

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ НА КОЛОННЫЙ АППАРАТ С УЧЕТОМ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭПИЦЕНТРА ВНЕШНЕГО ВЗРЫВА

М.А. Иляева, И.Р. Кузеев

В настоящее время вопросам обеспечения промышленной безопасности уделяется повышенное внимание. Аппараты колонного типа являются основным оборудованием нефтеперерабатывающих установок, и в них содержится значительное количество углеводородного сырья, которое характеризуется высокими взрывопожароопасными свойствами. Поэтому особый интерес представляет определение расчетных нагрузок, действующих на аппараты колонного типа при внешнем взрыве, которые позволят в дальнейшем разработать мероприятия направленные на обеспечение промышленной безопасности.

Для оценки воздействия ударных волн на колонные аппараты предлагается использовать схему расчета аналогичную определению нагрузки, возникающей в результате ветрового воздействия на аппарат. В расчетах аппараты колонного типа обычно принимают как вертикальный консольный стержень постоянного (или переменного) сечения, упруго заземленный у основания, [1, 2, 3] причем целесообразно рассматривать его как упругую систему [4]. В данной статье рассматриваются колонные аппараты постоянного по высоте сечения.

В работе [4] используется упрощенный метод, и нагрузка принимается равномерно распределенной по высоте колонного аппарата, отсюда неясен характер изменения нагрузки по высоте конструкции при действии кратковременных импульсных нагрузок. Такой подход дает приближенную оценку прочности и устойчивости аппаратов от действия внешнего взрыва.

Предлагается рассматривать взрывную нагрузку как сосредоточенную, и приложенную в определенном месте конструкции. Такая схема возникает на практике при разгерметизации отдельных узлов колонного аппарата с выбро-

сом в атмосферу значительных количеств углеводородного сырья или нефтепродуктов с последующим образованием неограниченного парогазового облака и его взрывом в воздушной среде вблизи аппарата (в атмосфере при нормальных условиях с плоским прямым фронтом ударной волны).

Нагрузку, создаваемую ударной волной на колонный аппарат в целом при внешнем взрыве можно представить как

$$P_{y\partial} = C_D \cdot K_d \cdot A \quad (1.1)$$

где C_D – коэффициент сопротивления тела стационарному обтекающему потоку воздуха или аэродинамический коэффициент; для колонного оборудования, ось симметрии которого перпендикулярна направлению потока $C_D = 1,2$ [5];

K_d – коэффициент динамического усиления;

A – нагрузка, действующая на аппарат при обтекании его ударной волной, Н. В нашем случае рассматриваются схемы, в которых нагрузка принимается равномерно распределенной (q) или сосредоточенной (F).

Распределенная нагрузка, действующая на аппарат колонного типа при обтекании его взрывной волной [4]:

$$A = q = \frac{\pi \cdot Q \cdot D_n}{2}, \quad (1.2)$$

где Q – динамический (скоростной) напор ударной волны, Па [6],

D_n – наружный диаметр колонны, м.

Сосредоточенная сила, действующая на колонный аппарат при обтекании его взрывной волной определяется:

$$A = F = \frac{\pi \cdot Q \cdot D_n \cdot H}{2}. \quad (1.3)$$

При решении динамических задач существует подход по которому динамические величины можно определить путем умножения статических величин на динамический коэффициент [7, 8, 9]. В данной задаче коэффициент динамического усиления можно представить

$$K_D = 1 + \frac{x_0}{x_{стат}} \quad (1.4)$$

где $\frac{x_0}{x_{стат}}$ - характеризует долю усиления динамической составляющей взрывной нагрузки;

$x_{стат}$ – статический прогиб от действия ударной волны, м.

Максимальный статический прогиб от действия взрывной волны.

$$x_{стат} = \frac{\Delta p_{обт} \cdot \pi \cdot D_n \cdot H^4}{16 \cdot E \cdot J}, \quad (1.5)$$

где $\Delta p_{обт}$ – давление обтекания, Па.

