

## ПОВЫШЕНИЕ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рашитов Р.Ф., Кузеев И.Р., Гляшева Р.Р.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*В статье для повышения взрывоустойчивости зданий и сооружений нефтеперерабатывающих предприятий предлагается установка по пути движения ударной волны специального устройства оптимального типа, способного уменьшить воздействие ударной волны. Параметром оптимизации является минимальное значение избыточного давления во фронте ударной волны перед защищаемым объектом. Подбор такого устройства предлагается осуществлять с использованием численных методов расчета.*

Цели, ставящиеся перед нефтеперерабатывающей промышленностью в условиях современной жизни, несомненно, приводят к увеличению количества аварийных ситуаций и, как следствие, к росту ущерба и ухудшению состояния окружающей среды.

Тенденции развития рынка приводят к увеличению объема переработки нефти. Так, в России в I полугодии 2007 г. объем первичной переработки нефти увеличился по сравнению с аналогичным периодом прошлого года на 5,3 %, то есть до 112 млн. т. Производство бензина выросло на 6,8 %, достигнув 17,2 млн. т, мазута – на 5,1 % (30,6 млн. т). Выпуск дизельного топлива составил 32,5 млн. т, что на 4,7 % больше чем за первые шесть месяцев 2006 г.[1].

Перед нефтеперерабатывающими производствами, эксплуатирующими опасные производственные объекты, стоит важнейшая задача – обеспечить промышленную безопасность, которая предполагает снижение вероятности возникновения аварий и катастроф. В связи с этим, основное внимание следует уделить на повышении противоаварийной устойчивости производства.

Здания и сооружения, в которых находится персонал, при существующем положении расположены в непосредственной близости от потенциально опасных объектов. При строительстве заводов не была предусмотрена защита персонала от воздействия ударной волны, образующейся при взрыве.

Для повышения взрывоустойчивости зданий и сооружений предлагается установка по пути движения ударной волны специальных устройств оптимального типа, способных уменьшать действие ударной волны. Параметром

оптимизации является минимальное значение избыточного давления во фронте ударной волны перед защищаемым объектом.

Определение оптимального типа специальных устройств рассмотрено на примере технологической установки ЭЛОУ-АВТ (комбинированная установка атмосферно-вакуумной перегонки нефти с предварительным ее обессоливанием). Типовой план расположения оборудования установки ЭЛОУ-АВТ показан на рисунке 1.

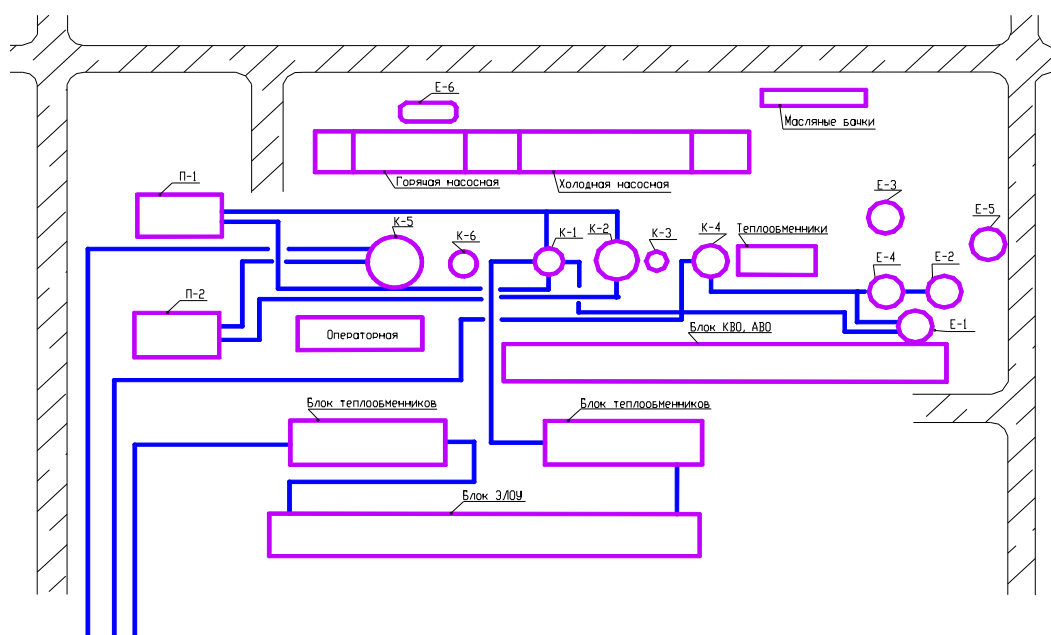


Рисунок 1. Типовое расположение оборудования установки ЭЛОУ-АВТ

Идрисов В.Р. в [2] исследовал типовое расположение установки ЭЛОУ-АВТ и выявил, что практически вся территория установки покрывается зонами полных разрушений объектов и представляет собой одну очень большую зону потенциальной опасности. В том числе серьезной опасности подвергается персонал, находящийся внутри операторного здания, поэтому будем рассматривать воздействие поражающих факторов взрыва на операторное здание. Известны многочисленные примеры полного разрушения или сильных повреждений таких зданий в результате взрывов паровых облаков [3].

В качестве такого сооружения для защиты операторного здания при типовом плане расположения на первом этапе рассматривается 4 типа устройств (рисунок 2), устанавливаемые по пути движения ударной волны.

