

## ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ ВОЛН НА БЛОЧНЫХ СТРУКТУРАХ ГОРНЫХ МАССИВОВ

*Курманалиев К., Султангазиева А.К., Турдукулова А.К.  
Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,  
Бишкек, Кыргызская Республика*

*Рассмотрены задачи о взаимодействии сейсмической волны с регулярной системой включений (блочные структуры с правильными формами), расположенные вблизи свободной поверхности горного массива.*

*Consider the problem of the interaction of seismic waves with a regular system of inclusions (block structures with the correct forms), located near the free surface of the rock mass.*

Территория Кыргызской Республики в основном состоит из горных массивов. Горные массивы моделируются блочными структурами из-за неоднородности сред, разделы которых являются границами и представляет контактные поверхности. Таким образом, в задачах с упругой постановкой можно рассматривать неоднородную среду с блочными включениями в макрозадачах и в реальных с фундаментами, полостью, тоннелей, сетевых сооружений, подземных коммуникаций, подземных городов. В [1] дан обзор аналогичных задач с действием ступенчатой волны Хевисайда и монохроматического источника идущих из вне и изнутри с выходом на свободную поверхность. В котором изучены основные особенности процесса и количественно-качественная оценка. Справедливость решений рассмотрены на модельных задачах с одиночными включениями правильной формы и сравнены существующими решениями аналогичных задач.

Решение  $f_*(t)$  для прямоугольного импульса конечной длительности могут быть получены простым вычитанием из решений  $f(t)$  для ступенчатой нагрузки Хевисайда той же функции с запаздывающим аргументом:

$$f_*(t) = f(t) - f(t - t_0)$$

Так, например, используя известные [2] асимптотические формулы для  $\sigma_{xx}$  и  $F_x$

$$F_x = \int_0^{2\pi} ([\sigma_{2\theta}] \sin \theta - [\sigma_2] \cos \theta) d\theta$$

Сила действующая на цилиндр в направлении движения волны определена напряжениями по первой форме, получим что при действии прямоугольного импульса длительности  $t_0$  на одиночное неподвижное включение амплитуды  $\sigma_{xx}$  и  $F_x$  убывают со временем ( $t \rightarrow \infty$ ) пропорционально  $\sigma_0 t_0 / \ln^*$ . Из простых физических соображений следует, что в случае импульса любой формы  $\sigma_0(t)$  и длительности  $t$  асимптотика ( $t \rightarrow \infty$ ) возмущений пропорциональна  $T / \ln t$ , где  $T = \int_0^t \sigma(t) dt$ . Таким образом, напряжения на контуре включения и суммарная сила, действующая на него, затухают сравнительно медленно и могут на протяжении достаточно большого интервала времени (после окончания действия импульса) оставаться заметным.