Для расчета максимального прогиба в режиме импульсного приложения нагрузки используется известный закон сохранения энергии, то есть равенства кинетической энергии ударной волны (K, Дж) и потенциальной энергии деформации (U, Дж) [5]

$$K = U. \quad (1.6)$$

Полная кинетическая энергия ударной волны в режиме импульсного приложения определяется:

$$K = \sum_{по\ высоте} \frac{I^2}{2 \cdot m} = \int_0^{\frac{H}{2}} \frac{\left(\frac{i \cdot \pi \cdot D_n}{2} dy \right)^2}{\frac{m}{H} dy} = \frac{\pi^2 \cdot i^2 \cdot D_n^2 \cdot H^2}{8 \cdot m}, \quad (1.7)$$

где I – полный импульс ударной волны, Н·с;

m – общая масса аппарата при рабочих условиях, кг.

Максимальная потенциальная энергия деформации, накопленная системой, определяется как интеграл по всей длине балки (стержня) от прохождения момента на угол поворота [5]

$$U = \int_0^H M \cdot \left(\frac{d^2 x}{dy^2} \right) dy, \quad (1.8)$$

где M – изгибающий момент, Н·м.

Потенциальная энергия деформации, накопленная упругой системой, при условии малой деформации (упругий изгиб Бернулли) определяется из вы-

ражения [5]:

$$U_y = \int_0^H \frac{M_y^2 dy}{2 \cdot E \cdot J} = \frac{E \cdot J}{2} \cdot \int_0^H \left(\frac{d^2 x}{dy^2} \right)^2 dy, \quad (1.9)$$

где M_y – изгибающий момент, возникающий в упругой системе, Н·м;

E – модуль упругости материала аппарата, Па;

J – момент инерции аппарата относительно центральной оси, м⁴.

Одним из основных моментов в решаемой задаче является выбор подходящей формы колебаний, однако в пределах допускаемой погрешности получается достоверное приближенное решение независимо от формы колебаний, удовлетворяющей соответствующим граничным условиям [5].

Для рассматриваемой системы форма деформируемой оси должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) нулевой прогиб и угол поворота в заделке ($x = dx = 0$ и $x' = \frac{dx}{dy} = 0$);
- 2) максимальный прогиб на свободном конце;
- 3) отсутствие момента сил на свободном конце (нулевая вторая производная, $x'' = \frac{d^2 x}{dy^2} = 0$).

Известно, что этим условиям отвечает колебание, соответствующее линии статического прогиба (рисунок 1).

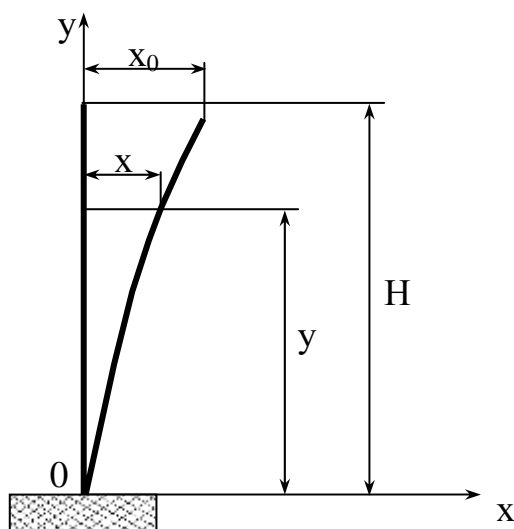


Рисунок 1 – Схема изгиба аппарата колонного типа под действием ударной нагрузки

Будем рассматривать 11 различных схем нагружения колонного аппарата, схемы приведены в таблице 1.

Для того, чтобы получить уравнение кривой статического прогиба по высоте, запишем прогиб в произвольном сечении, определенный по методу начальных параметров [7, 9, 10, 11] для единичной нагрузки ($q^* = 1$ Н/м или $F^* = 1$ Н) и при единичных характеристиках колонного аппарата ($E = 1$ Па, $J = 1$ м⁴).

Для схемы 1:

$$x(y) = \frac{y^4}{24}, \quad (1.10)$$

для схем 2 – 11:

$$x(y) = K_{\text{ед. прогиба}} \cdot y^3, \quad (1.11)$$

где $K_{\text{ед. прогиба}}$ – коэффициент, характеризующий зависимость статического прогиба по высоте при единичных характеристиках нагрузки и аппарата от схемы нагружения (таблица 1).