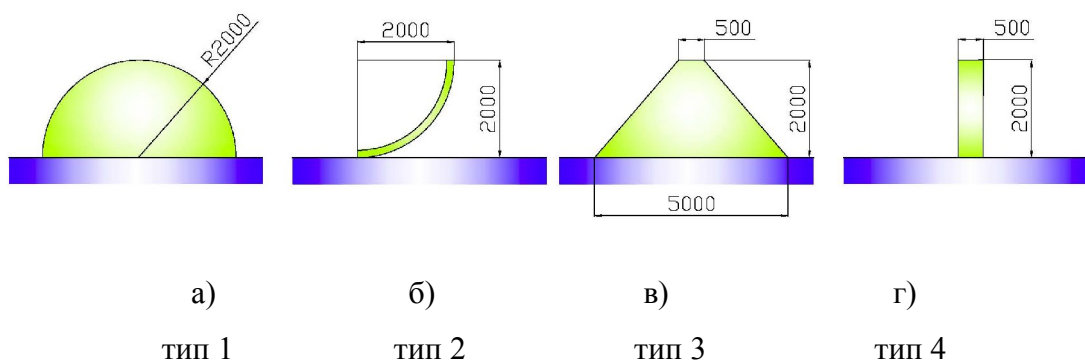


Рисунок 2. Типы рассматриваемых устройств (размеры указаны в мм)

Прогнозирование распространения ударных волн производилось с использованием газодинамического модуля программного комплекса Ansys.

Определение оптимального типа и размещения загородительного устройства осуществлялось в соответствии с алгоритмом, включающим в себя следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Сбор и анализ исходных данных для составления расчетной схемы (геометрическая модель объекта исследования, определение координат центра взрыва, расчет тротилового эквивалента, месторасположение операторной на площадке по отношению к центру взрыва).

Шаг 2. Определяются границы моделирования.

Шаг 3. Выполняется построение расчетной области

Шаг 4. Задается тип устройства и месторасположение

Шаг 5. Осуществляется подбор размера сетки элементов

Шаг 6. Выполняется построение сеточной модели

Шаг 7. Задаются начальные и граничные условия

Шаг 8. Задаются основные параметры контроля процесса решения и осуществляется численный расчет.

Шаг 9. Выполняется анализ графиков изменения давления во фронте ударной волны перед фронтальной стеной здания для каждого типа устройства.

Шаг 10. Определяется тип устройства, при котором значения давления перед фронтальной стеной здания является минимальным.

Применение описанного алгоритма возможно как для гипотетических, так и для проектных аварий, сопровождающихся взрывом.

Наибольшую опасность для операторного здания представляет аварийная ситуация в результате разгерметизации колонны К-5. Источником возникновения аварийной ситуации принят мгновенный выброс парогазовой фазы в атмосферу на высоте 4 м от нулевой отметки фундамента при разгерметизации колонны К-5.

На основании плана расположения оборудования была составлена расчетная область (рисунок 3), размеры которой составили 35,1м x 18,9м x 18,9 м.

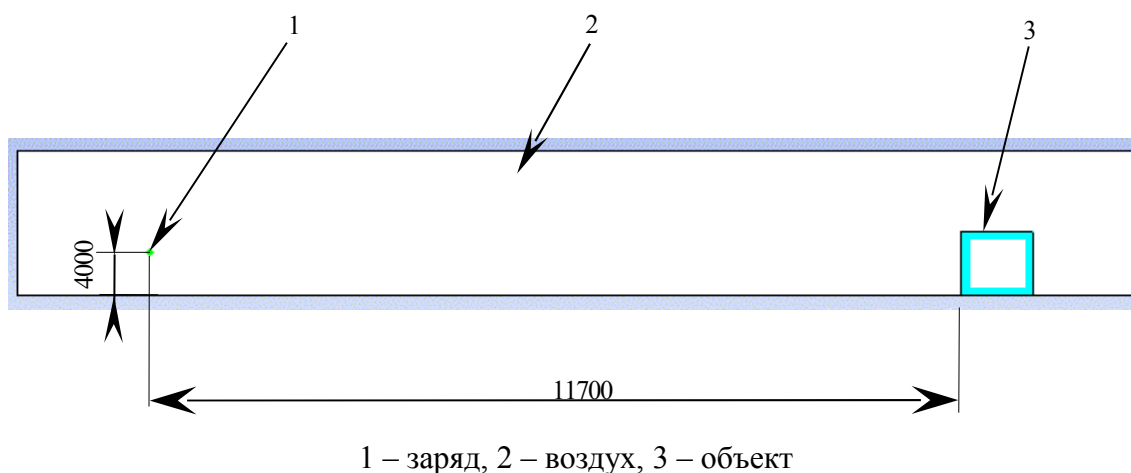


Рисунок 3. Расчетная область, размеры указаны в [мм]

В соответствии с реальным планом расположения оборудования на расстоянии 11,7 м от центра взрыва располагается операторное здание, которое представляет собой одноэтажное строение.

При проведении расчетов осуществлялось варьирование величины расстояния от центра взрыва, принятое равным от 6 м до 9 м с шагом 0,5 м (рисунок 4).

Моделирование устройств было осуществлено лагранжевыми элементами; для устройств типа 1, 3, 4 принят материал – бетон ( $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ ;  $G = 2,2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ;  $f_c = 1,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ;  $f_t / f_c = 0,1$ ; [4]), для устройства типа 2 – сталь ( $\nu = 0,3$ ;  $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ; [4]). Для решения поставленной задачи были созданы отдельные модели для каждого типа устройства.

