

**ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОГО ДЕЙСТВИЯ  
СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА ОСНОВАНИЕ ОПОРЫ ЛЭП  
КОЩЕЕВСКОГО ГРАНИТНОГО КАРЬЕРА**

**Н. С. Ремез**

Национальный технический университет Украины «КПИ»

ул. Борщаговская, 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: Nataly.Remez@gmail.com

**С. А. Крайчук**

Ровенский государственный гуманитарный университет

ул. С. Бандеры, 12, г. Ровно, 33000, Украина. E-mail: akraychuk@pisem.net

Приведены результаты численного моделирования взаимодействия сейсмозрывной волны с прямоугольным фундаментом опоры ЛЭП. Рассматривается задача про движение твердого однородного тела прямоугольной формы, находящееся в неограниченной упругой среде. Полученное обыкновенное дифференциальное уравнение с соответствующими начальными и граничными условиями решается численно. Исследуются влияние частотных характеристик колебаний, геометрических и инерционных параметров фундамента, характеристик грунтового основания и подрываемого взрывчатого вещества на сейсмостойкость опоры.

**Ключевые слова:** взрыв, сейсмозрывная волна, начально-краевая задача, численное моделирование.

**ВПЛИВ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ДІЇ СЕЙСМОВИБУХОВИХ  
ХВИЛЬ НА ОСНОВУ ОПОРИ ЛЕП КОЩІВСЬКОГО ГРАНИТНОГО  
КАРЄ'РУ**

**Н. С. Ремез**

Національний технічний університет України «КПІ»

вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: Nataly.Remez@gmail.com

**С. О. Крайчук**

Рівненський державний гуманітарний університет

вул. С. Бандери, 12, г. Ріне, 33000, Україна. E-mail: akraychuk@pisem.net

Наведено результати чисельного моделювання взаємодії сейсмодивухової хвилі з фундаментом опори ЛЕП. Розглядається задача про рух жорсткого однорідного тіла прямокутної форми, що знаходиться в безмежному пружному середовищі, під дією падаючої сейсмічної хвилі. Отримане звичайне диференціальне рівняння з відповідними початковими і граничними умовами вирішується чисельно. Досліджуються вплив частотних характеристик коливань, геометричних та інерційних параметрів фундаменту, характеристик ґрунтової основи і підриваємої вибухової речовини на сейсмостійкість опори.

**Ключові слова:** вибух, сейсмодивухова хвиля, початково-крайова задача, чисельне моделювання.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Одной из важнейших проблем для действующих горнодобывающих предприятий, размещенных вблизи населенных пунктов, является определение степени влияния взрывных работ на устойчивость сооружений. Актуальность данного вопроса обусловлена увеличением объемов взрывных работ, в частности, проведением вблизи различных охраняемых объектов, которые в результате техногенных нагрузок, таких как влияние сейсмозврывных волн, могут находиться в зоне риска. Использование энергии взрыва химических зарядов взрывчатых веществ (ВВ), а также различных условий подорывания обуславливают необходимость расчетов и создания эффективных методов управления влиянием сейсмических волн. Таким образом, проблема взаимодействия сейсмозврывных волн с природными и инженерными объектами является актуальной в наше время. При этом возникает необходимость получения прогнозной оценки устойчивости таких объектов, что невозможно без точного знания влияния и характера действия внешних сил. Поэтому возникает необходимость детального изучения взаимодействия сейсмозврывных нагрузок на основание охраняемого объекта.

Большинство работ по исследованию устойчивости сооружений посвящено изучению влияния сейсмических волн от землетрясений [1–5]. Исследований влияния сейсмозврывных волн на природные и инженерные объекты значительно меньше [6, 7]. Целью работы является исследовать влияние амплитудно-частотных характеристик сейсмозврывных волн на интенсивность колебаний основания сооружения.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В качестве объекта исследований было выбрано основание линии электропередач (ЛЭП), расположенной вблизи Кошеевского гранитного карьера (Киевская обл.).

Для численного моделирования сейсмического действия взрыва на фундамент охраняемого объекта был использован подход, разработанный в работе [8]. Рассматривается задача о движении жесткого однородного тела прямоугольной формы, которое находится в безграничной упругой среде, под действием падающей сейсмической волны. Начало декартовой системы координат совмещено с центром масс тела, направляющие оси расположены вдоль сторон прямоугольника. Полагается, что фронт падающей волны достигает границ тела в момент времени  $t=0$ . При  $t<0$  тело находится в состоянии покоя, а полный вектор перемещения в среде  $u$  с компонентами  $u$  и  $v$  совпадает с вектором перемещения  $u_+$  в падающей волне

$$u = u_+ (c(t)t - x \sin e + y \cos e), \quad (u_+(t) = 0, \quad t \leq 0), \quad (1)$$

где  $e$  – угол между осью  $x$  и фронтом падающей волны,  $c(t)$  – скорость распространения волны.