Дважды продифференцировав это выражение, и поделив правую часть выражений на максимальные соответствующие величины из [8], запишем уравнение прогиба, угла поворота и формы оси изогнутой балки относительно максимальных:

Для схемы 1:

$$x = \frac{x_0}{3} \cdot \left(\frac{y}{H}\right)^4, \quad (1.12)$$

$$x' = \frac{4}{3} \cdot \frac{x_0}{H} \cdot \left(\frac{y}{H}\right)^3, \quad (1.13)$$

$$x'' = 4 \cdot \frac{x_0}{H^2} \cdot \left(\frac{y}{H}\right)^2; \quad (1.14)$$

для схем 2 – 11:

$$x = K_* \cdot x_0 \cdot \left(\frac{y}{H}\right)^3, \quad (1.15)$$

$$x' = K_1 \cdot \frac{x_0}{H} \cdot \left(\frac{y}{H} \right)^2, \quad (1.16)$$

$$x'' = K_2 \cdot \frac{x_0}{H^2} \cdot \left(\frac{y}{H} \right). \quad (1.17)$$

где K_* , K_1 , K_2 – соответственно коэффициенты уравнения прогиба, угла поворота и формы оси изогнутой балки относительно максимальных в зависимости от схемы приложения нагрузки, приведенные в таблице 1.

Для упругой системы потенциальную энергию деформации можно определить из выражения:

для схемы 1:

$$U_y = \frac{E \cdot J}{2} \cdot \int_0^H \left(\frac{4 \cdot x_0}{H^2} \cdot \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right)^2 dy, \quad (1.18)$$

$$U_y = \frac{8}{5} \cdot \frac{x_0^2 \cdot E \cdot J}{H^3}; \quad (1.19)$$

для остальных рассматриваемых схем:

$$U_y = K_U \cdot \frac{x_0^2 \cdot E \cdot J}{H^3}, \quad (1.20)$$

где K_U – коэффициент, зависящий от схемы нагружения (см. таблицу 1).

Максимальный прогиб x_0 в режиме импульсного приложения нагрузки определяем из равенства потенциальной энергии деформации и кинетической энергии (1.5). Для схемы 1:

$$\frac{8}{5} \cdot \frac{x_0^2 \cdot E \cdot J}{H^3} = \frac{\pi^2 \cdot i^2 \cdot D_n^2 \cdot H^2}{8 \cdot m}, \quad (1.21)$$

отсюда

$$x_0 = 0,88 \cdot i \cdot D_n \cdot \sqrt{\frac{H^5}{E \cdot J \cdot m}}. \quad (1.22)$$

Для остальных схем:

$$x_0 = K_{x_0} \cdot i \cdot D_n \cdot \sqrt{\frac{H^5}{E \cdot J \cdot m}}, \quad (1.23)$$

где K_{x_0} – коэффициент, зависящий от схемы нагружения (см. таблицу 1).

Тогда получаем коэффициенты динамического усиления для схемы 1:

$$K_D = 1 + \frac{4,48 \cdot i}{\Delta p_{обм}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m \cdot H^3}}. \quad (1.24)$$

В общем случае выражение для определения коэффициента динамического усиления имеет вид:

$$K_D = 1 + \frac{K \cdot i}{\Delta p_{обм}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m \cdot H^3}}, \quad (1.25)$$

где K – коэффициент, зависящий от схемы нагружения.

Подставляя выражение (1.25) в (1.1) получаем формулу для определения нагрузки, создаваемой ударной волной на колонный аппарат в целом при внешнем взрыве:

$$P_{y\partial} = C_D \cdot A \cdot \left(1 + \frac{K \cdot i}{\Delta p_{обм}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m \cdot H^3}} \right). \quad (1.26)$$

Таким образом, получена зависимость нагрузки, действующей на аппараты колонного типа при действии взрывной волны в зависимости от расположения центра взрыва по высоте колонны.

Результаты расчета ударной нагрузки с учетом схемы нагружения приведены в таблице 2 для колонны атмосферной с высотой $H = 23,635$ м, наружным диаметром $D_n = 3,22$ м, внутренним диаметром $D_v = 3,2$ м; тротильный эквивалент взрыва $W = 2000$ кг.

