

2. Кочетков А.В. Нестационарное взаимодействие тонкостенных конструкций с ударными волнами в грунтовых средах / А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Горький: Горьк. ун-т, 1985. – С. 60 – 65.
3. Баженов В.Г. Деформирование цилиндрических оболочек в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения / В.Г. Баженов, А.В. Кочетков, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Горький: Горьк. ун-т, 1989. – С. 87 – 95.
4. Ляхов В.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. / В.М. Ляхов. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
5. Лучко И.А. Механический эффект взрыва в грунтах / И.А. Лучко, В.А. Плаксий, Н.С. Ремез и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
6. Лучко И.А. Прикладные задачи динамики грунтов / И.А. Лучко, В.А. Плаксий – Киев: Наук. думка, 1979. – 132 с.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
8. Уилкинс М.Л. Расчет упруго – пластических течений / М.Л. Уилкинс // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212 – 263.
9. Ляхов В.Н. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций / В.Н. Ляхов, В.В. Подлубный, В.В. Титаренко. – М.: Машиностроение, 1989. – 392 с.
10. Годунов С.Г. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.Г. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2014 р.

УДК 622.235:697.8

В. В. Бойко, д. т. н., **А. А. Кузьменко**, к. т. н., **Т. В. Хлевнюк**, к. т. н. (Институт гидромеханики НАН Украины)

О СЕЙСМИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ ОБРУШЕНИИ ВЫСОТНОГО СООРУЖЕНИЯ

V. V. Boiko, A. A. Kuzmenko, T. V. Khlevniuk, (Institute of Hydromechanics of NAN of Ukraine)

ABOUT THE SEISMIC EFFECTS IN THE COLLAPSE OF HIGH-RISE BUILDINGS

Приведены результаты сейсмометрических измерений параметров колебаний земной поверхности при обрушении дымовой трубы взрывным способом и сравнение их с существующими расчетными методами определения сейсмического эффекта при указанном технологическом процессе.

Ключевые слова: взрыв, масса заряда, скорость смещения грунта, период колебаний, коэффициент сейсмичности, сейсмобезопасность.

Наведені результати сейсмометричних вимірювань параметрів коливань земної поверхні при обваленні димової труби підривним способом і порівняння їх з наявними розрахунковими методами визначення сейсмічного ефекту при вказаному технологічному процесі.

Ключові слова: вибух, маса заряду, швидкість зміщення ґрунту, період коливань, коефіцієнт сейсмічності, сейсмобезпечність.

The results of seismic measurements of the earth's surface oscillations in the collapse of the chimney blasting and compare them with existing design methods determine the seismic effect at the specified process.

Keywords: explosion, charge weight, the rate of displacement of soil, the period of oscillation, the ratio of seismicity, seismic safety.

Введение. Способ взрывного обрушения зданий и сооружений, в т.ч. и больших промышленных вытяжных труб, находит широкое применение, т.к. при прочих равных условиях этот способ наиболее быстрый и менее трудоемкий.

Указанные работы в большинстве случаев выполняются в стесненных условиях и поэтому учет сейсмобезопасности расположенных вблизи зданий, сооружений, коммуникационных сетей и т.п. имеет весьма важное значение.

Публикаций на эту тематику имеется незначительное количество [1, 2, 3] особенно тех, где анализировались бы результаты измерения параметров сейсмозрывных волн (СВВ) и волн, вызванных ударом о земную поверхность падающих труб и отдельных конструкций сооружений при их разрушении.

Цель работы - оценка существующих методов определения сейсмического эффекта при взрывном способе обрушения высотного сооружения посредством их сравнения с фактическими данными, полученными при непосредственном измерении производственного процесса.

Изложение материала исследования. В статье рассматривается обрушение кирпичной дымовой трубы высотой 60 м и массой 1250 т в пгт. Калиновка Васильковского района Киевской области предприятием «Укрспецвзрыв».

Внешний радиус трубы в основании – 3,55 м, внутренний – 2,47 м; внешний радиус верхней части трубы - 2,0 м, внутренний – 1,5 м.

Сейсмический эффект при взрывном обрушении трубы имеет два источника: собственно взрыв шпуровых зарядов взрывчатых веществ (ВВ) по образованию подбоя в теле трубы и удар о земную поверхность падающей массы трубы.

В такой последовательности мы и рассмотрим эти два процесса.