Движение твердого прямоугольного тела описывается смещением центра масс  $u^*$  с компонентами  $u^*$   $v^*$  и малым углом поворота  $\alpha^*$

$$m u^*{}''(t) = R(t), \quad I \alpha^*{}''(t) = M(t), \quad (2)$$

с нулевыми начальными условиями

$$u_*(0) = u'_*(0) = 0, \quad \alpha_*(0) = \alpha'_*(0) = 0, \quad (3)$$

где  $m$  – масса тела единичной толщины,  $I$  – момент инерции тела относительно центра масс,  $R$  и  $M$  – соответственно равнодействующая и момент напряжений, действующих на тело со стороны упругой среды, которые выражаются через нормальное напряжение  $\sigma_n$  на поверхности тела следующим образом:

$$R(t) = \oint_{\Gamma} \sigma_n(t) d\Gamma, \quad M(t) = \oint_{\Gamma} [\sigma_n(t) \times r] d\Gamma. \quad (4)$$

Движение среды описывается динамическим уравнением Ляме:

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } u - \mu \text{rot rot } u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где коэффициенты Ляме  $\lambda$  и  $\mu$ , а также плотность  $\rho$  связаны со скоростями продольных  $a$  и поперечных  $b$  волн в грунте формулами:  $a^2(\lambda + \mu) / \rho$ ,  $b^2 = \mu / \rho$ .

Начальные условия для решения (5) задаются в виде (1), а граничные условия – в следующем виде:

$$\tau_{xy} \Big|_{\tilde{A}} = 0, \quad u_n^* \Big|_{\Gamma} = u_+^* + [r \times \alpha_+^* k]. \quad (6)$$

Задача ограничивается рассмотрением только поступательного движения тела.

В результате использованной в [8] методики составлено и решено уравнение движения (2) с учетом первичных дифракционных волн для  $t < 2H/a$ . Система волн, образованная при взаимодействии плоской волны с неподвижным прямоугольным телом, зависит от времени, соотношения сторон  $S = L/H$ , угла падения  $e$ .

Для окончательного описания поступательного движения тела было получено обыкновенное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами:

$$nu''_* + 2l_1(\tau)u''_* + 4C_0u_* = [2l_0(\tau) - \chi]u'_+ + \nu u_+, \quad n = \rho H^2 / m. \quad (7)$$

Величины  $\nu$  и  $\chi$  определяют порядок прохождения падающей волной улов тела за время  $t < 2H/a$  и радиус цилиндрических волн, образованных при этом.

Значения индекса при  $C_0$  показывают, какие углы тела взаимодействуют в данный момент с падающей волной.

Описание длин участков большей стороны прямоугольного тела, где происходят дифракции плоских волн (падающих и отраженных) имеет вид:

$$l_0(\tau) = \tau H (1 / \cos e - 1)$$

при  $0 < \tau < 2, s \cos e > 1$  и при  $0 < \tau < 2s \cos e, s \cos e < 1$ ;

$$l_0(\tau) = 2H[(s - \tau) + s \cos e] \text{ при } 2s \cos e < \tau \leq s\{1 + \cos e\};$$

$$l_0(\tau) = 0 \text{ при } s(1 + \cos e) < \tau \leq 2 \quad (\tau = at / H).$$

Описание длин участков плоских волн на большей стороне тела имеет следующий вид:

$$l_1(\tau) = 2H(s - \tau) \quad \text{при } \tau \leq s,$$

$$l_1(\tau) = 0 \quad \text{при } \tau > s.$$

Линейные величины  $u_+$ ,  $u_*$ ,  $l_0$ ,  $l_1$  отнесены к половине меньшей стороны прямоугольника  $H$ , и далее считаются безразмерными. Начальные условия определяются соотношениями (3).

Для учета особенностей сейсмического действия взрыва скорость распространения волны  $c(t)$  задавалась виде [9]:

$$c(t) = u_m \exp(-\beta t) \sin(\omega t), \quad (8)$$

где  $u_m$  – максимальная скорость смещения частиц грунта, которая рассчитывалась по экспериментальным данным [10].