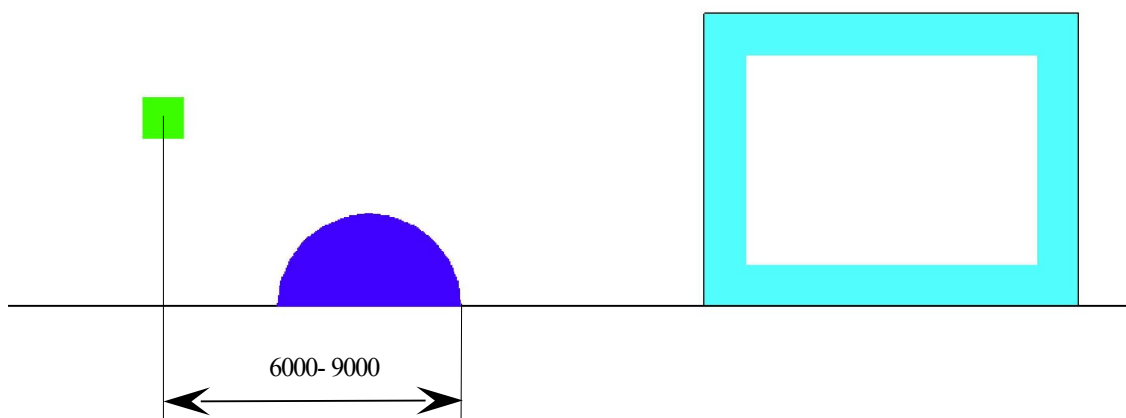


Рисунок 4. Расположение защитного устройства (размер указан в мм)

Для каждой модели было подобрано оптимальное количество элементов, которое составило приблизительно 143000 элементов.

Для каждого варианта численным анализом было определено максимальное значение давления во фронте ударной волны во времени в зависимости от типа (рисунок 2) и расположения устройства перед фронтальной стеной объекта (таблица 1).

Из таблицы 1 можно заключить, что наилучшим с точки зрения защиты объекта от ударной волны является расположение устройств на расстоянии 7,5 м от центра взрыва для устройств типа 1-3 и 6,5 м от центра взрыва для устройства типа 4.

Оптимальным в данной постановке задачи исследования является устройство типа 4 при расположении на расстоянии 6,5 м от центра взрыва. При этом снижение избыточного давления во фронте ударной волны происходит приблизительно в 2,07 раза.

Таблица 1

Максимальные значения избыточного давления во фронте ударной волны перед фронтальной стеной объекта при различных типах устройств, кПа

| Расстояние от центра взрыва, м | Тип устройства |      |     |     |
|--------------------------------|----------------|------|-----|-----|
|                                | 1              | 2    | 3   | 4   |
| 6                              | 646            | 1051 | 753 | 583 |
| 6,5                            | 625            | 1005 | 726 | 570 |
| 7                              | 610            | 951  | 688 | 573 |
| 7,5                            | 595            | 895  | 595 | 584 |
| 8                              | 596            | 950  | 597 | 596 |
| 8,5                            | 613            | 970  | 623 | 620 |
| 9                              | 637            | 1042 | 622 | 660 |

Для более эффективной защиты объекта на втором этапе исследована комбинация рассмотренных выше типов устройств. В проведенных численных экспериментах проанализировано разнообразное сочетание устройств.

Расчеты показали, что для типового плана расположения оптимальным является устройство, состоящее из двух последовательно расположенных стенок (рисунок 5).

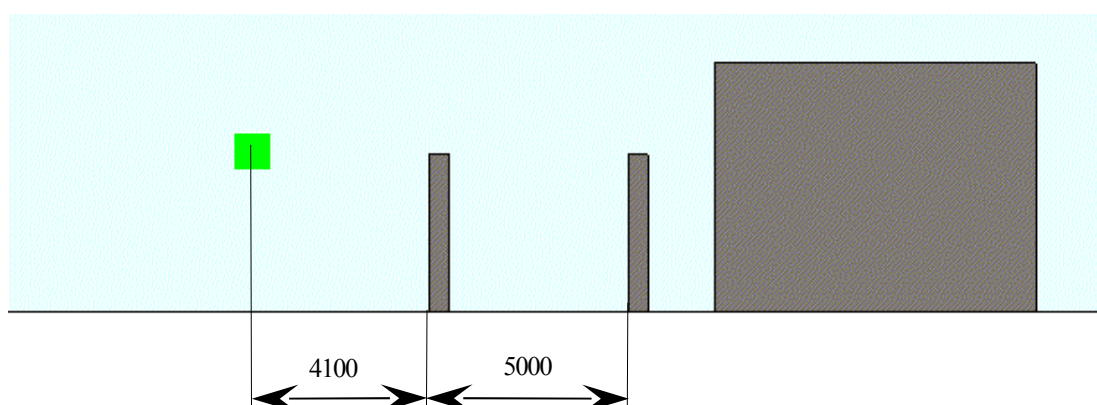


Рисунок 5. Расположение защитного устройства (размеры указаны в мм)

На рисунках 6 - 7 представлены результаты моделирования. На рисунке 6 изображено поле скоростей, на рисунке 7 приведены поля давления в расчетной области.

