

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН НА ОПЕРАТОРНЫЕ ЗДАНИЯ

Рашитов Р.Ф., Тляшева Р.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

В статье представлен алгоритм, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние конструкций операторных зданий, являющихся наиболее уязвимыми при аварийных взрывах на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии.

При расчете используются возможности программного пакета ABAQUS – одного из лидеров в области инженерных расчетов, которые позволяют решать практически любые нелинейные задачи с учетом реального поведения конструкции при различных типах нагружения.

Эффективное управление химическим и нефтеперерабатывающим заводом является важнейшей мерой для предотвращения пожаров, взрывов и токсических выбросов. Такое управление требует правильного проектирования и выбора места расположения систем управления, в том числе зданий, содержащих такие системы. Операторные здания особо подвержены разрушению, а персонал, находящийся внутри, - опасности, потому что эти здания обычно расположены вблизи центра опасных зон.

Одной из наиболее серьезных опасностей предприятий нефтегазопереработки является облако газопаровоздушной смеси, которое при определенных условиях способно взрываться и, следовательно, несет потенциальную опасность. Известны многочисленные примеры полного разрушения или сильных повреждений операторных зданий в результате взрывов паровых облаков [1]. Взрывы облаков газопаровоздушных смесей углеводородных продуктов являются объемными взрывами, в отличие от «точечных» взрывов твердых взрывчатых веществ.

Наибольшую опасность для людей и сооружений представляет механическое действие воздушной ударной волны детонационного взрыва облака газопаровоздушной смеси [2].

При детонации процесс горения в облаке газопаровоздушной смеси распространяется со сверхзвуковой скоростью, и после окончания детонации от границы облака взрыва также со сверхзвуковой скоростью начинает двигаться воздушная ударная волна.

Специалисты в области промышленной безопасности при исследовании

взрывов облаков газопаровоздушной смеси используют понятие тротилового эквивалента, считая, что эти взрывы аналогичны взрывам твердых (конденсированных) взрывчатых веществ. В то время как такая методика приблизительно верна при больших расстояниях от центра взрыва и приводит к серьезным погрешностям в ближней зоне.

В работе [3] приведен подробный анализ методик оценки последствий детонационных, а также дефлаграционных взрывов. Козлитин А.М. рассмотрел существующие в настоящее время методики и показал, что в методиках Бирбраера А.Н. и НТЦ «Промышленная безопасность» совпадают в ближней и средней зонах, а в дальней зоне методика НТЦ «Промышленная безопасность» не адекватна реальным процессам изменения параметров ударной волны; уравнение Садовского М.А., изначально предназначенное для оценки параметров взрыва твердых взрывчатых веществ, значительно завышает величины избыточных давлений в ближней и средней зонах действия воздушной ударной волны и приближенно верно для больших расстояний до центра взрыва.

Наибольший интерес, по мнению Козлитина А.М., представляет методика, описанная А.Н. Бирбраером, для расчета давления на фронте воздушной ударной волны при детонационных взрывах газопаровоздушных смесей.

Предлагаемая методика адекватно отражает физическую картину детонационного взрыва, как в ближней, так и дальней зонах действия ударной волны и при расчетах давления на фронте воздушной ударной волны позволяет более полно учесть физико-химические и взрывоопасные свойства газопаровоздушной смеси вещества, объем взрывающейся смеси, определяемый концентрационными пределами воспламенения и массой вещества, участвующего в формировании облака.

В данной методике параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака газопаровоздушной смеси ($\Gamma > r_0$), существенно зависят от величины приведенного расстояния $\Gamma_{пр}$ и определяются по формулам для соответствующего диапазона значений $\Gamma_{пр}$. Величина приведенного расстояния определяется из зависимости:

$$\Gamma_{пр} = \frac{\Gamma}{\sqrt[3]{2 \cdot E}} \quad (1)$$

где Γ - расстояние от центра взрыва,

E - энергия воздушной ударной волны.