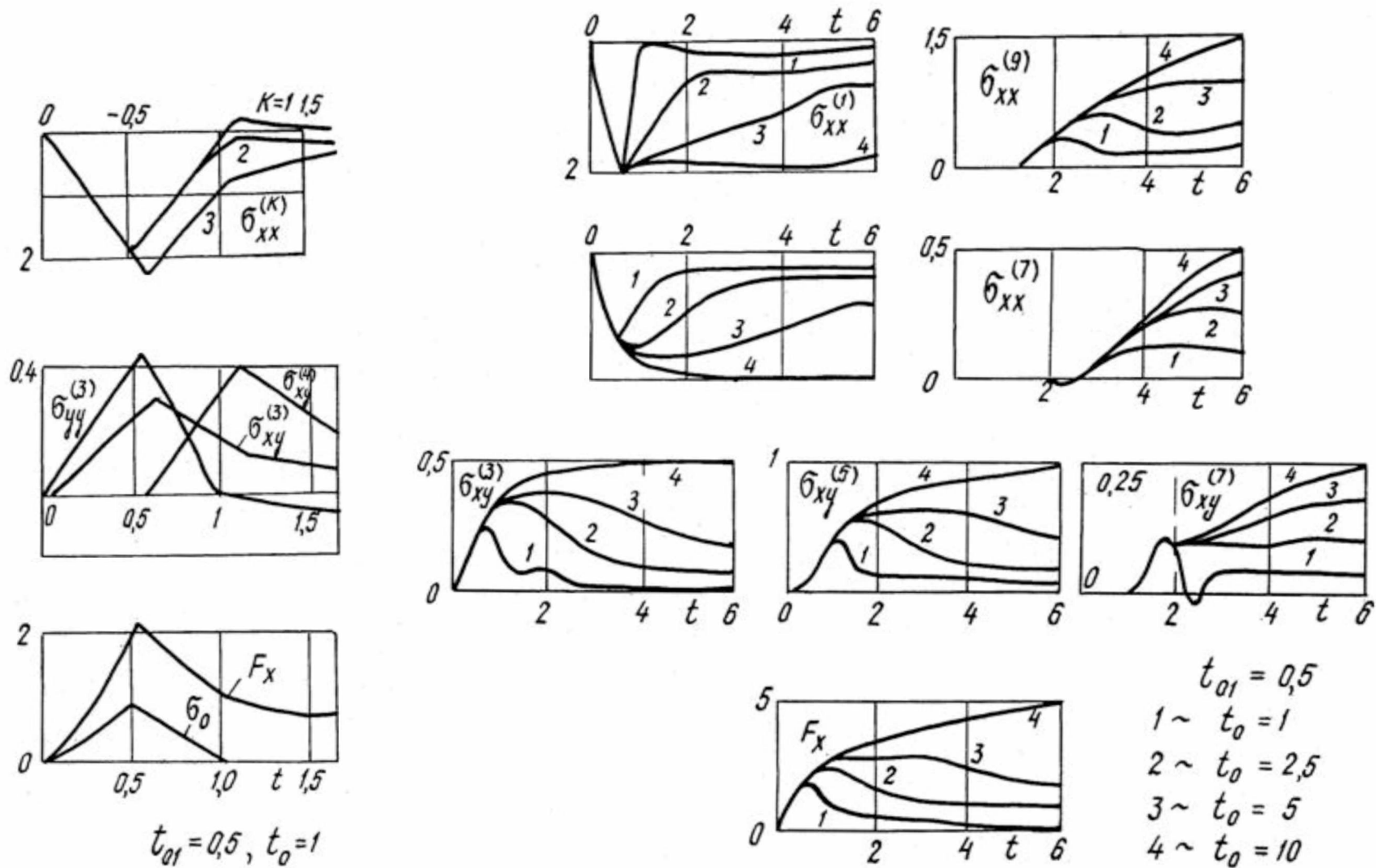


Рис.1. Влияние продолжительности действия импульса на НДС контура неподвижного тела

