

Введение.

На территории Российской Федерации взрывостойкость строительных конструкций регулируется обычно следующими документами:

1. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей» (утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. № 137).

2. Приложением №3 к Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».

Существуют методики, позволяющие рассчитывать устойчивость строительных конструкций (зданий, сооружений) к воздействию воздушной ударной волны, например; «Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок», авторства АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», Москва, 2000 г.

Какого –либо утвержденного государственного стандарта, методики, описывающей порядок полигонных испытаний заполнений проёмов (дверей, ворот, оконных блоков) на устойчивость к аварийному взрывному воздействию не существует.

В 2017 годы был утвержден ГОСТ Р 57471-2017 Конструкции взрывозащитные металлические. Общие технические требования и методы испытаний, но он применим в основном к террористическим и криминальным взрывам, в которых воздействие факторов взрыва нормируется количеством ВВ и расстоянием до преграды, в то время как в химической и нефтехимической промышленности принято оценивать последствия возможного взрыва через расчёт зон поражения.

1. Особенности поведения строительных конструкций при воздействии на них динамических взрывных нагрузок.

При расчетах последствий динамического воздействия на строительные конструкции в настоящее время используется следующая приближенная методология. Динамическая нагрузка заменяется эквивалентной ей по действию статической нагрузкой, которая определяется по формуле [1-4]:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{макс}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{макс}}$ - максимальное значение динамической нагрузки; $K_{\text{д}}$ - коэффициент динамичности, равный максимальному значению функции динамичности $T(t)$, описывающей движение (перемещение сечений) конструкции во времени.

Как следует из (1) для замены динамической нагрузки эквивалентной ей статической необходимо определить коэффициент динамичности $K_{\text{д}}$.

Известно, что движение конструкции в стадии упругих деформаций описывается уравнением:

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 \cdot T = \omega^2 \cdot f(t), \quad (2)$$

где ω - круговая частота собственных колебаний конструкции; $f(t)$ - функция, описывающая изменение безразмерной $f(t) = \frac{P(t)}{P_{\text{IAEN}}}$ динамической нагрузки во времени; $T(t) = S(t)/S_{\text{МАКС}}$ - относительное перемещение конструкции или функция динамичности; $S_{\text{МАКС}}$ - смещение конструкции при статическом воздействии на нее нагрузки - $P_{\text{МАКС}}$.

Уравнение (2) получено из следующих соображений. Динамика колебаний конструкции приближенно может быть описано следующим уравнением:

$$M \cdot \frac{d^2 S}{dt^2} = -k \cdot S + P(t) \cdot A, \quad (3)$$

где M - масса конструкции; k - коэффициент жесткости для данной конструкции и граничных условий; $S(t)$ - смещение конструкции; $P(t)$ - распределенная нагрузка; A - площадь конструкции.

Преобразуем уравнение (3) к виду:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = -\omega^2 \cdot S + g \cdot \frac{P(t)}{P_{ИНЕР}}, \quad (4)$$

где $P_{ЭИД} = \frac{M \cdot g}{A}$ - инерционность конструкции; $\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$ - частота собственных колебаний конструкции; g – ускорение свободного падения.

При статическом нагружении конструкции $\left(\frac{d^2 S}{dt^2} = 0\right)$ из уравнения (4) следует, что при нагрузке $P_{МАКС}$ и ее отклонении от положения равновесия - $S_{МАКС}$ имеем следующую связь между параметрами:

$$\omega^2 \cdot S_{МАКС} = g \cdot \frac{P_{МАКС}}{P_{ИНЕР}}. \quad (5)$$

Тогда, нормируя нагрузку к $P_{МАКС}$, а смещение конструкции к $S_{МАКС}$, из уравнения (4) получим искомое уравнение (2).

Решение уравнения (2) при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$T(t) = \omega \cdot \int_0^t f(u) \cdot \sin(\omega \cdot (t - u)) \cdot du = \omega \cdot (\sin \omega \cdot t \cdot \int_0^t f(u) \cdot \cos(\omega \cdot u) \cdot du - \cos \omega \cdot t \cdot \int_0^t f(u) \cdot \sin(\omega \cdot u) \cdot du). \quad (6)$$



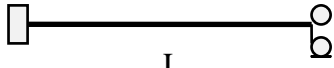
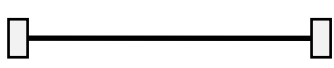
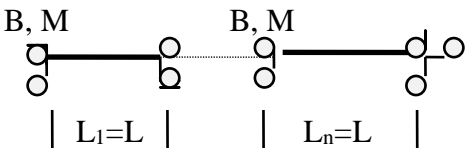
Численное интегрирование выражения (6) дает функцию перемещения конструкции под действием силы $f(t)$ во времени. Максимальное значение функции перемещения $T(t)$ - есть коэффициент динамичности K_d .

Для определения коэффициента динамичности необходимо знать частоту основного тона собственных колебаний конструкций - ω , которая для панелей определяется по формуле [4]:

$$\omega = \frac{\alpha}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{B}{M_k}}, \quad (7)$$

где L - пролет конструкции; B - изгибная жесткость: $B = E \cdot I$, где E - динамический модуль упругости, I - осевой момент инерции сечения, M_k - погонная масса конструкции: $M_k = \frac{q}{g}$, где q - погонная нагрузка от взрыва плюс нагрузка от собственного веса конструкции, α - коэффициент, определяемый по табл.1, g - ускорение свободного падения.

Таблица 1.

№	Конструкция	Коэффициент α
1.	B, M – const 	3.52
2.	B, M – const 	9.87
3.	B, M – const 	15.42
4.	B, M – const 	22.37
5.		15.4 – при n=2 18.5 – при n=3 19.9 – при n=4 n - число пролетов

Для тонких мембран (оболочек) частота собственных колебаний определяется в зависимости от свойств материала и начального состояния оболочки [4,5].

Решение уравнения (2) можно получить, численно разрешив систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dU}{dt} = -\omega^2 \cdot T + \omega^2 \cdot f(t) \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dt} = U$$

К недостаткам описанного выше метода решения уравнения (2) следует отнести следующее обстоятельство. В расчетах предполагается, что колебательный процесс рассматриваемой конструкции происходит на определенной частоте (как правило, на частоте основного тона). Хотя в действительности колебания происходят во всем спектре собственных частот конструкции. Кроме этого в данном методе произвольные граничные условия можно задавать с определенными приближениями.

На рисунке 1 приведены примеры решения уравнения (2) двумя методами: интегрированием соотношения (6) и интегрированием системы дифференциальных уравнений (8).

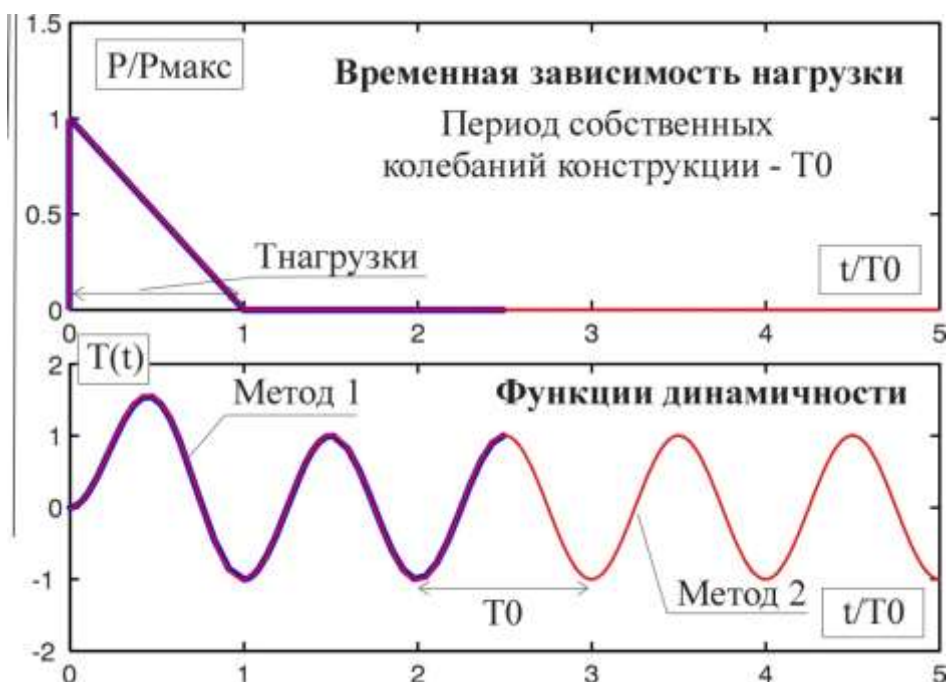


Рисунок 1 -
Временная
зависимость
динамической
нагрузки,
действующей на
конструкцию, и
функция
динамичности.

Физический смысл функции динамичности заключается в том, что она в безразмерном виде (давление нормируется к максимальному давлению - $P_{МАКС}$, смещение конструкции нормируется к - $S_{МАКС}$, где $S_{МАКС}$ – смещение конструкции при статическом воздействии на нее нагрузки - $P_{МАКС}$, а время нормируется к периоду собственных колебаний конструкции - T_0) описывает перемещение центральной точки конструкции при воздействии на нее динамической нагрузки.