В свою очередь, определение интенсивности сейсмических волн при взрывании шпуровых зарядов ВВ для получения подбоя проводилось двумя методами. Первый метод – это аппаратурные измерения параметров СВВ (скорость смещения грунта, см/с и периода его колебаний, с) и на основании полученных данных определение интенсивности колебаний земной поверхности. Второй метод – это аналитический метод жесткого штампа на упругом основании.

Рассмотрим первый метод. Измерение параметров СВВ, вызванных взрывом шпуровых зарядов подбоя, осуществлялось стандартной сейсмометрической аппаратурой – сейсмоприемники СМ-3, преобразователь сигналов АЦП Е 14-440 и регистратор ПК типа ноутбук.

Сейсмоприемники устанавливались на профиле 120-290 м от основания трубы. Породный массив состоял из песчаного грунта в верхних слоях (до 3-4 м), суглинков (до 10 м), водоносный слой песка мощностью 1 м на уровне 11 м и далее глина.

Согласно проекта взрывных работ (ВР) подбой выполнялся зарядами аммонита БЖВ, помещенными в шпуры диаметром 36 мм. На высоте одного метра от земной поверхности взрывались 28 шпуровых зарядов, сетка шпуров $0,5 \times 0,5$ м (двухрядная). В одном шпуре масса заряда ВВ составляла 0,147 кг, общая масса зарядов $Q = 4,12$ кг.

На рис.1 приведена сейсмограмма колебаний грунта на различных расстояниях ($r = 120 - 290$ м) от основания трубы при воздействии на земную поверхность взрыва зарядов подбоя (время воздействия от 1,0 до 2400 мс) и от падения трубы (3300 – 10000 мс).

Проанализируем интенсивность воздействия взрыва зарядов подбоя на земную поверхность по результатам сейсмометрических измерений параметров взрывных волн. Зависимость основного критерия сейсмоопасности ВР (скорости смещения грунта, см/с) от расстояния в поверхностной волне выражается степенной регрессией следующего вида:

$$U^z = K_1 \cdot r^{-n}, \quad \text{где:} \quad (1)$$

K_1 – коэффициент сейсмичности; r – расстояние от места взрыва до точки наблюдения, м; n – коэффициент затухания волнового процесса. По результатам настоящих измерений $K_1 = 500$, $n = 1,7$.

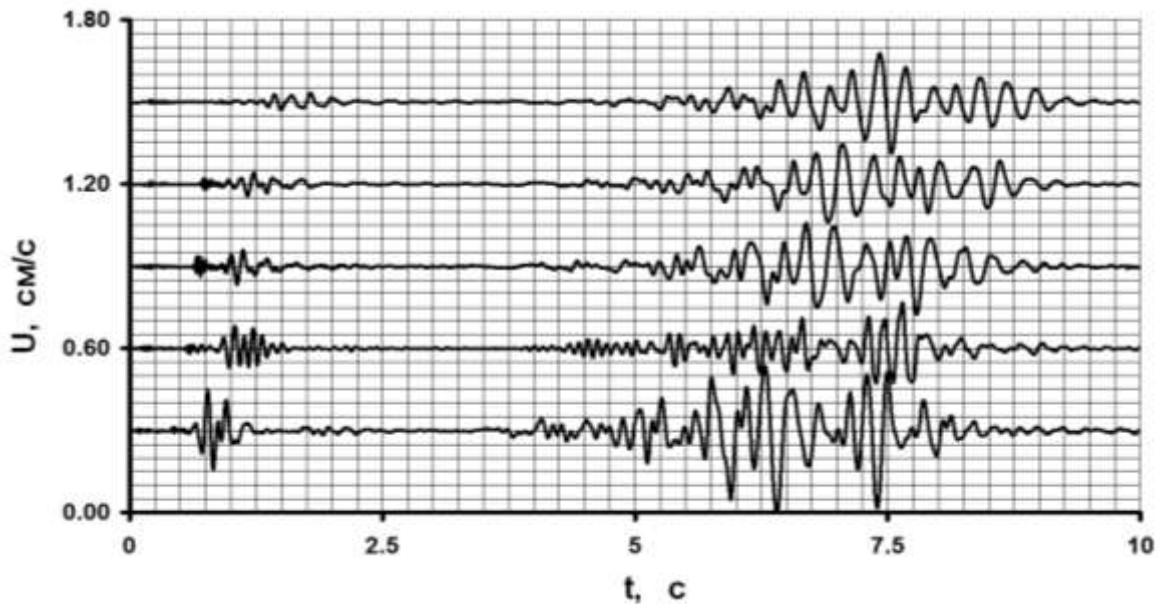


Рис.1. Сейсмограмма колебаний грунта на различных расстояниях при обрушении дымовой трубы