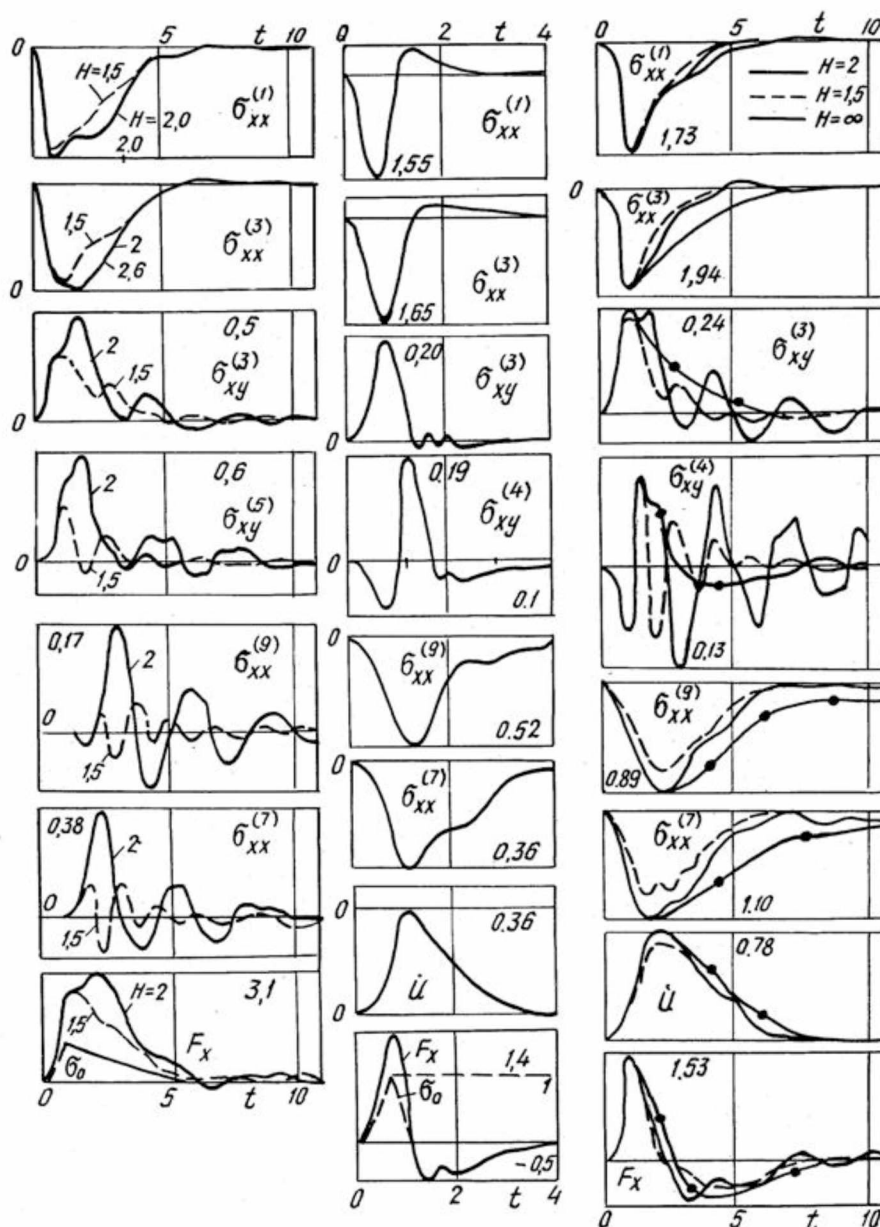


Рис.2.  $m = \infty$   $t_{01} = 0,5$ ,  $t_1 = 5$  Рис.3.  $m = 2$   $t_0 = 0,5$ ,  $t_1 = 1$  P

Рис.4.  $m = 2$   $t_0 t = 0,5$ ,  $t_1 = 5$  при  $t \geq 4t_0$  рис. 4.) практически исчезает, после чего включение уже не движется, а напряжения равны нулю.

В этом явлении «Последствия» основное отличие процесса дифракции на неподвижном включении со сдвигом по сравнению с акустической средой, где равновесие устанавливается сравнительно быстро вслед за окончанием действия импульса после обхода волной контура.

Асимптотика не дает точных количественных результатов и не позволяет определить максимальные (пиковые) амплитуды. В численном решении предпочтительным является использование готового алгоритма для расчета процесса при действии импульсов заданной формы вместо обращения к интегралам Дюамеля (как это обычно практикуется в случае решений, полученных аналитически). Были проведены расчеты для:

а) треугольных импульсов с параметрами  $t_{01}$  (время подъема) и  $t_{02}$  (время спада нагрузки,  $t_{01} = t_{01} - t_{02}$ ;

б) экспоненциальных -  $\sigma_0(t) = \sigma_0 \exp(-t/t_0)$ ;

в) синусоидальных -  $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(2\pi t/T_0)$ ;

г) комбинированных -  $\sigma_0(t) = \sigma_0 \exp(-t/t_0) \sin(2\pi t/T_0)$ .

Первыми двумя (а, б) интерпретировалось нагружение волной относительно близкого взрыва, третьим- стационарная вибрация, четвертым- сейсмическая волна от землетрясения или дальнего взрыва большой интенсивности.

- а)  $\sigma_0(t) = \sigma_0(t_{01} - t_{02})$  - близкий взрыв,
- б)  $\sigma_0(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_0}}$  - дальний взрыв большой интенсивности,
- в)  $\sigma_0(t) = \sigma_0 \sin \frac{2\pi t}{T_0}$  - вибрация,
- г)  $\sigma_0(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_0}} \sin \frac{2\pi t}{T_0}$  - сейсмическая волна.

На рис.1. представлены результаты расчета задачи о действии продольной волны с треугольным импульсом на одиночное неподвижное включение с квадратным контуром. Видно, как с ростом  $t_0$  удлиняется "хвост" последствия и увеличиваются амплитуды возмущений (максимальные амплитуды достигаются с запаздыванием по отношению к времени достижения  $\max(\sigma_0(t))$  в падающей водке, что объясняется вкладом дифракционных волн).