При расчетах предполагается, что нагрузка, действующая на какой-либо объект при его взаимодействии с взрывной волной, может быть определена независимо от реакции самого объекта на это воздействие и что сами объекты являются жесткими твердыми телами, на которых могут происходить процессы отражения и дифракции взрывных волн, приводящие к изменению первоначальной картины течения за фронтом взрывной волны. Это связано, прежде всего, с большим различием между плотностями среды, по которой распространяется взрывная или ударная волна (т. е. воздухом), и большинства твердых тел, испытывающих воздействие взрывной волны, а также с очень большим различием акустических импедансов воздуха и твердых тел. Поэтому эти предположения вполне могут быть использованы при решении большинства задач, связанных с расчетом воздействия взрывных волн на различные объекты. Однако при анализе нагрузок, возникающих при подводных или подземных взрывах, уже нельзя независимо рассматривать процессы ударного нагружения и деформации твердого тела [4].

Для длинных ударных волн различают две характерные фазы взаимодействия с неподвижным объектом: дифракции и установившегося (медленно изменяющегося) обтекания [5]. В фазе дифракции весьма малой длительности в процессе охвата объекта волной, нагрузки существенно нестационарны. В связи с эффектом отражения максимальные давления на некоторые элементы объекта значительно превышают избыточное давление на фронте проходящей ударной волны, однако они быстро убывают, достигая величины, так называемого «застойного» давления, соответствующего началу второй фазы.

Нагрузки в фазе установившегося обтекания играют решающую роль при длинных ударных волнах. Картина взаимодействия таких волн с объектами довольно сложна. Минимальное значение числа Маха на фронте, начиная с которого местная скорость обтекания достигает скорости звука, называется критическим $M_{кр}$.

При докритических числах Маха существенную роль играют свойства вязкости воздуха, и кроме нормального давления на поверхность объект испытывает воздействие касательных напряжений (сил трения), определяемых состоянием пограничного слоя и числом Рейнольдса. Обычно у поверхности плохообтекаемого объекта пограничный слой бывает смешанный: на одних участках – ламинарный, а на других – турбулентный. По мере возрастания шероховатости поверхности и числа Рейнольдса область турбулентности расширяется, что приводит к уменьшению сил трения. Тыльные грани некоторых объектов представляют плоский срез. В данном случае за тыльными поверхностями образуется так называемая мертвая зона с пониженным давлением («донный» эффект), в которой происходит беспорядочное вихревое движение воздуха. Донным эффектом, также, обусловлено резкое снижение давления при переходе через значение $M \sim 1$. Следовательно, фаза установившегося обтекания не является строго стационарной из-за явлений турбулентности в пограничном слое и «донного» эффекта, которым свойственны пульсационные изменения скорости. Таким образом, скорости в каждой точке у поверхности тела могут характеризоваться лишь как некоторые усредненные по времени величины.

В момент падения фронта ударной волны на переднюю грань параллелепипеда происходит нормальное отражение волны и соответствующее возрастание давления. За счет волн разгрузки, распространяющихся от ребер передней грани параллелепипеда, давление на ней будет падать и через некоторое время устанавливается равным сумме избыточного давления в падающей волне и скоростного напора (давление торможения потока). Время ослабления давления примерно равно времени пробега волны разрежения от ребер передней грани до ее середины и обратно.

При прохождении фронта ударной волны вдоль верхней и боковых граней параллелепипеда появляются завихрения, связанные с обтеканием потока газа передней грани. Эти завихрения и поток газа из области повышенного давления перед передней гранью несколько снижают давление на верхней и боковых гранях по сравнению с давлением в проходящей волне. Достигнув задних ребер параллелепипеда, ударная волна обтекает их и движется вдоль задней грани, при этом также образуются завихрения. Через некоторое время после схлопывания

затекающей волны, в центре задней грани на ней устанавливается примерно постоянное давление, несколько меньшее давления в проходящей ударной волне за счет завихрений, появляющихся при затекании газового потока за заднюю грань параллелепипеда.

Общую нагрузку, действующую на любую грань, можно представить в виде суммы избыточного давления в проходящей волне $\Delta p(t)$ и давления торможения $\Delta p_t(t)$, которое связано со скоростным напором в ударной волне выражением

$$\Delta p_t(t) = C_d q(t) \quad (2)$$

где $q(t)$ – скоростной напор в ударной волне в момент времени t ,

C_d – коэффициент торможения, величина которого зависит от ориентации рассматриваемой грани относительно направления распространения ударной волны и может быть как положительной, так и отрицательной (например, для верхней, боковых и задней граней). Коэффициент торможения при нормальном набегающем потоке на плоскую поверхность [7] равен единице.