Популярно. Имеется две абсолютно разные конструкции. У первой конструкции период собственных колебаний T_1 , а у второй - T_2 . На обе конструкции действуют динамические нагрузки одинаковой формы (здесь, главное, чтобы форма во времени у нагрузок была одинаковой), например, как это показано на верхнем рисунке 1. Если длительность первой нагрузки разделить (пронормировать) на T_1 , а длительность второй нагрузки разделить на T_2 , и если в полученном безразмерном виде эти длительности будут

одинаковы, то и колебательные процессы обеих конструкций будут одинаковы при условии, что время тоже будет аналогичным образом пронормировано. Другими словами, функции динамичности у этих двух конструкций будут одинаковыми. Численное значение временной зависимости отклонения от положения равновесия для каждой конструкции определяется путем умножения значения функции динамичности на значение $S_{МАКС}$, определяемое по формуле (5).

Результаты интегрирования уравнения (2) приведены на рисунке 2. В качестве исходной нагрузки принята нагрузка треугольной формы.

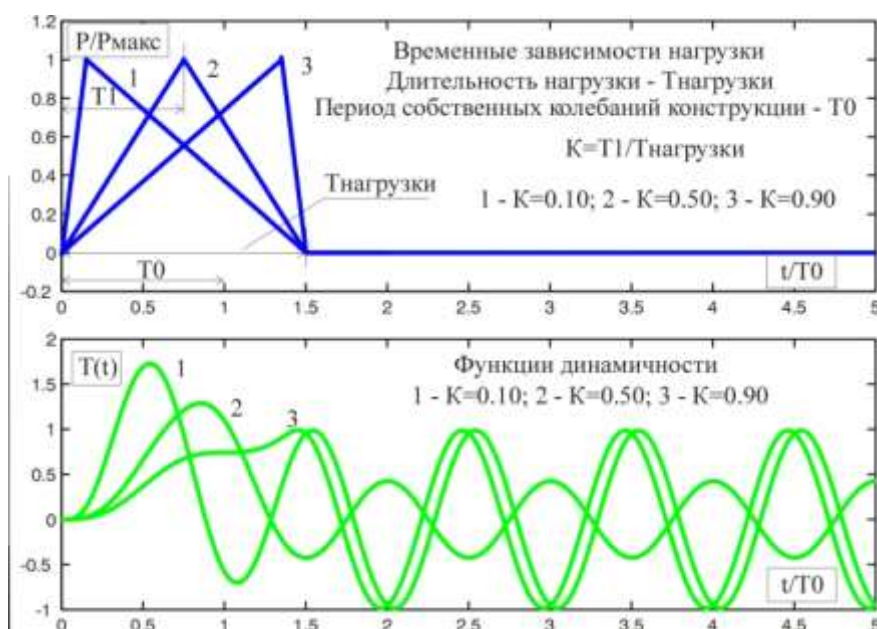


Рисунок 2 - Функции динамичности для трех типов нагрузок, имеющих одинаковый импульс, но разную форму.

Длительность нагрузки принята равной $T_{НАГРУЗКИ}=1.5T_0$, где T_0 – период собственных колебаний конструкции. Время нарастания нагрузки составляло $T_1=0.10 \cdot T_{НАГРУЗКИ}$; $T_1=0.50 \cdot T_{НАГРУЗКИ}$ и $T_1=0.90 \cdot T_{НАГРУЗКИ}$. Соответствующие коэффициенты динамичности (максимальные значения $T(t)$) составляют: $K_d=1.7267$; $K_d=1.2879$ и $K_d=0.9900$. Видно, что форма нагрузки существенно влияет на значение коэффициента динамичности (для данного соотношения между длительностью нагрузки и периодом собственных колебаний конструкции, которое было принято равным $T_{НАГРУЗКИ} / T_0=1.5$).

Таким образом, первая динамическая нагрузка (или динамическая нагрузка первой формы) с максимальным давлением $P_{МАКС}$ приведет к отклонению конструкции в $K_d=1.7267$ раз большему, чем при статическом на нее воздействии давления со значением $P_{МАКС}$. А динамическая нагрузка с третьей формой отклонит конструкцию максимум на $K_d * S_{МАКС} = 0.9900 * S_{МАКС}$, где $S_{МАКС}$ – смещение конструкции при статическом воздействии на нее нагрузки - $P_{МАКС}$. Т.е. динамическое воздействие нагрузки с первой формой существенно опаснее для конструкции (прогиб конструкции будет на 72% больше), чем динамическое воздействие нагрузки с третьей формой.

На рисунке 3 приведены значения коэффициентов динамичности для различных соотношений между длительностью нагрузки и периодом собственных колебаний конструкции и для пяти видов нагрузки.

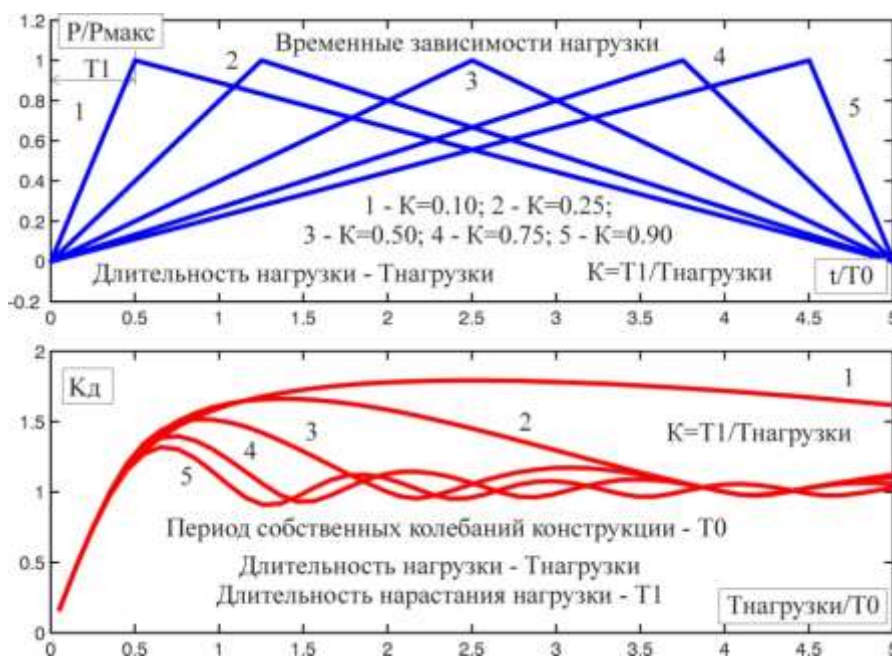


Рисунок 3 - Коэффициенты динамичности для пяти типов нагрузок.

Видно, что временной характер нагрузки влияет на коэффициент динамичности только при соотношениях между длительностью нагрузки и периодом собственных колебаний конструкции, которые больше $0.5 * T_0$.

На рисунке 4 приведены значения коэффициентов динамичности для различных соотношений между длительностью нагрузки и периодом собственных колебаний конструкции, для ударного вида нагрузки $K=0$ и для типа нагрузки, имеющей только фазу нарастания – $K=1$. Условно это можно считать «крайними» формами нагрузок: ударная и плавная.

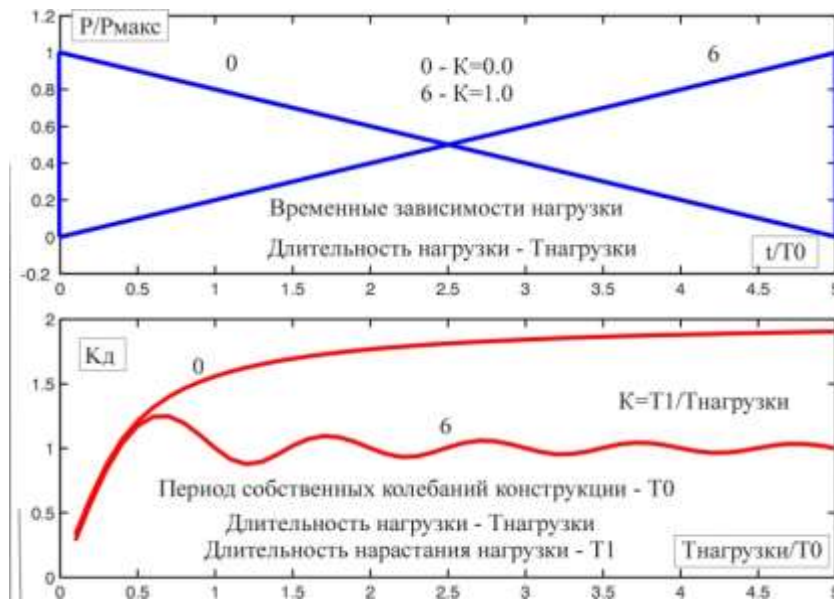


Рисунок 4 - Коэффициенты динамичности для двух «крайних» типов нагрузок.

На рисунке 5 приведены коэффициенты динамичности для соотношений между длительностью нагрузки и периодом собственных колебаний конструкции, меньших 0.5.

