

На правах рукописи

ИЛЯЕВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**УСТОЙЧИВОСТЬ АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
ВНЕШНЕГО ВЗРЫВА**

Специальность 05.26.03 – "Пожарная и промышленная безопасность"
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2002

Работа выполнена на кафедре "Машины и аппараты химических производств" Уфимского государственного нефтяного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузеев И.Р.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Шарафиев Р.Г.

кандидат технических наук, профессор
Гафаров Р.Х.

Ведущая организация: Башкирский научно-исследовательский
институт нефтяного машиностроения
("БашНИИнефтемаш")

Защита диссертации состоится "___" _____ 2002 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 в Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан "___" апреля 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

И.Г. Ибрагимов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы вопросам обеспечения промышленной безопасности уделяется повышенное внимание. Только за последние двадцать лет произошло 150 крупных аварий и прослеживается отчетливая тенденция роста их числа в силу ряда причин (значительная изношенность оборудования, человеческий фактор и др.). Аппараты колонного типа являются основным технологическим оборудованием установок нефтеперерабатывающих заводов, которое работает при высоких температурах и давлениях, а также содержит значительное количество углеводородного сырья. В таких условиях нарушение требований промышленной безопасности зачастую является причиной аварий, связанных с неконтролируемыми взрывами, которые приводят к колоссальным материальным потерям, человеческим жертвам и наносят экологический вред окружающей среде. Аппараты колонного типа имеют значительную высоту и расположены, как правило, на открытых технологических площадках. В случае потери устойчивости или прочности таких объектов создается угроза повторных взрывов, что может повлечь цепное развитие аварии. Проблеме оценки последствий аварий, связанных с взрывами парогазовоздушных облаков, посвящены исследования зарубежных и отечественных авторов. Однако, при относительно высокой степени изученности рассматриваемой проблемы, остаются слабо освещенными и решенными вопросы, относящиеся к практическому расчету последствий аварий с учетом динамических факторов, влияющих на прочность и устойчивость конструкций под действием внешних взрывов. При сложившейся ситуации в нефтеперерабатывающей и нефтехимической отрасли существует потребность в создании новых и усовершенствовании существующих методов и способов оценки опасности промышленных объектов, содержащих взрывопожароопасные вещества, с последующей разработкой мероприятий, позволяющих повысить уровень безопасности. Эти вопросы, весьма актуальные для взрывоопасных производств, рассматриваются в работе на примере аппаратов колонного типа - основного технологического оборудования НПЗ.

Цель работы. Оценка прочности и устойчивости аппаратов колонного типа от действия внешнего взрыва с учетом дополнительных динамических факторов: расположения эпицентра внешнего взрыва по высоте колонны, аэродинамической неустойчивости колонных аппаратов, а также возможного наличия трещин.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать статистическую информацию о взрывоопасности технологических установок нефтеперерабатывающих заводов;
- провести анализ известных методов по оценке воздействия взрыва на промышленные объекты;
- оценить опасность резонансных явлений при действии взрывной волны на аппарат колонного типа;
- выявить влияние высоты расположения эпицентра взрыва на уровень поражения колонных аппаратов;
- исследовать влияние наличия трещин в аппарате колонного типа на характер взаимодействия с взрывной волной.

Научная новизна

1 Получены коэффициенты динамического усиления нагрузки K_d , действующей при взрыве на аппараты колонного типа, от параметров взрывной волны (избыточного давления на фронте ударной волны - Δp , импульса – i) с учетом высоты расположения эпицентра взрыва h относительно колонны. Для рассмотренных колонных аппаратов величина K_d находится в диапазоне 1,04...22,28.

2 Установлена зависимость величины ударной нагрузки от высоты расположения эпицентра взрыва относительно колонного аппарата. Выявлено, что максимальные нагрузки на аппарат возникают при взрыве, центр которого расположен у основания колонны.

3 Выявлена область значений импульса ударной волны ($i = 10...500$ Па·с), в которой максимальный прогиб от действия взрыва находится в резонансе.

нансной области. Построена резонансная кривая, позволяющая определить значение импульса для любого колонного аппарата, при котором наиболее вероятно возникновение резонанса.

4 Предлагается параметр b , который учитывает геометрические параметры, массу и свойства материала аппарата при расчете на аэродинамическую неустойчивость в случае ударно – волнового резонанса. Для реальных колонных аппаратов величина b находится в пределах $0,01...0,9$. Причем наиболее опасными с точки зрения потери прочности и устойчивости в случае наступления резонанса являются аппараты с параметром $b = 0,03...0,3$.

Практическая ценность

Полученные результаты важны для более глубокого понимания процессов взаимодействия аппаратов колонного типа с ударной волной.

Получены коэффициенты K_R для определения зон разрушения. Радиусы зон разрушения, рассчитанные по этим коэффициентам, соответствуют значениям избыточных давлений, принятым в нормативной документации.

Уточнена методика определения критической длины и глубины трещины для случая взаимодействия колонного аппарата с взрывной волной, которая позволяет прогнозировать развитие трещинообразного дефекта в случае воздействия на аппарат внешнего взрыва.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на V Международной научной конференции "Методы кибернетики химико-технологических процессов" (г. Уфа, 1999 г.); 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, УГНТУ, 1999 г.); III республиканском конкурсе научных работ студентов вузов Республики Башкортостан "Безопасность жизнедеятельности" (г. Уфа, 2000 г.); межрегиональной научно-методической конференции "Проблемы нефтегазовой отрасли" (г. Уфа, 2000 г.); 52-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, УГНТУ, 2001 г.); III Конгрессе нефтегазопромышленников России (г. Уфа, 2001 г.); республиканской научно-технической конференции "Технологические проблемы развития машиностроения в Башкортостане" (г. Уфа, 2001 г.); III Всероссийской научно – практической конференции "Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций" (г. Уфа, 2002 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликована 1 статья в научно-техническом журнале, 1 статья в научно-техническом Internet-журнале и 10 тезисов докладов научно-технических конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, содержит 122 страницы машинописного текста, в том числе 28 рисунков, 11 таблиц, список использованных источников из 130 наименований, 2 приложения.

Основное содержание работы

В первой главе на основе анализа статистической информации об авариях, связанных с взрывами на промышленных объектах нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий, показана опасность аппаратов колонного типа как элемента технологической системы. 34% взрывов происходит на открытых технологических площадках, причем в таких условиях создаются более тяжелые последствия взрывов, чем в закрытых объемах производственных зданий. Аппараты колонного типа являются основным технологическим оборудованием процессов нефтепереработки, имеют значительные геометрические размеры и внутренний объем и содержат большие массы взрывопожароопасных углеводородных веществ, поэтому потеря прочности и устойчивости при действии взрыва может вызвать тяжелые последствия и повлечь за собой цепное развитие аварии, так называемый эффект "домино".

