УДК 614.83

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
С НАЗЕМНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

**INTERACTION OF THE AIR SHOCK WAVES
WITH GROUND OBJECTS**

Абдрахманов Н.Х., Волкова Ю.В.

Ассоциация «Башкирская ассоциация экспертов»,

г. Уфа, Российская Федерация

ФГБОУ ВПО «Уфимский Государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация

N.H. Abdrakhmanov, Y.V. Volkova

Assotiaton “Basgkir Assotiation of Experts”, Ufa, the Russian Federation

FSBEI of HPE “Ufa State Petroleum Technological University”,

Ufa, the Russian Federation

bashexpert@mail.ru

Аннотация. В работе подобно рассматривается взаимодействие и поведение ударной волны на какой-либо элемент наземного объекта (здание, сооружение, оборудование, прибор и другие предметы) и реакция элемента на действие этой силы. Так как взрывные воздействия в общем случае – переменные во времени и в пространстве. Их особенностью является сложный характер взаимодействий с сооружением и выработки нагрузок, вызывающих колебательные движения конструкций, поэтому в работе при оценке воздействия ударной волны на какой-либо элемент объекта (здание, сооружение, оборудование, прибор и другие предметы) учитывается

сила, возникающая в результате действия ударной волны, и реакция элемента, выраженная в виде деформации его конструкций.

Анализируются динамическая нагрузка от воздействия ударной волны и закон ее изменения во времени, зависящие от места расположения рассматриваемого здания, сооружения или отдельного предмета, конструктивных особенностей элемента, его формы, размеров, прочностных характеристик, внутренней структуры, а также от параметров падающей ударной волны, и действие нагрузок обтекания, определяемые, главным образом, максимальным избыточным давлением в ударной волне, и нагрузок торможения, возникающих под действием скоростного напора.

Приведены формулы расчета избыточного давления отражения и скорости распространения ударной волны, графические иллюстрации изменения избыточного давления ударной волны во времени и взаимодействие воздушной ударной волны с объектом.

Abstract. This note considers the interaction and behavior of the shock wave on an element surface object (building, construction, equipment, apparatus and other items), and a cell reaction to this force.

Since explosive impact in the general case - variable in time and space. Their feature is the complex nature of the interactions with the construction and development of stress - causing oscillating structures, so the work in assessing the impact of the shock wave on an element of the object (building, structure, equipment, apparatus and other items) to take into account the force resulting from the action shock, and cell reaction expressed as a deformation of its structure. Analyzes the dynamic load of the shock wave and the law of its change over time, depending on the location of the considered building, structure or a single subject design

features of the item, its shape, size, strength characteristics, internal structure, as well as the parameters of the incident shock wave, and action loads flow, defined mainly by the maximum excess pressure in the shock wave, and braking loads generated by the action of the ram.

There submitted formulas pressure reflection and propagation velocity of the shock wave changes graphic illustration of the shock wave pressure and reaction time airblast the object.

Ключевые слова: взрыв, ударная волна, избыточное давление, обтекание, отражение, наземные объекты, взрывоопасные объекты, опасные объекты.

Key words: blast, shock wave, overpressure, flow, reflection, ground objects, explosive objects, dangerous objects.

Аварии на различных объектах, связанные с производством, хранением, транспортировкой, использованием взрывоопасных и других энергоемких материалов и веществ, вызывают необходимость обеспечения взрывобезопасности на этих объектах.

Взрывные воздействия в общем случае - переменные во времени и в пространстве. Их особенностью является сложный характер взаимодействий с сооружением и выработки нагрузок, вызывающих колебательные движения конструкций. При оценке воздействия ударной волны на какой-либо элемент объекта (здание, сооружение, оборудование, прибор и другие предметы) необходимо учитывать силу, возникающую в результате действия ударной волны, и реакцию элемента на действие этой силы. Реакция элемента выражается в виде деформации его конструкций. Значительные остаточные деформации приводят к полному или частичному их разрушению. Возможны

перемещение или опрокидывание (сваливание), а также внутренние изменения в отдельных элементах объекта в результате его сотрясения [1].