Очевидно, что характер изменения давления будет зависеть от положения рассматриваемой точки относительно ребер грани параллелепипеда. В том случае, если необходимо определить реакцию на взрывную нагрузку отдельных граней или всего объекта в целом, то в рассмотрение можно ввести среднее избыточное давление $\Delta p_s(t)$, умножая которое на площадь поверхности грани, можно определить суммарную нагрузку на нее в любой момент времени.

Обозначим через l – длина объекта в направлении распространения волны, H – высота объекта, B – ширина объекта, D – скорость распространения волны, τ – длительность фазы дифракции.

Изменение избыточного давления Δp может быть представлено в виде графика на рисунке 1.

Первоначальное давление Δp_{rf} определяется зависимостью:

$$\Delta p_{rf} = \Delta p_m \cdot \left(2 + \frac{(\gamma+1) \cdot \Delta p_m}{(\gamma-1) \cdot \Delta p_m + 2 \cdot \gamma \cdot p_0} \right) \quad (3)$$

где Δp_m – давление во фронте ударной волны;

p_0 – атмосферное давление;

γ – показатель адиабаты, для воздуха $\gamma = 1,4$.

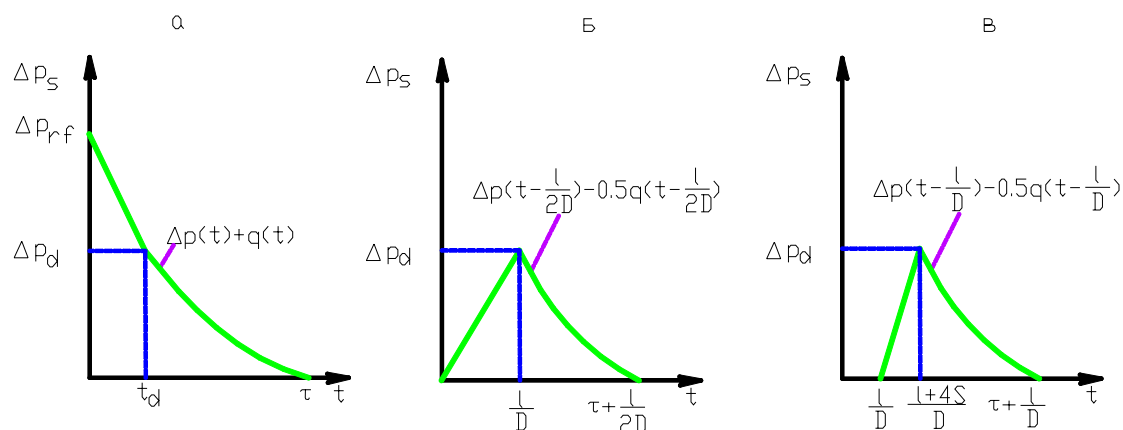


Рисунок 1. Усредненные нагрузки на элементы
прямоугольного закрытого сооружения [6]:
а – фронтальная стена; б – боковые стены и крыша; в – тыльная стена

Через некоторое время t_d , на передней грани устанавливается застойное давление Δp_d равное величине:

$$\Delta p_d = \Delta p(t_d) + C_d q(t_d) \quad (4)$$

где $\Delta p(t_d)$ и $q(t_d)$ – избыточное давление и скоростной напор в ударной волне в момент времени t_d .

Величина t_d с достаточной точностью может быть определена из выражения:

$$t_d = \frac{3S}{D} \quad (5)$$

где S – расстояние от точки схлопывания волн разгрузки до ближайшего ребра грани (высота или половина ширины передней грани).

В дальнейшем среднее избыточное давление на передней грани равно

$$\Delta p_s = \Delta p(t) + C_d q(t) \quad (6)$$

и падает до нуля при $t = \tau$.

В зарубежных странах для использования при проектировании разработаны стандарты, которые были проанализированы в работе [1].

В частности Маршалл В. рассмотрел: Британский стандарт – стандарт Ассоциации химической промышленности, CIA, 1979; Американский стандарт – стандарт Ассоциации производителей химической промышленности, MCA, 1978; стандарт правительства Нидерландов – стандарт Министерства труда и социальной безопасности, MSZ, 1977, документ Комитета советников по основным опасностям., в котором обобщены результаты почти всех исследований по взрывам паровых облаков – АСМН, 1979.

