

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

С. А. Швырков

Пожарный риск  
при квазимгновенном разрушении  
нефтяного резервуара

Монография

Утверждено редакционно-издательским советом  
Академии ГПС МЧС России

Москва  
2015

УДК 614.839  
ББК 38.96+35.514+30.6  
Ш 359

Рецензенты:

*Н. Н. Брушлинский*, профессор кафедры управления и экономики Академии ГПС МЧС России, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

*Ю. А. Поляков*, профессор кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России, доктор технических наук, профессор;

Ш 359      **Швырков С. А.**

Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара: монография / С. А. Швырков. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.

На основании анализа статистических данных квазимгновенных разрушений вертикальных стальных резервуаров (РВС) с нефтью и нефтепродуктами выявлена неспособность существующими нормативными преградами удерживать образующийся поток жидкости (волну прорыва), что неоднократно приводило к катастрофическим последствиям и всегда сопровождалось значительным материальным ущербом, а также обоснована необходимость рассмотрения волны прорыва в качестве опасного фактора аварии при оценке пожарного риска.

Предложена концепция оценки потенциального пожарного риска при разрушении РВС и его снижения за счет применения разработанной ограждающей стены с волноотражающим козырьком. Монография ориентирована на научных и практических работников пожарной охраны, проектных и экспертных организаций, преподавателей, адъюнктов и слушателей образовательных учреждений пожарно-технического профиля.

Издано в авторской редакции.

УДК 614.839  
ББК 38.96+35.514+30.6

© Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2015  
© Швырков С. А., 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Основной направленностью современных подходов к обеспечению пожарной безопасности, базирующихся на концепции «приемлемого риска», является снижение вероятности гибели людей. Это предполагает выполнение комплекса работ, связанных с анализом риска возможных аварий, при этом вопрос научной обоснованности и адекватности расчетных методик является одним из ключевых в обеспечении безопасности людей. Отсутствие или пренебрежение научными основами приводит, с одной стороны, к экономически неоправданным затратам на обеспечение пожарной безопасности, с другой – к серьезным упущениям в отношении реальной опасности аварийной ситуации на объекте [1–15].

Несмотря на повышенное внимание исследователей к данной проблеме и достаточно большое количество как отечественных (Н. Н. Брушлинский, О. М. Волков, В. П. Сучков, Ю. Н. Шебеко, И. А. Болодьян, Д. М. Гордиенко, А. Н. Елохин, В. С. Сафонов, Г. Э. Одишария, А. А. Швыряев, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин, В. И. Сидоров, В. И. Измалков, В. А. Акимов, А. М. Козлитин и др. [16–35]), так и зарубежных работ (Д. Химмельблау, Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото, В. Маршалл, *B. Alle, M. Morris, A. Miles, J. Cooper, A. Wolski, N. Dembsey, B. Meacham, J. Tixier, H. Beerens, J. Post et all.* [36–48]), посвященных анализу риска на объектах нефтегазового комплекса, некоторые важные с практической точки зрения закономерности, характеризующие пожарную опасность полного разрушения технологического оборудования, выявлены в научном плане недостаточно. И, как следствие, отсутствуют методы оценки опасных факторов, динамики развития и прогноза последствий аварийной ситуации, связанной с квазимгновенным разрушением вертикального стального резервуара с нефтью или нефтепродуктом (далее РВС или нефтяной резервуар).

Отличительными признаками такой аварии являются полная потеря целостности корпуса РВС и выход в течение короткого промежутка времени (не более 10–15 с) на прилегающую территорию всей хранящейся в резервуаре жидкости в виде мощного потока – волны прорыва. При этом волна характеризуется резкой нестационарностью, наличием фронта в виде бора (вала), движущегося со значительной скоростью и обладающего большой разрушительной силой [28, 49–56].

В этой связи следует отметить, что к основным сооружениям по ограничению аварийного разлива жидкостей в резервуарных парках на протяжении последних ста лет относятся земляные обвалования или ограждающие стены, расчет которых производится только на гидростатическое удержание пролитой жидкости [57].