Выявлено, что в ходе технологических процессов на нефтеперерабатывающих предприятиях перерабатываются, хранятся и транспортируются легко воспламеняющиеся и горючие жидкости и газы, которые обладают различными физико-химическими свойствами и являются взрывопожароопасными веществами. При их истечении существует опасность образования взрывоопасных парогазовых облаков. Парогазовые облака на нефтеперерабатывающих заводах могут образовываться двумя различными путями: в результате почти мгновенного выброса при полном разрушении сосуда и при достаточно длительном истечении (например, в случае разгерметизации аппарата или его узла), когда вещество в течение определенного промежутка времени выбрасывается и испаряется. Форму облака, которое образуется газовойдушной смесью и, как правило,

загорается с края, можно упрощенно представить как диск или тороид. В случае появления источника воспламенения парогазовоздушные облака взрываются с образованием ударных волн большой разрушительной силы, вызывающих дробление и деформации объектов.

В этой главе приведена классификация взрывных процессов по основным критериям. Наибольшее количество описанных крупномасштабных взрывов различных сред относится к наземным взрывам тяжелых углеводородов. Существуют различные модели взрывных явлений, определяемые физико – химическими свойствами источников взрыва: взрыв конденсированных взрывчатых веществ (ВВ); взрыв сжатых газов; взрыв перегретых жидкостей; взрыв парогазовых смесей; взрыв пылевоздушных смесей и аэрозолей.

Разрушающая степень взрыва характеризуется количеством пролитого горючего вещества. Для горючих веществ (кроме H_2 , CO , CH_4 и C_2H_4) разрушения при взрыве наблюдаются лишь при утечке энергоносителя в количестве, превышающем 2000 кг.

Во второй главе рассматриваются основные параметры и свойства ударных волн при внешних взрывах, которые необходимо учитывать при оценке их воздействия на оборудование технологических установок.

Определяя нагрузки, действующие на объекты при прохождении ударной волны, следует иметь в виду следующие свойства ударных волн, описанные в литературе: скорость распространения ударных волн всегда больше скорости звука в невозмущенной среде; на фронте ударной волны параметры состояния и движения среды изменяются скачком; ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения; скорость ударной волны зависит от ее интенсивности; ударная волна не имеет периодического характера, а распространяется в виде одиночного скачка уплотнения; при встрече проходящей волны с объектом ограниченных размеров происходит отражение и дифракция ударных волн; при прохождении воздушной взрывной волны в грунте образуются ударные волны, которые взаимодействуют с объектом.

При решении конкретных прикладных задач к основным параметрам, характеризующим разрушающую способность взрывной волны, относят избыточное давление Δp , и удельный импульс взрыва i :

$$\Delta p = 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{r} + 430 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt[3]{W^2}}{r^2} + 1400 \cdot 10^3 \cdot \frac{W}{r^3}, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра облака до точки измерения, м;

W – масса тротила, энергия которого равна энергии взрывающейся газовой смеси, кг;

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{W^2}}{r}. \quad (2)$$

Законы изменения нагрузок во времени, при решении прикладных задач, заменяют упрощенными – расчетными.

Глава также посвящена обзору основных принципов существующих в настоящее время в официальной нормативной документации методик, используемых для оценки последствий воздействия взрывных явлений на промышленные объекты и работающий персонал:

1) методика оценки последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах и экспресс - методика прогнозирования последствий взрывных явлений на промышленных объектах, которые позволяют определить степень разрушения зданий и сооружений промышленной и селитебной зоны и возможное количество людей, которые могут пострадать в зависимости от режима превращения топливовоздушной смеси от действия ударной и тепловой волн;

2) методика ориентировочного расчета зон разрушения и возможного травмирования персонала в случае аварии, позволяющая рассчитать радиусы зон различной степени разрушений (при аварийных взрывах зона поражения рассматривается как круг) и возможного травмирования персонала;

3) общие принципы количественной оценки взрывоопасности технологических объектов (стадий, блоков) совместно с методикой расчета участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушений, которые позволяют определить уровень взрывоопасности технологических объектов на основании

энергетических показателей технологической системы и определить границы зон разрушений различной степени тяжести.

Известные методы и приемы по динамическому расчету сооружений и конструкций на взрывные воздействия позволяют по параметрам ударных волн определять напряжения, деформации и прогибы в элементах конструкций, чтобы определить степень повреждения. Существуют упрощенные и численные методы расчета элементов конструкций на действие взрывной волны, которые используются для обеспечения безопасности людей в сейсмических районах, в добывающей и военной промышленности, а также в гражданской обороне. Однако известными методами не в полном объеме получены решения для оценки прочности и устойчивости конструкций, аналогичных технологическому оборудованию нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий.

При решении задачи о прочности и устойчивости аппаратов колонного типа при действии внешних взрывных нагрузок предлагается воспользоваться стандартным методом расчета, дополненным расчетной ударной нагрузкой, определяемой с использованием упрощенных методов расчета конструкций на взрывные воздействия. Ударные волны действуют на конструкции и сооружения как кратковременные динамические нагрузки, причем в большинстве случаев они являются аварийными. Поэтому для выяснения уровня повреждения объекта наибольший интерес представляют максимальные напряжения и деформации при взрывном воздействии, поэтому учет динамики деформируемого состояния в подобных расчетах, как правило, не производится.

В расчетах аппараты колонного типа обычно принимают как вертикальный консольный стержень постоянного (или переменного) сечения, упруго заземленный у основания. Целесообразно рассматривать колонный аппарат как упругую систему (по аналогии на действие ветровой и сейсмической нагрузки). Для упрощения вычислений в работе рассматриваются колонные аппараты постоянного по высоте сечения.

В качестве модели взрыва рассматривается случайный наземный взрыв неограниченного парогазового облака в воздушной среде (атмосфере) при нор-

мальных условиях с плоским прямым фронтом ударной волны.

В приведенной ниже методике используются упрощенные аналитические методы и характер изменения нагрузки по высоте конструкции принимается равномерно распределенным.

Расчетную распределенную нагрузку, создаваемую ударной волной при обтекании, действующую на колонный аппарат в целом или на его участок высотой $((H - y), \text{ м})$, при внешнем взрыве определяют из выражения

$$P_{\text{уд}} = C_D \cdot \frac{\pi}{2} \cdot Q \cdot D_n \cdot K_d \cdot (H - y), \quad (3)$$

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

Q – динамический (скоростной) напор ударной волны, Па, рассчитываемый в зависимости от Δp ;

D_n – наружный диаметр колонны, м;

K_d – коэффициент динамического усиления;

H – высота колонны, м;

y – высота произвольного расчетного сечения, м.

