

## Литература:

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». – URL: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2021-god> (дата обращения 29.09.2022).
2. «На выставке Securika/MIPS обсудили пожарную безопасность в условиях надзорных реформ». Информационно-аналитический журнал «РУБЕЖ». – URL: <https://rubezh.ru/news/2017/03/24/na-vyistavke-securika/mips-obsudili-rozharnuyu-bezopasnost-v-usl> (дата обращения 02.10.2022).
3. ГОСТ Р 59638-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180685> (дата обращения 02.10.2022).
4. СНЕККИТ – спрей для проверки датчиков. Новости от detectortesters. – URL: <https://www.nordtech.ru/noclimb.htm> (дата обращения 03.10.2022).
5. Каталог тестового оборудования от DETECTORTESTERS. Аэрозоли, капсулы. – URL: [https://www.detectortesters.ru/catalog/aerozoli\\_kapsuly/](https://www.detectortesters.ru/catalog/aerozoli_kapsuly/) (дата обращения 04.10.2022).

---

DOI: 10.25728/iccss.2022.80.92.070

Мусаев В.К.

### **Вычислительный эксперимент в задаче о моделировании взрывных воздействий в подвале десятиэтажного здания с упругой полуплоскостью**

**Аннотация:** Приводится информация о математическом (компьютерном) моделировании нестационарных взрывных волн в подвале десятиэтажного здания с основанием в виде упругой полуплоскости. Разработана методика и алгоритм. Создан комплекс программ. При разработке комплекса программ использовался алгоритмический язык Фортран-

90. Решена задача о компьютерном (цифровом) моделировании нестационарных взрывных волн в подвале десятиэтажного здания с упругим основанием в виде полуплоскости.

**Ключевые слова:** волновая теория взрывной безопасности, вычислительный эксперимент, комплекс программ Мусаева В.К., взрывное воздействие, треугольный импульс, контурные напряжения, подвал, десятиэтажное здание

Приведенные исследования в рассматриваемой научной работе являются продолжением ранее полученных результатов. Такой подход к исследованию новых задач, которые опираются и продолжают предыдущие результаты, можно выполнять, если изначально была принята постановка и реализация задач с использованием методов фундаментальной науки. Этот выбор можно было сделать благодаря применению методов вычислительной механики деформируемых тел (вычислительная механика) с возможностями языков программирования и вычислительным машин.

Составлен комплекс программ для решения нестационарной динамической задачи теории упругости для областей разной (сложной) формы. В работе приводится компьютерное (цифровое) решение задачи о моделировании нестационарных взрывных волн в подвале десятиэтажного здания с упругой полуплоскостью. Применяется методика неотражающих граничных условий.

Некоторые вопросы в области моделирования нестационарных динамических задач рассмотрены в следующих работах [1-6].

В работах [2-3, 5-6] приведена информация о верификации моделирования нестационарных волн напряжений в деформируемых телах с помощью рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Приближенное значение уравнения движения в теории упругости приведено в следующих работах [2-6]. В работах приведена информация о явной двухслойной схеме [2-6]. Шаг по времени для устойчивости явной двухслойной схемы для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках приведен в следующих работах [2-6].

Рассматриваемая задача впервые решена Мусаевым В.К. с помощью разработанной методики, алгоритма и комплекса программ [2-6].

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с).

Рассматривается задача о воздействии взрывной волны в виде треугольного импульса (дельта функция) в подвале десятиэтажного здания с упругим основанием (рисунки 1, 2). Начальные условия приняты нулевыми.