Динамическая нагрузка от воздействия ударной волны и закон ее изменения во времени зависят от места расположения рассматриваемого здания, сооружения (наземное, полузаглубленное, подземное, расположенное на склоне возвышенности и т.д.) или отдельного предмета, конструктивных особенностей элемента, его формы, размеров, прочностных характеристик, внутренней структуры, а также от параметров падающей ударной волны. Нагрузка от ударной волны на отдельные части элемента зависит от положения их относительно направления распространения ударной волны [2].

Если поверхность расположена параллельно направлению движения ударной волны, она не вызывает отражения волны и не испытывает действия скоростного напора. Поэтому нагрузка создается только действием избыточного давления воздушной ударной волны. При этом в большинстве практических случаев набеганием ударной волны пренебрегают и считают, что вся поверхность (пролет) конструкции сооружения загружается одновременно. Это допустимо, так как фронт ударной волны, двигаясь со сверхзвуковой скоростью, проходит пролет конструкции за весьма малое время, одну-две десятых от периода собственных колебаний конструкции.

Действие нагрузки от ударной волны, распространяющейся вдоль поверхности земли, можно разделить на нагрузки обтекания, определяемые, главным образом, максимальным избыточным давлением в ударной волне, и нагрузки торможения, возникающие под действием скоростного напора. В большинстве случаев все

элементы испытывают действие обеих нагрузок, хотя для некоторых типов элементов одна из этих нагрузок может иметь более важное значение по сравнению с другой. В зоне действия головной ударной волны при воздушных взрывах наибольшие нагрузки возникают на поверхностях элементов, обращенных к взрыву [3]. Когда фронт ударной волны достигает преграды (например, передней стены сооружения), происходит отражение частиц воздуха волны и торможение масс движущегося воздуха. Давление на стену повышается от избыточного давления во фронте ударной волны $\Delta P_{\text{ф}}$ до избыточного давления волны отражения $\Delta P_{\text{отр}}$. По краям стены уплотненная масса воздуха немедленно после своего образования начинает обтекать стену. Из-за разницы давлений падающей и отраженной волн возникает волна разрежения, распространение которой приводит к снижению давления на стену от значения $\Delta P_{\text{отр}}$ до некоторого значения избыточного давления волны обтекания $\Delta P_{\text{обт}}$. Следовательно, первоначальная сила, действующая на преграду, уменьшается, так как, во-первых, снижается давление в массах воздуха, уплотненных волной у передней стены здания; во-вторых, волна, обтекая здание, оказывает давление на него сзади и с боков, а также, проникая внутрь здания через проемы, повышает давление воздуха внутри здания.

При обтекании боковые и верхние (горизонтальные) поверхности зданий и сооружений начинают испытывать давление ударной волны. Нагрузка на эти поверхности будет равна избыточному давлению во фронте проходящей волны плюс нагрузка торможения. Эту нагрузку при расчетах можно принимать равной давлению в проходящей волне, так как нагрузка торможения за счет неровности (шероховатости) поверхности будет незначительной. На

рисунке 1 представлено взаимодействие ударных волн с объектами прямоугольной формы.

Рисунок 1. Взаимодействие воздушной ударной волны с объектом прямоугольной формы: а - вид сбоку, б - вид сверху

Во время процесса обтекания на переднюю (лобовую) стену сооружения действует избыточное давление и скоростной напор ударной волны. В результате разность давления на переднюю и заднюю части сооружения создает горизонтально направленную силу смещения, стремящуюся сдвинуть сооружение в направлении распространения ударной волны. Эта сила называется нагрузкой обтекания.

После того, как закончится процесс обтекания, и элемент полностью погрузится в волну, результирующая горизонтальная

нагрузка будет относительно небольшая, так как разность давлений на его передней (лобовой) и задней стенах незначительная и определяется целиком давлением скоростного напора на переднюю стену сооружения. Фактическое давление на всей стене сооружения превышает давление окружающей атмосферы и, хотя оно постепенно падает, эта разность давлений сохраняется до тех пор, пока не окончится положительная фаза действия ударной волны.