Коэффициент динамического усиления упругой системы

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

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

E – модуль упругости материала аппарата, Па;

J – момент инерции аппарата относительно центральной оси, м^4 ;

m – общая масса аппарата при рабочих условиях, кг.

Далее по известной формуле рассчитывается изгибающий момент от ударной волны в любом из опасных сечений и по стандартной методике проводится проверочный расчет на прочность и устойчивость колонных аппаратов.

Третья глава посвящена оценке прочности и устойчивости аппаратов

колонного типа при внешнем взрыве с учетом дополнительных динамических воздействий.

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

Предлагается рассматривать взрывную нагрузку как сосредоточенную и приложенную в определенном месте конструкции. Такая схема возникает на практике при разгерметизации отдельных узлов колонного аппарата с выбросом в атмосферу значительных количеств углеводородного сырья или нефтепродуктов с последующим образованием неограниченного парогазового облака и его взрывом в воздушной среде вблизи аппарата (в атмосфере при нормальных условиях с плоским прямым фронтом ударной волны).

Рассмотрены 10 различных схем нагружения колонных аппаратов ударной нагрузкой от внешнего взрыва (рисунок 1).

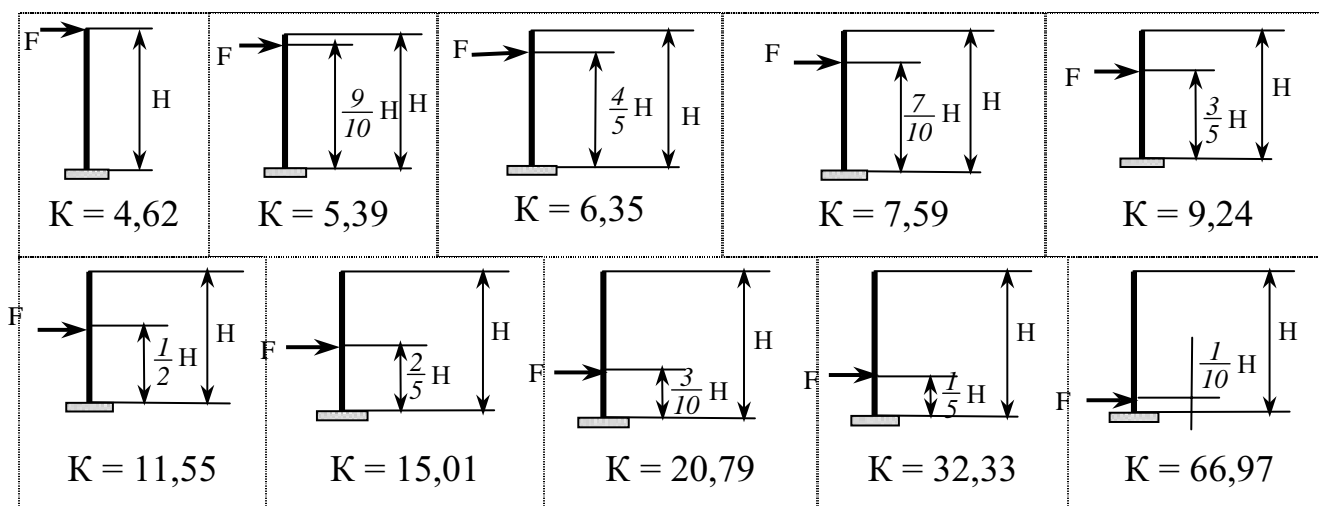


Рисунок 1 – Схема нагружения колонных аппаратов ударной нагрузкой

В общем виде формулу для определения нагрузки, создаваемой ударной волной на колонный аппарат в целом при внешнем взрыве, можно представить следующим образом:

$$P_{\text{уд}} = C_D \cdot F \cdot \left(1 + \frac{K \cdot i}{\Delta p_{\text{обт}}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m \cdot H^3}} \right), \quad (5)$$

где F – сосредоточенная нагрузка, приложенная в определенном месте конструкции, Н;

K – коэффициент, определяемый схемой нагружения (см. выше).

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

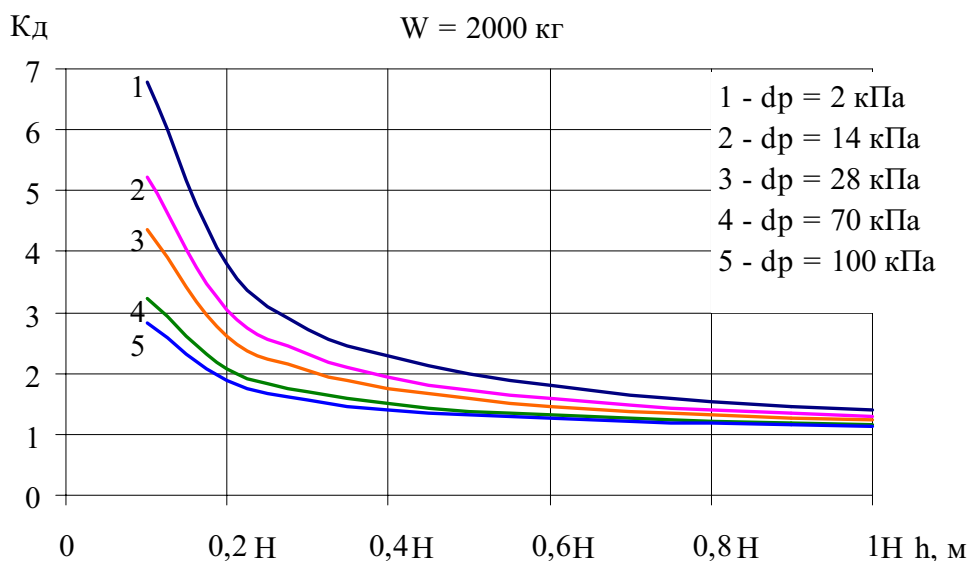


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента динамичности от расстояния до места взрыва по высоте колонны для различных значений избыточных давлений