Анализ последствий разрушений РВС, выполненный в настоящей работе, убедительно свидетельствует о том, что такие преграды не способны удержать поток, движущийся по законам гидродинамики, в результате чего подобные аварии неоднократно приводили к травмам и гибели людей, значительному материальному и экологическому ущербу [53–55, 58–61]. Так, например, в результате образования и воздействия горячей волны прорыва при разрушении РВС-4600 м<sup>3</sup> с нефтью на Уфимском НПЗ (Башкирия, 1953 г.) погибли 22 сотрудника пожарной охраны и 2 работника объекта. В результате образования горящего потока бензина при разрушении РВС-700 м<sup>3</sup> на «Каменской» нефтебазе (Ростовская область, 1961 г.) с выходом его за пределы объекта и распространением на жилой сектор погиб 41 человек. Вследствие воздействия волны при разрушении РВС-20000 м<sup>3</sup> с водой на Невинномысской ГРЭС (Ставропольский край, 1985 г.) полностью разрушено железобетонное ограждение мазутного хозяйства объекта, элементы которого, подхваченные потоком воды, повредили соседний резервуар с мазутом, который попал в р. Барсучки и р. Кубань, что привело к большому экологическому ущербу. При взрыва паров нефти в РВС-20000 м<sup>3</sup>, разрушения резервуара с образованием и воздействием горячей волны в резервуарном парке линейной производственно-диспетчерской станции «Конда» (Тюменская область, 2009 г.) погибли 3 и получили тяжелые травмы 4 сотрудника пожарной охраны, более 20 человек, в том числе из персонала станции, были контужены. Только прямой ущерб от аварии составил более 1,5 млрд руб. (прил. А).

Анализ дополнительных способов защиты от разлива жидкости в резервуарных парках в виде рвов, канав, амбаров и др., устраиваемых за основными сооружениями, показал, что на практике они не нашли широкого применения, что обусловлено, в первую очередь, необходимостью выделения для их обустройства значительной части производственной территории. В частности, сооружение таких преград для резервуарных парков в городских условиях является практически невыполнимой задачей. Такая же проблема возникает и при обеспечении безопасности морских терминалов, расположение которых сопряжено, как правило, с минимальными расстояниями до акваторий, а также особенностями грунтового покрытия (слабые и насыпные грунты) [241, 242].

В результате анализа нормативных документов по оценке пожарного риска на производственных объектах выявлено, что волна прорыва не рассматривается в качестве опасного фактора аварийной ситуации, при этом отсутствуют данные как по частоте разрушений РВС, так и по статистическим вероятностям реализации сценариев развития рассматриваемой аварийной ситуации. Кроме этого, не приводятся методы оценки формы площади

пролива жидкости при разрушении РВС, а также параметров воздействия волны прорыва на людей и противопожарные преграды, что не позволяет производить количественный анализ пожарного риска при квазимгновенном разрушении РВС [133, 135, 136, 284].

Таким образом, анализ состояния проблемы и уточнение понятийного аппарата позволили сформулировать общую концепцию работы: о развитии методологических основ оценки пожарного риска при квазимгновенном разрушении РВС, как одной из наиболее пожароопасных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), а также средств его снижения за счет разработки и применения ограждающей стены с волноотражающим козырьком, устойчивой к воздействию волны прорыва.

Цель представленных в монографии результатов исследований – развитие методов оценки и средств снижения пожарного риска при квазимгновенном разрушении нефтяного РВС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи, постановки и решения которых последовательно изложены в соответствующих главах монографии:

- выполнить анализ статистических данных разрушений РВС, на основании которого разработать логическое дерево событий с определением его частотных и вероятностных характеристик, установить коэффициенты разлития и параметры формы площади пролива жидкости, скорректировать метод определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением пожара пролива с учетом направления разрушения РВС;

- разработать математическую модель квазимгновенного разрушения РВС, на основании численного решения которой получить зависимости для определения параметров силового воздействия волны прорыва на человека и предложить метод определения условной вероятности поражения человека волной прорыва;

- произвести сравнение полученных зависимостей по определению площади пролива и параметров силового воздействия волны прорыва на человека с результатами натурного эксперимента при разрушении РВС;

- сформулировать принципы разработки ограждений РВС для полного удержания волны прорыва, на основании которых предложить вариант конструктивного исполнения преграды – ограждающую стену с волноотражающим козырьком;

- разработать экспериментальный стенд и методику проведения опытов по удержанию волны прорыва предложенной конструкцией преграды, сравнить полученные данные с результатами численного моделирования;

- разработать методы определения геометрических параметров ограждающей стены с волноотражающим козырьком и динамических нагрузок на ее конструктивные элементы от воздействия волны прорыва;

– предложить концепцию оценки потенциального пожарного риска и его снижения за счет применения ограждающей стены с волноотражающим козырьком при квазимгновенном разрушении РВС.