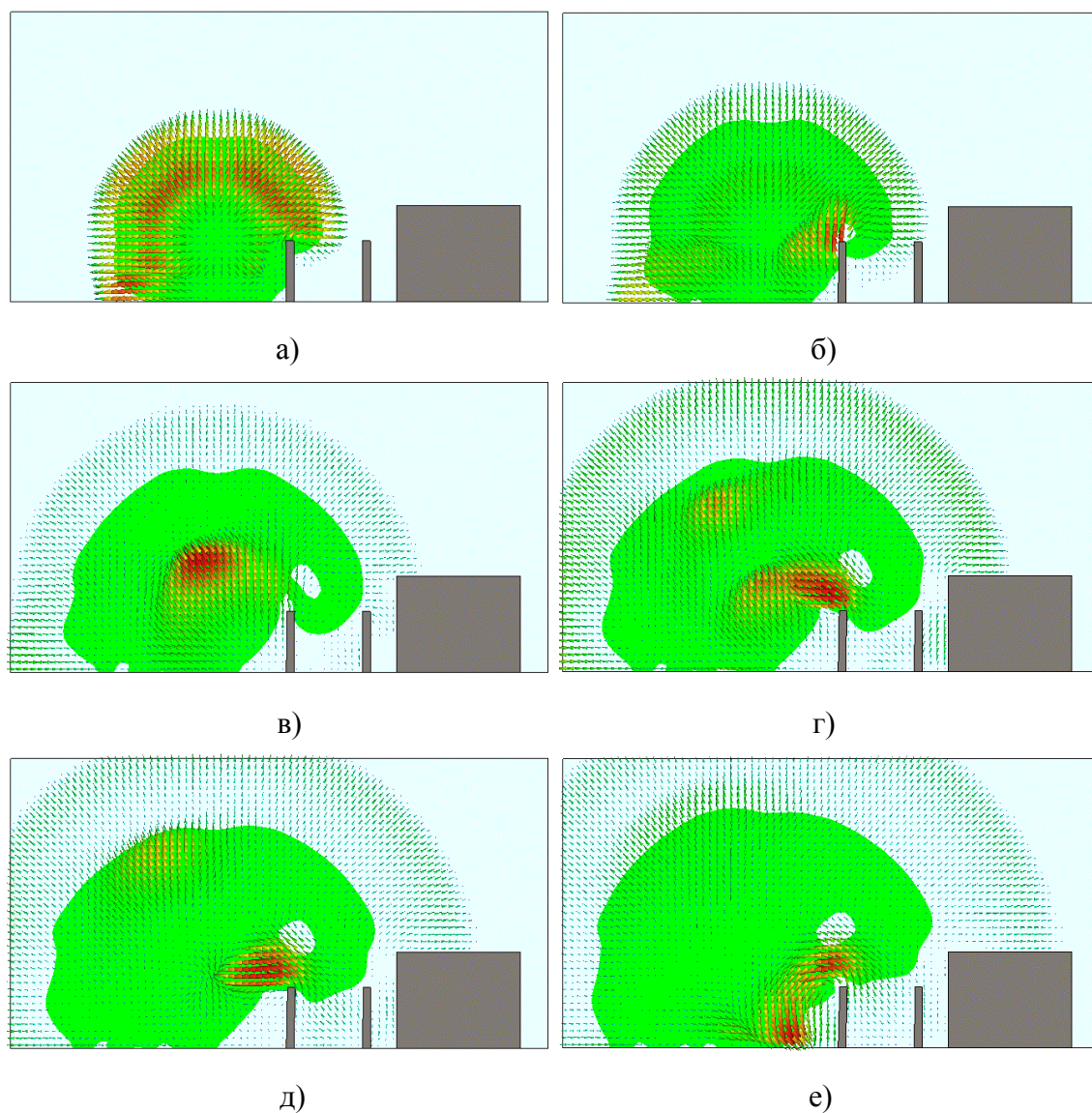


Рисунок 6. Поле скоростей на моменты времени:  
0.0037 с (а), 0.0056 с (б), 0.0094 с (в), 0.0131 с (г), 0.0150 с (д) и 0.0188 с (е)  
после начала инициирования взрыва

Снижение избыточного давления во фронте ударной волны при установке этого типа устройства происходит приблизительно в 6,5 раз.