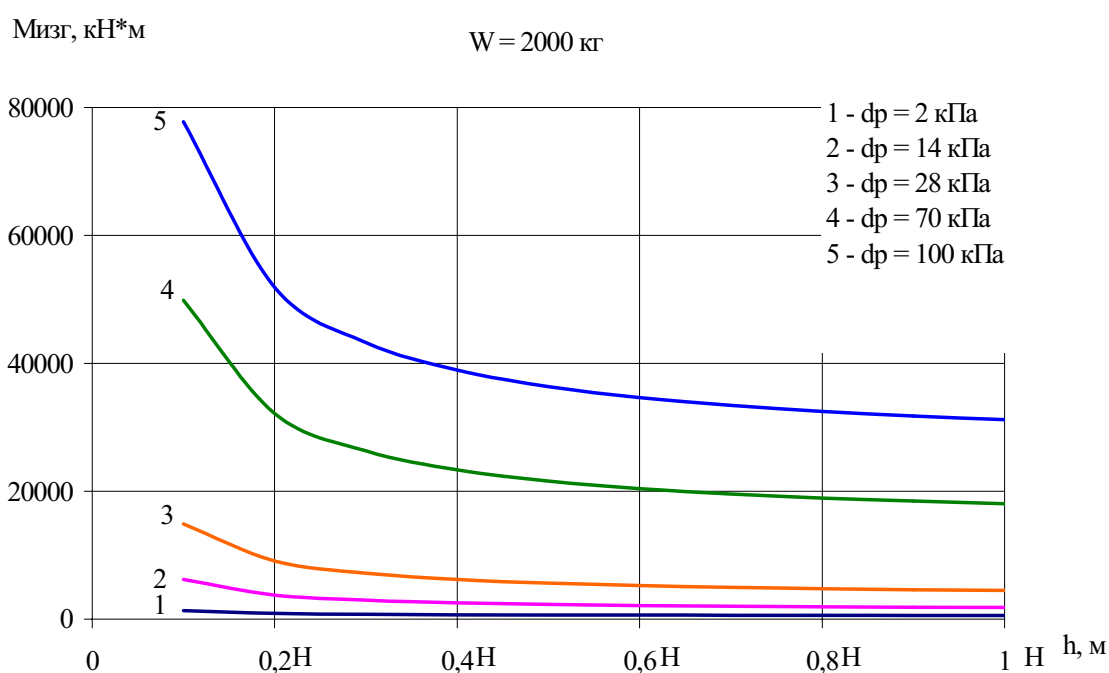


Рисунок 3 – Зависимость величины изгибающего момента от расстояния до центра взрыва по высоте колонного аппарата для различных зон разрушений

Расчеты проводились для 23 аппаратов, имеющих различные параметры конструкции (геометрические характеристики, масса, материал). Для вычислений использовался программный продукт Microsoft Excel for Windows 2000. Оценивались расчетные нагрузки, которые действуют на аппараты колонного типа при внешних взрывах от источника различной массы и на различных расстояниях от него. Рисунок 3 иллюстрирует графическую зависимость величины максимального изгибающего момента, возникающего в нижнем опасном сечении колонного аппарата, от расстояния до центра взрыва по высоте колонны для различных зон разрушения при заданных параметрах взрыва.

Анализируя полученные результаты численного моделирования для данного колонного аппарата при заданных условиях внешнего взрыва, можно предположить, что в зоне расстекления колонный аппарат под действием взрыва не потеряет прочность и устойчивость; в зоне слабых разрушений, если центр внешнего взрыва будет находиться в нижней половине (по высоте) колонны, произойдет лишь потеря прочности анкерных болтов. В зоне средних разрушений произойдет потеря прочности анкерных болтов и потеря устойчивости опорной обечайки; в зоне сильных разрушений при нахождении центра взрыва ниже четверти высоты колонны, помимо потери прочности анкерных болтов, потери устойчивости опорной обечайки, произойдет потеря прочности и устойчивости формы аппарата, а в зоне полных разрушений при взрывном воздействии произойдет потеря прочности анкерных болтов, потеря устойчивости опорной обечайки, потеря прочности и устойчивости формы аппарата, а если взрыв произойдет в нижней четверти колонны, то и условие прочности сварного шва будет нарушено.

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальная нагрузка на аппарат создается в случае наземного взрыва, когда центр взрыва находится у основания колонны.

В практике эксплуатации высоких сооружений и гибких конструкций известны случаи, когда системы обнаруживают в условиях естественного ветра

склонность к раскачиванию поперек потока. При действии ударной нагрузки это явление может усиливаться и привести к резонансу. Поскольку ударная волна не имеет периодического характера и распространяется как единый скачок уплотнения, колебания, возникающие после прохождения ударной волны, можно рассматривать как свободные затухающие колебания. Из литературы известно, что в зоне избыточных давлений ($\Delta p = 2 \dots 28$ кПа) при незначительных массах взрывающегося вещества ($W = 2 \dots 10$ тонн) может иметь место явление резонанса ($x_0 = x_{0\text{рез}}$).

В зоне небольших избыточных давлений влияющим параметром ударной волны является импульс (режим квазистатического нагружения). И для изучения опасности резонансных явлений необходимо выявить граничные значения импульса, при которых возможен резонанс, а также влияние характеристик самого аппарата (геометрических параметров, массы, материала).

Предлагается применять параметр b , который описывает геометрические характеристики аппарата, а также учитывает массу и свойства материала колонны:

$$b = \frac{l}{D_n^2} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot H^3}{E \cdot J}}. \quad (6)$$

Для реальных колонных аппаратов величина параметра b находится в пределах $0,01 \dots 0,9$.

Для оценки опасности резонансных явлений при действии взрывной волны на аппараты колонного типа проведены исследования, которые заключались в сравнении x_0 и $x_{0\text{рез}}$ в областях различных импульсов при взрывах зарядов различных масс. В результате расчетов выявлена область значений импульсов ($i = 10 \dots 500$ Па·с), при которых максимальный прогиб от действия взрыва находится в резонансной области, и построена резонансная кривая (рисунок 4), позволяющая определить значение импульса, при котором наиболее вероятно возникновение резонанса для конкретного колонного аппарата.