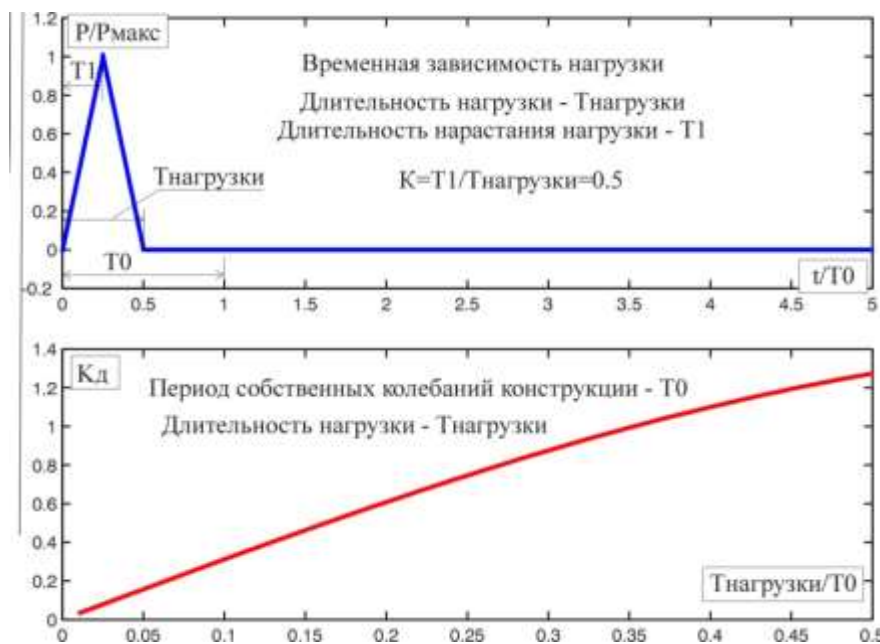


Рисунок 5 - Коэффициенты динамичности для соотношений $T_{нагрузки}/T_0 < 0.5$ и для треугольного типа нагрузки.

Для указанных соотношений $T_{нагрузки}/T_0 < 0.5$, как указывалось ранее (см. рисунок 3 и рисунок 4), форма нагрузки не влияет на числовые значения коэффициентов динамичности.

Основное влияние на значения коэффициентов динамичности оказывает импульс давления - $I = \int P(t)dt$. Это видно из результатов, приведенных на рисунке 6, где приведены значения коэффициентов динамичности для нагрузки

треугольной формы ($I=0.5 \cdot P_{\text{МАКС}} \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}$) и для нагрузки прямоугольной формы ($I=P_{\text{МАКС}} \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}$).

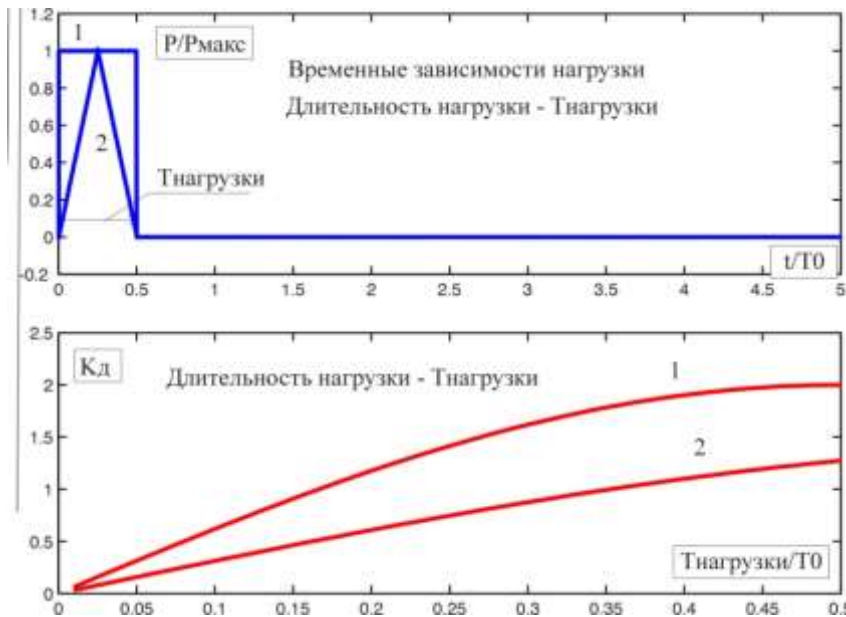


Рисунок 6 - Коэффициенты динамичности для соотношений $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0 < 0.5$ и для нагрузок треугольного и прямоугольного типов.

На рисунке 7 приведены значения коэффициентов динамичности для нагрузки прямоугольной формы и для широкого диапазона соотношений $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0$.

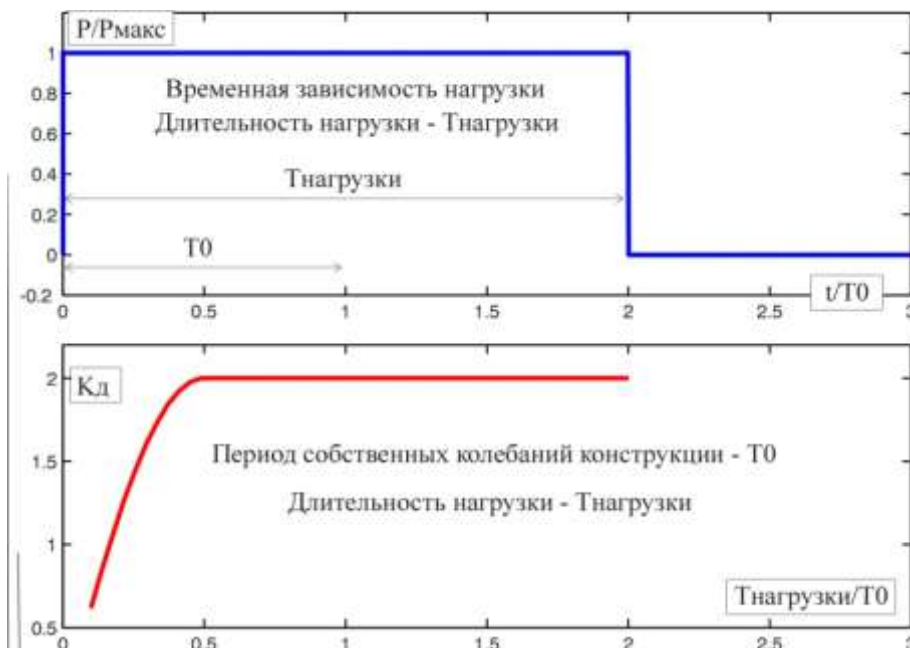


Рисунок 7 - Коэффициенты динамичности для нагрузки прямоугольного типа.

Видно, что для указанного типа нагрузки коэффициент динамичности равен 2 при $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0 > 0.5$, а при $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0 < 0.5$ линейно уменьшается с уменьшением значения $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0$.

Исходя из приведенных расчетов, следует, что коэффициент динамичности для кратковременных нагрузок ($T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0 < 0.5$) приближенно можно определить по следующей формуле:

$$K_d = \frac{2 \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}}{T_0} \cdot \left(2 - 1.5 \cdot \left(1 - \frac{I}{P_{\text{МАКС}} \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}} \right) \right), \quad (9)$$

где I - импульс давления - $I = \int P(t)dt$.

Например, для нагрузки треугольной формы ($I = 0.5 \cdot P_{\text{МАКС}} \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}$) имеем, что коэффициент динамичности приближенно равен:

$$K_d = 1.25 \cdot \frac{2 \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}}{T_0}, \quad (10)$$

а для нагрузки прямоугольной формы ($I = P_{\text{МАКС}} \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}$) имеем, что коэффициент динамичности приближенно равен:

$$K_d = 2.0 \cdot \frac{2 \cdot T_{\text{НАГРУЗКИ}}}{T_0}, \quad (11)$$

Коэффициент динамичности для нагрузок с длительностью больше, чем $T_{\text{НАГРУЗКИ}} > 0.5 \cdot T_0$, приближенно можно определить по графиками, приведенным на рисунке 3, рисунке 4 или на рисунке 8.

