,20998987	0,212089769	0,82472625	0,81812844
250	0,22569065	0,227947557	0,60494475	0,600105192
260	0,23842372	0,240807957	0,5314218	0,527170426
270	0,24290109	0,245330101	0,69729727	0,691718892
280	0,23842372	0,240807957	0,92452664	0,917130427
290	0,22569065	0,227947557	1,21272105	1,203019282
300	0,20998987	0,212089769	1,29110712	1,280778263
310	0,22012616	0,222327422	1,22292095	1,213137582
320	0,33812709	0,341508361	1,03418719	1,025913692
330	0,62554162	0,631797036	0,67636512	0,670954199
340	0,98090141	0,990710424	0,28728706	0,284988764
350	0,99080838	1,000716464	0,93561556	0,928130636
360	0,77414753	0,781889005	1,38788814	1,376785035

волны сдвига. На рис. 2 приведены эпюры контурных напряжений  $|\sigma_{\theta 3}|$  для разных частот падающей волны ( $\omega = 15, 50, 100$  Гц), когда угол падения волны  $\alpha = 0^\circ$ , угол наклона плоскости изотропии  $\varphi = 0^\circ$ .

Как видно из рисунка, наибольшая концентрация напряжений и продольных перемещений наблюдается при частоте  $\omega = 15$  Гц (сейсмической частоте). С увеличением частоты значения напряжений и перемещений имеют тенденцию к уменьшению. Аналогичная картина наблю-

дается и при других углах наклона плоскости изотропии.

На рис. 3 приведен график зависимости контурных касательных напряжений от величины перемычки между выработками  $R_{ij}$  на контуре левой выработки (аналогичная картина наблюдается на контуре правой выработки) при расстоянии до плоской границы  $\delta_i = 3 R$ ,  $\delta_j = 3 R$ . Из рисунка видно, что увеличение расстояния между выработками уменьшает пики максимальных напряжений.