Рассмотрим характер изменения нагрузки от воздушной ударной волны на переднюю (лобовую) и заднюю (тыловую) стены замкнутого сооружения (здания) прямоугольной формы, стены которого не имеют проемов, либо имеют небольшое их количество - около 5% общей площади. При расчетах удобно пользоваться линейными эпюрами изменения давления во фронте ударной волны во времени, т. е. с заменой времени действия фазы сжатия на эффективное время Θ (кривая 2 на рисунке 2, а). Эпюра результирующей горизонтальной нагрузки стремящейся сдвинуть сооружение прямоугольной формы, приведена на рисунке 2, б.

При столкновении ударной волны с передней стеной (при $t = 0$), расположенной перпендикулярно направлению распространения ударной волны, давление на стену мгновенно повышается от ΔP_{ϕ} до $\Delta P_{отр}$. Избыточное давление отражения $\Delta P_{отр}$ может быть рассчитано по формуле (1):

$$\Delta P_{отр} = 2\Delta P_{\phi} + \frac{6\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 7P_0}, \quad (1)$$

где $P_{отр}$ - избыточное давление в отраженной от преграды волне, кПа;

ΔP_0 - атмосферное давление, при нормальных условиях $\Delta P_0 = 101,3$ кПа.

В дальнейшем, до полного погружения сооружения в ударную волну, давление на лобовую стену сооружения резко падает.

При установлении режима обтекания принято считать, что нагрузка на лобовую стену большинства зданий и сооружений уменьшается примерно вдвое, $\Delta P_{\text{обт}} \approx 0,5 \Delta P_{\text{отр}}$ (рисунок 2, б).

Рисунок 2. Изменение избыточного давления ударной волны
во времени

Время от начала отражения до начала установления режима обтекания ориентировочно принято считать равным наименьшему из вычисленных значений (2):

$$t_{\text{обт}} = \min \left\{ \frac{3h}{C_{\phi}}; \frac{3b}{2C_{\phi}} \right\} \quad (2)$$

где h и b - высота и ширина сооружения или его части, возвышающаяся над уровнем земли;

C_{ϕ} - скорость распространения волны, может быть рассчитана из выражения (3) или принята при приближенных расчетах равной скорости распространения звука в воздухе (340 м/с):

$$C_{\phi} = 340 \sqrt{1 + 0,0083 \Delta P_{\phi}} \quad (3)$$

где C_{ϕ} - скорость движения фронта ударной волны, м/с.

На тыльную стену нагрузка начинает действовать после прохождения ударной волной расстояния, равного длине сооружения, т. е. через время $t_{\text{бок}} = l/C_{\phi}$. Ее значение достигает максимального значения за время $t_{\text{тыл}}$, которое принимается равным наименьшему из значений (4):

$$t_{\text{тыл}} = \min \left\{ \frac{4h}{C_{\phi}}; \frac{2b}{2C_{\phi}} \right\} \quad (4)$$

Максимальное значение нагрузки на тыловую поверхность обычно не превышает давления в проходящей волне. Следовательно, нагрузка обтекания действует в течение времени, за которое ударная волна пробегает путь от передней поверхности до смыкания фронта за тыльной стеной, за время $t_{\text{бок}} + t_{\text{тыл}}$. Длительность действия нагрузок обтекания определяется размерами сооружения и даже для больших сооружений составляет лишь некоторую долю продолжительности действия ударной волны.

Обычно время обтекания для зданий равно десятым долям секунды, а стены этих зданий в результате их прогиба или сдвига внутрь здания под действием ударной волны разрушаются в течение

сотых долей секунды. Продолжительность действия ударной волны (фазы сжатия) составляет единицы секунд. Таким образом, максимальная деформация конструкции здания (сооружения) происходит в начальный период нагружения за время, в большинстве случаев на два порядка меньшее продолжительности действия фазы сжатия ударной волны и на один порядок меньшее времени установления режима обтекания.

После полного обтекания сооружения ударной волной начинается фаза торможения (установившийся режим обтекания). Результирующая горизонтальная нагрузка режимов обтекания и торможения, стремящаяся сдвинуть сооружение, может быть примерно представлена в линейных координатах в виде эпюры нагрузки, заштрихованной на рисунке 2 б [5,7].