Для расчета частоты колебаний основы сооружения  $\omega = 2\pi/T$  были использованы экспериментальные данные [7]:

$$T = k_R Q_l^{1/6} (0.015l + 1) \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^v, \quad (9)$$

где  $k_R$ ,  $v$  – экспериментальные коэффициенты, учитывающие свойства породы;  $Q_l$  – линейная масса скважинного заряда,  $l$  – длина заряда,  $Q$  – масса заряда,  $r$  – расстояние от эпицентра взрыва до пункта наблюдения.

Данная задача решалась численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Расчеты проводились для угла между осью  $x$  и фронтом падающей волны  $e = \pi/2$  и отношения скоростей поперечной и продольной волны  $\gamma = 0,5$ , что соответствует суглинку. Параметры падающей волны рассчитывались для расстояний  $r = 30, 100, 1000, 2000, 3000$  м от эпицентра взрыва и для таких взрывчатых веществ, которые используются на карьере, а именно, анемикс 70; граммонит 50/50; аммонит № 6 ЖВ, с массой заряда равной 20, 100, 1000, 2000, 3000, 20000, 50000 кг.

На рис. 1 представлена зависимость смещения опоры ЛЭП, расположенной на расстоянии  $r = 2000$  м от эпицентра, в зависимости от времени при взрывах зарядов граммонита 50/50 разной массы: 1 –  $Q = 3000$  кг; 2 –  $Q = 2000$  кг; 3 –  $Q = 1000$  кг; 4 –  $Q = 100$  кг; 5 –  $Q = 20$  кг.

Из анализа рисунка можно сделать вывод, что чем больше масса заряда, тем больше амплитуда и частота колебаний основания охраняемого объекта.

На рис. 2 приведены зависимости смещения основы ЛЭП, расположенной на расстоянии  $r = 1000$  м от эпицентра, от времени при взрыве заряда граммонита 50/50 массой  $Q = 3000$  кг в суглинках различной плотности: 1 –  $\rho = 1940$  кг/м<sup>3</sup>, 2 –  $\rho = 1790$  кг/м<sup>3</sup>; 3 –  $\rho = 1590$  кг/м<sup>3</sup>.

Из рисунка следует, что чем более плотный грунт, тем больше амплитуда колебаний основания сооружения. Это объясняется тем, что менее плотные, пористые грунты являются демпфирующими средами, в которых происходит гашение энергии волн.

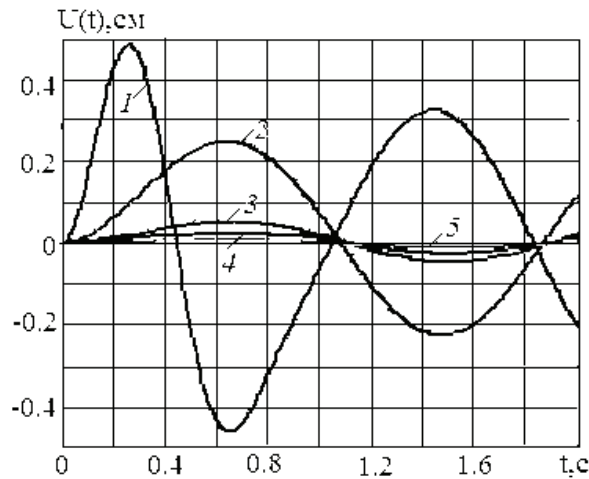


Рисунок 1 – Зависимость смещения опоры ЛЭП от времени при взрывах зарядов граммонита 50/50 разной массы: 1 –  $Q = 3000$  кг; 2 –  $Q = 2000$  кг; 3 –  $Q = 1000$  кг; 4 –  $Q = 100$  кг; 5 –  $Q = 20$  кг

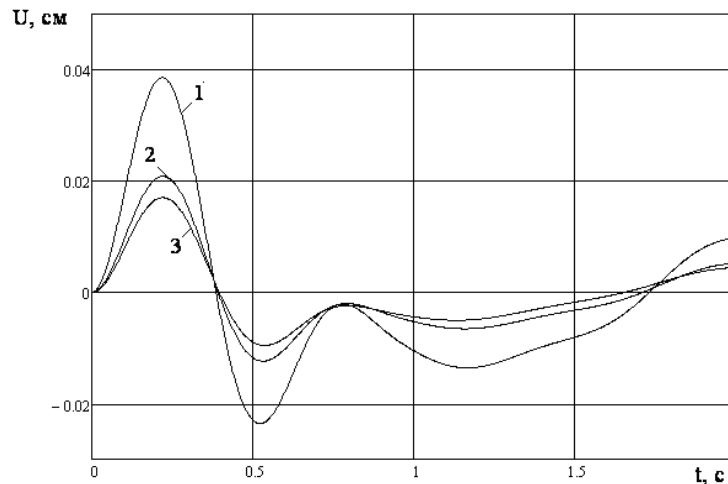


Рисунок 2 – Зависимость смещения основы ЛЭП от времени при взрыве заряда граммонита 50/50 массой  $Q=3000$  кг в суглинках различной плотности: 1 –  $\rho = 1940$  кг/м<sup>3</sup>; 2 –  $\rho = 1790$  кг/м<sup>3</sup>; 3 –  $\rho = 1590$  кг/м<sup>3</sup>