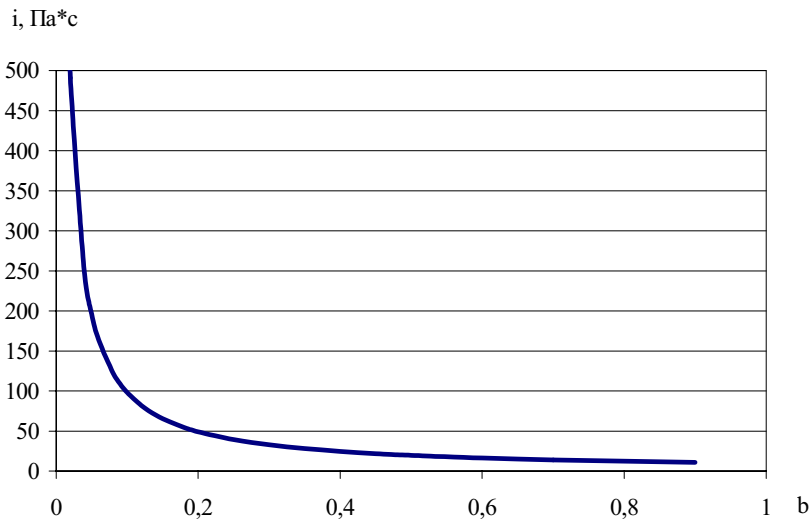


Рисунок 4 – Резонансная кривая $x_0 = x_{0 \text{ рез}}$ для различных колонных аппаратов

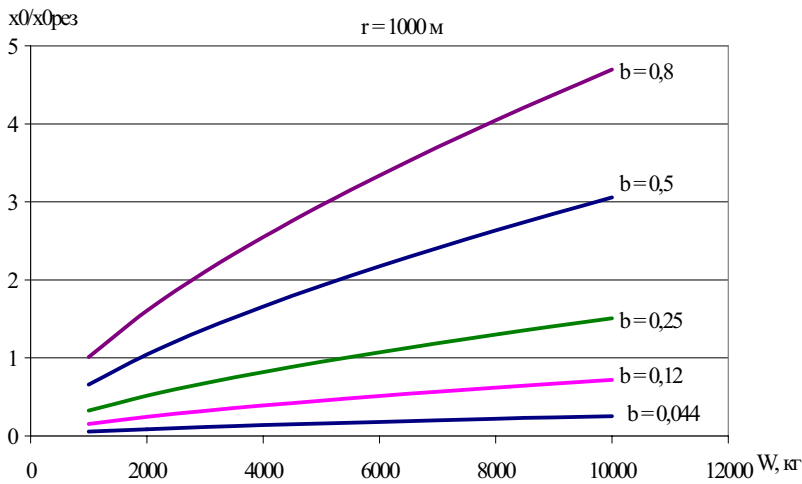


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебаний от массы заряда для различных колонных аппаратов

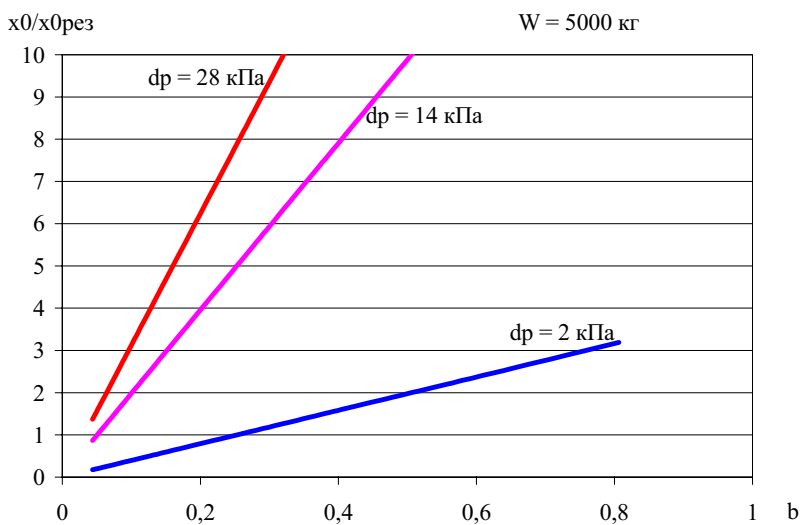


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды колебаний от параметров колонных аппаратов

На рисунках 5 и 6 приведены графики, характеризующие зависимости амплитуды колебаний от массы заряда и параметров аппарата при различных параметрах взрыва.

Анализируя данные таблицы 1, можно сделать заключение, что для колонных аппаратов с параметрами $b = 0,01 \dots 0,02$ наступление резонанса маловероятно; для аппаратов $b = 0,5 \dots 0,9$ наступление резонанса, с точки зрения прочности и устойчивости аппарата, является безопасным, т.к. в данном случае на аппарат действует незначительная ударная нагрузка. Поэтому наиболее опасными с точки зрения потери прочности и устойчивости в случае наступления резонанса являются аппараты с параметром $b = 0,03 \dots 0,3$.

Таблица 1 - Характеристики колонного аппарата и возможность явления ударно – волнового резонанса

Параметр b	Импульс, Па·с	Возможность явления резонанса
0,01...0,02	400...500	явление резонанса маловероятно
0,03...0,04	200...400	явление резонанса может произойти при взрыве заряда массой до 10000 кг на расстоянии до 195 м при избыточном давлении до 28 кПа
0,05...0,09	100...200	явление резонанса может произойти при взрыве заряда массой до 6000 кг на расстоянии до 300 м при избыточном давлении до 14 кПа
0,1...0,2	40...100	явление резонанса может произойти при взрыве заряда массой до 6000 кг на расстоянии до 1000 м при избыточном давлении до 14 кПа
0,3...0,4	20...40	явление резонанса может произойти при взрыве заряда массой от 1000 до 10000 кг на расстоянии от 540 до 2245 м при избыточном давлении до 2 кПа
0,5...0,9	10...20	явление резонанса может произойти при взрыве заряда массой до 5000 кг на расстоянии до 1785 м при избыточном давлении до 2 кПа

Как показали проведенные автором исследования, вычисленные значения радиуса зон разрушения по формулам (7) и (8) при известных коэффициентах K_R не соответствуют принятым зонам разрушения, определяемым избыточными давлениями.

$$R = K_R \cdot \sqrt[3]{W} \quad \text{при } m > 5000 \text{ кг}, \quad (7)$$

или

$$R = K_R \cdot \frac{\sqrt[3]{W}}{\sqrt[6]{1 + \left(\frac{3180}{W}\right)^2}} \quad \text{при } m \leq 5000 \text{ кг}, \quad (8)$$

где R – расстояние от предполагаемого центра взрыва до объекта, м;

K_R – коэффициент, соответствующий уровню воздействия взрыва на объект, м/кг^{1/3};

W – тротильный эквивалент взрыва, кг;

m – приведенная масса парогазовой среды, участвующей во взрыве, кг.

Для устранения несоответствия были проведены расчеты, которые позволили вычислить значения коэффициентов K_R (таблица 2), соответствующие

радиусам разрушений при известных значениях граничных избыточных давлений при $m > 5000$ кг.