Таблица 2

Результаты расчета ударной нагрузки на атмосферную колонну, Н

Схема	Зона разрушений				
	расстекления $r = 680$ м	слабых $r = 128$ м	средних $r = 77$ м	сильных $r = 41,5$ м	полных $r = 33$ м
1	2	3	4	5	6
схема 1	8303,3	60634,0	172398,2	744986,4	1299617,4
схема 2	8375,6	61050,4	173388,1	748007,3	1304040,4
схема 3	8772,3	63334,3	178818,4	764578,8	1328304,0
схема 4	9269,1	66195,2	185620,4	785336,4	1358696,6

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
схема 5	9909,4	69882,8	194388,1	812092,6	1397872,2
схема 6	10761,5	74789,7	206054,7	847695,5	1450000,9
схема 7	11954,5	81659,4	222388,1	897539,7	1522981,1
схема 8	13741,3	91949,0	246852,7	972198,0	1632293,5
схема 9	16723,7	109123,2	287686,1	1096808,3	1814744,1
схема 10	22685,9	143456,7	369317,4	1345921,1	2179487,3
схема 11	40575,1	246472,0	614246,8	2093367,3	3273874,9

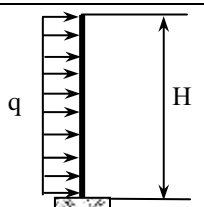
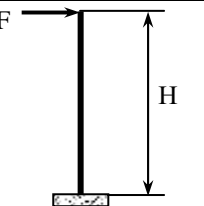
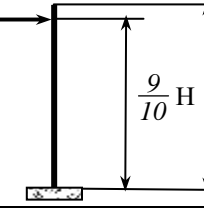
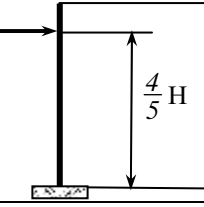
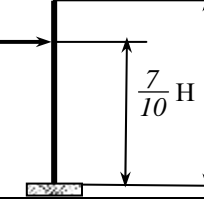
Анализируя полученные результаты численного моделирования для колонных аппаратов можно сделать вывод, что максимальная нагрузка на аппарат создается в случае наземного взрыва, когда центр взрыва находится у основания колонны

На рисунке 2 представлена графическая зависимость коэффициента динамичности от расстояния до центра взрыва по высоте колонного аппарата для различных значений избыточного давления.

Рисунок 3 иллюстрирует графическую зависимость величины ударной нагрузки от расстояния до центра взрыва по высоте колонны для различных зон разрушения при заданных параметрах взрыва.

Таблица 1

Коэффициенты, зависящие от схемы нагружения

№	Схема	$K_{\text{ед. прогиба}}$	K_*	K_1	K_2	K_U	K_{x0}	K
1		1/24	1/3	4/3	4	8/5	0,88	4,48
2		1/6	1/2	3/2	3	3/2	0,907	4,62
3		0,1215	0,4286	1,2857	2,57	1,102	1,058	5,39
4		0,0853	0,3637	1,0911	2,182	0,794	1,247	6,35
5		0,0572	0,3044	0,91301	1,826	0,556	1,49	7,59

Продолжение таблицы 1

6		0,036	0,25	0,75	1,5	0,375	1,814	9,24
7		0,0208	0,2	0,6	1,2	0,24	2,267	11,55
8		0,0167	0,1538	0,4615	0,923	0,142	2,948	15,01
9		0,0045	0,111	0,333	0,667	0,074	4,081	20,79
10		0,0013	0,0714	0,2143	0,429	0,0301	6,349	32,33
11		0,0002	0,0345	0,1035	0,207	0,007	13,15	66,97