Объектом исследования являлись гидродинамические процессы, характеризующие пожарную опасность квазимгновенного разрушения РВС, и практическое использование их основных закономерностей для решения проблемы снижения пожарного риска. В качестве предмета исследования рассматривались различные ограждения РВС и их влияние на величину пожарного риска.

Основу теоретических исследований составляли методы теории вероятностей и математической статистики, теории подобия и математического моделирования, декомпозиции развития возможных аварийных ситуаций, выявления закономерностей, описания, обобщения. Моделирование и расчеты, связанные с решением систем уравнений гидродинамики и уравнений деформируемого твердого тела в связанной пространственной постановке, проведены с использованием современного программного комплекса для инженерных расчетов *LSDYNA*, а также подтверждены результатами экспериментальных исследований, обработка которых производилась в математической системе *Statgraphics-5.0*. Расчеты, связанные с количественной оценкой пожарного риска при разрушении РВС, проведены с использованием математической системы *Mathcad-14*. Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные, правовые и нормативные источники, материалы расследования аварий, материалы научно-исследовательских работ по тематике пожарной безопасности и анализа риска.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы позволяют производить расчетное определение величин пожарного риска при квазимгновенном разрушении РВС, а также получить исходные данные, необходимые для разработки проектной документации на строительство ограждающей стены с волноотражающим козырьком. Применение ограждающей стены направлено на снижение пожарного риска, а также количества сил и средств, необходимых для ликвидации гидродинамической аварии и возможного пожара при разрушении РВС.

В заключении необходимо отметить, что представленные в монографии результаты исследований реализованы при разработке (прил. В):

- проектной документации на строительство ограждений с волноотражающим козырьком в резервуарных парках площадок «Шесхарис» и «Грушовая». Новороссийск: ОАО «Черномортранснефть»;
- нормативного документа: «Методические указания. Расчетное определение параметров аварийного разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенном разрушении РВС». М.: «НК «РОСНЕФТЬ»;

- нормативного документа: «Методические указания. Расчетное определение параметров защитной преграды от волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении РВС». М.: «НК «РОСНЕФТЬ»;
- нормативного документа по пожарной безопасности: «Специальные технические условия на решения проекта «Антипинский НПЗ. II пусковой комплекс». Тюмень: ООО «ИКЦ «Промтехбезопасность»;
- нормативного документа: «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности» ГОСТ Р 53324–2009. М.: ВНИИПО МЧС России;
- нормативного документа: «Специальные технические условия по обеспечению пожарной безопасности Комплекса по перевалке и фракционированию стабильного газового конденсата и продуктов его переработки мощностью 6 млн тонн в год в Морском торговом порту Усть-Луга». Санкт-Петербург: ООО «Пожнефтехим»;
- проектной документации на строительство защитных ограждений групп резервуаров в составе Комплекса ОАО «НОВАТЭК» в Морском торговом порту Усть-Луга. Кингисепп: ОАО «НОВАТЭК-Усть-Луга»;
- проектной документации на строительство защитных ограждений резервуаров в составе Комплекса наливных грузов ОАО «РОСНЕФТЬ-БУНКЕР» в Морском торговом порту Усть-Луга. Краснодар: ЗАО «НИПИ» «ИнжГео».

Автор надеется, что настоящая монография будет полезна всем тем, кто интересуется практическими вопросами оценки, анализа и управления рисками, а также прикладными аспектами проблемы обеспечения пожарной, промышленной и экологической безопасности нефтяных резервуаров.

Некоторые суждения, изложенные в книге, могут оказаться спорными, поэтому все конструктивные замечания и пожелания в адрес публикуемых материалов автором будут с благодарностью приняты и обсуждены.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своей семье, и прежде всего отцу – Швыркову Александру Николаевичу, без чьей всесторонней поддержки появление этой монографии было бы невозможно.