Таблица 2 - Значения избыточных давлений и соответствующие им значения коэффициента K_R по зонам разрушения

Параметры	Зоны разрушения				
	расстекление	слабое	среднее	сильное	полное
Δp , кПа	≤ 2	14	28	70	≥ 100
K_R , м/кг ^{1/3}	54,2	10,8	6,9	4,1	3,4

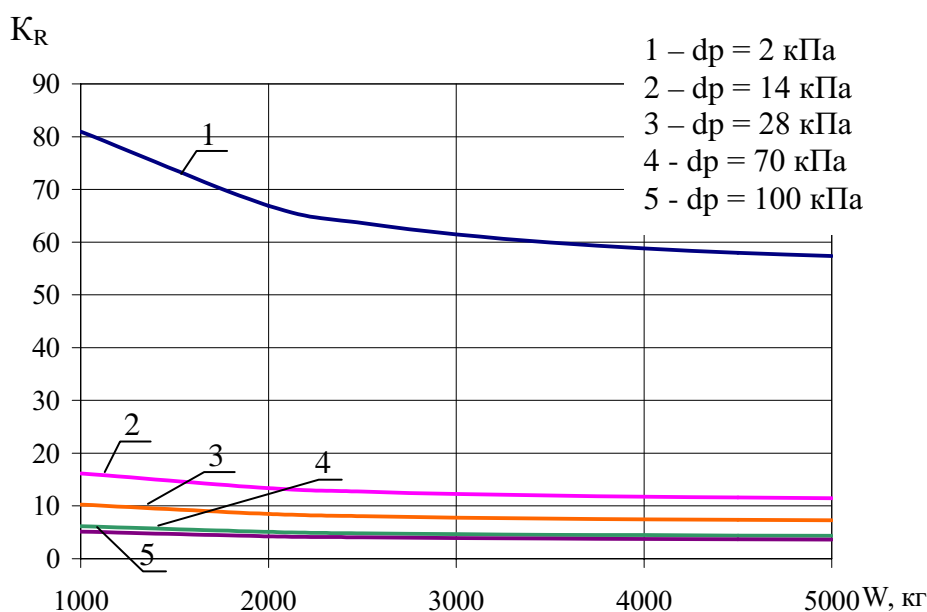


Рисунок 7 – Зависимость коэффициентов K_R от тротилового эквивалента

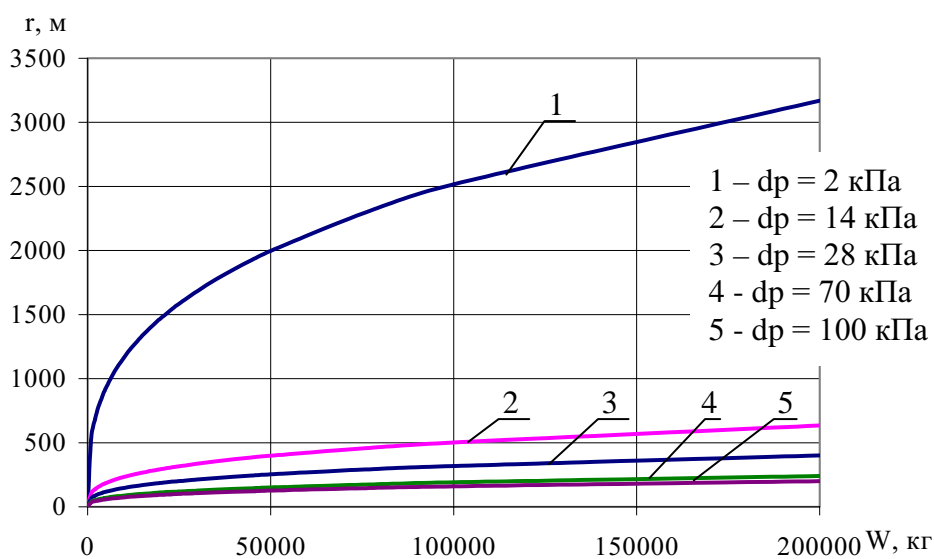


Рисунок 8 – Зависимость радиусов разрушения от тротилового эквивалента

Коэффициенты K_R при $m \leq 5000$ кг имеют сложную зависимость от избыточного давления на фронте ударной волны и представлены графически на рисунке 7.

Рисунок 8 позволяет достаточно точно рассчитать радиусы зон разрушения и определить степень разрушения оборудования и сооружений в зависимости от массы взрывающегося вещества. Для проверки данной методики проводилось срав-

нение результатов расчета с данными по реальным авариям.

Рассмотренная методика позволяет разработать рекомендации по расположению опасных технологических объектов.

При оценке прочности колонных аппаратов необходимо учесть имеющиеся в конструкции трещины и оценить их влияние на прочность.

Любой материал, какой бы предварительной технологической обработке он ни подвергался, всегда обладает какими-либо несовершенствами. Колонные аппараты изготавливаются сопряжением различных оболочек термической сваркой. При этом анализ работы аппаратов позволяет выявить преимущественные места возникновения дефектов: 1) сварные швы или участки, прилегающие к местам сварки; 2) различные места концентрации напряжений, обусловленные формой элемента; 3) различные местные повреждения (трещины, царапины, вмятины, подрезы и т.п.), появившиеся при изготовлении отдельных элементов или при недоброкачественной обработке. Эти дефекты являются очагами, вблизи которых начинаются разрушения.

В процессе эксплуатации колонных аппаратов в условиях статических и малоцикловых нагрузок происходит эволюция дислокационной структуры: образуются разрозненные дислокационные скопления, устойчивые полосы скольжения, ячеистая и фрагментированная (кристаллит разбит на микрообласти, разориентированные на углы порядка нескольких градусов) структуры. При этом изменяются и физико-механические свойства: предел текучести, прочность, пластичность, коэффициенты упругости, трения, магнитные, электрические и тепловые свойства, а также скорость распространения упругих волн. Обнаружено, что образование фрагментированной структуры с "ножевыми" границами зерен приводит к появлению хрупкого излома при ударном разрушении. Количественный анализ поверхности разрушения показал, что доля хрупкой составляющей равна 20 – 30%.

Очевидно, что, рассматривая воздействие ударной волны на оборудование при взрыве, для оценки прочности необходимо учитывать состояние структуры металла.

Таблица 3 - Механические свойства стали БСтЗсп с различной дислокационной структурой после испытаний на ударный изгиб

Структура стали	Исходная $\rho = 2 \cdot 10^9 - 8 \cdot 10^{10}, \text{ см}^{-2}$	Ячеистая	Фрагментированная с "ножевыми" границами
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	268	250	298
Предел прочности σ_B , МПа	430	450	560
Максимальное относительное удлинение $\delta, \%$	26	24	18
Ударная вязкость KCV, Дж/см ²	185	157	78
Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , МПа· м ^{1/2}	41,5	38,7	33,4

Хрупкое разрушение может начинаться в изолированных областях локального охрупчивания – твердых включениях, прижогах, хрупких сварных швах и т.д., трещиностойкость которых ниже, чем у основного материала.

