

**О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ  
«СООРУЖЕНИЕ-ГРУНТ-ВОЗДУХ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**NUMERICAL SIMULATION SECURITY SYSTEM  
«CONSTRUCTION OF GROUND-AIR» UNDER SEISMIC IMPACT**

**Аннотация.** Рассматривается безопасность уникальных сооружений, находящихся в воздушной и грунтовой средах, при сейсмических воздействиях. Поставленная задача решается с помощью метода конечных элементов.

**Annotation.** We consider the safety of unique structures that are in the air and soil environments, and seismic effects. The problem is solved using the finite element method.

**Ключевые слова.** Динамическая теория упругости, моделирование, метод конечных элементов, воздействие в виде функции Хевисайда, сжимающее нормальное напряжение, растягивающее нормальное напряжение, касательное напряжение, сейсмическое волновое воздействие.

**Key words.** Dynamic theory of elasticity, modeling, finite element method, the impact in the form of the Heaviside function, compressing the normal stress, the tensile normal stress, shear stress, the seismic wave effect.

В работах [1–7] приведена информация о численном моделировании сейсмических волн в деформируемых телах.

Рассмотрим воздействие сейсмической волны на предполагаемое сооружение без полости (рис. 1).

Сейсмическое воздействие моделируется в виде функции Хевисайда (рис. 2).

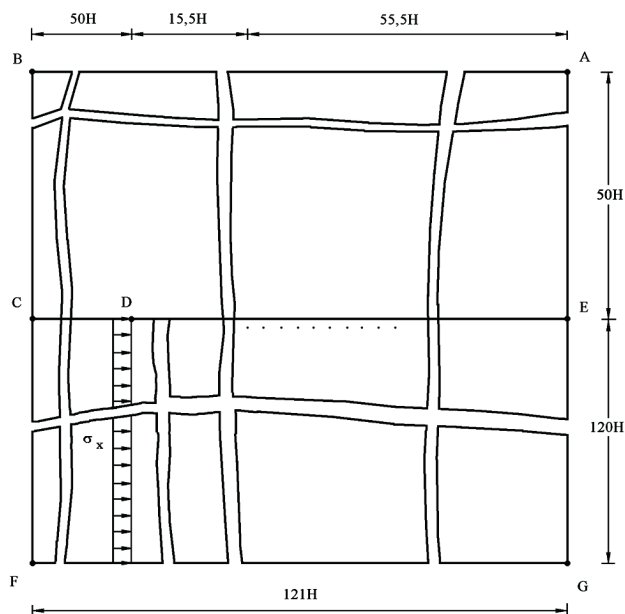


Рис. 1. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны на грунтовую и воздушную среды без полостей

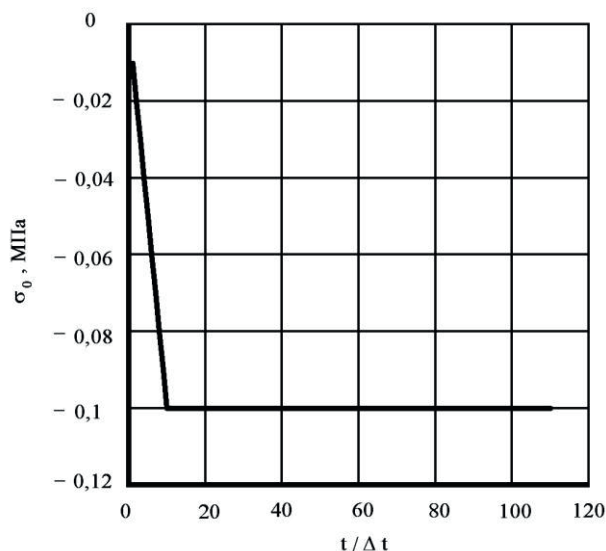


Рис. 2. Воздействие типа функции Хевисайда

От точки D параллельно поверхности грунтовой среды EDC приложено нормальное напряжение  $\sigma_x$ , которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n=t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до P, а при  $n \geq 10$  равно P ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = 0,1$  МПа).

Граничные условия для контура ABCFGE при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура ABCFGE не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 10$ . На границе EDC приняты условия непрерывности перемещений.

Для области ABCDE приняты следующие исхо-

Мусаев Вячеслав Кадыр оглы – доктор технических наук, профессор, профессор Российского университета Дружбы народов, тел. 8-926-567-05-58.

Musaev Vyacheslav – doctor of technical sciences, professor, Russian Peoples' Friendship University, tel. 8-926-567-05-58.

дные данные:  $H=\Delta x=\Delta y$ ;  $\Delta t=0,147 \cdot 10^{-4}$  с;  $C_p=340$  м/с;  $\rho=1,22$  кг/м<sup>3</sup> ( $1,22 \cdot 10^{-9}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>).