Автор также выражает глубокую признательность профессору кафедры проектирования и эксплуатации газонефтепроводов РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, д.т.н., профессору Лурье Михаилу Владимировичу и рецензентам, давших ряд ценных советов при подготовке настоящей монографии, кроме того благодарит сотрудников и работников кафедры пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России за многолетнее плодотворное сотрудничество.

Отдельное спасибо старшему редактору Академии ГПС МЧС России Л. А. Масловой за помощь в оформлении рукописи монографии.

*С. А. Швырков*

## ГЛАВА 1

# АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ, ТРЕБОВАНИЙ НОРМ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ РАЗЛИВА ЖИДКОСТЕЙ И ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА

### 1.1. Статистические данные о квазимгновенных разрушениях РВС

#### 1.1.1. Источники информации

Основным источником информации о пожарах и авариях в резервуарных парках объектов ТЭК страны служил статистический листок, поступающий в централизованную систему сбора информации о пожарах во ВНИИПО МЧС России. При сборе информации использовались также информационные письма департаментов МЧС России, ведомственные обзоры данных о пожарах и авариях, заключения экспертных комиссий по расследованию аварий и пожаров в резервуарных парках, опубликованные в печати статьи, монографии, а также личные базы данных специалистов, занимающихся указанной проблемой [11, 49, 51, 54, 55, 62–89].

При сборе данных о каждом пожаре или аварии в специально разработанную карточку [55, 90–92] заносились основные и дополнительные сведения, необходимые для исследования (дата и место аварии, название объекта, принадлежность к отрасли, характеристика резервуара, вид хранимой жидкости, уровень заполнения резервуара на момент аварии, характеристика производственной площадки, уклон местности, расположение объекта в ситуационном плане, причина разрушения, площадь разлива, вид и характеристика защитного ограждения, последствия аварии и др.).

Собранный банк данных представляет собой частную выборку из генерального статистического массива произошедших и зарегистрированных случаев полных разрушений РВС (150 инцидентов) на объектах ТЭК СССР, СНГ и РФ за период с 1951 по 2010 гг. (рис. 1.1).

Собрать полную информацию обо всех происшедших на территории бывшего СССР и СНГ авариях, связанных с полным разрушением РВС и тем более с детальным изложением обстоятельств, приведших к их разрушению, не представляется возможным. В частности, это обусловлено нежеланием компаний и организаций придавать широкой огласке аварийные ситуации, которые не сопровождались крупными пожарами, не приводили к травмам и гибели людей, а также следствием которых не было причинение значительного ущерба природной среде или третьим лицам. К числу закрытой информации относятся также инциденты на объектах оборонного ведомства.