Критические размеры трещины определяет критерий хрупкого разрушения K_{Ic} :

$$\text{критическая длина трещины} \quad \ell_{кр}^{\partial} = \frac{2 \cdot K_{Ic}^2}{\pi \cdot \sigma^2}; \quad (9)$$

$$\text{критическая глубина} \quad \ell_{кр}^z = \left(\frac{K_{Ic}}{1,22 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi}} \right)^2, \quad (10)$$

где K_{Ic} – коэффициент интенсивности напряжений, МПа*м^{1/2};

σ - напряжения от максимальной нагрузки на аппарат от действия внешнего взрыва, МПа.

Напряжения от максимальной нагрузки на аппарат

$$\sigma = \text{MAX} \{ \sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{E_1}, \sigma_{E_2} \}, \quad (11)$$

где σ_{x_1} – меридиональные напряжения со стороны взрыва (по аналогии с ветровой нагрузкой), Па;

σ_{x_2} – меридиональные напряжения с противоположной от взрыва стороны колонны, Па;

σ_{E_1} – эквивалентные напряжения со стороны взрыва, Па;

σ_{E_2} – эквивалентные напряжения с противоположной от взрыва стороны, Па.

Меридиональные напряжения определяются по формулам

$$\sigma_{x_1} = \frac{P_r \cdot (D_6 - S)}{4 \cdot (S - c)} - \frac{G_1 + G_2}{\pi \cdot D_6 \cdot (S - c)} + \frac{4 \cdot \sum M_{z-z}}{\pi \cdot D_6^2 \cdot (S - c)}, \quad (12)$$

$$\sigma_{x_2} = \frac{P_r \cdot (D_6 - S)}{4 \cdot (S - c)} - \frac{G_1 + G_2}{\pi \cdot D_6 \cdot (S - c)} - \frac{4 \cdot \sum M_{z-z}}{\pi \cdot D_6^2 \cdot (S - c)}, \quad (13)$$

где P_r – расчетное давление в аппарате, Па;

D_6 – внутренний диаметр аппарата, м;

S – толщина стенки аппарата, м;

c – прибавка к толщине стенки, м;

G_1 и G_2 – соответственно вес первого и второго участков колонны при рабочих условиях, Н;

$\sum M_{z-z}$ – изгибающий момент от совместного действия ветровой и ударной нагрузки в расчетном сечении $z - z$ (место приварки корпуса аппарата к опоре), Н*м.

Эквивалентные напряжения равны

$$\sigma_{E_1} = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 - \sigma_{x_1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_{E_2} = \sqrt{\sigma_{x_2}^2 - \sigma_{x_2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2}, \quad (15)$$

где σ_y – тангенциальные напряжения (только от внутреннего давления в аппарате), Па,

$$\sigma_y = \frac{P_r \cdot (D_6 - S)}{2 \cdot (S - c)}. \quad (16)$$

Результаты расчетов представлены графически на рисунках 9 и 10.

Из проведенных расчетов видно, что наличие в конструкциях даже незначительных трещин в случае воздействия на них взрывной нагрузки способно привести к их росту и в конечном итоге - к потере прочности аппарата.

Для оценки достоверности проделанных исследований рассмотрены несколько примеров воздействия взрывов на промышленные объекты при реальных авариях, которые показали удовлетворительную сходимость результатов, полученных расчетным путем и на основе экспертного анализа аварий.

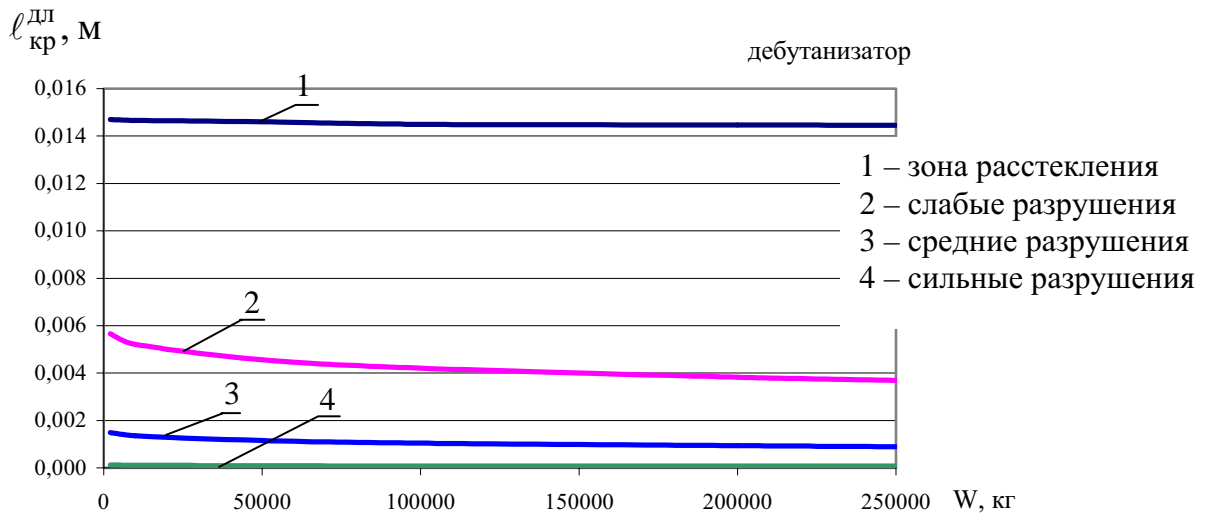


Рисунок 9 – График зависимости критической длины трещины от тротилового эквивалента внешнего взрыва