Ниже приводятся результаты анализа, взятые из [1]:

АСМН – Если стены здания получили трещины и наклон, крыша прогнулась, но поскольку персонал, находясь внутри здания, не пострадал и большинство оборудования, по-прежнему управляемо, т. е. имеется возможность предотвратить аварию установки, считается, что операторное здание «выдержало» аварию. Здание, по возможности, должно быть расположено вне зоны вероятного распространения парового облака. В противном случае оно должно обладать способностью выдерживать максимальное избыточное давление, равное 100 кПа, в течение 30 мс. Здания, расположенные вне зоны вероятного распространения парового облака, проектируются в расчете на более низкие уровни избыточного давления, определяемые по шкале расстояний для соответствующей зависимости.

CIA – Операторное здание способно «пережить» одну аварию, произошедшую в результате взрыва «вблизи или на поверхности земли». Основная задача – защитить людей, находящихся в операторном здании, и оборудование, которое должно оставаться в эксплуатационном режиме взрыва, несмотря на то, что само здание, вероятно, придется перестроить. При опасности сильного разрушения (категория 1 по CIA), когда здание находится в зоне вероятного распространения парового облака или в окружении других зданий, максимальное значение избыточного давления может достигать 100 кПа и оказывать воздействие в течение 30 мс. Для случаев, когда здание расположено вне зоны вероятного распространения парового облака, максимальное значение избыточного давления может достигать 70 кПа и оказывать воздействие в течение

20 мс. В случае если паровое облако может охватывать крышу здания или располагаться над зданием с удалением в 15 м, проектирование крыши производится для тех же значений избыточного давления, что и для стен здания. Здание должно быть расположено по возможности дальше от вероятных источников паровых облаков, имеющих массу 15 т, и не ближе 30 м от них.

МСА – Основная цель – обеспечить защиту людей, находящихся в операторном здании. Для этого установлены предельные значения деформации конструкции здания. При опасности сильного разрушения (категория С по МСА) здания должны быть расположены не ближе 30 м друг от друга. Считается, что здание не будет поражено при удалении от источников взрыва как минимум на 60 м. При этом вероятные параметры взрыва – избыточное давление, равное 70 кПа, воздействующее в течение 20 мс. Для менее серьезных взрывов парового облака допускается уровень избыточного давления, равный 20 кПа.

MSZ – Министерство труда и социальной безопасности.

Будучи подвергнутым максимальной ударной нагрузке в результате взрыва все здание вместо ремонта впоследствии может быть снесено. Единственное условие - оно должно сохраниться после взрыва. Рассматриваются удаленные (периферийные) сооружения. Внешние стены зданий проектируются для значений избыточного давления отраженных волн 30 кПа, крыша зданий - 20 кПа; лишь для случая попадания здания в зону распространения вероятного облака проектирование ведется для избыточного давления, равного 30 кПа.

На стадиях разработки, проектирования и изготовления сложных технических систем, в современных компаниях наибольшее распространение получили средства компьютерного моделирования. Для широкого внедрения разработанных технологий в производственную практику были созданы и реализованы программные процедуры, позволяющие для не имеющих достаточного опыта в области численного моделирования, быстро освоить и эффективно применять данные технологии.

В последнее время появилось множество подобных программных пакетов, нашедших широкое применение во всех областях промышленности.

ABAQUS является одним из лидеров в области инженерных прочностных расчетов. ABAQUS имеет возможность решать практически любые сложные

нелинейные задачи с учетом реального поведения конструкции при различных типах нагружения.

Определим напряженно-деформированное состояние здания операторной. Конструкция операторной состоит из стен и перекрытия. Общая высота здания составляет 6 м, длина – 8 м. Толщина фронтальной стены операторной – 0,6 м, боковой стены – 0,6 м, тыльной стены – 0,5 м.

Рассмотрим следующий вариант: авария с выбросом 10 т сжиженного пропана (пример из работы [3]). Операторная располагается на расстоянии 102 м от центра взрыва.

Давление во фронте ударной волны, рассчитанное по методике по А.Н. Бирбраера, составляет 60 кПа. Радиус облака ГПВС $r_0 = 37$ м; объем облака ГПВС $V = 9,904 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Построение геометрии расчетной области осуществляется в непосредственно в графической среде программы ABAQUS. На рисунках 2 и 3 показана модель операторного здания.