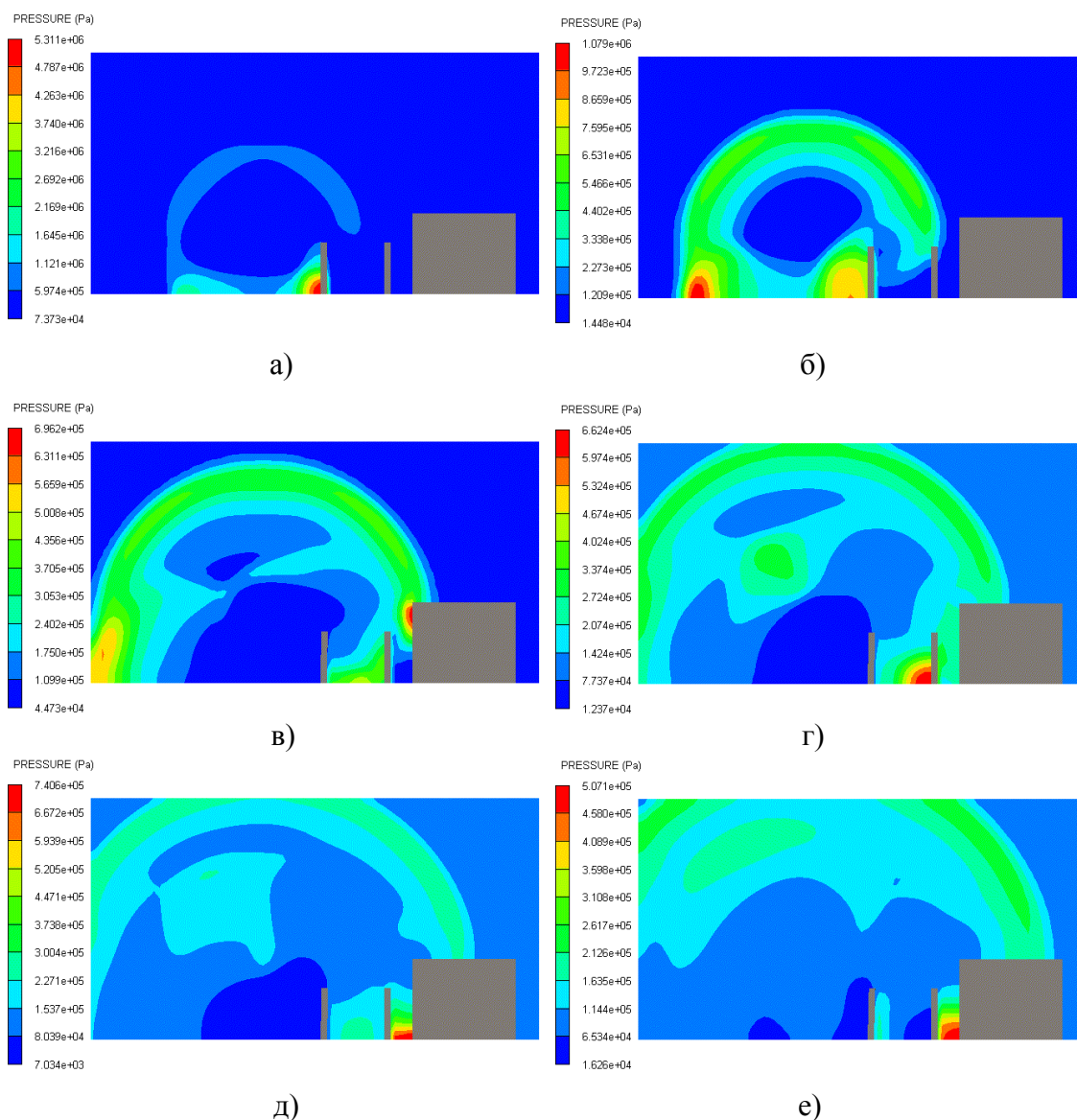


Рисунок 7. Поле давления на моменты времени:  
0.0037 с (а), 0.0056 с (б), 0.0094 с (в), 0.0131 с (г), 0.0150 с (д) и 0.0188 с (е)  
после начала инициирования взрыва

Для последующего определения напряженно-деформированного состояния конструкций здания при воздействии ударной волны были построены графики изменения средних избыточных давлений, действующих на элементы сооружения, во времени (рисунок 8), в соответствии с рекомендациями, приведенными в [7].

На рисунке 8 момент времени 0 с соответствует моменту времени начала воздействия ударной волны на здание.

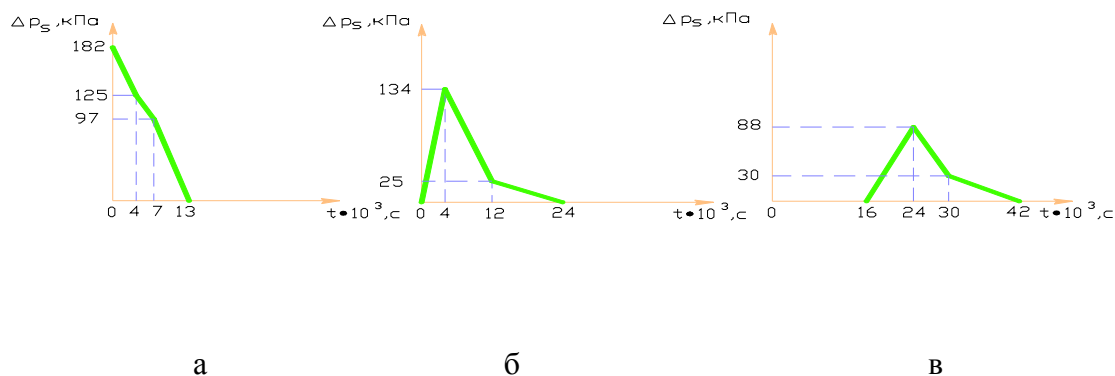


Рисунок 8. Усредненные нагрузки на элементы здания операторной:

а – фронтальная стена; б – боковые стены и крыша; в – тыльная стена

Произведем оценку напряженно-деформированного состояния конструкций здания операторной с применением метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе Abaqus.

Действие ударной волны на элементы конструкции моделировалось в виде изменяющегося во времени давления, приложенного снаружи к поверхностям здания.

Будем считать, что при увеличении нагрузки при изгибе железобетонной конструкции возникают трещины в растянутой зоне. При дальнейшем увеличении нагрузки трещины раскрываются. Разрушение сечения наступает тогда, когда напряжения в арматуре растянутой зоны достигают предела текучести, при этом уменьшается высота сжатой зоны бетона, что сопровождается значительным увеличением прогиба или когда напряжения в сжатой зоне бетона достигают предела прочности на сжатие. Первый случай разрушения возникает в нормально армированных балках, второй при перearмировании [5].

На рисунке 9–10 приведены результаты численного исследования. На рисунке 9 показаны контурные графики величины DAMAGET и величины DAMAGEC для бетона. Распределение эквивалентных напряжений арматурной стали по теории Мизеса изображено на рисунке 10.

Величины DAMAGET и DAMAGEC являются параметрами поврежденности, равные нулю для неповрежденного материала и единице для полностью разрушенного материала при растяжении и сжатии соответственно [8, 9].