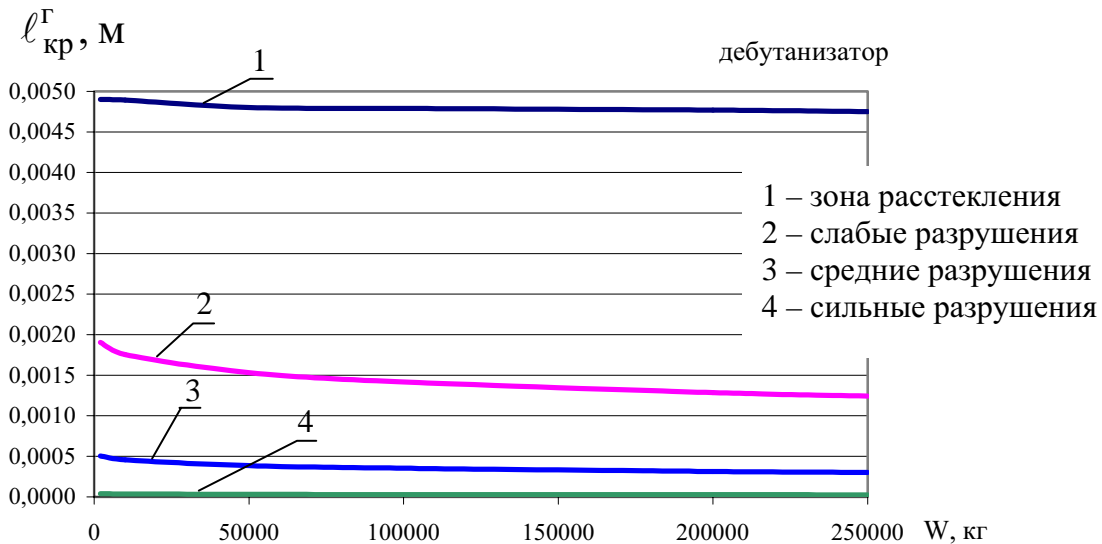


Рисунок 10 – График зависимости критической глубины трещины от тротилового эквивалента внешнего взрыва

Общие выводы

1 Проведена оценка прочности и устойчивости аппаратов колонного типа при действии внешнего взрыва с учетом дополнительных динамических факторов: расположения эпицентра взрыва относительно колонны; аэродинамической неустойчивости; возможного наличия трещин. Определено, что нарушение прочностных свойств и потеря устойчивости аппаратов колонного типа происходит в областях с большими значениями избыточного давления (порядка 70 кПа и выше), что согласуется с результатами расследований аварий, где наблюдались поражения аппаратов колонного типа различной степени.

2 Предложен метод, позволяющий определить расчетную нагрузку, действующую на аппарат колонного типа при внешнем взрыве, с учетом высоты расположения эпицентра взрыва относительно колонного аппарата, подобранный в результате анализа известных методов по оценке воздействия взрыва на промышленные объекты. Получены коэффициенты динамического усиления нагрузки K_d , действующей при взрыве на аппараты колонного типа, от параметров взрывной волны (избыточного давления на фронте ударной волны - Δp , импульса - i) с учетом высоты расположения эпицентра взрыва h относительно колонны; для рассмотренных колонных аппаратов величина K_d находится в диапазоне 1,04...22,28. Установлена зависимость величины ударной нагрузки от высоты расположения эпицентра взрыва относительно колонного аппарата и выявлено, что максимальные нагрузки на аппарат возникают при взрыве, центр которого расположен у основания колонны, что согласуется с проведенным анализом статистической информации о взрывоопасности технологических установок НПЗ.

3 Предложен параметр b , который учитывает геометрические параметры, массу и свойства материала аппарата при расчете на аэродинамическую неустойчивость в случае ударно – волнового резонанса; для реальных колонн величина b находится в пределах 0,01...0,9. Выявлена область значений импульса ($i = 10...500 \text{ Па} \cdot \text{с}$), в которой максимальный прогиб от действия взрыва находится в резонансной области; причем наиболее опасными с точки зрения потери прочности и устойчивости в случае наступления резонанса являются колонные аппараты с параметром $b = 0,03...0,3$.

4 Получены коэффициенты K_R для определения зон разрушения. Радиусы зон разрушения, рассчитанные по этим коэффициентам, соответствуют значениям избыточных давлений, принятым в нормативной документации.

5 Уточнена методика определения критической длины и глубины трещины для случая взаимодействия колонного аппарата с взрывной волной, которая позволяет прогнозировать развитие трещинообразного дефекта в случае воздействия на аппарат внешнего взрыва.

Список опубликованных работ

- 1 Стороженко Ю.В., Хуснияров М.Х., Иляева М.А. Характеристики взрывоопасного парогазового облака // Методы кибернетики химико - технологических процессов (КХТП-V-99): Тез. докл. V Междунар. науч. конф. - Уфа, 1999. – Т. 2. – Кн. II. - С. 49-50.
- 2 Иляева М.А., Хуснияров М.Х. Характеристики парогазового облака при свободном проливе нефтепродуктов // Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 66-67.
- 3 Иляева М.А., Шевердин А.В. Расчет зоны взрывоопасных концентраций для нефтепродуктов // Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 68.
- 4 Иляева М.А. Устойчивость нефтезаводского оборудования под действием ударной волны // Тезисы докладов III республиканского конкурса научных работ студентов вузов Республики Башкортостан "Безопасность жизнедеятельности". - Уфа, 2000. – С. 12-14.
- 5 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Определение безопасного расстояния от места взрыва // Тезисы докладов межрегиональной научно-методической конференции "Проблемы нефтегазовой отрасли". - Уфа, 2000. – С. 26-28.
- 6 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Аэродинамическая неустойчивость колонных аппаратов под действием внешнего взрыва // Материалы 52-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 2001. – С. 46.
- 7 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Аэродинамическая неустойчивость колонных аппаратов под действием внешнего взрыва на НПЗ // Тезисы докладов III Конгресса нефтегазопромышленников России. - Уфа, 2001. – С. 306-308.
- 8 Иляева М.А. Расчет колонных аппаратов на прочность и устойчивость под действием ударной нагрузки с учетом высоты расположения эпицентра внешнего взрыва // Технологические проблемы развития машиностроения в

Башкортостане: Сб. науч. тр. – Уфа: Гилем, 2001. – С. 176–178 с.

- 9 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Определение ударной нагрузки на колонный аппарат с учетом высоты расположения эпицентра внешнего взрыва // Нефтегазовое дело. - №9 <http://www.ogbus.net/authors/Ilyaseva/ily1.pdf>. - 12 с.
- 10 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Аэродинамическая неустойчивость колонных аппаратов под действием внешнего взрыва на НПЗ // Нефть и газ. – 2002. - № 1. – С. 65-69.
- 11 Иляева М.А. Прогнозирование последствий наземного взрыва // Материалы III Всероссийской научно – практической конференции "Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций". – Уфа, 2002. – С. 55-57.
- 12 Иляева М.А., Кузеев И.Р. Оценка прочности колонных аппаратов под действием внешнего взрыва с учетом наличия трещин // Материалы III Всероссийской научно – практической конференции "Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций". – Уфа, 2002. – С. 164-166.

Соискатель

М.А. Иляева