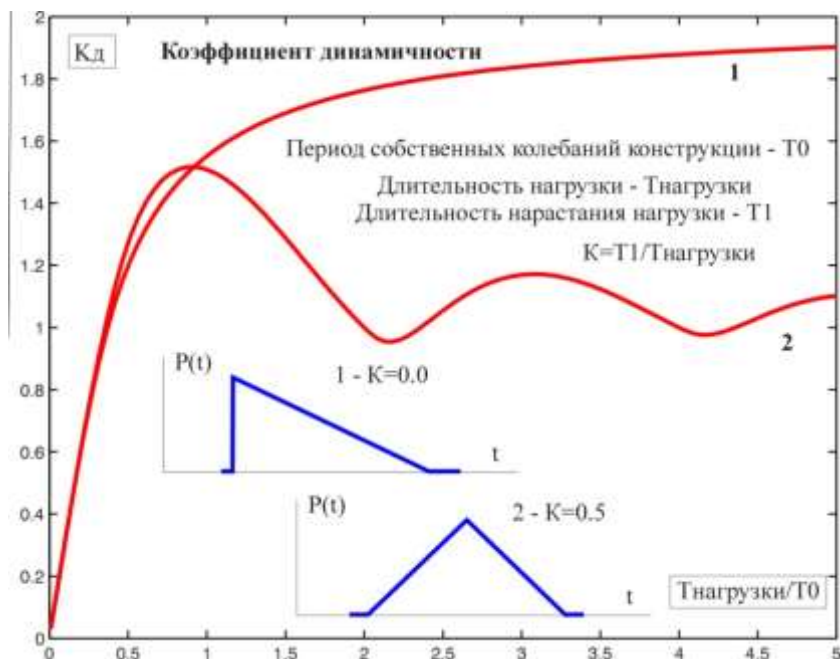


Рисунок 8 - Коэффициенты динамичности для нагрузок пилообразного и треугольного типов

На рисунке 9 приведены временные зависимости динамической нагрузки и функции динамичности, которые им соответствуют.

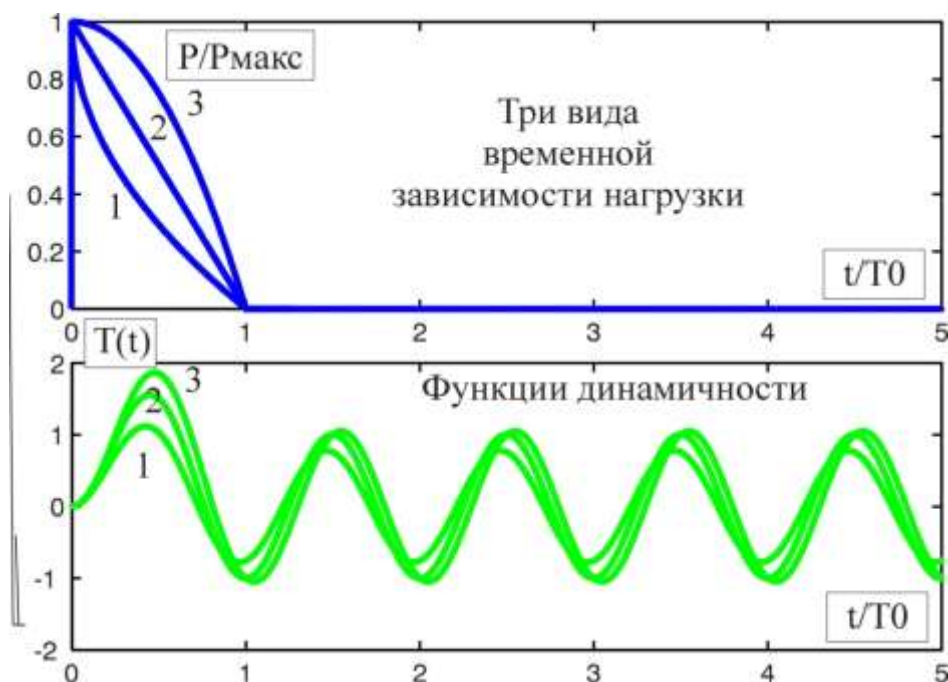


Рисунок 9 -
Функции динамичности для трех типов нагрузок, имеющих различные импульсы.

Из рисунков 2 и 9 следует, что на функцию динамичности (соответственно и на коэффициент динамичности) оказывает влияние не только форма нагрузки, но и ее импульс. Вообще говоря, импульс нагрузки определяется ее формой, поэтому говорить о том, что импульс оказывает влияние на коэффициент динамичности не совсем корректно. Однако в настоящее время получило распространение взаимосвязь между последствиями взрыва (или последствиями воздействия взрывного давления на объект) и его характеристика в виде максимального избыточного давления и импульса давления.

Напомним существующие методы оценки последствий воздействия ВУВ на объекты и людей [6,7,8].

Принято считать, что при взрывах конденсированных ВВ степень разрушения сооружений и вероятность гибели (травмирования) людей зависит от двух параметров: максимального давления и импульса фазы сжатия.

На рисунке 10 приведены зависимости степени разрушения зданий и вероятности поражения людей при воздействии на них ВУВ произвольной интенсивности [6,7,8].

а)

б)

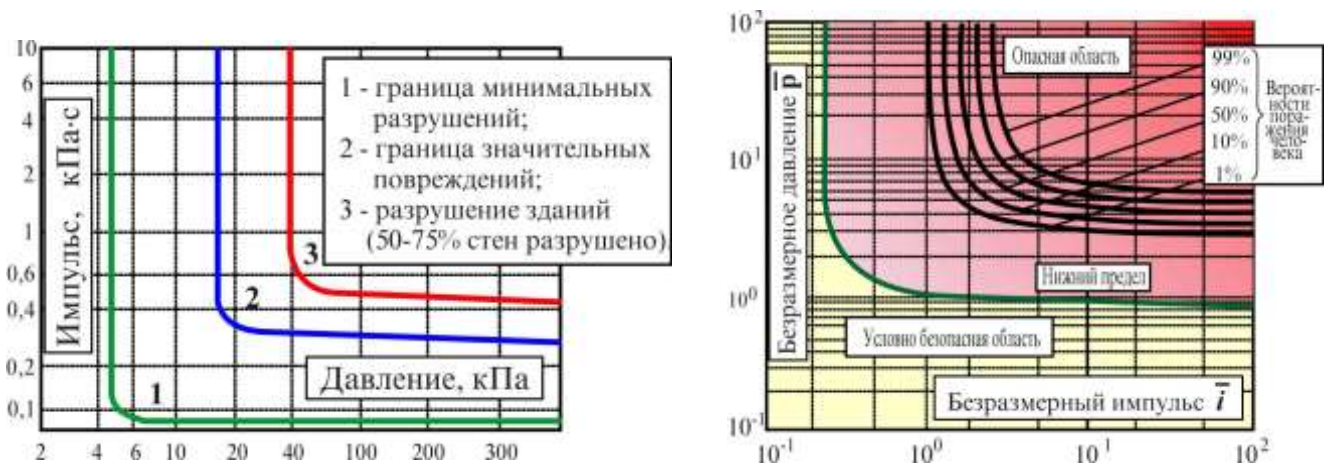


Рисунок 10 — P-I диаграммы для определения степени разрушения зданий (а) и поражения людей (б) при воздействии на них взрывных (ударных) нагрузок

При определении вероятности достижения того или иного ущерба используют понятие пробит-функция (Pr). Связь между вероятностью поражения ($V, \%$) и значением пробит-функции (Pr) приведена на рисунке 11.

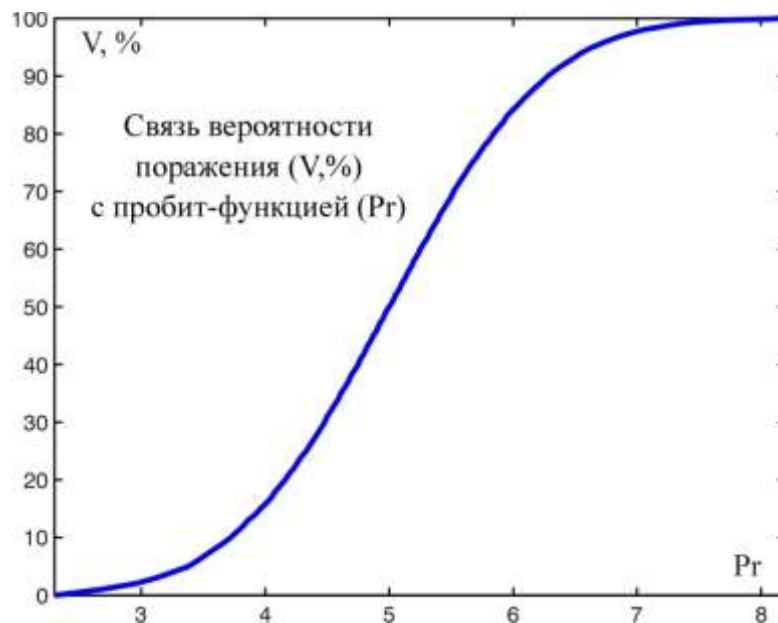


Рисунок 11 — Связь между вероятностью поражения ($V, \%$) и значением пробит-функции (Pr)

В таблице 2 приведена связь между вероятностью поражения ($V, \%$) и значением пробит-функции (Pr) табличном виде.

Таблица 2 - Связь вероятности поражения (V,%) с пробит-функцией (Pr)

V, %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2,3	2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,0	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Значение пробит-функции, определяющей вероятность поражения человека, равно:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln V_1, \quad (12)$$

где фактор V_1 равен:

$$V_1 = \left(\frac{17500}{P(\text{Па})} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I(\text{Па} \cdot \text{с})} \right)^{9,3}, \quad (13)$$

где $P(\text{Па})$ – максимальное давление в ВУВ, $I(\text{Па} \cdot \text{с})$ – импульс фазы сжатия в ВУВ.