Для прогнозирования сейсмического эффекта аналогичных работ в других условиях, а также для расчета сейсмобезопасного расстояния или допустимой массы заряда зависимость (1) можно записать в следующем виде:

$$U^z = K_2(r/Q^{1/3})^{-1,7}, \quad \text{где:} \quad (2)$$

$$K_2 = K_1 \cdot (Q^{1/3})^{-1,7} = 500 \cdot (4,12^{1/3})^{-1,7} = 225.$$

Результаты обработки полученного сейсмометрического материала показывают, что скорость смещения грунта при взрыве зарядов подбоя изменяется от 0,15 см/с до 0,032 см/с на расстоянии от 120 до 290 м от места взрыва при периоде колебаний в поверхностной волне от 0,11 до 0,15 с.

Рассмотрим второй метод, который заключается в следующем. Часть трубы ниже уровня расположения зарядов подбоя рассматривается как жесткий штамп на упругом основании (мягком грунте). При взрыве к штампу прикладывается напряжение и он начинает двигаться с начальной скоростью (м/с):

$$U_{\text{ш}} = Q \cdot \sqrt{2C} / 2M, \quad \text{где:} \quad (3)$$

M – масса части трубы ниже уровня расположения зарядов ($M = 25330$ кг); C – энергия единицы массы заряда ($C = 4,2 \times 10^6$ Дж/кг).

В результате несложных расчетов получаем, что $U_{\text{ш}} = 23,4$ см/с, а на границе сред «жесткий штамп – мягкий грунт» в результате процесса преломления волны значение скорости смещения уменьшается до 10,4 см/с.

Далее, в мягком грунте, будет распространяться волна типа поверхностной, которая в зависимости от расстояния может определяться по формуле [3]. К сожалению, формула (4), рекомендуемая в работе [3], «не работает», т.к. рассчитанные на ее основе результаты отличаются в меньшую сторону от фактических (замеренных) в 6-8 раз.

$$U = U_{\text{ш}} \left(r_0/r \right)^{1,5}, \quad \text{где:} \quad (4)$$

r_0 – половина размера основания штампа, м; r – расстояние от основания трубы до наблюдаемого пункта, м.

Поэтому после выхода волны $U_{\text{ш}}$ из жесткого штампа в мягкий грунт можно пользоваться формулами (1) или (2) для определения сейсмического эффекта при взрыве зарядов подбоя. О последнем можно сказать, что его интенсивность очень слабая, меньше одного балла, а периоды колебаний не совпадают с резонансной областью колебаний зданий и сооружений, что способствует повышению сейсмобезопасности.

Проанализируем действие второго источника колебаний земной поверхности – удар о грунт обрушенной трубы и образование волновых колебаний, подобных поверхностной волне.

Зависимость скорости смещения грунта от расстояния выражается следующей степенной регрессией:

$$U^z = 45 \cdot r^{-1,05}, \quad R = -0,988. \quad (5)$$

Падение трубы произошло в две стадии, сначала упала ее нижняя часть (2/3 высоты), а потом верхняя часть (1/3 высоты). Таким процесс падения трубы зафиксирован и на канале №1 ($r = 120$ м) осциллограммы (рис.1), но в дальнейшем (каналы № 2-5) волновые процессы сливаются в один, возможно усиливая друг друга. Поэтому, будем вести расчет удара трубы о земную поверхность как единый процесс.

Чтобы определить интенсивность воздействия удара жесткого тела о грунт обычно приравнивают энергию удара к химической энергии взрыва сосредоточенного эквивалентного заряда. Масса последнего определяется по формуле:

$$Q_{\text{эКВ}} = E_k / C, \quad \text{где:} \quad (6)$$

E_k – кинетическая энергия груза, Дж; C – энергия единицы массы заряда, Дж/кг. Для ВВ аммонита 6ЖВ – $C = 4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг. При падении дымовой трубы:

$$E_k = M \cdot g \cdot H, \quad \text{где:}$$

M - масса трубы, $1,25 \cdot 10^6$ кг; H – вертикальное перемещение центра тяжести трубы к моменту встречи с грунтом (25 м).