На рис.2. расчет системы неподвижных квадратных включений для двух значений  $H=1, 5$ ; 2 и треугольного импульса с параметрами  $t_{01} = 0,5$ ,  $t_0 = 5$ . Если на лобовой поверхности отличие  $\sigma_{xy}$  сравнительно невелико, то на теневой и боковых (для  $\sigma_{xy}$ ) оно существенно. Здесь четко проявляется колебательный характер процесса, связанный с переотражениями волн от включений, причем, как и в случае ступенчатой нагрузки (п.2.3), с ростом  $H$  амплитуды и периоды осцилляций увеличиваются. На поведение  $F_x$ , однако, влияние этого колебательного процесса сравнительно невелико, естественно, что в случае системы отсутствует эффект последствия (так же как и отсутствует рост при действия ступенчатой нагрузки).

В случае подвижного одиночного включения (рис.3. и кривая с точками на рис.4.) на теневой поверхности, начиная с момента взаимодействия, реализуются напряжения сжатия, которые держатся сравнительно долго и медленно убывают. На лобовой поверхности сжатие сменяется растяжением (практически сразу после окончания действия импульса). Это связано с тем, что к данному моменту времени скорость включения достигает пикового значения, и его движение способствует разгрузке лобовой поверхности от дифракционной составляющей. Теперь уже тормозят включение растягивающие напряжения, при этом  $F_x$  (или  $\ddot{U}$ ) достигает максимальной отрицательной амплитуды. С течением времени процесс дифракции затухает.

Практически та же качественная картина реализуется в случае системы подвижных включений (рис.4.) с тем лишь отличием, что в сдвиговых, напряжениях появляется осциллирующая составляющая, которая, однако, не оказывает заметного влияния (вследствие относительной малости амплитуд) на кинематические характеристики.

Расчеты показали, что описанная выше качественная картина сохраняется (что и следовало ожидать) при действии импульсов экспоненциальной формы.

Случай комбинированной нагрузки (г) с постоянным затуханием  $t_0 = 2$  и периодами  $T_0 = 10,8; 5,4; 2,7; 1,75$  представлен для квадратного контура на рис.5. (а, б, в, г - одиночное неподвижное включение; штриховая кривая с точками (в) - система неподвижных включений,  $m=2$ ;  $\delta$  - подвижное включение,  $m=2$  - ( для системы с  $H \geq 2$  получены неотличимые в масштабе графика результаты). Чем ниже несущая частота (выше  $T_0$ ), тем интенсивнее напряжения на контуре и сила  $F_x$  и тем больше амплитуда квазистатического последствия на одиночном включении, что связано с ростом величины импульса в падающей волне (с ростом  $T_0$ ). В случае системы это последствие отсутствует. Движение включений носит колебательный характер.

Несмотря на то, что импульс второй полуволны в нагрузке меньше, чем первый, в осциллограмме  $F_x$  (или, что то же самое  $\ddot{U}$ ), наоборот, - импульс второй (отрицательной) полуволны больше, что и приводит к появлению заметных отрицательных амплитуд скорости  $\dot{U}$  (рис.5.).

На примере дифракции нестационарной синусоидальной волны сдвига (в) на системе включений (рис.6.,  $T_0=2,5$ ,  $H=2$ ,  $m=2$ ,  $\psi=0$ ) можно проследить процесс выхода на стационар. При этом определяются амплитуды искоемых параметров в стационарном режиме (штриховые прямые) и коэффициенты вступления  $K_f$ , определяющие вклад нестационарности (отношение пикового значения амплитуды к стационарному). В представленном примере амплитуды силовых параметров за время процесса растут практически монотонно и их  $K_f$  мало отличаются от единицы. Учет нестационарности существенен, для кинематических параметров:  $K_V = 4/5$ , а  $K_V = 5$ . Следует отметить тот факт, что напряжения  $\sigma_{xy}$  на лобовой поверхности (и  $\sigma_{yy}^{(4)}$ ) находятся в противофазе с  $\sigma_{xy}$  на теневой поверхности (и  $\sigma_{yy}^{(6)}$ ), однако последние существенно меньше по амплитуде, поэтому сравнительно больших значений достигает размах осцилляций  $F_y$  и  $M$ . Нормальные напряжения в средней части боковой поверхности ( $\sigma_{yy}^{(5)}$ ) ~ на порядок меньше, чем  $\sigma_{yy}^{(4)}$ . Это объясняется тем, что здесь  $\sigma_{yy}^{(5)}$  меняет знак.