Вероятность полного разрушения промышленных зданий (здания подлежат сносу) определяется следующим значением пробит-функции:

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln V_2, \quad (14)$$

где фактор V_2 равен:

$$V_2 = \left(\frac{40000}{P(\text{Па})} \right)^{8,4} + \left(\frac{460}{I(\text{Па} \cdot \text{с})} \right)^{9,3}, \quad (15)$$

где $P(\text{Па})$ – максимальное давление в ВУВ, $I(\text{Па} \cdot \text{с})$ – импульс фазы сжатия в ВУВ.

Вероятность длительной потери человеком управляемости определяется значением пробит-функции:

$$Pr_3 = 5 - 5,74 \cdot \ln V_3, \quad (16)$$

где фактор V_3 равен:

$$V_3 = \left(\frac{4,2}{\bar{P}} \right) + \left(\frac{1,3}{\bar{I}} \right) , \quad (17)$$

где безразмерное давление $\bar{P} = 1 + \frac{P}{P_0}$, где P – максимальное давление в ВУВ, P_0

– атмосферное давление, $\bar{I} = \frac{1}{P_0^{\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{1}{3}}}$, где m – масса тела человека, $I(\text{Па}\cdot\text{с})$ –

импульс фазы сжатия в ВУВ.

Вероятность разрыва барабанных перепонок у человека определяется значением пробит-функции, зависящей только от максимального давления в ВУВ:

$$\text{Pr}_4 = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(P) . \quad (18)$$

Вероятность отброса человека ВУВ определяется значением пробит-функции:

$$\text{Pr}_5 = 5 - 2,44 \cdot \ln V_5 , \quad (19)$$

где фактор V_5 равен:

$$V_5 = \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{P} \right) + \left(\frac{1,3 \cdot 10^9}{P \cdot I} \right) . \quad (20)$$

Приведенные выше зависимости вероятностей поражения ВУВ используются при оценке безопасности территорий, попадающих под воздействие взрывного давления.

Как указывалось выше, нормирование степени разрушения строительных конструкций и поражения людей (CP) при воздействии ВУВ проводится в зависимости от избыточного давления во фронте ВУВ (P , Па) и импульса фазы сжатия (I , Па·с), т.е. $CP = CP(P, I)$. Кроме этого, степень разрушения и степень поражения людей зависит от соотношения между T_0 и $T_{\text{нагрузки}}$, где T_0 - период собственных колебаний строительной конструкции; $T_{\text{нагрузки}}$ - длительность фазы сжатия ВУВ.

При взрывах конденсированных ВВ, мощность которых не превышает нескольких десятков кг тринитротолуола (ТНТ), имеют место зависимости:

$$CP = CP(P, I) \quad \text{при } T_{\text{НАГРУЗКИ}} \sim T_0 \quad (21)$$

либо

$$CP = CP(I) \quad \text{при } T_{\text{НАГРУЗКИ}} \ll T_0, \quad (22)$$

где I - импульс фазы сжатия ВУВ,

либо

$$CP = CP(P) \quad \text{при } T_{\text{НАГРУЗКИ}} \gg T_0 \quad (23)$$

где P - максимальное значение избыточного давления во фронте ВУВ.

Приведенные выше соотношения обременены несколько излишними запасами. Поэтому ниже рассмотрим процедуру оценки степени разрушения объектов, основанную на физических закономерностях, связанных с воздействием динамических нагрузок на строительные конструкции.

Рассмотрим воздействие на конструкции коротких (по сравнению с периодом собственных колебаний конструкции - T_0) ударных нагрузок, т.е. рассмотрим нагрузки, имеющие крутой передний фронт. Это характерно для ВУВ от взрывов ВВ. Общий вид таких нагрузок был приведен на рисунке 9. Длительность фазы сжатия в ВУВ при взрывах нескольких килограммов ТНТ достаточно мала и существенно превышает период собственных колебаний строительных конструкций зданий. Например, для 50 кг ТНТ длительность фазы сжатия ($T_{\text{НАГРУЗКИ}}$) ВУВ (в зависимости от расстояния) изменяется примерно от 5 до 10мс. Период собственных колебаний типовых строительных панелей имеет порядок 25-50мс (T_0), а металлических конструкций небольшого размера (дверей) 50-100 мс. Следовательно рассмотрим ситуацию, когда $T_{\text{НАГРУЗКИ}} < T_0$.

Примем, что допустимая (по нормативным прочностным характеристикам) нагрузка на строительную конструкцию равна P_0 . Период собственных колебаний строительной конструкции - T_0 . Максимальное значение ударной нагрузки равно - $P_{\text{НАГРУЗКИ}}$, а ее продолжительность - $T_{\text{НАГРУЗКИ}}$. Обезразмерим исходные параметры. Давление приведем к P_0 :

$P=P_{\text{НАГРУЗКИ}}/ P_0$. Время к T_0 : $T=T_{\text{НАГРУЗКИ}}/ T_0$. Тогда приближенное соотношение (9) для коэффициента динамичности примет вид:

$$K_d = T \cdot (1 + 3 \cdot I_0), \quad (24)$$

где I_0 – безразмерный импульс давления, характеризующий временную форму

нагрузки - $I_0 = \frac{\int P_0(t)dt}{P_0 \cdot T_0}$. Например, для прямоугольного импульса $I_0=1$, для треугольного - $I_0=0.5$.

Используя соотношение (1), которое приводит динамическую нагрузку к статической, получим критерий, характеризующий устойчивость конструкции к динамической нагрузке:

$$P \cdot K_d \leq 1, \quad (25)$$

которое в размерном виде выглядит следующим образом:

$$P_{\text{НАГРУЗКИ}} \leq \frac{P_0}{K_d}. \quad (26)$$

На рисунке 12 приведены функции динамичности для четырех видов ударных нагрузок, имеющих следующие значения безразмерного импульса:

нагрузка 1 имеет прямоугольную форму и безразмерный импульс - $I_0=1$,

нагрузка 2 имеет форму $P(t) = P_{\text{НАГРУЗКИ}} \cdot \left(1 - \left(\frac{t}{T_{\text{НАГРУЗКИ}}}\right)^M\right)$, $M=2$ и безразмерный

импульс $(I_0 = 1 - \frac{1}{M+1}) - I_0=2/3$,

нагрузка 3 имеет треугольную форму и безразмерный импульс - $I_0=0.5$,

нагрузка 4 имеет форму $P(t) = P_{\text{НАГРУЗКИ}} \cdot \left(1 - \left(\frac{t}{T_{\text{НАГРУЗКИ}}}\right)^M\right)$, $M=1/2$ и безразмерный

импульс - $I_0=1/3$.

Из приведенного рисунка следует, что зависимость коэффициента динамичности от длительности воздействия нагрузки носит линейный характер примерно до $T=T_{\text{НАГРУЗКИ}}/ T_0 < 0.5$.

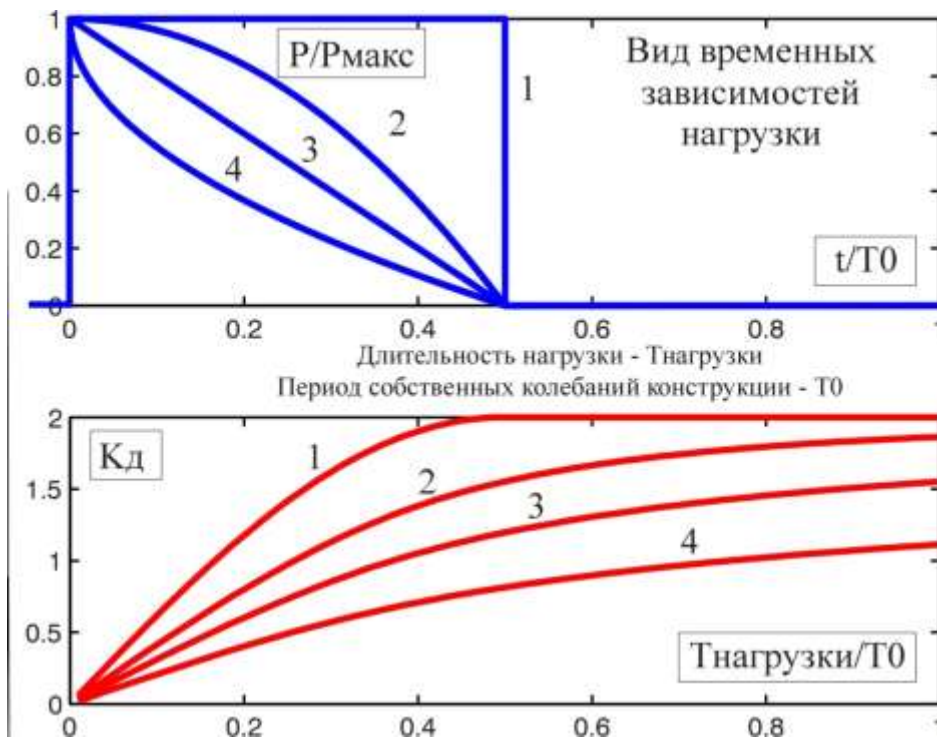


Рисунок 12 -
Временные зависимости действующих нагрузок и соответствующие им коэффициенты динамичности для различных значений времени действия нагрузки (от $0.01 \cdot T_0$ до T_0).