$$Q_{\text{ЭКВ}} = \frac{M \cdot g \cdot H}{C} = 70,45 \text{ кг.}$$

Для возможности прогнозирования сейсмобезопасности ВР, связанных с обрушением дымовых труб и других высотных сооружений, необходимо иметь зависимость скорости смещения грунта от приведенного к массе заряда расстояния. Имея коэффициент сейсмичности $K_3 = 45$ в формуле (5) и эквивалентную массу заряда $Q_{\text{ЭКВ}}=70.45$, можно представить искомую зависимость в следующем виде:

$$U = K_4 \left(\frac{r}{Q_{\text{ЭКВ}}^{1/3}} \right)^{-1,05}, \text{ см/с, где:} \quad (7)$$

$$K_4 = K_3 \cdot (Q_{\text{ЭКВ}}^{1/3})^{-1,05} = 45 \cdot 0,222 = 10.$$

Анализируя зависимости (5) и (7) можно утверждать, что коэффициент затухания волнового процесса $n=1,05$ более обоснован, чем $n=1,5$ и $n=2,5$, принимаемые по убеждениям в [1-3], т.к., во-первых, коэффициент $n=1,05$ получен на основе фактических данных, зарегистрированных сейсмометрическим комплексом при обрушении дымовой трубы, а, во-вторых, волновые процессы происходят в мягком грунте в упругой области при распространении сейсмической поверхностной волны, а это все указывает, что величина n должна быть не более 1,0 – 1,2. Коэффициенты 1,5 или 2,5 относятся к упруго-пластическим и пластическим объемным волнам.

Особенностью поверхностной волны, возникшей при ударе является меньшая, примерно в два раза, скорость ее распространения по сравнению со взрывной волной.

Представление об интенсивности волновых колебаний при обрушении дымовой трубы дают данные (рис. 2), откуда видно, что скорость смещения в поверхностной волне, возникшей при подземном взрыве ($Q = 70$ кг, $H_0 = 1 \text{ м/кг}^{1/3}$) в песчано-суглинистом грунте (позиция 3), в 2 раза превышает аналогичный показатель при ударе о земную поверхность падающей трубы (позиция 2). Примерно такое же соотношение интенсивности колебаний при сравнении взрывных волн, возникших при подбросе (позиция 1), и волн, вызванных ударом о земную поверхность падающей трубы (позиция 2).

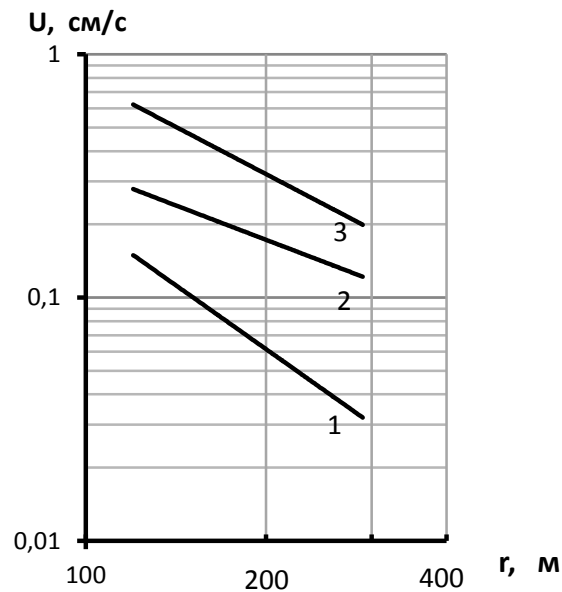


Рис. 2. Сравнение интенсивности сейсмических волн:

1 – подбой трубы ($Q=4,12$ кг); 2 – удар о земную поверхность падающей трубы ($Q_{\text{экв}}=70$ кг); 3 – подземный взрыв сосредоточенного заряда ВВ ($H_0=1\text{ м/кг}^{1/3}$, $Q=4,12$ кг)

Существенной особенностью волн, возникших при ударе, является величина периодов их колебаний, которые на профиле от 120 до 290 м изменяются от 0,23 с до 0,25 с и превосходят в 4-5 раз аналогичные данные при взрывах контактных (наружных) зарядов массой 40-80 кг [3].

Периоды колебаний волн, возникших при ударе и подземном взрыве, практически находятся на одном уровне.