На рис. 7. представлены примеры расчета действия продольной волны различной длительности на систему подвижных включений квадратного сечения, расположенную вблизи свободной поверхности ( $m=2$ ,  $H=2$ ,  $l_0=1$ , волна движется из глубины полуплоскости).

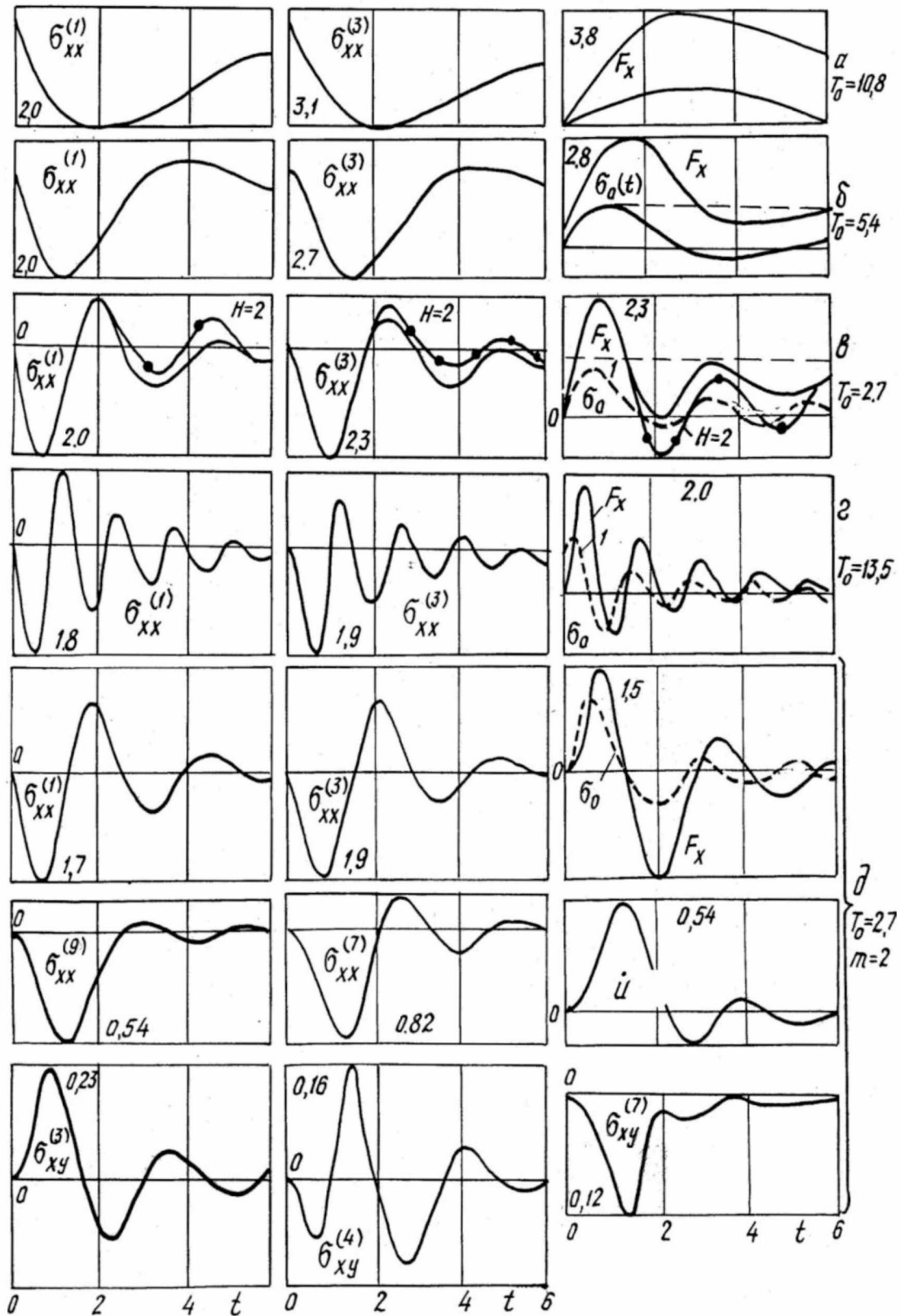


Рис. 5. Действие сейсмической волны

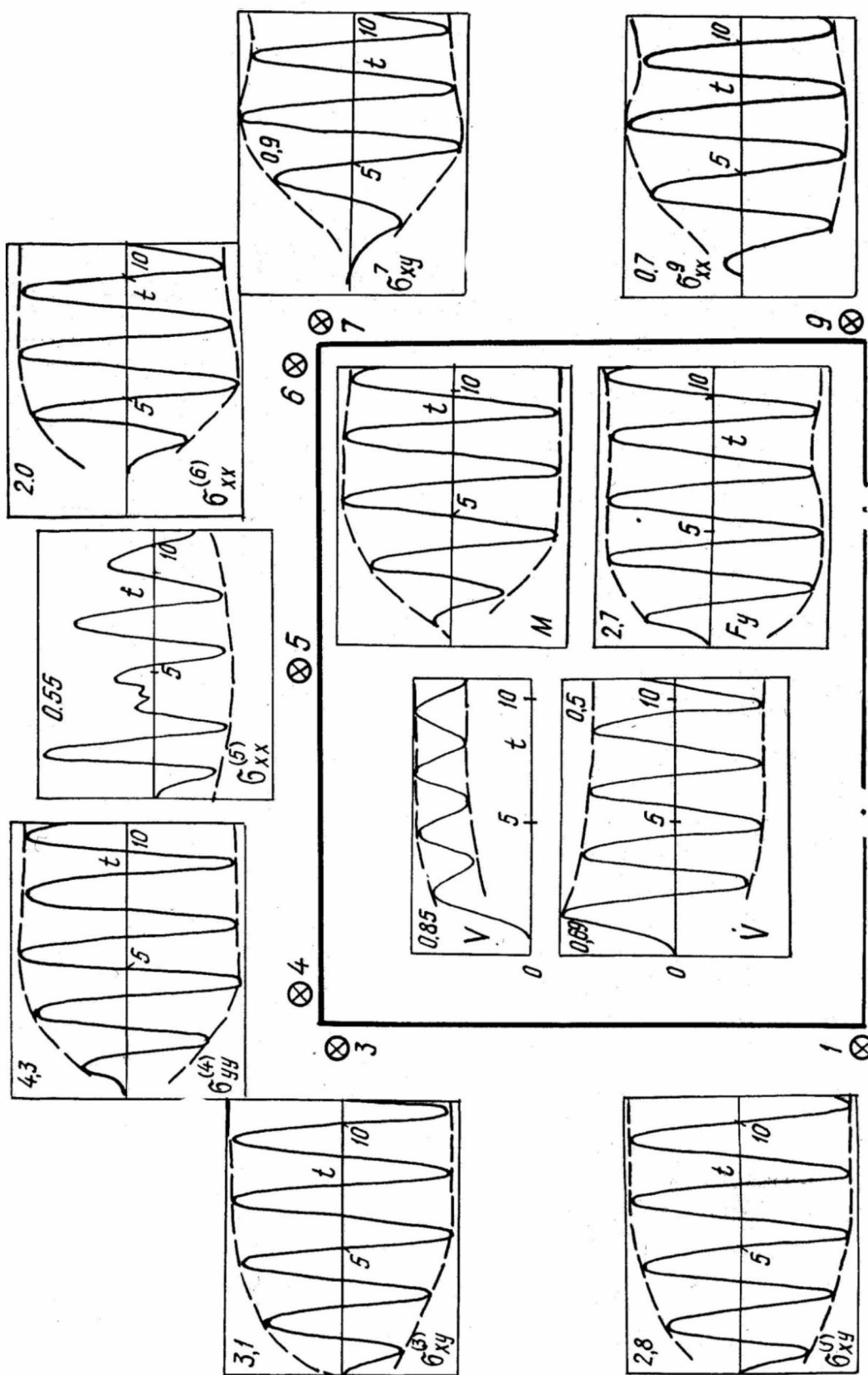


Рис.6. ( $t_0 = \infty$ ,  $T = 2,5$ ,  $m = 2m_0$ ,  $H = 2a$ )