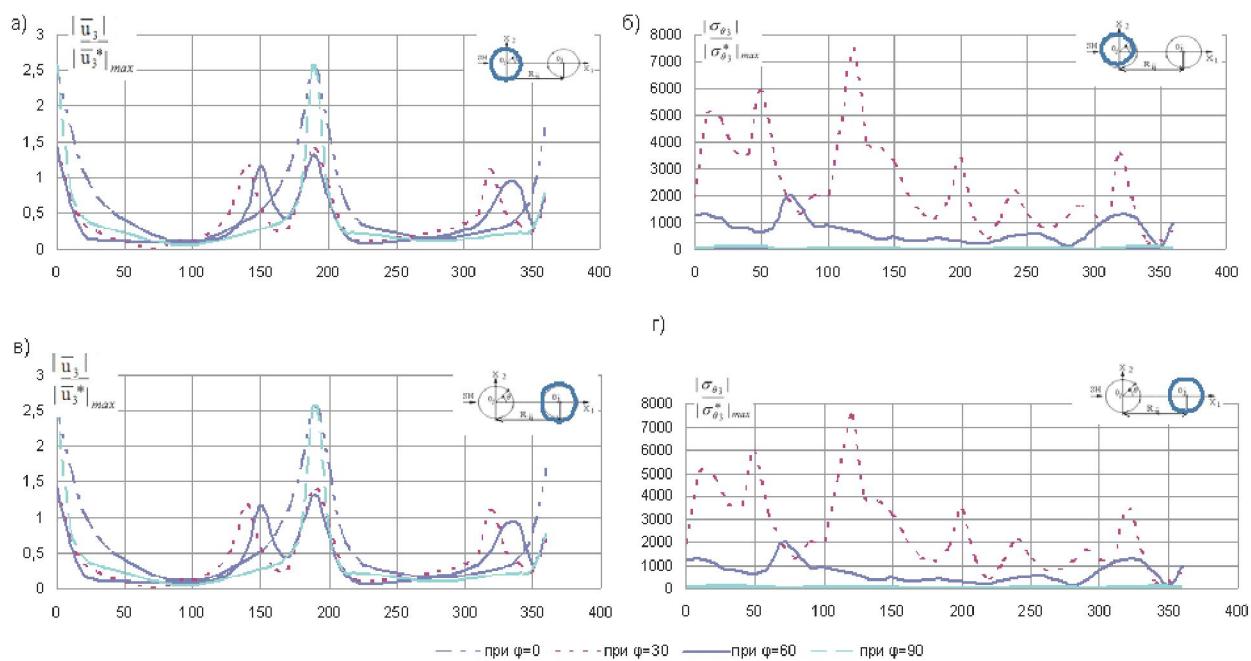


Рис. 1

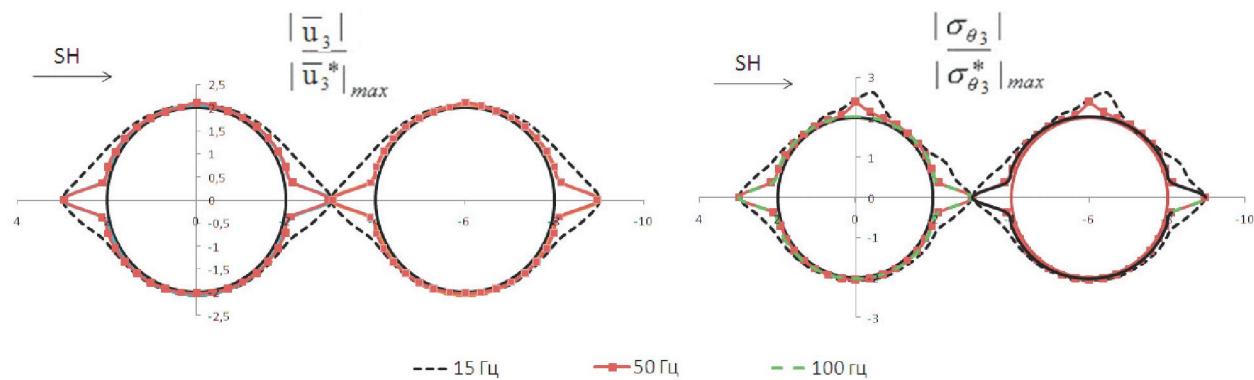


Рис. 2

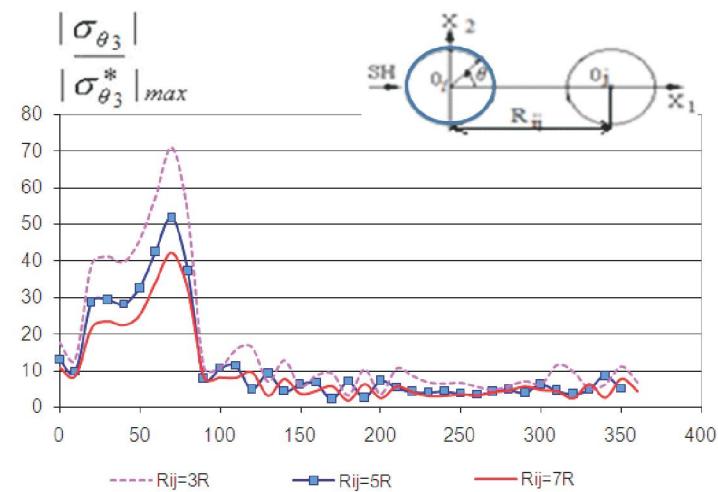


Рис. 3

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ержанов Ж.С., Айтмалиев Ш.М., Масанов Ж.К. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве. Алма-Ата: Наука, 1980. 213 с.
2. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Черевко М.А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978. 310 с.
3. Космодамянский А.С., Сторожев В.И. Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред. Киев: Наукова думка, 1985. 178 с.
4. Масанов Ж.К., Атымтаева Л.Б., Мырзахметова Г.С., Ягапшиева Б.Е. Теоретические аспекты исследования динамического напряженного состояния анизотропного массива с полостями неглубокого заложения // Механика и машиноведение. 2008. № 4. С. 101-106.

## Резюме

SH-толқын жылжуының стационарлық дифракциясында, деформацияланбаган бекітпемен бекітілген жер бетінде жақын орналасқан дөңгелек қазбалар топтамасы бар және изотропияның көлбей жазықтықтарымен серпімді транстропты тау жынысының кернеулік-деформациялық күйін анықтау бойынша зерттеулер талдаған. Жер бетінде жақын орналасқан қазбалар контурында

орын ауыстыру мен кернеулердің таралу заңдылықтары және анизотропиялық көп байланысты жартылай кеңістікте динамиканың есептерін қatal аналитикалық шешімдері негізінде жана эффекттер алыныш, жер бетінде өсери, орталардың физика-механикалық параметрлері мен құлау толқындарының кернеулік-деформациялық күйі көрсетілген.

## Summary

The authors is devoted to the research analysis on identifying of stress-strain condition of elastic transtropic massif with inclined plane of isotropy, which contains a number of mutual influenced shallow located circular mine roadways supported by underformable lining at the case of a stationary diffraction of elastic SH-waves. In this paper, on base of rigorous analytical solutions of the dynamics of anisotropic multilinked halfspace the new effects and regularities of distribution of shallow located mine roadways contour stresses and deformations are obtained, impact of daily surface, physical and mechanical massif and waves properties into their stress-strain condition are shown.

Институт механики и машиноведения

им. У. А. Джолдасбекова,

г. Алматы

Поступила 30.03.2010г.