Зависимость смещения основы ЛЭП от времени на расстоянии  $r=3000$  м при взрыве зарядов массой  $Q=3000$  кг различных ВВ приведена на рис. 3. Нумерация кривых соответствует таким ВВ: 1 – анемикс 70; 2 – аммонит №6 ЖВ; 3 – граммонит 50/50. Из анализа рисунка следует, что максимальная амплитуда достигается при взрыве заряда анемикса 70. При взрыве заряда граммонит 50/50 такой же массы амплитуда смещения в 5,5 раз меньше, а аммонита № 6 ЖВ – в 1,6 раз меньше. Такое распределение значений амплитуд колебаний основы ЛЭП при взрывах различных ВВ одинаковой массы объясняется соответственным распределением детонационных характеристик данных ВВ, а именно: в таком же порядке возрастания находятся плотность, теплота взрывчатого превращения и скорость детонации взрывчатых веществ (табл. 1).

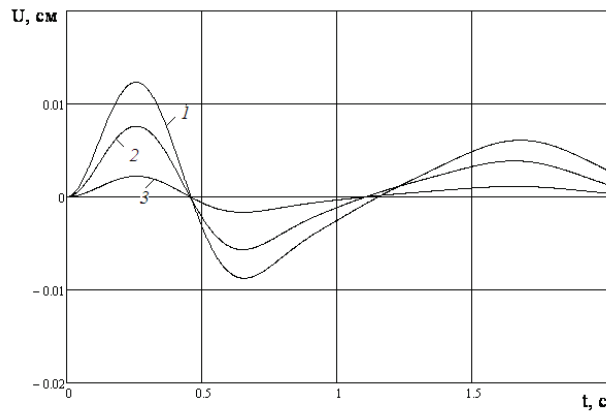


Рисунок 3 – Зависимость смещения основы ЛЭП от времени на расстоянии  $r = 3000$  м при взрыве зарядов массой  $Q = 3000$  кг различных ВВ:  
1 – анемикс 70; 2 – аммонит № 6 ЖВ; 3 – граммонит 50/50

Таблица 1 – Характеристики ВВ

ВВ	Скорость детонации $D$ , м/с	Плотность, $\rho_{ВВ}$ кг/м <sup>3</sup>	Теплота взрывчатого превращения $Q$ , ккал/кг	Показатель политропы	Показатель изоэнтропы
Анемикс 70	5000	1220	3200	2,33	1,25
Аммонит 6 ЖВ	4340	1000	1030	1,90	1,25
Граммонит 50/50	3600	950	1000	1,90	1,25

**ВЫВОДЫ.** Таким образом, для исследования амплитудно-частотного действия сейсмозрывной волны на процесс колебания основания опоры ЛЭП было проведено численное моделирование взаимодействия сейсмозрывной волны с прямоугольным жестким телом. Исследовались особенности колебания сооружения в зависимости от массы заряда, детонационных характеристик ВВ и плотности грунта. Результаты данной работы могут быть использованы для расчета параметров взрывных работ, которые должны обеспечивать сейсмостойкость охраняемых объектов. Продолжением данной работы может быть более детальное исследование колебательного процесса системы «грунт – основание охраняемого объекта» для различных типов грунтов и разработка рекомендаций по выбору параметров взрывных работ с учетом указанных особенностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения / Кауфман Б.Д. Шульман С.Г. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
2. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
3. Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках / А.П. Кириллов, В.В. Крылов, А.Е. Саргасян – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 354 с.

4. Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости / Э.Е. Хачи-ян, В.А. Амбарцумян – М.: Наука, 1981. – 204 с.

5. Хлевнюк Т.В. Підвищення надійності оцінки сейсmobезпеки будівель різного технічного стану при техногенних вибухах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.: спец. 05.15.03 «Відкрита розробка корисних копалин» / Т. В. Хлевнюк, НТУУ «КПІ». – Київ, 2009. – 23 с.

6. Оценка сейсmobезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик / В.В. Бойко, А.А. Кузьменко, Т.В. Хлевнюк // Вісник Національного технічного університету України НТУУ "КПІ", серія "Гірництво". – 2008 – № 16. – С. 3–13.