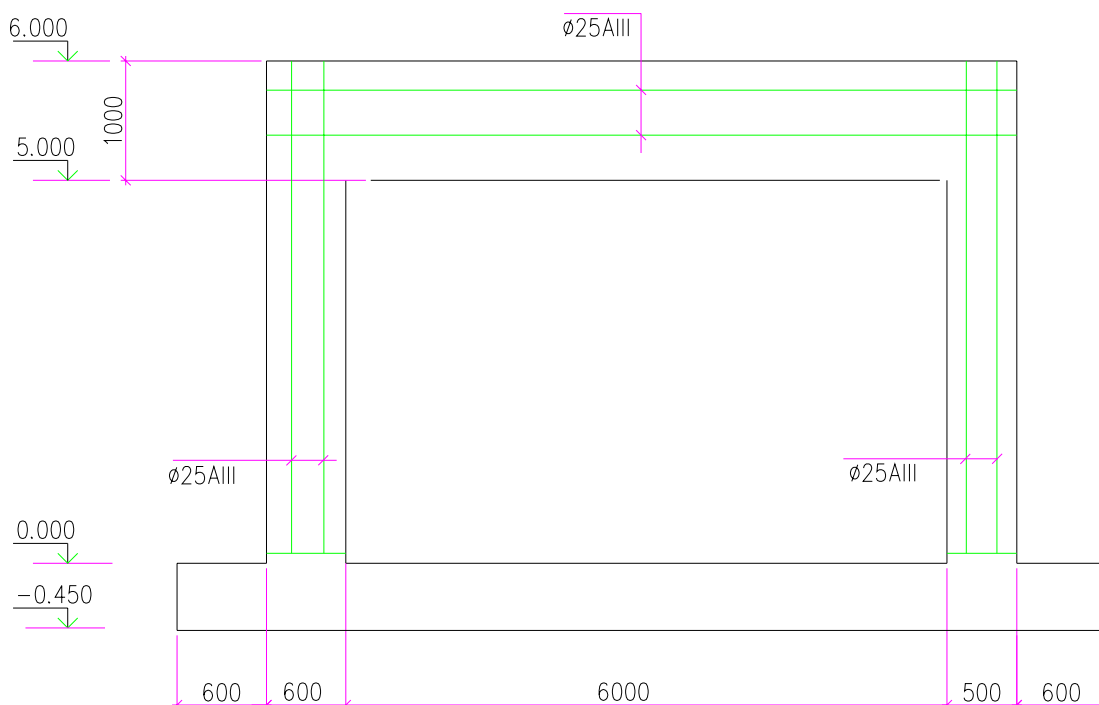


Рисунок 2. Геометрия здания операторной

Для моделирования конструкции из бетона используются элементы типа «солид» с использованием модели damaged plasticity. Модель damaged plasticity применяется в случае уменьшения упругой жесткости бетона, вызванной пластическим упрочнением как при сжатии, так и при растяжении.

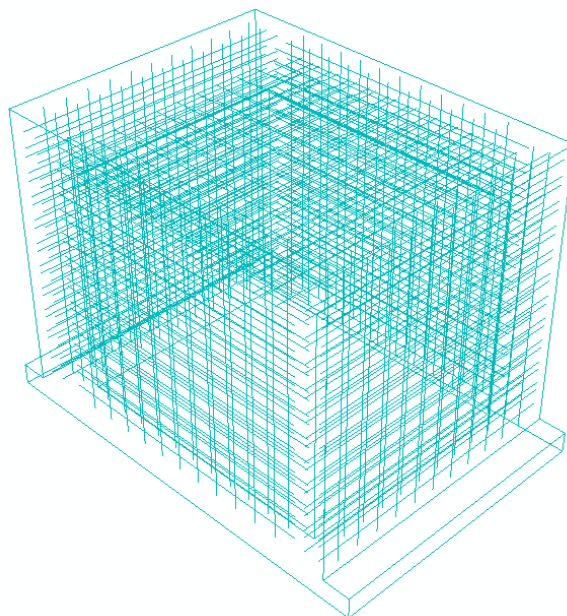


Рисунок 3. Трехмерная модель здания операторной

Армирование в горизонтальном и вертикальных направлениях моделируются с использованием embedded element – встроенными балочными элементами со свойствами армирующего материала. Материал арматуры – сталь ($\nu=0,3$; $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$; $E=2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$).