Расчет критерия устойчивости конструкции к динамической нагрузке (25) приведен на рисунке 13.

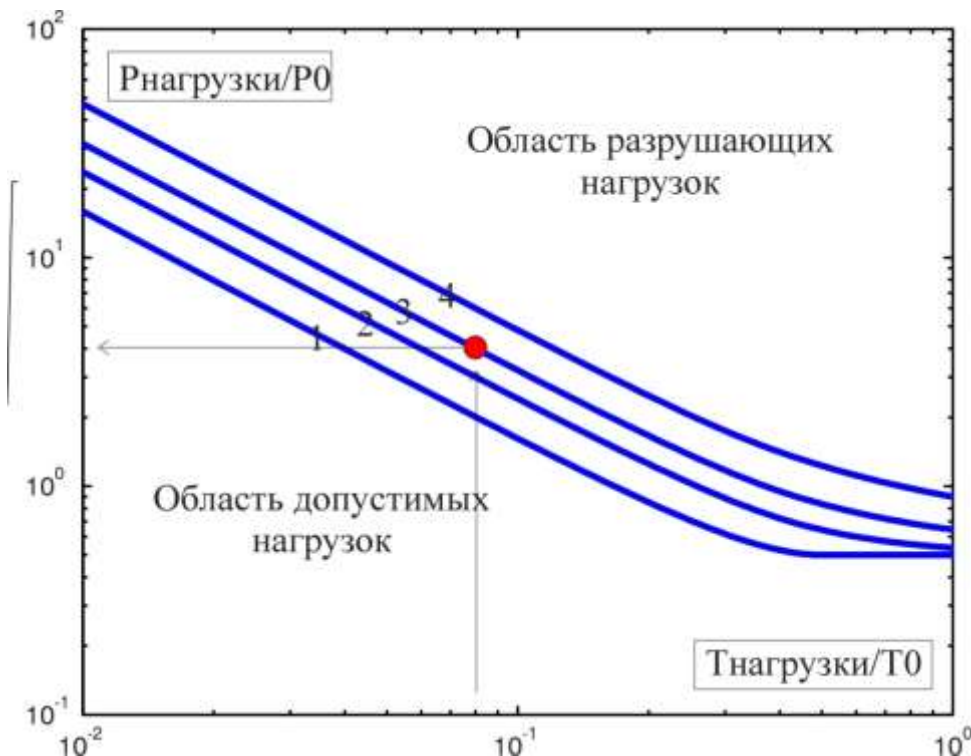


Рисунок 13 -
Критерии устойчивости конструкции к динамической нагрузке для различных значений времени действия нагрузки (от $0.01 \cdot T_0$ до T_0).

По графикам, приведенным на рисунке 13, легко определить способность любой конструкции к восприятию ударных нагрузок. Например, конструкция имеет период собственных колебаний $T_0=50\text{мс}$ и способна выдержать

статическую нагрузку в $P_0=10\text{кПа}$. На нее действует динамическая нагрузка треугольной формы (на рисунках 12 и 13 это 3-ий вид временной зависимости нагрузки) с длительностью $T_{\text{НАГРУЗКИ}}=4\text{мс}$. Определяем $T=T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0=0.08$. По графику рисунка 9 находим, что максимальное значение динамической нагрузки с принятыми временными параметрами не должно превышать показанную на графике величину - $4*P_0=40\text{кПа}$.

Ниже приводится методика, позволяющая определить параметры ВУВ, возникающей при взрывах ВВ.

2. Методы расчета параметров взрыва конденсированных взрывчатых веществ

Перед рассмотрением методов расчета параметров взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) опишем физические процессы, возникающие в атмосфере при данном типе взрыва.

Конденсированные ВВ (твердые, пластичные, жидкие, литые, прессованные, порошкообразные, чешуирированные и т.п.) отличаются высокой плотностью (свыше 500 кг/м^3) и высокой скоростью детонации. Давление в детонационной волне пропорционально плотности ВВ ρ и квадрату скорости детонации D : $\Delta p = \frac{\rho \cdot D^2}{k+1}$, где k – показатель адиабаты (для конденсированных ВВ $k=3$). Поэтому конденсированные ВВ обладают, благодаря развивающемуся высокому давлению при взрыве, сильным бризантным (дробящим) действием. Например, при взрыве ТНТ (тротила), имеющего плотность равную 1600 кг/м^3 и скорость детонации 7000 м/с , давление взрыва составляет около 20000000 кПа . При взрывах конденсированных ВВ на грунте всегда образуется воронка взрыва, а от границы заряда уходит воздушная ударная волна (ВУВ) с очень высоким давлением. Чувствительность конденсированных ВВ к внешним воздействиям различна. Например, ТНТ не взрывается при пробивании пульей и не детонирует при поджоге, а горит сильно коптящим пламенем. Другие же ВВ взрываются при малейшем трении, ударе и нагревании.

Основным поражающим фактором при взрыве ВВ является ударная волна. Избыточное давление во фронте ВУВ определяется по формуле М.А. Садовского [10,11]:

$$\Delta p = \frac{82,4}{\bar{R}} + \frac{265}{\bar{R}^2} + \frac{687}{\bar{R}^3}, \text{ кПа}, \quad (2.1)$$

где \bar{R} - приведенное расстояние до центра взрыва:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{K_{эф} \cdot C \cdot z}}, \text{ м/кг}^{1/3}, \quad (2.2)$$

где C - масса заряда, кг; z - коэффициент, учитывающий отношение теплоты взрывчатого превращения ВВ к теплоте взрывчатого превращения тротила; $K_{эф}$ - коэффициент эффективности заряда ВВ по образованию ВУВ. Значение $K_{эф}$ в основном определяется расположением заряда относительно твердых поверхностей и учитывает их экранирующий эффект: $K_{эф}=1$ для воздушных взрывов; $K_{эф}=2$ для наземных взрывов в безграничном пространстве; $K_{эф}=4$ для заряда, расположенного у стены здания и т.д.

Поражающие факторы при взрыве ВВ зависят от следующих параметров: типа ВВ, его массы, расположения заряда относительно твердых поверхностей, расстояния от точки наблюдения до места взрыва.

Взрывные нагрузки от зарядов ВВ отличаются по многим важнейшим признакам от взрывных нагрузок при взрывах газопаровоздушных смесей (ГПВС):

- взрывные нагрузки от ВВ (типичный профиль взрывного давления при подрыве ВВ приведен на рисунке 2.1) и взрывные нагрузки при детонации ГПВС имеют несопоставимые величины по длительности нагружения;

- в «ближней» зоне взрыва уровни взрывных нагрузок от ВВ существенно превышают уровни взрывных нагрузок при детонации ГПВС;

- взрывные нагрузки от зарядов ВВ в «ближней» зоне взрыва не только на несколько порядков превышают уровни взрывных нагрузок при дефлаграции ГПВС, но и имеют крутой профиль изменения давления во времени, а при дефлаграции ГПВС имеет место волна сжатия.

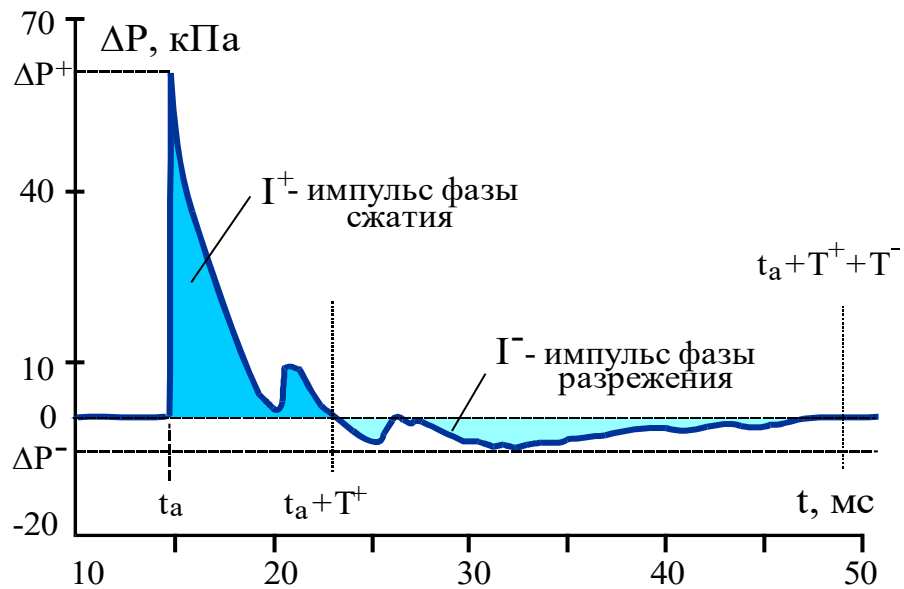


Рисунок 2.1 — Типичный вид ударной волны при подрыве ВВ

Описанная ниже методика построена на основе методики М.А.Садовского с некоторыми уточнениями и дополнениями. До выполнения расчетов должны быть подготовлены следующие исходные данные:

- C - масса ВВ в кг и вид его упаковки;
- вид ВВ и его теплота взрывчатого превращения Q , либо должно быть известно отношение α теплоты взрыва ВВ к теплоте взрыва тротила (принимаемой равной 4240 кДж/кг);
- вид взрыва (наземный, воздушный, заглубленный в грунт);
- виды грунтов под зарядом ВВ (скальный, глинистый и т.п.);
- высота взрыва над землей;
- плотность укладки ВВ.