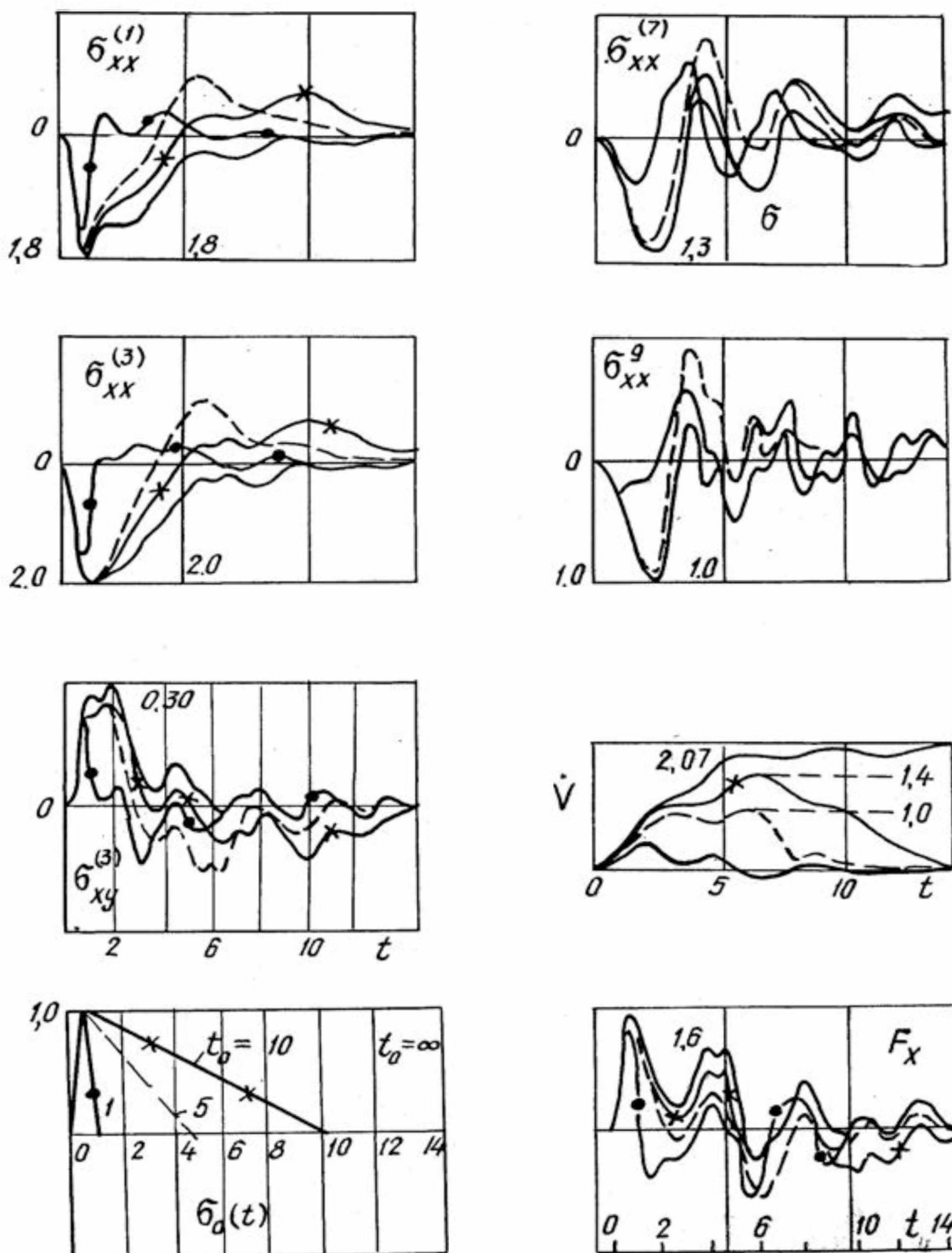


Рис.7. Действие импульсной волны на тело, расположенное вблизи свободной поверхности

Следует отметить, что при  $t_0 \geq 5$  длительность импульса не оказывает существенного влияния на качественную картину процесса, который определяется в основном отраженными от свободной поверхности волнами. Как видно из рисунков, при  $t_0 = 5$  прямая и отраженная от поверхности волны вступают во взаимодействие, не изменяя максимальной амплитуды скорости  $\dot{V}$ . Пиковые амплитуды растягивающих про-

дольных напряжений и отрицательного значения  $F_y$ , достигаются также при  $t_0=5$ . Максимальные же значения представленных величин (за исключением  $\dot{V}_{max} = 2,07$  при  $t=\infty$ ) при  $t_0 \geq 5$  уже практически не меняются.