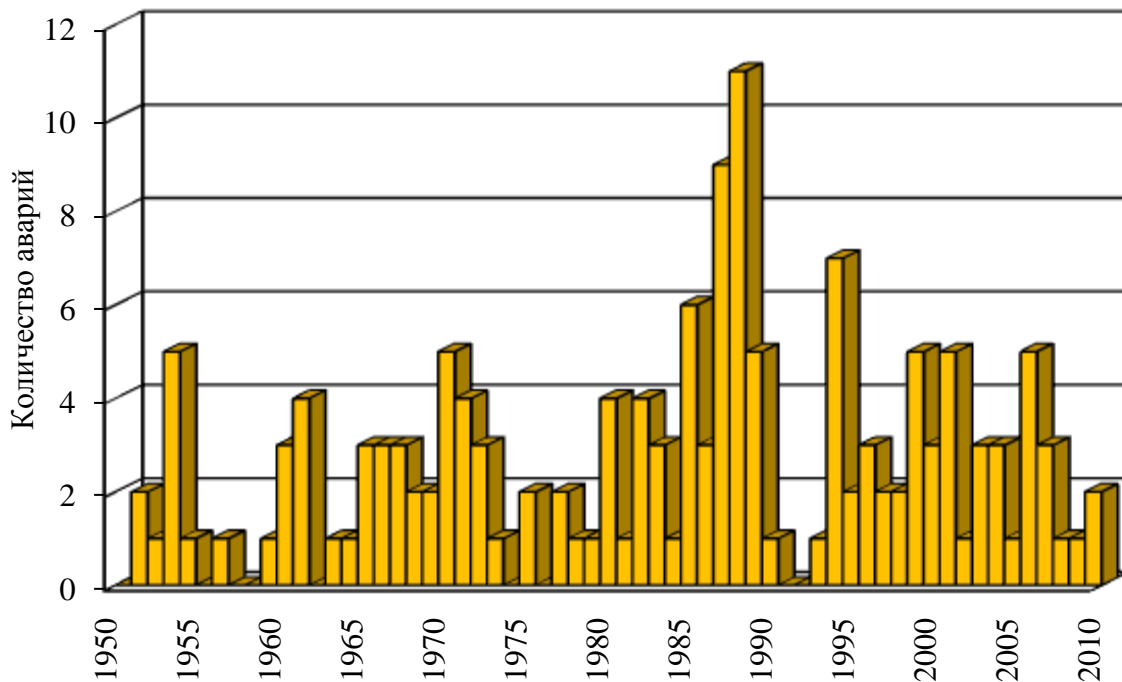


Рис. 1.1. Распределение квазимгновенных разрушений РВС по годам

В связи с этим анализируемая выборка, хотя и является репрезентативной, но не может быть исчерпывающей как по учету количества разрушений РВС, так и по полноте исходной информации. В тоже время в собранном массиве данных представлены все известные аварии, связанные с пожарами, человеческими жертвами, значительным материальным и/или экологическим ущербом, то есть при которых потенциал опасности разлива нефти и нефтепродуктов при авариях РВС проявился в полной мере (прил. А).

### 1.1.2. Анализ статистических данных

Основными предпосылками возникновения квазимгновенных разрушений РВС являются: большой процент износа эксплуатируемых в настоящее время РВС, неравномерные просадки оснований, сложный характер нагружения конструкции, отсутствие достаточного контроля сплошности сварных соединений в зоне уторного шва, отступления от проектов, нарушения режимов эксплуатации, коррозия металла и др. [93–98].

Анализ причин разрушений РВС (рис. 1.2) показал, что в абсолютном большинстве они являются следствием дефектов сварных соединений в сочетании с применением некачественной листовой стали с пониженными механическими свойствами.

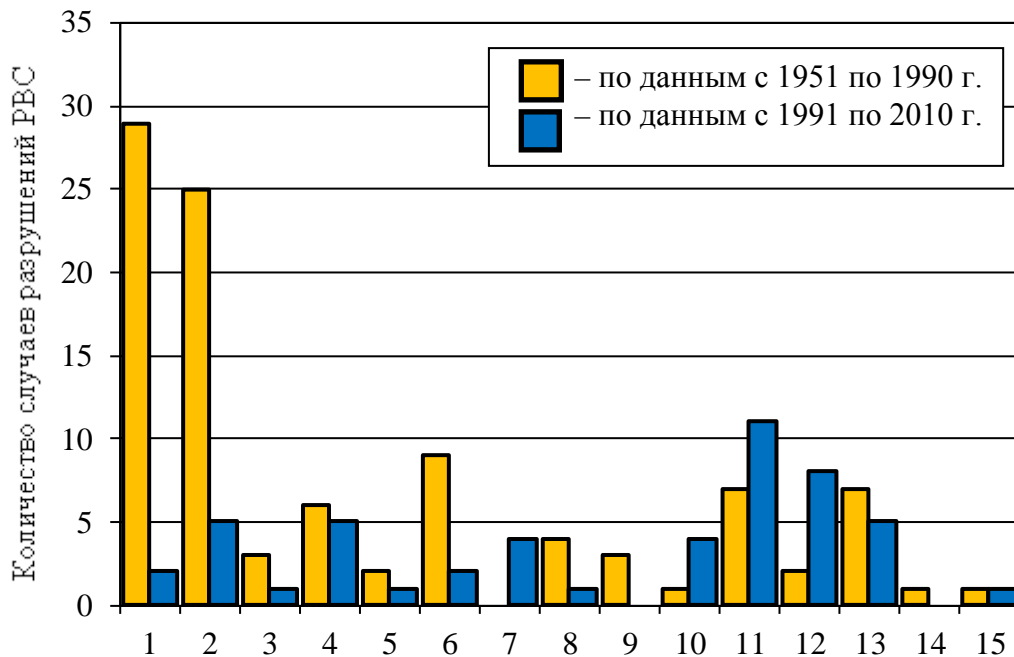


Рис. 1.2. Распределение причин разрушений РВС:

1 – хрупкое разрушение металла; 2 – дефекты сварочно-монтажных работ; 3 – неравномерная осадка основания РВС; 4 – воздействие высоких температур на пожаре; 5 – землетрясение; 6 – коррозионный износ; 7 – диверсионный акт; 8 – внешнее воздействие взрывной волны; 9 – внешнее механическое воздействие; 10 – взрыв внутри РВС от самовозгорания пирофорных отложений; 11 – взрыв внутри РВС от статического электричества (при замере уровня жидкости); 12 – взрыв внутри РВС при производстве сварочных работ; 13 – упущения и просчеты при проектировании, строительстве, монтаже и др.; 14 – взрыв внутри РВС от удара молнии; 15 – взрыв внутри РВС при распространении огня по газораздаточной системе

При этом чаще всего хрупкие трещины, приводящие к разрушению резервуаров, возникали в дефектах сварочных швов, выполненных при монтаже. Данное обстоятельство обусловлено склонностью некоторых марок стали к хрупкому разрушению при низких температурах (СтЗкп и т. п.). Отметим, что в прежние годы для изготовления резервуаров широко использовали кипящую маргеновскую сталь, которая, как известно, обладала повышенной склонностью к хрупкому разрушению даже при температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре около  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ударная вязкость такой стали резко падает и при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет лишь около 7 % от начального значения [51, 73, 78, 93, 99]. Исключение кипящей стали как материала для изготовления резервуаров и вывод из эксплуатации большого количества ранее построенных из этой стали емкостей существенно снизили аварийность резервуаров по этой причине.

Однако, как показала практика, и высококачественная сталь (СтЗпс, 09Г2С и т. п.) оказывается неустойчивой к низким температурам. Примером тому может служить разрушение резервуара при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в резервуарном парке цеха переработки газового конденсата в г. Дудинка (прил. А).

Рассмотренные обстоятельства позволяют считать, что и сегодня вопрос обеспечения надежности резервуарных конструкций остается нерешенным. То есть признать как факт, что несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние десятилетия в области резервуаростроения, возможность разрушений РВС сохраняется, что и подтверждает статистика аварий.

Следует также отметить, что в последние два десятилетия, наряду с известными причинами, проявились угрозы современной реальности – инфраструктурный терроризм. Любые структуры резервуарных парков могут стать поводом для возможного террористического шантажа или акта. Причем эта опасность актуальна не только с точки зрения террора, но и с ведением нечестной конкурентной борьбы [100, 101].

Специфика проблемы в данном случае связана прежде всего с тем, что резервуары несут в себе повышенную опасность как для самого объекта, так и для окружающей территории, вследствие хранения в них большого количества взрывопожароопасных и токсичных веществ. Единичная емкость резервуаров и резервуарных парков непрерывно растет и все большим становится энергетический потенциал объекта и следовательно угроза, риск и последствия возможного осуществления техногенного теракта [102]. Наиболее остро эта проблема была освещена после известных трагических событий 11 сентября 2001 г. в США [103], когда заговорили о недостаточной прочности и коллапсе городских сооружений при свершении террористических актов. В этой связи важно отметить, что в настоящее время в городах и населенных пунктах нашей страны находится более 350 крупных нефтехранилищ и тысячи складов горюче-смазочных материалов промышленных предприятий [33, 34, 55, 104–107], при этом имели место случаи подрыва резервуаров с нефтью на территории населенных пунктов в Чечне и Ставропольском крае (прил. А).

Важно также указать, что в последние годы нефтехранилища все чаще становятся мишенью в военных конфликтах. Так, например, в июле 2006 г. в результате бомбардировки израильскими ВВС хранилищ топлива электростанции в г. Джие (Ливан) из разрушенных резервуаров в Средиземное море вылилось более 35 тыс. т нефти, которое распространилось по побережью на 80 км, вызвав экологическую катастрофу [108]. Таким образом, рассмотренные обстоятельства указывают на необходимость повышения эффективности антитеррористической защиты нефтехранилищ.