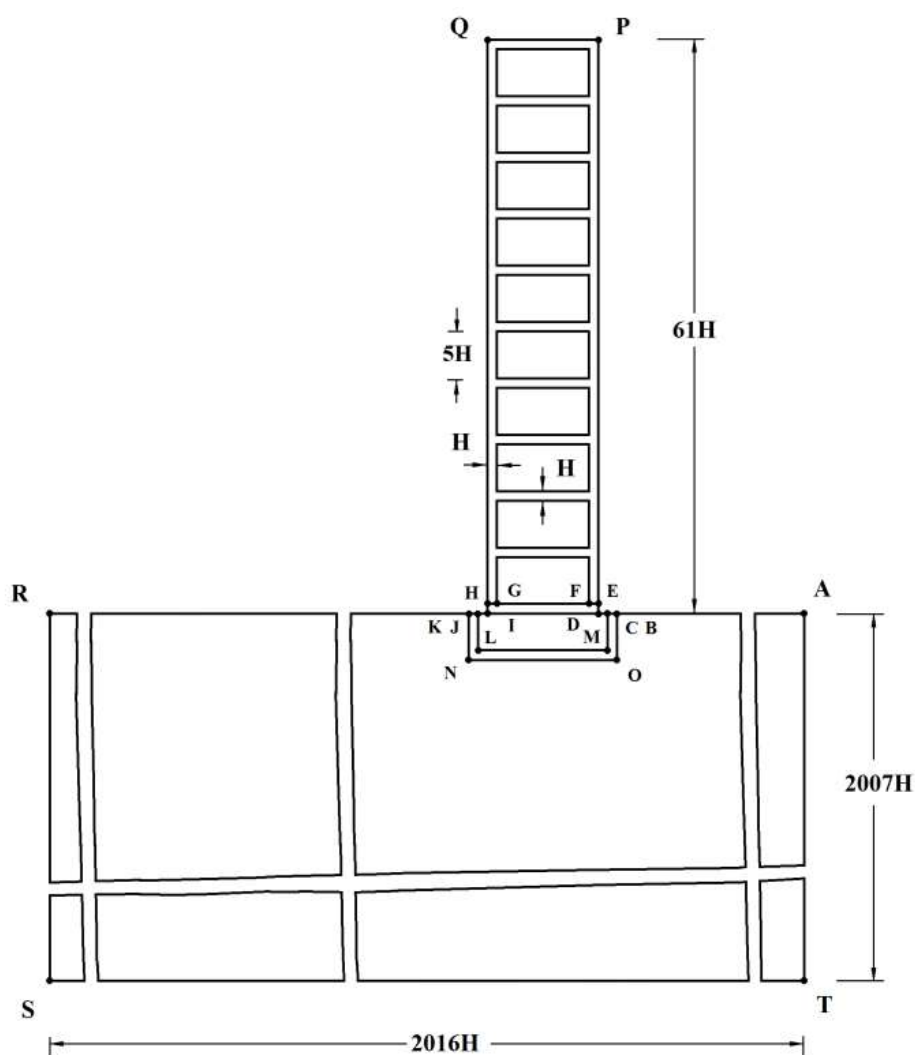


Рисунок 1 – Постановка задачи для десятиэтажного здания с подвалом и упругим основанием в виде полуплоскости.

Схема В.К. Мусаева

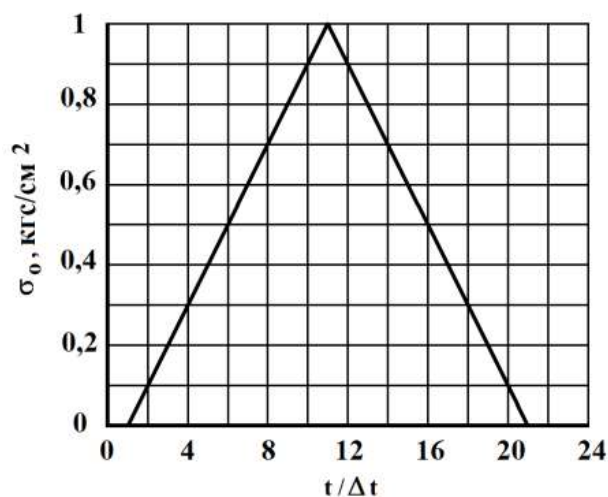


Рисунок 2 – Воздействие в виде треугольного импульса.  
График В.К. Мусаева

Начальные условия приняты нулевыми. По нормали к контуру DJLM приложено нормальное напряжение  $\sigma_n$  (рисунок 3), которое при  $1 \leq n \leq 11$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до  $P$ , а при  $11 \leq n \leq 21$  от  $P$  до 0 ( $P = \sigma_0$ ).

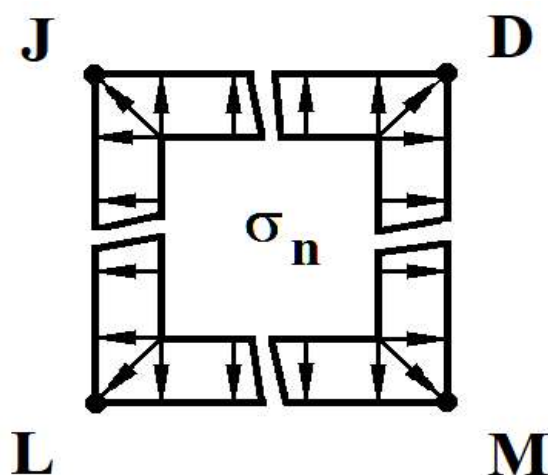


Рисунок 3 – Взрывное воздействие по контуру подвального этажа.  
Схема В.К. Мусаева

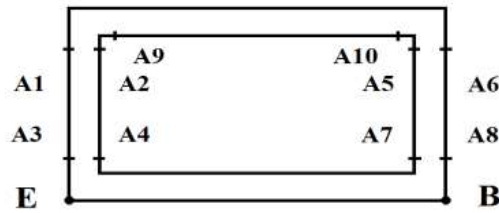


Рисунок 4 – Точки, в которых получены упругие напряжения во времени. Схема В.К. Мусаева

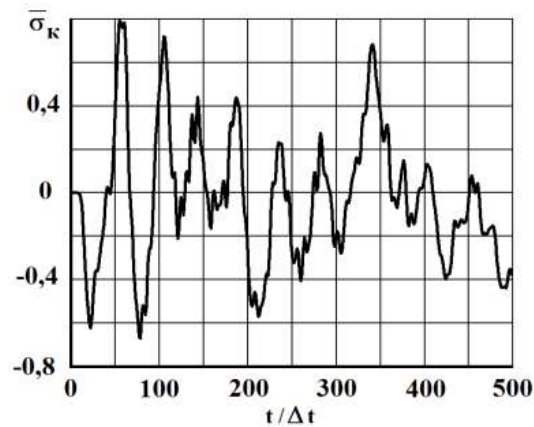


Рисунок 5 – Изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  в точке A1 на контуре десятиэтажного здания во времени  $t / \Delta t$ .