Нагрузка от ударной волны задается в виде давления, изменяющегося во времени. Расчет давления произведен по методике, описанной выше. Амплитуда давления по времени приведена на рисунке 4.

Конечно-элементная модель с приложенными нагрузками показана на рисунке 5. Модель операторной состоит из 56 тыс. конечных элементов.

На рисунках 6 – 7 представлены результаты численного исследования с помощью ABAQUS.

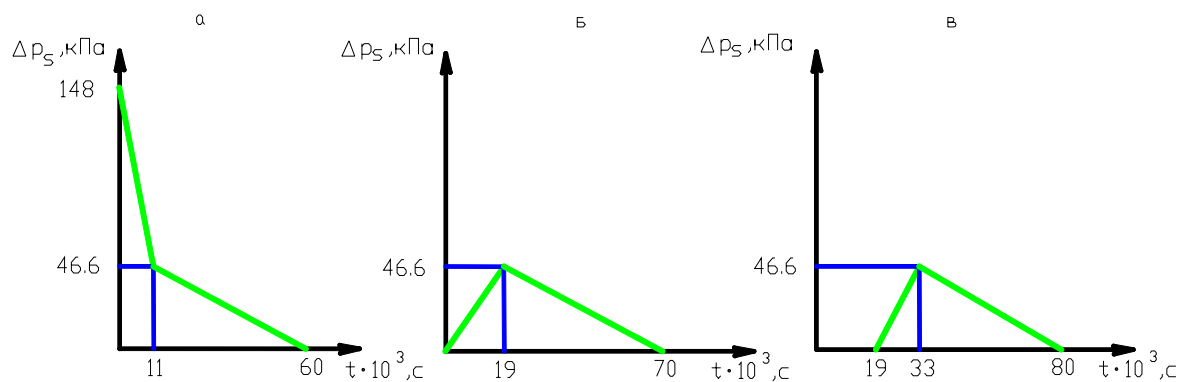


Рисунок 4. Амплитуда давления по времени:
а – фронтальная стена; б – боковые стены и крыша; в – тыльная стена

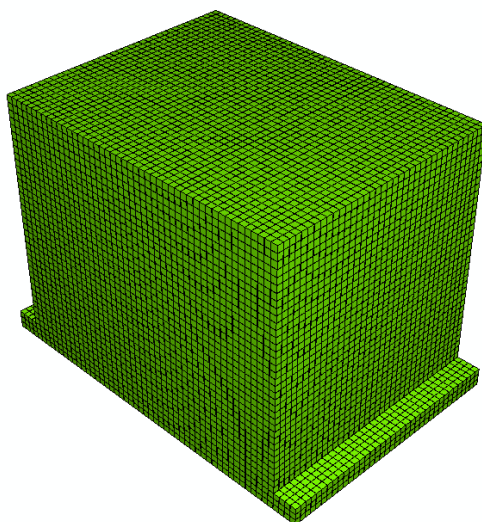


Рисунок 5. Недеформированная конечно-элементная модель здания операторной

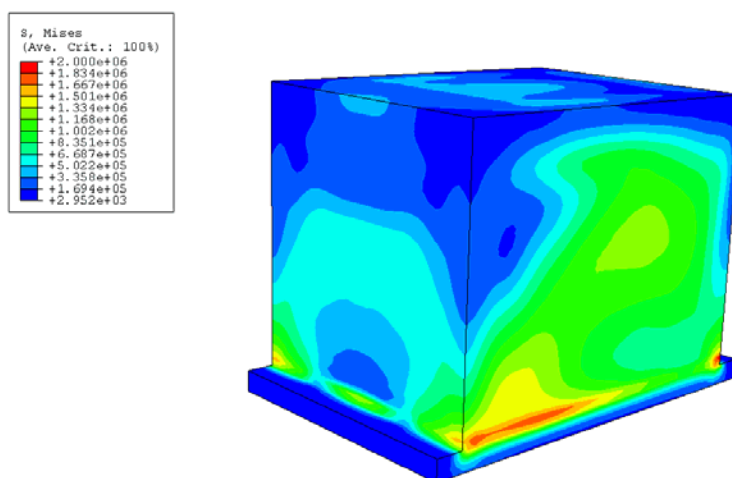


Рисунок 6. Распределение эквивалентных напряжений по теории Мизеса в момент времени 0,011 с