Продолжая анализ, отметим, что механизм разрушений РВС достаточно сложный и не является пристальным предметом рассмотрения в настоящей работе. В тоже время из материалов экспертиз аварий следует, что раскрытие РВС происходило в основном вследствие разрушения наиболее нагруженного конструктивного элемента – узла сопряжения стенки с днищем резервуара. При этом стенка РВС разрушалась на всю высоту и за счет больших радиальных усилий, связанных с давлением жидкости при ее истечении из РВС, отрывалась от днища, а ее края разворачивались на 120–180°. Стенка резервуара с силой отбрасывалась с фундамента в сторону, противоположную направлению истечения жидкости, а крыша РВС обрушивалась на днище.

На рис. 1.3–1.5 приведены результаты анализа статистических данных квазимгновенных разрушений резервуаров.



Рис. 1.3. Распределение разрушившихся РВС по объектам ТЭЖ

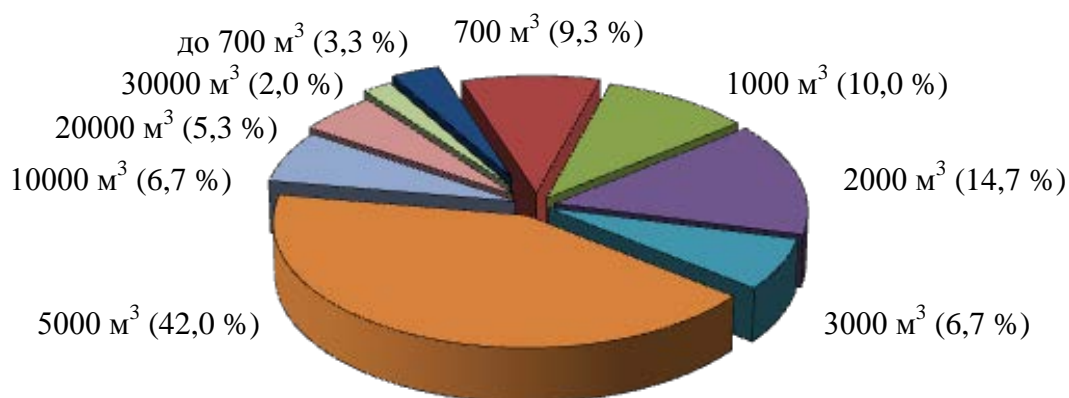


Рис. 1.4. Распределение разрушившихся РВС по номинальной емкости



Рис. 1.5. Распределение разрушившихся РВС по видам находившихся в них продуктов

Примерно половина всех аварий, связанных с разрушением резервуаров, квалифицировались как крупные или катастрофические, 32 из которых привели к гибели 126 человек. Одна из первых таких аварий, унесшая жизни 41 человека, произошла в марте 1960 г. на «Каменской» нефтебазе в Ростовской области. Вследствие переполнения бензином резервуара типа РВС-700 м<sup>3</sup> произошло его полное разрушение по вертикальному сварному шву. Следует отметить, что резервуар был построен на отдельной площадке и вокруг него, по проекту, не предусматривалось устройство обвалования. Образовавшаяся горящая волна вышла за пределы территории нефтебазы и по уклону в сторону р. Северный Донец достигла жилых домов, при этом горящий на поверхности реки бензин достиг противоположного берега и поджег пристань и лодки. Общая площадь пожара разлива превышала 10000 м<sup>2</sup> (рис. 1.6–1.8).