Избыточное давление во фронте ВУВ определяется по формуле:

$$\Delta p_{\phi} = \frac{1}{\bar{R}} \left[82,4 + \frac{1}{\bar{R}} \left(265 + \frac{1}{\bar{R}} 687 \right) \right], \text{ кПа}, \quad (2.3)$$

или для определения \bar{R} при заданном значении Δp_{ϕ} в виде:

$$\bar{R} = \frac{1}{\Delta p_{\phi}} \left[82,4 + \frac{1}{\bar{R}} \left(265 + \frac{1}{\bar{R}} 687 \right) \right], \text{ м/кг}^{\frac{1}{3}}.$$

\bar{R} - приведенное расстояние до центра взрыва, определяемое по зависимости:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{K_{эф} \cdot C}}, \quad \text{м/кг}^{\frac{1}{3}}, \quad (2.4)$$

где C - масса заряда в кг; $K_{эф}$ - коэффициент эффективности заряда ВВ по образованию ВУВ:

$$K_{эф} = K_{\epsilon} \cdot K_{ПВ} \cdot K_{Г} \cdot K_{П} \cdot \alpha \quad (2.5)$$

K_{ϵ} - коэффициент вида взрыва, учитывает высоту расположения заряда ВВ относительно поверхности земли, равный 1 – для воздушных взрывов и 2 - для наземных взрывов;

$K_{ПВ}$ - коэффициент плотности укладки ВВ в заряде, учитывает плотность заряда;

$K_{Г}$ - коэффициент плотности грунтов при наземных взрывах, учитывает затраты энергии на образование воронки и рыхление грунта;

$K_{П}$ - коэффициент поднятия заряда над уровнем грунта, учитывает уменьшение затраты энергии на образование воронки;

α - коэффициент, учитывающий отношение теплоты взрывчатого превращения ВВ к теплоте взрывчатого превращения тротила. Значения α приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значение α для ряда ВВ

Виды ВВ	α	Виды ВВ	α
Тротил	1	Тринитроанилин	0,981
Динитробензол	0,86	Пикрат аммония	0,792
Тринитробензол	1,066	Аммонийная селитра	0,396
Октоген	1,278	Аммотол 80/20	0,991
Тэн	1,378	Пироксилин	1,03
Дымный порох	0,658	Гексоген	1,306
Тринитрохлорбензол	1	Оксиликвиты (поглотители)	0,991

Закон изменения избыточного давления во времени определяется по зависимости:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{\phi} \left(1 - \frac{t}{\tau_{+}} \right)^n, \quad \text{кПа}, \quad (2.6)$$

где τ_{+} - длительность положительной фазы, определяемая по зависимости:

$$\tau_+ = \bar{\tau}_+ \sqrt[3]{K_{эф} \cdot C}, \quad c, \quad (2.7)$$

где $\bar{\tau}_+$ - приведенное время длительности положительной фазы ВУВ, определяемое по формуле:

$$\bar{\tau}_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{R}, \quad c/кг^{1/3}, \quad (2.8)$$

где n - показатель спада избыточного давления, вычисляемый по зависимости:

$$n = 1 + \left(\frac{\Delta p_\phi}{P_0} \right)^\gamma \quad (2.9)$$

где γ - показатель степени, равный при $5 \leq \Delta p_\phi \leq 1000$ кПа

$$\gamma = \begin{cases} 0,6 \text{ при } \Delta p_\phi \geq p_0 \\ 0,4 \text{ при } \Delta p_\phi \leq p_0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

где p_0 - атмосферное давление (101,3 кПа).

При взрывах ВВ имеет место подобие явлений, которое выражается в следующем. При двух геометрически подобных взрывах зарядов ВВ различной энергии на одинаковых приведенных расстояниях от центра взрыва равны: значения избыточных давлений Δp_ϕ ; значения скоростных напоров q_ϕ ; значения массовых скоростей U_ϕ ; приведенные времена положительной фазы $\bar{\tau}_+$; приведенные удельные импульсы положительной фазы \bar{i}_+, \bar{j}_+ ; показатели спада избыточного давления n и скоростного напора m . Это позволяет создавать универсальные таблицы значений параметров ВУВ, независимо от энергии взрыва (см. таблицу 2.2).

Приведенный удельный импульс положительной фазы избыточного давления определяется по выражению

$$\bar{i}_+ = \frac{\Delta p_\phi \cdot \tau_+}{n+1}, \quad \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{кг}^{1/3}}. \quad (2.11)$$

Для перехода к размерным значениям приведенные величины нужно умножить на $\sqrt[3]{K_{эф} \cdot C}$.

Значение скоростного напора во фронте ВУВ вычисляется по формуле:

$$q_{\phi} = \frac{2,5 \cdot \Delta p_{\phi}^2}{\Delta p_{\phi} + 709}, \quad \text{кПа.} \quad (2.12)$$

Изменение скоростного напора во времени описывается зависимостью:

$$q(t) = q_{\phi} \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right)^m, \quad \text{кПа,} \quad (2.13)$$

где m - показатель спада скоростного напора, определяемый по зависимости:

при $\Delta p_{\phi} < p_0$

$$m = 2,64 + 2,93 \left(\frac{\Delta p_{\phi} - 21}{102,4} \right)^{1,05} \quad (2.14)$$

при $\Delta p_{\phi} \geq p_0$

$$m = 2,47 + 3 \left(\frac{\Delta p_{\phi}}{p_0} \right)^{0,25}. \quad (2.15)$$

Таблица 2.2 – Параметры ВУВ при взрывах ВВ на различных приведенных расстояниях

\bar{R} , м/кг ^{1/3}	Δp_{ϕ} кПа	$\bar{\tau}_+$, мс/кг ^{1/3}	n	\bar{i}_+ , Па · с/кг ^{1/3}	q_{ϕ} , кПа	m	\bar{j}_+ , Па · с/кг ^{1/3}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1034	1,5	5,02	258	1534	-	-
1,5	376	1,84	3,20	165	324	6,63	78,22
2	193	2,12	2,47	117	103	5,99	32,0
2,5	119	2,37	2,40	90,9	42,9	5,57	15,83
3	82	2,59	1,92	72,7	21,4	4,90	9,40
3,5	64	2,80	1,81	60,6	12,15	4,28	5,44
4	47,9	3,00	1,74	52,4	7,57	3,90	4,64
4,5	38,9	3,18	1,68	46	5,06	3,64	3,47
5	32,5	3,35	1,63	41,3	3,57	3,46	2,68
5,5	27,8	3,52	1,59	37,7	2,63	3,33	2,14
6	24,3	3,67	1,56	34,7	2,00	3,23	1,74
6,5	21,5	3,82	1,54	32,4	1,57	3,15	1,45
7	19,2	3,97	1,31	30,3	1,26	3,09	1,22
7,5	17,3	4,11	1,49	28,5	1,03	3,04	1,05
8	15,8	4,24	1,48	27,0	0,86	2,99	0,91
8,5	14,5	4,37	1,46	25,7	0,72	2,96	0,79
9	13,4	4,5	1,44	24,6	0,62	2,93	0,71
9,5	12,4	4,62	1,43	23,5	0,53	2,90	0,63
10	11,6	4,74	1,42	22,7	0,46	2,88	0,56
10,5	10,8	4,86	1,41	21,8	0,41	2,86	0,52
11	10,2	4,97	1,40	21,7	0,36	2,84	0,46
11,5	9,6	5,09	1,39	20,4	0,32	2,83	0,43
12	9,1	5,19	1,38	19,8	0,29	2,82	0,39

Приведенный импульс скоростного напора определяется по формуле

$$\bar{j}_+ = \frac{q_\phi \cdot \tilde{\tau}_+}{m+1}, \quad \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{кг}^{1/3}}. \quad (2.16)$$

При нормальном отражении от плоской преграды возникающее отраженное давление определяется по зависимости

$$\Delta p_{отр}^H = 2\Delta p_\phi + 2,4 \cdot q_\phi, \quad \text{кПа}. \quad (2.17)$$

Параметры ВУВ на ее фронте связаны между собой соотношениями адиабаты Гюгонио, а за фронтом волны - соотношениями адиабаты Пуассона. Это позволяет по известным значениям одних параметров находить другие.

Скорость распространения фронта ВУВ:

$$D_\phi = a_0 \sqrt{1 + \frac{6}{7} \cdot \frac{\Delta p_\phi}{p_0}} = a_0 \sqrt{1 + 8,46 \cdot 10^{-3} \Delta p_\phi}, \quad \text{м/с}, \quad (2.18)$$

где p_0 - атмосферное давление; a_0 - скорость звука (340 м/с при $T=288,15$ К).