Для области EDCFG приняты следующие исходные данные:  $H=\Delta x=\Delta y$ ;  $\Delta t=0,125 \cdot 10^{-4}$  с;  $C_p=400$  м/с;  $C_s=250$  м/с;  $\rho=1,469 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> ( $1,469 \cdot 10^{-6}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>).

В расчетах принимается минимальный шаг по времени, то есть  $\Delta t=0,125 \cdot 10^{-4}$  с.

Исследуемая расчетная область имеет 20862 узловые точки. Решается система уравнений из 83448 неизвестных.

Результаты расчетов показаны в точке В3 (рис. 3–4).

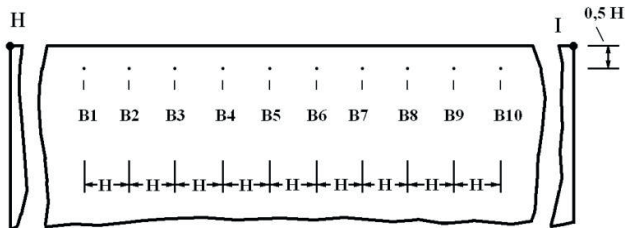


Рис. 3. Точки, в которых приводятся упругие напряжения во времени

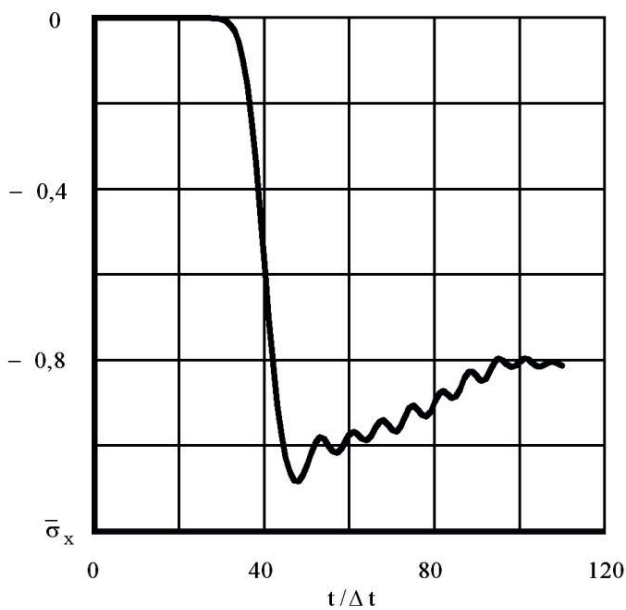


Рис. 4. Изменение упругого нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  во времени  $t/\Delta t$  в точке В3 в задаче без полости

Рассмотрим воздействие сейсмической волны в виде функции Хевисайда на предполагаемое сооружение с полостью (рис. 5).

От точки D параллельно поверхности грунтовой среды IHEDC приложено нормальное напряжение  $\sigma_x$ , которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n=t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до P, а при  $n \geq 10$  равно P ( $P=\sigma_0$ ,  $\sigma_0=0,1$  МПа). Граничные условия для контура ABCJKI при  $t > 0$   $u=v=\dot{u}=\dot{v}=0$ . Отраженные волны от контура ABCJKI не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 10$ . На границе IHGFEDC приняты

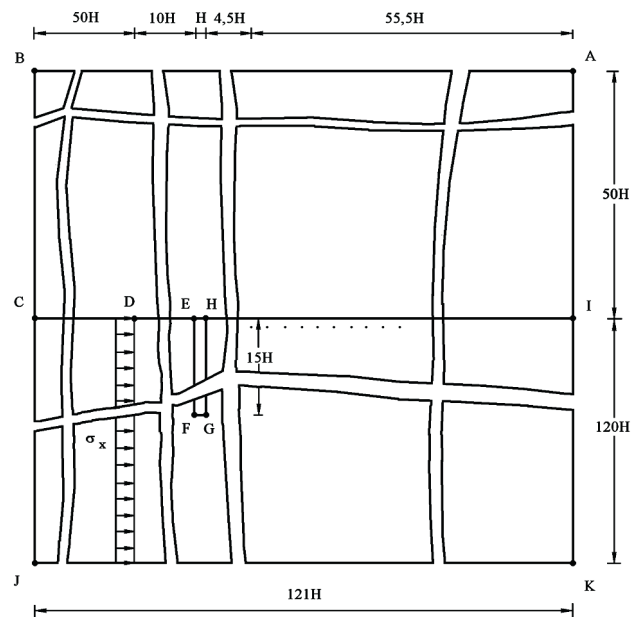


Рис. 5. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны на упругую грунтовую и воздушную среду с полостью в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к пятнадцати)

условия непрерывности перемещений.

Для области ABCDEFGHI приняты следующие исходные данные:  $H=\Delta x=\Delta y$ ;  $\Delta t=0,147 \cdot 10^{-4}$  с;  $C_p=340$  м/с;  $\rho=1,22$  кг/м<sup>3</sup> ( $1,22 \cdot 10^{-9}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>).