### Литература

1. Курманалиев К., Султангазиева А.К., Турдукулова А.К. Дифракция упругой волны на блочных структурах горных массивов. // Известия КГТУ № 31 Бишкек 2014г., стр.
2. Абдукадыров С.А., Пинчукова Н.И., Степаненко М.В. Об однородном способе численного решения уравнений динамики упругих сред и конструкций. ФТПРПИ, СОАН СССР, Новосибирск, 1984, №6, с 34-41.

УДК 622.83: 622. 34

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Тажимаев К. Т., Султаналиева Р.М.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, [kshbak@yandex.ru](mailto:kshbak@yandex.ru),  
Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,  
Бишкек, Кыргызская Республика, [raia-ktu@mail.ru](mailto:raia-ktu@mail.ru)

*Приведены методы и результаты определения действующих и остаточных напряжений в горных породах удароопасных и сейсмоактивных участков породного массива.*

*Methods and results of definition of operating and residual stresses in rocks dangerous on rock burst and seismoactive sites of a file of rocks are resulted.*

Горные породы представляют собой сложные гетерогенные природные образования. В таких многокомпонентных средах, образовавшихся из расплавленных магм и термальных растворов, при последующем неравномерном охлаждении формируются остаточные напряжения. Такие напряжения могут образоваться также и при неоднородных упругопластических деформациях. Исследования остаточных напряжений в металлах и технических материалах проводятся с давних пор, а в горных породах такие исследования были проведены Влохом Н.П., Липиным Я.М. и Сашуриным А.Д. в 1970 годы [1, 2, 4].

М. Фридман [5] показал, что метод разгрузки и метод дифракции рентгеновских лучей при измерении остаточных напряжений дают близко совпадающие результаты. Он показал, что ориентация остаточных напряжений хорошо согласуется с элементами структуры массива, из которого для исследования отбирались соответствующие блоки горных пород.

Экспериментальные измерения (методом полной разгрузки) действующих в породных массивах горно-складчатых областей сейсмоактивных регионов Средней Азии напряжений, выполненные нами показали значительную неоднородность напряженного состояния, и, как свидетельствуют результаты, часто горизонтальные напряжения превышали вертикальные, что не укладывается в рамки существующих теоретических положений.

В итоге многолетних экспериментальных исследований напряженного состояния удароопасных рудных месторождений Средней Азии было установлено, что в сейсмоактивных зонах и на удароопасных участках шахтных полей рудных и угольных месторождений пространственное распределение действующих напряжений неоднородное и имеет периодический характер. Было экспериментально доказано, что неоднородность, а иногда знакопеременность действующих в массиве напряжений обусловлена наличием в сейсмоактивных зонах неоднородного поля остаточных напряжений, так как колебательный (периодический) характер пространственного распределения действующих напряжений по фазе совпадает с характером распределения остаточных напряжений [6].

Тажимаевым К.Т. [8] была разработана структурная модель квазиизотропной горной породы, где показано, что реальная среда – массив горных пород представляет собой единство непрерывности (континуум) и дискретности, т.е. дискретно – связанную среду. Предлагается рассмотреть горную породу, при изучении процессов ее деформирования и разрушения, как конструкцию, состоящую из определенно расположенных и связанных по локальным участкам структурных элементов, где приложенная извне нагрузка распределяется согласно строению этой внутренней конструкции. В предложенной модели рассматриваются структурные иерархические уровни с присущими каждому из них неоднородностями (дефектами). Согласно иерархической системе структурных уровней, каждый вышестоящий уровень включает элементы структуры всех нижестоящих уровней, т.е. согласно структурной модели, тектоническая плита сложена из блоков, блоки в свою очередь состоят из зерен, зерна составлены из кристаллических отдельных и, наконец, кристалличе-



дольных напряжений и отрицательного значения  $F_y$  достигаются также при  $t_0=5$ . Максимальные же значения представленных величин (за исключением  $\dot{V}_{max} = 2,07$  при  $t=\infty$ ) при  $t_0 \geq 5$  уже практически не меняются.

### Литература

1. Курманалиев К., Султангазиева А.К., Турдукулова А.К. Дифракция упругой волны на блочных структурах горных массивов.// Известия КГТУ № 31 Бишкек 2014г., стр.
2. Абдукадыров С.А., Пинчукова Н.И., Степаненко М.В. Об однородном способе численного решения уравнений динамики упругих сред и конструкций. ФТПРПИ, СОАН СССР, Новосибирск, 1984, №6, с 34-41.