7. Рилько М.А. О движении в упругой среде жесткого прямоугольного тела под действием плоской волны // Механика твердого тела. – 1977. – № 1. – С. 158–164.

8. Спектры и их приложение к задачам взрывного дела / В.П. Нагорный, И.И. Денисюк – Киев: Институт геофизики им. Субботина, 2010. – 184 с.

### **INFLUENCE OF AMPLITUDE-FREQUENCY ACTION OF SEISMIC - BLAST WAVES ON FOUNDATION OF SUPPORT LEP AT KOSCHEEVSKIY GRANIT QUARRY**

**V. Remez**

National Technical University of Ukraine "KPI"

vul. Borsagovska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: Nataly.Remez@gmail.com

**S. Kraichuk**

PSC «Experimental technology of explosive works»

vul. S. Bandery, 12, Rivne, 33000, Ukraine. E-mail: akraichuk@pisem.net

The results of numeral simulation of interaction of seismic-blast waves are resulted with rectangular foundation of support LET. A task is examined about motion of homogeneous solid of rectangular form, being in an unlimited elastic medium. The got differential equation with the proper initial and boudary conditions decides numerally. Influence of frequency descriptions of vibrations, geometrical and inertia parameters of foundation, behaviours of the ground foundation and undermined explosive on seismic resistant are developed.

**Key words:** explosion, seismic-blast wave, initial-boundary problem, numeral design.

#### REFERENCES

6. Kaufman, B.D. and Kaufman, B.D. (1980), *Seysmicheskie vozdeystviya na gidrotekhnicheskie i energeticheskie sooruzheniya* [Seismic action on hydrotechnical and power buildings], Science, Moscow, Russia.

7. Birbraer, A.N. and Shulman, S.G. (1989), *Prochnost i nadejnost konstruktsiy AES pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Durability and reliability of constructions of AES at the special dynamic influences], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

8. Kirillov, A.P., Krylov, V.V. and Sargasyan, A.E. (1984), *Vzaimodeystvie fundamentov sooruzheniya s osnovaniem electrostantsiy pri dinamicheskikh nagruzkakh* [Interaction of building foundations of power-stations with base at the dynamic loadings], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

9. Khachiyani, E.E. and Ambarcumyan, V.A. (1981), *Dinamicheskie modeli sooruzheniy v teorii seysmostoykosti* [Dynamic models of buildings in the theory of seismic stability], Moscow, Russia.
10. Khlevnyuk, T.V. (2009), "Increase of reliability of estimation of seismic safety of buildings with different level of the technical state at technogenic explosions", Thesis abstract for Cand.Sc. (Engineering.), 05.15.03, National Technical University of Ukraine "KPI", Kiyv, Ukrain.
11. Boyko, V.V., Kuz'menko, A.A., Khlevnyuk, T.V. (2008), "Evaluation of seismic safety of buildings at explosive waves influence on them taking into account their spectral descriptions", *Transactions of National technical university of Ukraine "KPI", serya "Mountain business"*, no.16, pp. 3–13.
12. Rilko, M. A. (1977), "About motion in the resilient environment of hard rectangular body under the action of flat wave", *Mechanics of solid*, no. 1, pp. 158–164.
8. Nagorniy, V.P. and Denisyuk, I.I. (2010), *Spectry i ikh prilojenie k zadacham vzryvnogo dela* [Spektra and their application to the problems of explosive works], Kiev, Ukraine.

Стаття надійшла 14.11.2013.

УДК 624.15.001

### ВПЛИВ КОЛЕКТОРІВ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ НА МІЦНІСНІ ТА НЕСУЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВ І ФУНДАМЕНТІВ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМІННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Б. В. Моркляник**

Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна.

**А. С. Фартушний, В. Г. Шаповал**

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»  
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49000, Україна.

E-mail: andrej\_fartuschnij@i.ua, shap-ww@mail.ru

Представлені матеріали експериментальних досліджень процесу тріщиноутворення в конструкціях із композитного матеріалу (бетону з полімерною вставкою). Показано, що в діапазоні температур  $-2...+40$  °C має місце інтенсивне тріщиноутворення. Зроблено висновок про те, що при проектуванні суміщених фундаментів теплових насосів, в яких розташовані пластикові теплообмінники, необхідно враховувати зумовлені відмінністю в коефіцієнтах теплового розширення додаткові напруження.

**Ключові слова:** тепловий насос, температурні деформації та напруження, тріщиноутворення, полімерна трубка, додаткові зусилля, коефіцієнт теплового розширення.