Для области IHGFEDCJK приняты следующие исходные данные:  $H=\Delta x=\Delta y$ ;  $\Delta t=0,125 \cdot 10^{-4}$  с;  $C_p=400$  м/с;  $C_s=250$  м/с;  $\rho=1,469 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> ( $1,469 \cdot 10^{-6}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>).

В расчетах принимается минимальный шаг по времени, то есть  $\Delta t=0,125 \cdot 10^{-4}$  с.

Исследуемая расчетная область имеет 20862 узловые точки. Решается система уравнений из 83448 неизвестных.

Результаты расчетов показаны в точке В3 (рис. 3–4).

На рис. 6 представлено изменение упругого нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  ( $\bar{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma_0$ ) во времени n в точке В3 (рис. 3), находящейся около границы воздушной и грунтовой сред.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Решена задача о воздействии плоской продольной сейсмической волны на упругую грунтовую и воздушную среды с полостью в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к пяти). Исследуемая расчетная область имеет 20862 узловые точки. Решается система уравнений из 83448 неизвестных. Рассматриваются точки на границе воздушной и грунтовой сред, которые находятся на расстоянии (4,5–13,5)H от полости. Полость, с соотношением ширины к высоте один к пяти, уменьшает величину сжимающего нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  в 1,89 раза.

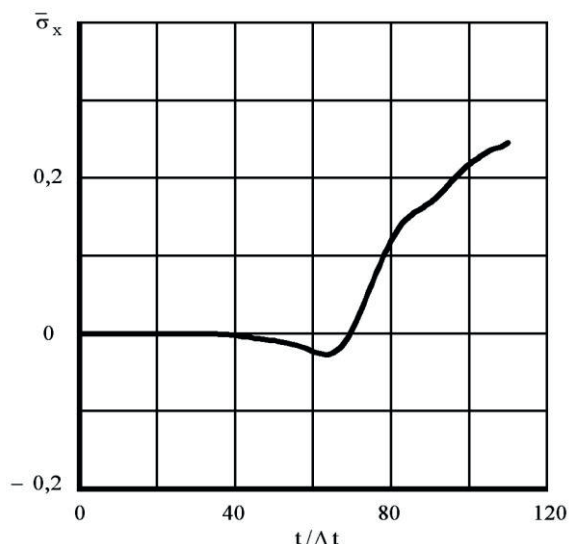


Рис. 6. Изменение упругого нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  во времени  $t/\Delta t$  в точке В3 в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к пятнадцати).

2. Решена задача о воздействии плоской продольной сейсмической волны на упругую грунтовую и воздушную среды с полостью в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к десяти). Исследуемая расчетная область имеет 20862 узловые точки. Решается система уравнений из 83448 неизвестных. Рассматрива-

ются точки на границе воздушной и грунтовой сред, которые находятся на расстоянии  $(4,5-13,5)H$  от полости. Полость, с соотношением ширины к высоте один к десяти, уменьшает величину сжимающего нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  в 9,77 раза.

3. Решена задача о воздействии плоской продольной сейсмической волны на упругую грунтовую и воздушную среды с полостью в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к пятнадцати). Исследуемая расчетная область имеет 20862 узловые точки. Решается система уравнений из 83448 неизвестных. Рассматриваются точки на границе воздушной и грунтовой сред, которые находятся на расстоянии  $(4,5-13,5)H$  от полости. Полость, с соотношением ширины к высоте один к пятнадцати, уменьшает величину сжимающего нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  в 13,67 раза.

4. Полученные результаты можно оценить как первое приближение к решению сложной комплексной задачи о применении полостей для увеличения безопасности различных сооружений в воздушной и грунтовой средах при сейсмических воздействиях с помощью численного моделирования волновых уравнений теории упругости.

#### Литература

1. Мусаев В.К. Решение задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны параллельной свободной поверхности упругой полуплоскости на предполагаемое сооружение // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск IX. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2007. – С. 269–274.
2. Мусаев В.К. Численное моделирование плоских продольных сейсмических волн в упругой полуплоскости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2007. – № 1. – С. 14–20.
3. Мусаев В.К. Компьютерное моделирование безопасности сооружений с грунтовой и воздушной средами при сейсмических воздействиях // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2009. – С. 120–125
4. Мусаев В.К. О безопасности уникальных сооружений с грунтовой и воздушной средами при сейсмических воздействиях // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XI. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2009. – С. 254–260.
5. Мусаев В.К. О моделировании сейсмической волны параллельной свободной поверхности упругой полуплоскости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 4. – С. 61–64.
6. Мусаев В.К. Численное моделирование задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны на грунтовую и воздушную среды с экраном в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к пятнадцати) // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2010. – С. 195–199.
7. Мусаев В.К. Математическое моделирование волн напряжений в объектах геотехники при сейсмических воздействиях // Геотехнические проблемы мегаполисов. Труды Международной конференции по геотехнике. – М.: ПИ «Геореконструкция», 2010. – С. 1517–1524.

Материал поступил в редакцию 19. 04. 2013 г.