График В.К. Мусаева

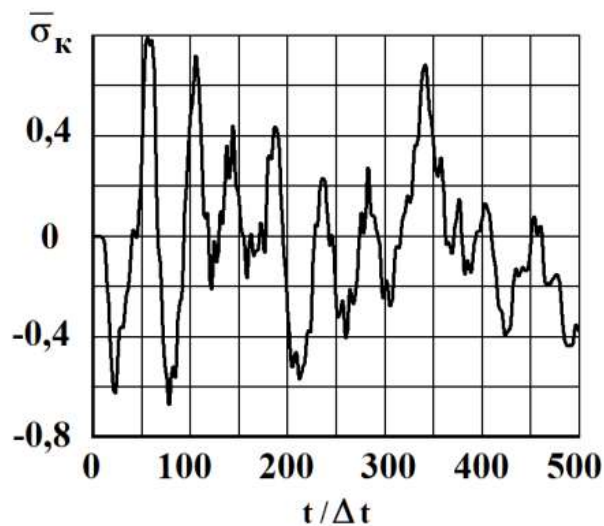


Рисунок 6 – Изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  в точке A6 на контуре десятиэтажного здания во времени  $t / \Delta t$ .

График В.К. Мусаева

На контуре JD приложено нормальное напряжение  $\sigma_y$  ( $\sigma_y = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = 0,1$  МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>)). На контуре LM приложено нормальное напряжение  $\sigma_y$  ( $\sigma_y = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -0,1$  МПа (-1 кгс/см<sup>2</sup>)). На контуре DM приложено нормальное напряжение  $\sigma_x$  ( $\sigma_x = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = 0,1$  МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>)). На контуре JL приложено нормальное напряжение  $\sigma_x$  ( $\sigma_x = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -0,1$  МПа (-1 кгс/см<sup>2</sup>)). Граничные условия для контура *RSTA* при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура *RSTA* не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 500$ .

При расчетах приняты следующие исходные данные:  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 2,788 \cdot 10^{-6}$  с;  $E = 3,15 \cdot 10^4$  МПа ( $3,15 \cdot 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>);  $\nu = 0,2$ ;  $\rho = 0,255 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> ( $0,255 \cdot 10^{-5}$  кгс см<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>);  $C_p = 3587$  м/с;  $C_s = 2269$  м/с.

Решается система уравнений из 16202276 неизвестных.

Контурное напряжение  $\bar{\sigma}_k$  получено в точках A1-A10 (рисунок 4). В точках A1 и A6 (рисунки 5, 6) показано изменение контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  в десятиэтажном здании с основанием в виде упругой полуплоскости во времени  $t / \Delta t$ .

## Выводы

1. На основе метода конечных элементов (компьютерное моделирование) разработан комплекс программ для решения линейных волновых задач.

2. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач при волновых воздействиях, с помощью метода конечных элементов приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

3. Десятиэтажное здание моделируется с упругим основанием в виде упругой полуплоскости. Взрывное воздействие моделируется в виде функции треугольного импульса (дельта функция). Решается система уравнений из 16202276 неизвестных.

4. Получены контурные напряжения в характерных точках исследуемого объекта (десятиэтажное здание с подвалом).

5. Профили контурных напряжений соответствуют симметрии конструкции и нагрузки при решении задачи переходного процесса при моделировании взрывных волн в подвале десятиэтажного здания с упругим основанием.

Литература:

1. *Ионов В.И., Огibalов П.М.* Напряжения в телах при импульсивном нагружении. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с.

2. *Musayev V.K.* Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – Volume 11. Issue 1. – P. 135-146.

3. *Musayev V.K.* On the mathematical modeling of nonstationary elastic waves stresses in corroborated by the round hole // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – Volume 11. Issue 1. – P. 147-156.

4. *Мусаев В.К.* Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба) // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – № 4. – С. 164-174.

5. *Мусаев В.К.* Математическое моделирование нестационарных волн напряжений в деформируемых телах при ударных, взрывных и сейсмических воздействиях. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – 629 с.

6. *Мусаев В.К.* Защита нарушенного авторского права (плагиат) в Пушкинском городском, Московском областном и Верховном Судах Российской Федерации. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – 874 с.

---