Низкочастотные колебания при ударных нагрузках, которые попадают в резонансную область колебаний зданий и сооружений (4-5 Гц), требуют особого сейсмобезопасного внимания при проведении работ по обрушению высотных сооружений. Все зависит от расстояния до охраняемых сооружений, допустимых значений критериев сейсмоопасности и частотных характеристик.

Можно на примере настоящих исследований показать, как зависит допустимая скорость смещения от соотношения периодов колебаний в волне и собственных колебаний охраняемого объекта.

Период колебаний при ударе трубы о земную поверхность $T=0,25$ с, период собственных колебаний охраняемого объекта $T_0=0,2$ с, логарифмический декремент затухания $\lambda_0=0,3$, период колебаний стандартного маятника $T_{\text{см}}=0,25$ с, допустимая скорость смещения охраняемого объекта $U_0=0,5$ см/с без учета частотных характеристик.

Определить допустимую скорость колебаний охраняемого объекта с учетом частотных характеристик, указанных выше, представляется возможным, используя следующее соотношение [4, 5]:

$$U_{\text{доп}} = U_0 \cdot C / V_{\text{зд}}, \text{ где:} \quad (8)$$

C - спектр действия колебаний:

$$C = T_0^2 / T_{\text{см}}^2 \cdot 1 / \sqrt{2\lambda_0};$$

$V_{\text{зд}}$ - частотная характеристика системы «грунт – охраняемый объект»:

$$V_{\text{зд}} = \left[\left(1 - T^2 / T_0^2 \right)^2 + 4\lambda_0^2 / (\pi^2 + \lambda_0^2) \cdot T^2 / T_0^2 \right]^{-1/2}.$$

После решения соотношения (8) получим допустимую скорость смещения для охраняемого объекта $U_{\text{доп}} = 0,25$ см/с, а в результате удара о земную поверхность падающего груза на расстоянии 120 м от основания трубы скорость смещения грунта по вертикальной составляющей 0,3 см/с.

Таким образом, казалось бы незначительная интенсивность сейсмических колебаний при обрушении трубы не должна вызвать проблем с сейсмобезопасностью, но «благодаря» значительным низкочастотным колебаниям в волне при ударе и наступлению резонансного эффекта, проблемы возникают.

Выводы

Основываясь на приведенных сейсмометрических измерениях параметров волнового процесса при обрушении высотной дымовой трубы, установлены некоторые особенности формирования и распространения волновых колебаний.

Так, например, возникающие волновые колебания при взрыве шпуровых зарядов подбоя трубы распространяются в грунтовом массиве на основании закономерностей сейсмозрывной волны, а не волны, сохраняющей в своей основе конструктивные особенности «жесткого штампа».

Нами установлено, что возникшая при ударе о грунт поверхностная волна, распространяется в мягком грунте с коэффициентом затухания $n = 1,05$, что соответствует типу этой волны. А коэффициенты $n = 1,5 - 2,5$, которые присвоены волновому процессу при ударе трубы о грунт волевым решением [1-3], относятся к упруго-пластическим и пластическим волнам.

В статье показаны различие и сходство сейсмического эффекта при взрывах подземного, накладного зарядов, взрыва шпуровых зарядов подбоя трубы и при ударе о земную поверхность дымовой трубы.

На конкретном примере показан метод определения допустимой скорости смещения грунта в основании сооружения с учетом частотных характеристик

вынуждающего волнового процесса и собственных колебаний охраняемого объекта.

Список использованных источников

1. Афонин В. Г. Справочное руководство по взрывным работам в строительстве / В. Г. Афонин, Л. М. Гейман, В. М. Комир. К.: «Будівельник», 1974. – 382 с.
2. Двоскин Х. М. Валка железобетонной трубы высотой 120 м взрывным способом в заданном направлении / Х. М. Двоскин // Взрывное дело, М.:Недра. – 1970. – №69/26. – С. 278-289.
3. Цейтлин Я. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я. И. Цейтлин, Н. И. Смолий. М.:Недра. – 1981. – 192 с.
4. Бойко В. В. Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд: ДСТУ 7116:2009. – [Чинний від 2009.18.12.] – К.: Держспоживстандарт України. - 2010.- 6с. (Національні стандарти України).
5. Бойко В. В. Оценка сейсмобезопасности 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 (КПІ), Серія «Гірництво». – 2008. – Вип. 16. – С. 3 – 13.

Статья поступила в редакцию 04.09.2014 р.