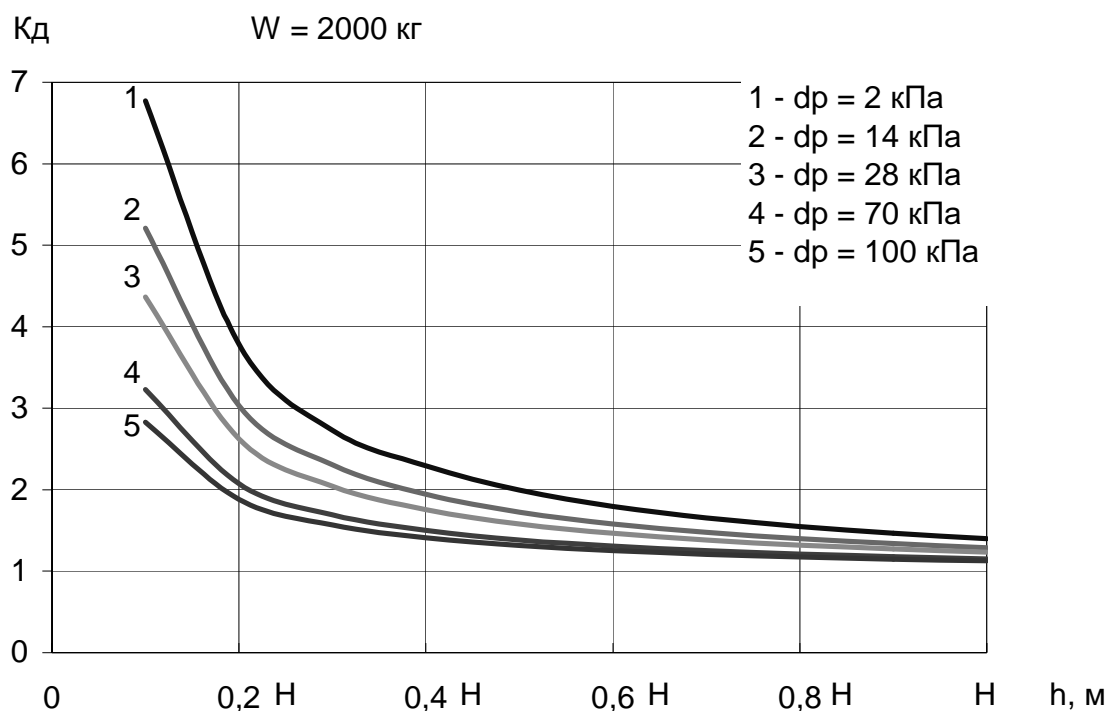


Рис. 2 - Зависимость коэффициента динамичности от расстояния до места взрыва по высоте колонны для различных значений избыточных давлений