Скорость потока частиц на фронте ВУВ:

$$U_\phi = \frac{2,4\Delta p_\phi}{\sqrt{1 + 8,46 \cdot 10^{-3} \Delta p_\phi}}, \quad \text{м/с}. \quad (2.19)$$

Плотность воздуха на фронте ВУВ:

$$\rho_\phi = \rho_0 / (1 - U_\phi / D_\phi), \quad \text{кг/м}^3. \quad (2.20)$$

Температура воздуха на фронте ВУВ:

$$T_\phi = \frac{p_\phi \cdot 10^3}{\rho_\phi \cdot R_g}, \quad \text{К}, \quad (2.21)$$

где $p_\phi = \Delta p_\phi + p_0$ - полное давление (кПа) на фронте ВУВ; R_g - удельная газовая постоянная для воздуха, равная 287 Дж/(кг К).

Скорость звука на фронте ВУВ:

$$a_\phi = \sqrt{k \cdot R_g \cdot T_\phi}, \quad \text{м/с}, \quad (2.22)$$

где k - показатель адиабаты для воздуха, равный 1,4 при $T=288,15^0$ К.

Параметры за фронтом ВУВ определяются при помощи зависимостей изменения избыточного давления (2.6) и скоростного напора (2.13) во времени на заданном расстоянии R :

Плотность воздуха за фронтом ВУВ - $\rho(t)$:

$$\rho(t) = \rho_{\phi} \left(\frac{p(t)}{p_{\phi}} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ кг/м}^3. \quad (2.23)$$

Скорость потока воздуха за фронтом ВУВ - $U(t)$:

$$U(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot q(t) \cdot 10^3}{\rho(t)}}, \text{ м/с}. \quad (2.24)$$

Скорость звука за фронтом ВУВ - $a(t)$:

$$a(t) = \sqrt{k \frac{p(t) \cdot 10^3}{\rho(t)}}, \text{ м/с}. \quad (2.25)$$

В таблице 2.3 приведены значения параметров ВУВ на ее фронте. Эти данные справедливы для ударных волн любого происхождения (взрывы ВВ; детонация газопаровоздушных смесей; ВУВ, возникающие при разрыве сосудов под давлением и т.д.).

Параметры ВУВ в фазе разрежения определяются следующим образом:

максимальное значение давления разрежения: $\Delta p_{-}^m = \frac{-32,18}{R}$, кПа ;

длительность фазы разрежения: $\tau_{-} = 0,013\sqrt{C}$, с ; закон изменения давления

разрежения во времени: $\Delta p_{-}(t) = 13,9\Delta p_{-}^m \frac{t}{\tau_{-}} \left(1 - \frac{t}{\tau_{-}} \right) \cdot e^{-4 \frac{t}{\tau_{-}}}$, кПа , где t -

отсчитывается от конца положительной фазы.

Таким образом, основным поражающим фактором при взрыве ВВ является ударная волна. В этом случае поражающие факторы при взрыве ВВ зависят от следующих параметров: типа ВВ; его массы; расположения заряда относительно твердых поверхностей; расстояния от точки наблюдения до места взрыва.

Приведенные выше соотношения позволяют получить достаточно подробную информацию о параметрах ВУВ, формирующейся при взрыве ВВ.

Таблица 2.3 - Значения параметров на фронте воздушной ударной волны.

Δp_{ϕ} , кПа	D , м/с	U_{ϕ} , м/с	ρ_{ϕ} , кг/м ³	q_{ϕ} , кПа	T_{ϕ} , К	$K^{*}_{отр}$	\bar{R} , м/кг ^{1/3}
10	354	23,0	1,31	0,347	296	2,08	11,16
12	357	27,4	1,33	0,499	297	2,10	9,74
14	359	32,0	1,34	0,677	299	2,11	8,71
16	363	36,4	1,36	0,882	301	2,13	7,92
18	364	40,2	1,38	1,114	302	2,15	7,31
20	368	44,4	1,39	1,371	303	2,16	6,81
22	370	48,5	1,41	1,65	304	2,18	6,39
24	373	52,5	1,43	1,96	306	2,19	6,04
26	375	56,5	1,44	2,30	308	2,21	5,74
28	378	60,4	1,46	2,66	309	2,23	5,48
30	381	64,3	1,47	3,04	310	2,24	5,26
35	387	73,8	1,51	4,11	314	2,28	4,79
40	393	83,0	1,55	5,34	317	2,32	4,43
45	399	91,9	1,59	6,71	320	2,36	4,14
50	406	100	1,63	8,23	323	2,39	3,90
60	417	117	1,70	11,7	330	2,47	3,54
70	429	133	1,78	15,7	336	2,54	3,26
80	440	148	1,85	20,3	342	2,61	3,04
90	451	163	1,92	25,3	348	2,68	2,87
100	462	177	1,98	30,9	354	2,74	2,72
200	556	299	2,58	110	407	3,32	1,96
300	639	383	3,05	223	458	3,73	1,65
400	712	459	3,44	364	507	4,16	1,46
500	776	525	3,77	517	556	4,48	1,33
600	838	584	4,05	687	604	4,75	1,24
700	894	639	4,28	869	651	4,98	1,16
800	948	736	4,67	1258	747	5,36	1,06

3. Некоторые замечания о параметрах дефлаграционного взрыва газопаровоздушных смесей

Дефлаграционные взрывы газопаровоздушных смесей характеризуются дозвуковыми скоростями распространения пламени, которые редко превышают значений 170-200м/с. Начальные скорости горения составляет 3-10м/с, и только потом происходит их ускорение. Поэтому нарастание давления в волне сжатия, сопровождающей дефлаграционный взрыв, происходит достаточно плавно. Следствием этих особенностей является длительность процесса нагружения конструкций взрывной волной. Поэтому для дефлаграционных взрывов характерно следующее соотношение между длительностью нагрузки и

периодом собственных колебаний строительных конструкций: $T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0 > 1$. Кроме этого, постепенное нарастание взрывного давления формирует нагрузку, показанную на рисунке 2 (третий вид нагрузки). И как следует из рисунка 2 даже при длительности нагрузки, составляющей $T_{\text{НАГРУЗКИ}} = 1.5T_0$, где T_0 – период собственных колебаний конструкции, коэффициент динамичности близок к единице. Поэтому нагрузки при дефлаграционных взрывах воспринимаются строительными конструкциями практически, как стационарные нагрузки. Подробнее о параметрах дефлаграционных взрывов можно найти в [6].

4. Итоговые замечания о воздействии взрывных нагрузок на конструкции

Методами строительной механики определяется период собственных колебаний конструкции T_0 . Определяются временные параметры взрывной нагрузки: ее длительность - $T_{\text{НАГРУЗКИ}}$ и форма. Для ударных волн принимается треугольная форма: $P(t) = P_{\text{НАГРУЗКИ}} \cdot \left(1 - \left(\frac{t}{T_{\text{НАГРУЗКИ}}} \right)^M \right)$ и определяется параметр спада давления – M . Определяется безразмерный импульс - I_0 ($I_0 = 1 - \frac{1}{M+1}$). Приближенно (с некоторым запасом) можно принять $M=1$ и безразмерный импульс - $I_0=0.5$.

Определяется допустимая на строительную конструкцию нагрузка - P_0 .

Определяется безразмерное время действия нагрузки - $T = T_{\text{НАГРУЗКИ}}/T_0$. По графику рисунка 13 находится максимальное значение динамической нагрузки, которую может выдержать конструкция. Для этого полученное по графику численное значение следует умножить на допустимую для данной конструкции нагрузку - P_0 .

Немаловажное препятствие к использованию метода составляет сложность определения периода собственных колебаний конструкции математическим или экспериментальным методом, предполагается, что

колебательный процесс каждого элемента происходит на определенной частоте (как правило, на частоте основного тона). Хотя в действительности колебания происходят во всем спектре собственных частот упругого элемента. Поэтому считаем возможным использование метода для сплошных металлических экранов или многослойного стекла. Для конструкций же с движущимися частями (дверей) предполагается использовать традиционный метод (рис 10.). Разумеется, при возможности провести испытание защитной конструкции зарядом 500 и более кг тротилового эквивалента вышеописанные методы вряд ли понадобились бы.

Список использованных источников

1. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1974. 219с.
2. Расторгуев Б.С. Методические указания по проектированию новых и обследованию существующих строительных конструкций зданий взрывоопасных производств (1 редакция) - М., 1996. 227
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. (Дополнения. Разд.10. Прогнбы и перемещения).
4. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. - М.: Стройиздат, 1981. 248с.
5. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М. Высшая школа. 1970. С.710.
6. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. МГСУ. 2001. -460с.
7. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов». –М.: Гостандарт России. – 85 с.
8. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. Сборник документов Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», серия 27, выпуск 2. – М.: 2001. – 224 с.
9. А.А.Комаров, Е.В.Бажина. Особенности взрывных явлений в пешеходных переходах. //Научно-технический журнал, Вестник МГСУ. 2009 № 3 с. 107-109.
10. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, М., 1960., 595с.

11. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований – в кн. Физика взрыва, №1, М., изд. АН СССР, 1952.