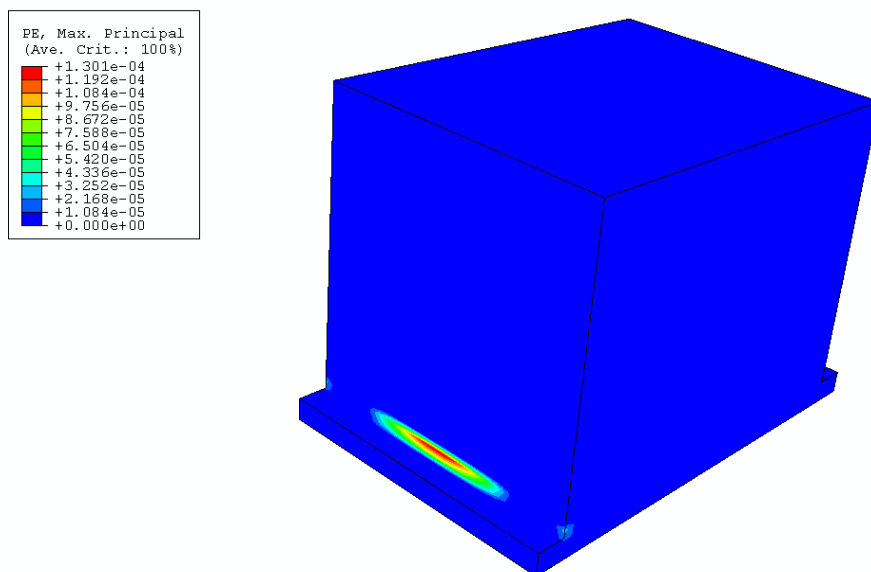


Рисунок 7. Распределение пластических деформаций в момент времени 0,080 с

Максимальные растягивающие напряжения бетона при данной амплитуде давления превышают предела текучести на растяжение для бетона. Начинают образовываться трещины.

Контурные графики величины перемещения и DAMAGET в момент времени 0,080 с представлены соответственно на рисунках 8 и 9.

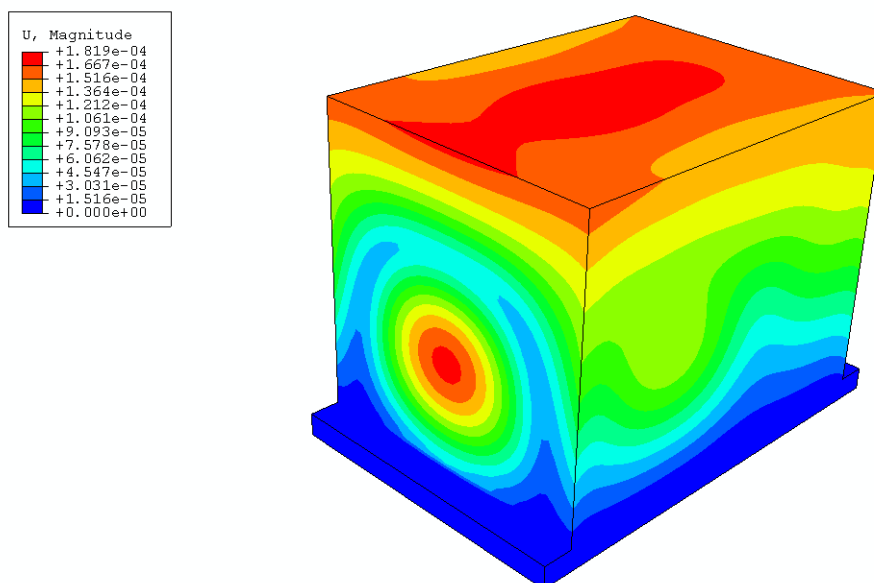
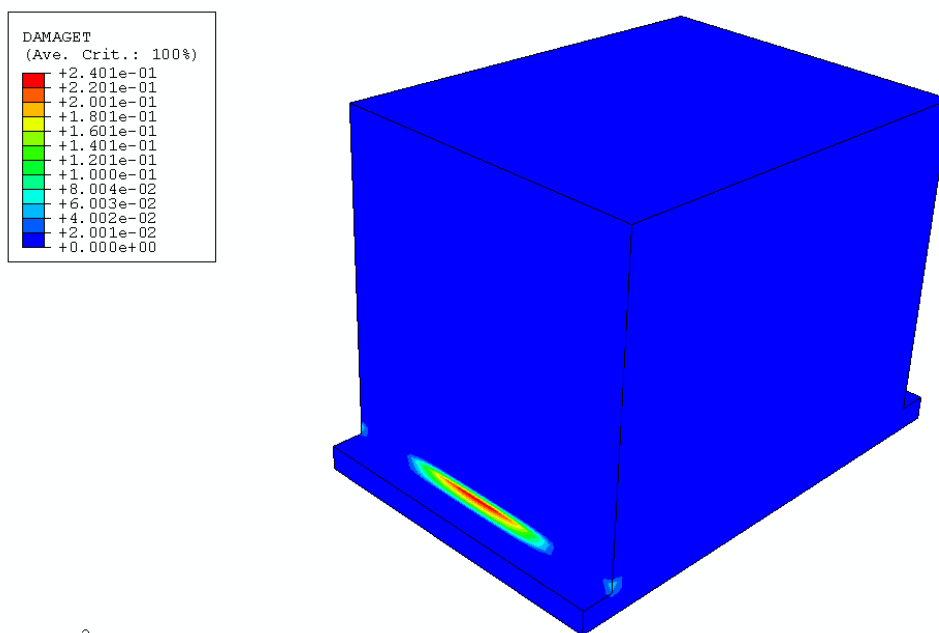