Анализ динамики распределения эквивалентных напряжений стальной арматуры по теории Мизеса показывает, что максимальное значение эквивалентных напряжений для стали во времени составляет около 23,5 МПа.

Как показывают результаты моделирования, в процессе нагружения арматура железобетона работает в упругой стадии. Возможно образование неопасных трещин в растянутой зоне бетона. Установка устройства обеспечивает взрывоустойчивость здания и применение дополнительных мер не требуется.

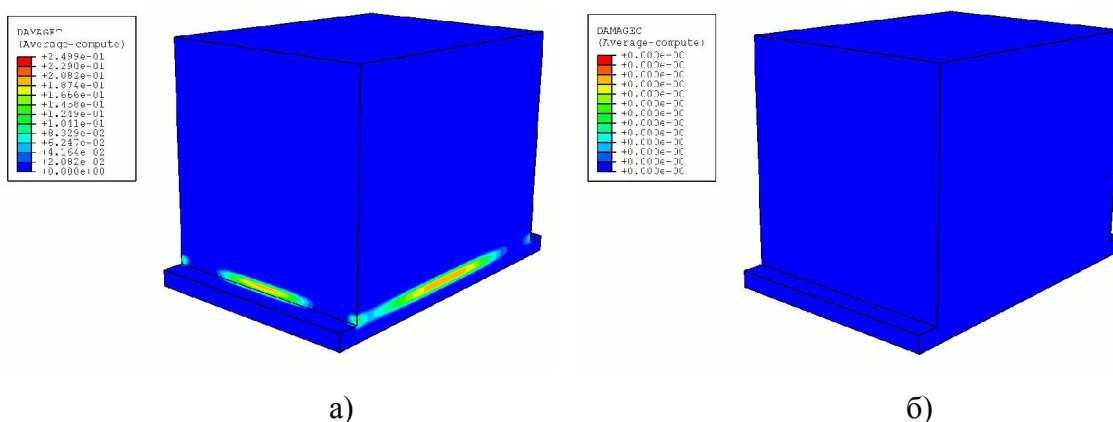


Рисунок 9. Контурный график величины DAMAGET (а) и величины DAMAGEC (б) для бетона на момент времени 0.0528 с после начала инициирования взрыва

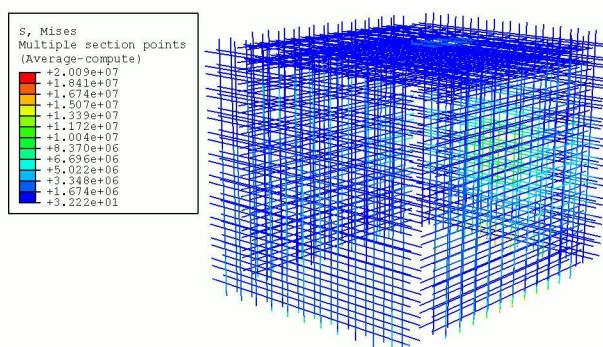


Рисунок 10. Распределение эквивалентных напряжений для стали по теории Мизеса [Па] на момент времени 0.0528 с после начала инициирования взрыва

Для построения картины напряженно-деформированного состояния конструкций устройства при возникновении аварийной ситуации произведем численное моделирование методом конечных элементов. В исследовании рассмотрим только первую стенку устройства в связи с тем, что она подвергается большему нагружению.

Были произведены ряд численных экспериментов, в результате которых были получены оптимальные размеры устройства из условия прочности. Геометрическая модель устройства изображена на рисунке 11.

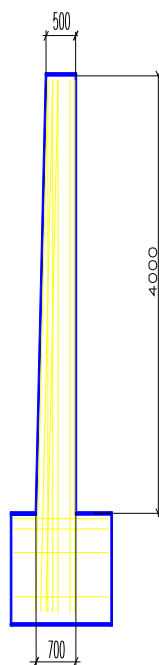


Рисунок 11. Геометрическая модель устройства, размеры указаны в [мм]

На рисунках 12 – 13 приведены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций здания. Динамика изменения контурного графика величины DAMAGET и величины DAMAGEC для бетона представлена на рисунке 12.

На рисунке 13 представлено распределение эквивалентных напряжений стальной арматуры по теории Мизеса.

Анализ рисунка 12 показывает, что образуются ряд локальных трещин в растянутой зоне бетона, что приводит к частичному разрушению верхней

поверхности бетона. Анализ рисунка 13 показывает, что значения эквивалентных напряжений рабочей арматуры во времени в растянутой зоне бетона не превышает предела текучести стали, то есть стальная арматура работает в упругой стадии.