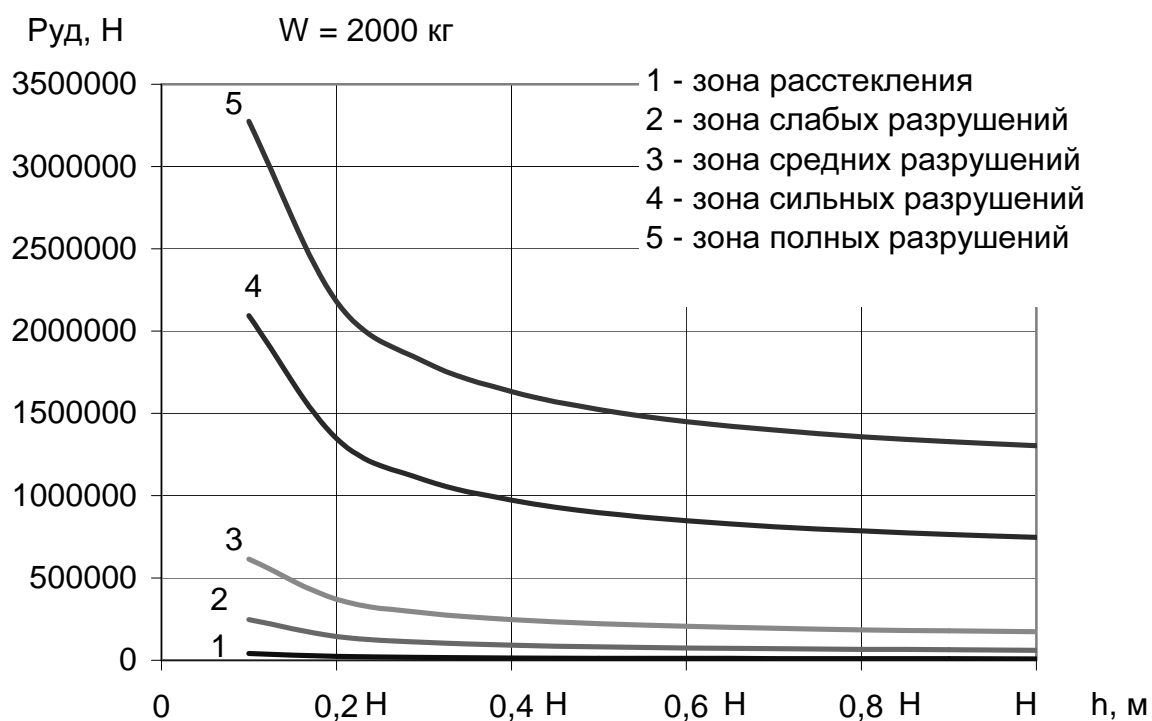


Рис. 3 - Зависимость величины изгибающего момента от расстояния до центра взрыва по высоте колонного аппарата для различных зон разрушений

Литература:

1. ГОСТ 24756 – 81. Сосуды и аппараты. Нормы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий. – М.: Стандартгиз, 1981

2. Бабицкий И.Ф., Вихман Г.Л., Вольфсон С.И. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов/Под ред. Г.Л. Вихмана.- М.: Недра, 1965.- С. 185.

3. Расчет аппаратов на ветровую нагрузку с применением ЭВМ.- Уфа: УНИ, 1986.- С. 6, 8-9, 15-21.

4. Оценка живучести аппаратов колонного типа нефтеперерабатывающих предприятий при действии внешнего взрыва. Стороженко Ю.В. Диссертация.

5 Взрывные явления. Оценка и последствия: Пер. с англ./У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда.– М.: Мир, 1986.- Т.1.- С. 9-10, 108-109, 128, 146, 151, 154, 206, 266.- Т.2.- С. 206.

6. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва.- М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959.- С. 9, 15-16, 22, 182, 184, 195, 225.

7. Беляев Н.М. Сопротивление материалов.- М.: Наука, 1976.- С. 281.

8. Гафаров Р.Х., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г. Краткий справочник инженера – механика.- Уфа: УГНТУ, 1995.- С. 11-12.;

9. Сборник задач по сопротивлению материалов /Под ред. А.В. Александрова. – М.: Стройиздат, 1977 – С. 334. – С. 146.

10. Сопротивление материалов /Под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1975. – С. 411 – 428.

11. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. Сопротивление материалов. – Киев: Вища школа, 1986. – С. 381 – 415.

12. А.А. Лацинский Конструирование сварных химических аппаратов: Справочник.- Л.: Машиностроение, 1981.- С. 285, 287, 306-311.

АННОТАЦИЯ

УДК 66.08

Определение ударной нагрузки на колонный аппарат с учетом высоты
расположения эпицентра внешнего взрыва

М.А. Иляева аспирант, И.Р. Кузеев д.т.н., профессор

Статья посвящена проблеме расчета ударной нагрузки, создаваемой на колонные аппараты от действия внешнего взрыва с учетом высоты расположения центра взрыва относительно колонны.

Построена графическая зависимость величины ударной нагрузки от расстояния до центра взрыва по высоте колонного аппарата для различных зон разрушения.

Определено, что максимальная нагрузка на аппарат колонного типа в случае наземного или надземного внешнего взрыва создается, когда центр взрыва находится у основания колонны.

Ил. 3, табл. 2, библиогр. 12 назв.

THE SUMMARY

Determination of a shock load on a column type apparatus with allowance for heights of a disposition of centre of external explosion

M.A. Ilyeva the post-graduate student,

I.R. Kuzeev the doctor of engineering science, professor

The article is devoted to a problem of account of a shock load on column apparatus created from an external explosion with allowance for height of a disposition of centre of explosion concerning a column.

The graphic dependence of magnitude of a shock load on a distance up to the centre of explosion on height of a column type apparatus for various zones of destruction is obtained.

Determined, that the maximum load on an apparatus of column type in the case of ground or above ground external explosion forms, when the centre of explosion is at the basis of a column.

Figures 3, tables 2, bibliography 12 titles