Выводы

Подробный анализ и изучение поведения воздушной ударной волны и ее взаимодействие с наземными объектами помогает предприятиям, эксплуатирующим опасные производственные объекты, содержащие взрывоопасные смеси, предотвратить серьезные аварии и защитить персонал от повреждения и гибели, а также выбрать оптимальное защитное устройство, устанавливаемое на пути движения воздушной ударной волны и спрогнозировать развитие аварии в случае ее возникновения.

Список используемых источников

1. Козлитин А.М., Яковлев Б.Н. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка: детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: учеб. пособие/под ред. А.И. Попова. Саратов: СГТУ, 2000. 124 с.
2. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.
3. Атаманюк В. Г., Ширшев Л. Г., Акимов Н. И. Гражданская оборона: учебник для вузов/ Под ред. Д. И. Михайлика. М.: Высшая школа, 1986. 207 с.
4. Таубкин И.С., Фролов А.В. О методиках расчёта параметров взрыва облаков газопаровоздушных смесей // Проблемы безопасности и чрезвычайные ситуации. 2006. № 2. С. 35–46.
5. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Пер. с англ./ Бейкер У. и др./ под ред. Я. Б. Зельдовича и Б. Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986. 319 с.
6. Ударные и детонационные волны. Методы исследования/ Кобылкин И.Ф. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2004. 376 с.
7. Козлитин А.М. Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой промышленности // Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска. Саратов: СГТУ 2005. С. 16–44.

8. РД 03-409-01 Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. Введ. 26.06.01. Госгортехнадзор России. М., 2001. 25 с.

References

1. Kozlitin A.M., Yakovlev B.N., Chrezichainie situacii tehnogenного kharaktera. Prognozirovanie i ochenka: determinirovannye metody kolichestvennoy ochenki opasnostei tehnosferi: Ycheb. Posobie/ Pod red. Popova A.I. Saratov: SGTU, 2000. 124 s. [in russian].
2. Beschastnov M.V. Promishlennye vzrivi. Oenka i predupregdenie. M.: Khimiya, 1991. 432 s. [in russian].
3. Atamnuk V.G., Shirshov L.G., Akimov N.I., Grafdanskaya oborna: ychebnik dlya vuzov/ Pod red. Mihailika D.I. Moskva.: Vicshaya shkola, 1986. 207 s. [in russian].
4. Tabukin I.S., Frolov A.V. O metodikah rascheta parametrov vzriva oblaka fazoparovo zdushnykh smesei/ Problemi bezopasnosti i chrezvichainie situacii. 2006. № 2. S. 35–46. [in russian].
5. Vzrivnie yavleiya. Ochenka i posledstviya: V 2-h kn. perev. s angl./ Beiker Y. i dr./ pod red. Zeldovicha Ya.B., Gelfanda B.E.: Mir, 1986. 319 s. [in russian].
6. Udarnie i detonacionnye volni. Metodi issledovaniya 2-e izd., pererab. i dop./ Kobilkin I.F., i dr., M.: Fizmatlit, 2004. 376 s. [in russian].
7. Kozlitin A.M. Veroyatnostnye metody analiza posledstviy vo zdejstviy vzriva na cheloveka, tehnologicheskoe oborudovanie, zdaniya, soorugeniya pri avariinnykh situatsiyah na predpriyatiyah neftegazovoy promishlennosti/ Upravlenie promishlennoy i ekologicheskoy bezopasnostu

produktivnih objektov na osnovu riska. Saratov: SGTU 2005. S.16–44.
[in russian].

8. RD 03-409-01 Metodika ocenki posledstvi avariinih vzrivotov toplino-vozdushnih smesei. Vved. 26.06.01. 25 s. Gosgrtehnadzor Rossii.
[in russian].

Сведения об авторах

Information about authors

Абдрахманов Н.Х., канд. техн. наук, Ассоциация «Башкирская ассоциация экспертов, г. Уфа, Российская Федерация

N.H. Abdrakhmanov, Candidate of Technical Science, Assotiaton “Bashkir Association experts”, Ufa, Russian Federation

Волкова Ю.В., магистр, ФГБОУ ВПО УГНТУ г. Уфа, Российская Федерация

Y.V. Volkova, master FSBEI of HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: bashexpert@mail.ru