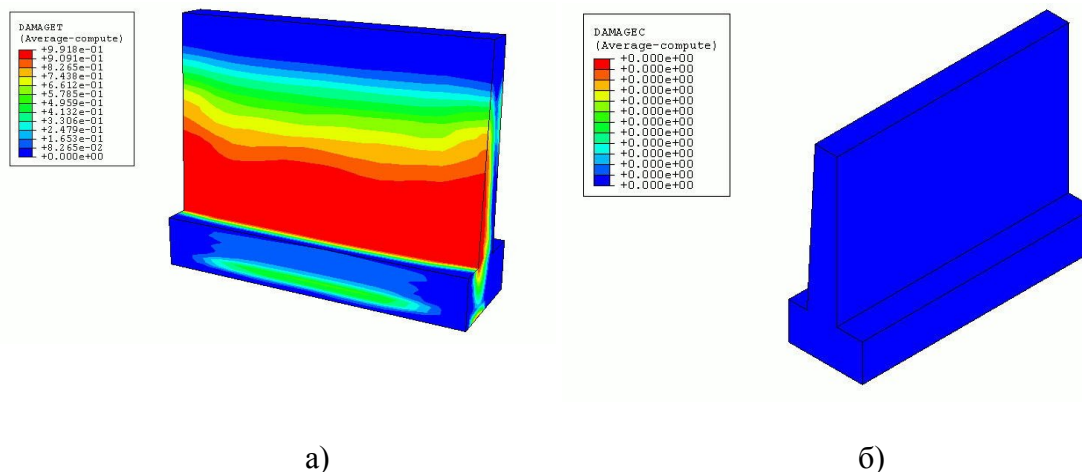


Рисунок 12. Контурный график величины DAMAGET (а) и величины DAMAGEC (б) для бетона на момент времени 0.0221 с после начала инициирования взрыва

Результаты исследования показывают, что в сжатой зоне бетона конструкции работают в упругой стадии. Таким образом, разрушение конструкции при нагружении ударной волной не произойдет и прочность конструкции обеспечена.

Дополнительно произведем расчет железобетонного элемента по деформациям из условия, по которому прогибы конструкции от действия нагрузки не должны превышать предельно допустимого значения прогиба.

При расчете методом конечных элементов была построена динамика изменения контурного графика перемещения, представленная на рисунке 14.

Предельно допустимое значения прогиба в данном случае составляет 1/100 вылета консоли [6], то есть 0,04 м. Максимальный прогиб конструкции составил 0,02324 м. Условие прочности конструкции при расчете по деформациям выполняется.

Таким образом, прогнозирование аварийной ситуации с образованием взрыва на типовой площадке ЭЛОУ-АВТ с использованием численных методов позволило

минимизировать последствия от взрывов путем установки защитной конструкции на пути движения ударной волны.

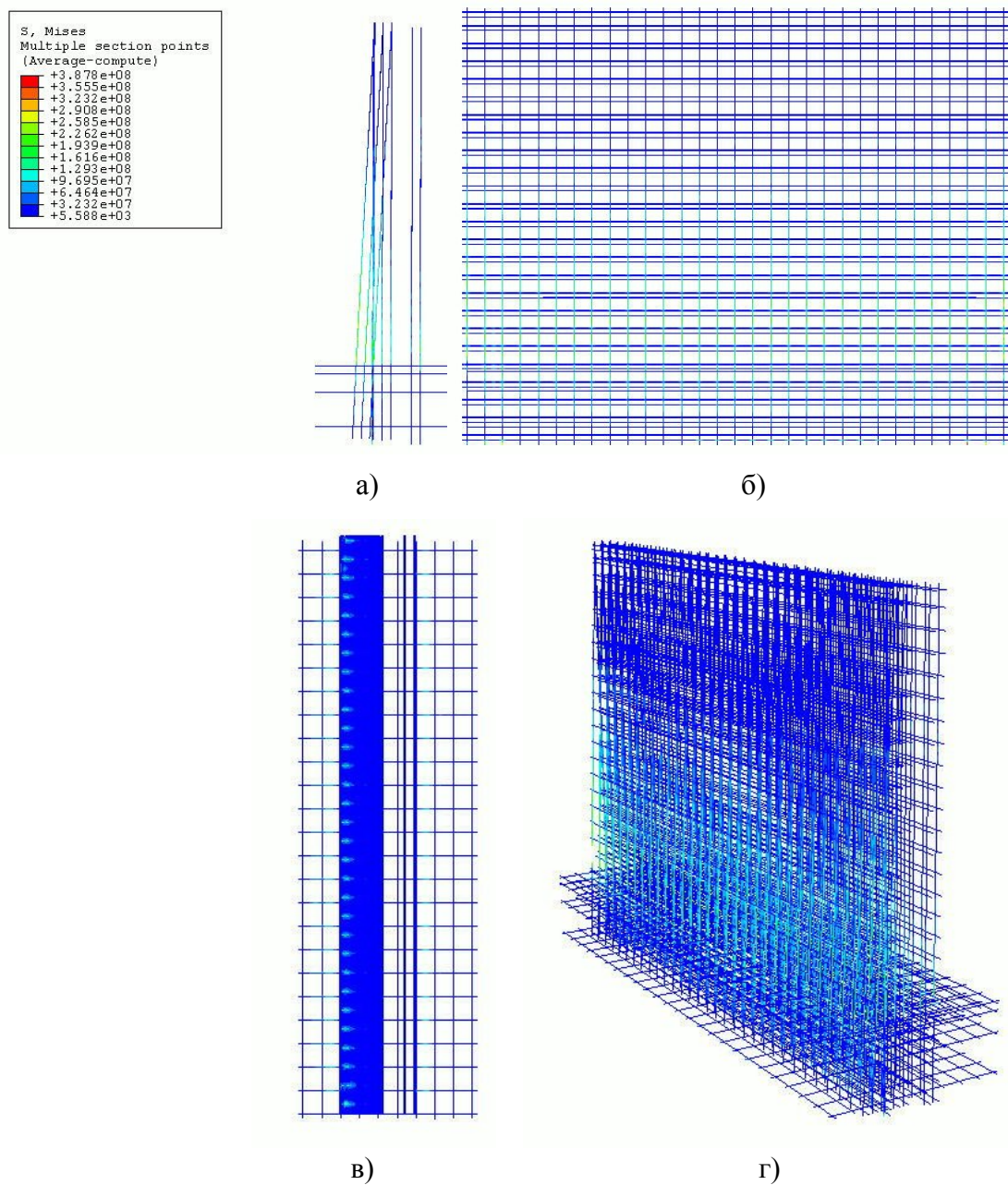


Рисунок 13. Распределение эквивалентных напряжений стальной арматуры по теории Мизеса [Па]:

а) вид спереди, б) вид сбоку, в) вид сверху, (г) трехмерный вид на момент времени 0.0221 с после начала инициирования взрыва

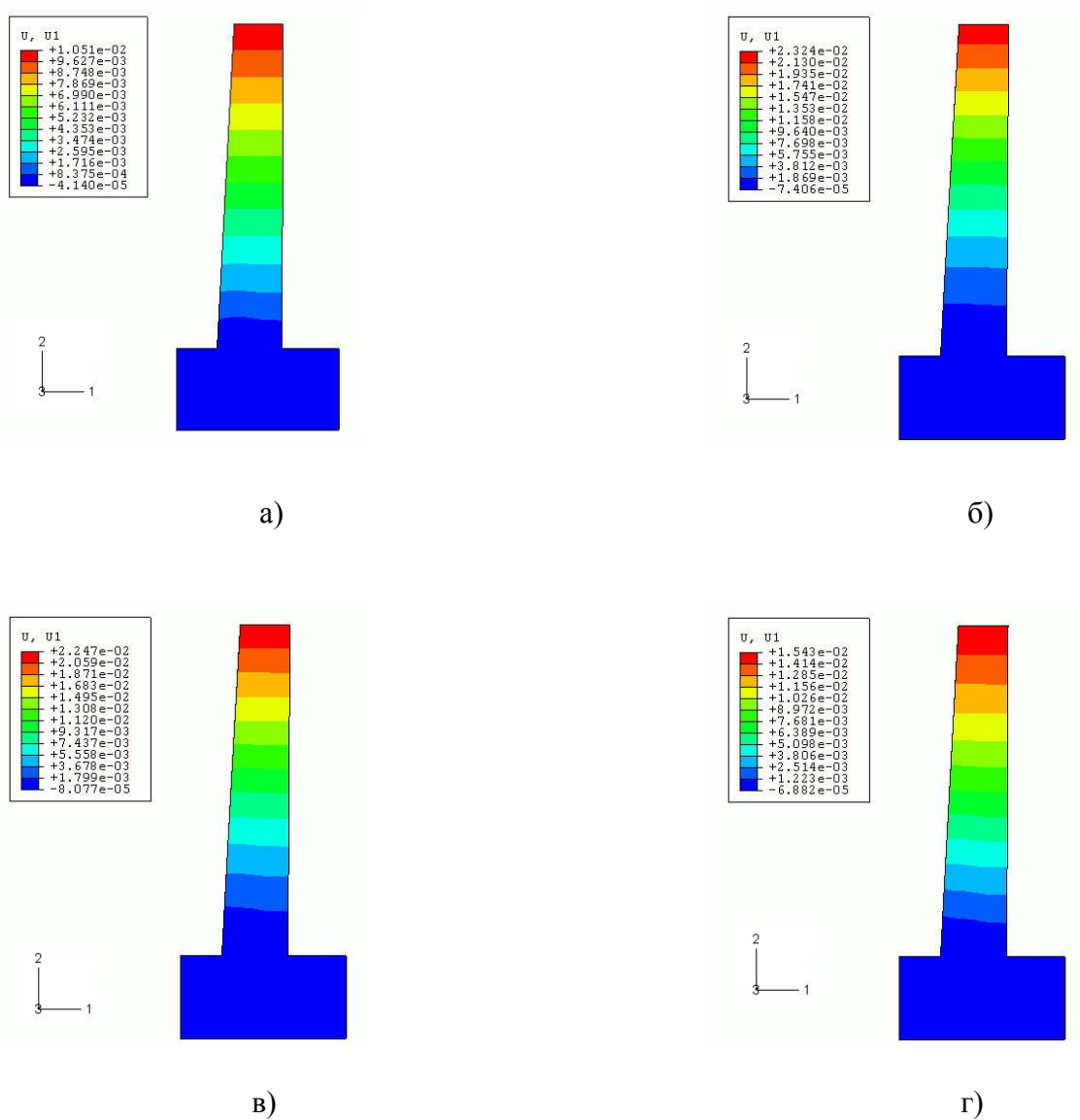


Рисунок 14. Контурный график перемещения (scale factor = 1) на моменты времени 0.071 с (а), 0.0101 с (б), 0.0191 с (в) и 0.0221 с (г) после начала инициирования взрыва

## Литература

1. Шевчук А. Мода на нефтепереработку // Нефть России. – 2007. – № 11. – с. 64–66.
2. Идрисов В. Р. Оценка зон потенциальной опасности опасных производственных объектов предприятий нефтепереработки с использованием ГИС-технологий и вейвлет-анализа / Дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2006.- 127 с.
3. Маршалл В. Основные опасности химических производств. Пер. с англ. / Под ред. Чайванова Б.Б., Черноплекова А.Н. – М., Мир, 1989. – 672 с.
4. AUTODYN User Manual.
5. Строительные конструкции. В 2-х т. Т.2 Железобетонные конструкции: Учебник для техникумов / Цай Т.Н. – М.: Стройиздат, 1985. – 462 с.
6. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
7. 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.
8. ABAQUS Example Problems Manual.
9. ABAQUS/CAE User's Manual.