Рисунок 8. Контурный график перемещения (scale factor = 1)



2

Рисунок 9. Контурный график изменения величины DAMAGET в момент времени 0,08 с

Поражающее действие ударной волны на человека и объекты при взрывах газопаровоздушных смесей рядом исследователей [4, 6, 8] описывается с использованием так называемых P-I диаграмм («избыточное давление – импульс»). Такой подход наиболее характерен для количественной оценки последствий взрывов твердых (конденсированных) взрывчатых веществ бризантного действия, при взрывах которых генерируются короткие ударные волны и эффект воздействия на людей и объекты определяется импульсом ударной волны I в ближней зоне и соотношением «избыточное давление - импульс» в дальней зоне действия ударной волны, в то время как при объемных взрывах газопаровоздушных смесей образуются длинные ударные волны [1].

В работе [9] в результате анализа литературных данных получена таблица, по которой для предприятий нефтегазовой, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также жилых и общественных зданий по значению избыточного давления можно определить характер предполагаемого разрушения.

При давлении 60 кПа для промышленных зданий с железобетонным каркасом предполагаются сильные разрушения: значительные деформации несущих конструкций, разрушение большей части перекрытий, стен и

оборудования производственных корпусов и жилых зданий, образование трещин в стенах.

Результаты, полученные в программном комплексе ABAQUS хорошо согласуются с данными, приведенными в литературе. Проведенные исследования показывают, что расчетная процедура позволяет эффективно решать задачи определения напряженно-деформированного состояния при воздействии ударной волны на здания и сооружения.

Литература

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств М., Мир, 1989 – 672 с.
2. Котляревский В.А., Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Безопасность резервуаров и трубопроводов– М., Экономика и информатика, –2000 – 555 с.
3. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. – Саратов, 2002 – 179 с.
4. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Пер. с англ./Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Под ред. Зельдовича Я. Б., Гельфанда Б. Е. – М., Мир, 1986 – 319 с.
5. Григорян С.С. О действии длинных ударных воли на твердое тело//ПМТФ. – 1963. – № 3. – С. 37–49.
6. Убежища гражданской обороны: Конструкции и расчет/Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А. и др.; Под ред. Котляревского В.А.. – М.: Стройиздат, 1989. – 606 с.
7. Физика взрыва/Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 832 с.
8. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере.– М.: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ, 1999 – 124 с.
9. Козлитин А.М. Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли

10. ABAQUS/CAE User's Manual
11. ABAQUS Example Problems Manual
12. <http://www.abaqus.com>