Рис. 1.6. Пожар на нефтебазе при разрушении РВС-700 м<sup>3</sup>



Рис. 1.7. Вид резервуара после разрушения и пожара

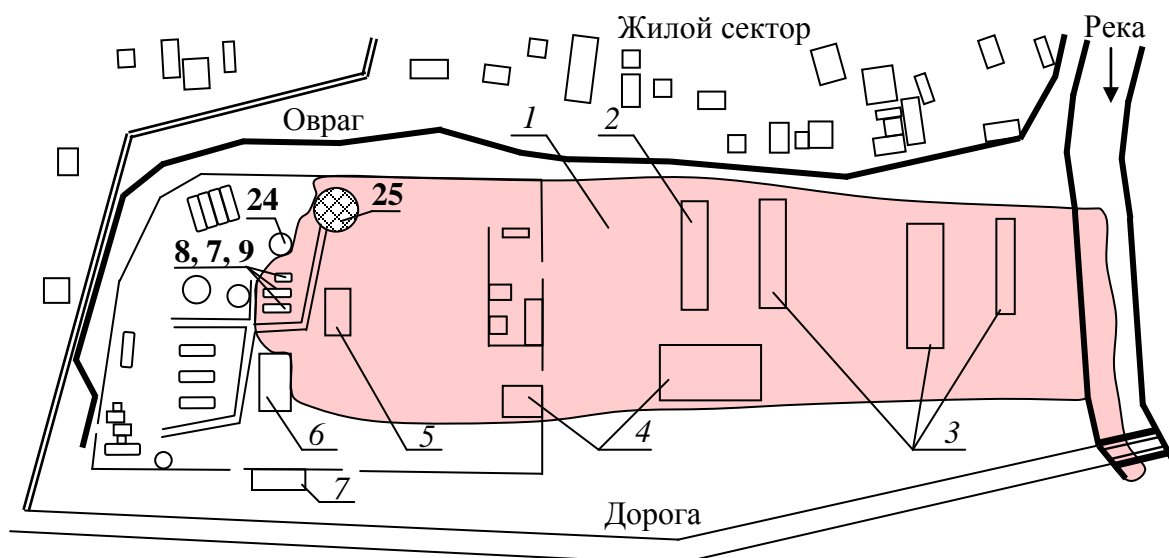


Рис. 1.8. Последствия разрушения РВС-700 м<sup>3</sup> с бензином:

1 – площадь пожара разлива, равная 10000 м<sup>2</sup>; 2 – хозяйственные деревянные постройки; 3 – жилые деревянные бараки; 4 – жилые каменные дома; 5 – раздаточная; 6 – полуподземный склад материалов (бетонный); 7 – разливочная; 24 – резервуар типа РВС-150 м<sup>3</sup> с бензином; 25 – аварийный резервуар; 8, 7, 9 – резервуары горизонтальные стальные, вместимостью 8 и по 33 м<sup>3</sup>, соответственно, с керосином и техническим маслом

Продолжая анализ, отметим, что каждый третий случай квазимгновенного разрушения резервуара сопровождался, так называемым, эффектом «домино». Одна из первых таких аварий произошла 2 февраля 1953 г. в резервуарном парке Уфимского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) в Башкирии при разрушении резервуара типа РВС-4600 м<sup>3</sup> № 4, в котором находилось около 4000 т сырой нефти. Резервуарный парк состоял из шести резервуаров: № 2, 3, 4 и 5 типа РВС-4600 м<sup>3</sup>, располагавшихся в одном обваловании, № 1 и № 158 типа РВС-4600 м<sup>3</sup> и РВС-10000 м<sup>3</sup> – в самостоятельных обвалованиях, последовательно примыкавших к обвалованию первой секции. Резервуары металлические, сварные, диаметром 23 и 35 м, высотой 11,4 м, соответственно. На территории парка кроме резервуаров были расположены 13 различных производственных зданий и сооружений, при этом, резервуарный парк примыкал к территории НПЗ и отделялся от него шлакоблочным забором высотой 2,5 м.

На момент аварии в РВС № 1 уровень сырой нефти составлял 10 м, в РВС № 2 – 11 м, в РВС № 3 – 8,9 м, в РВС № 4 – 11,28 м, в РВС № 5 – 9,3 м. В РВС № 158 уровень мазута составляла 10 м. При разрушении РВС № 4 стенки резервуара развернулись и ударили по соседнему РВС № 5, что привело к разрушению его второго пояса на всей высоте вертикального шва. Нефть, вышедшая из резервуаров, залила всю площадь обвалования

РВС № 2, 3, 4 и 5 и вышла за ее пределы. При этом большая часть продукта была выброшена за обвалование в сторону производственных зданий, залила территорию, прилегающую к ним, и двумя потоками начала растекаться дальше, создав угрозу железнодорожному мосту и нефтеналивной эстакаде НПЗ. Одновременно с растеканием нефти от высеченной искры при ударе корпусов резервуаров произошло ее воспламенение.

К прибытию первой пожарной команды (через 5-6 минут с момента аварии) разлившаяся нефть горела за обвалованием и в обваловании РВС № 2, 3, 4 и 5, при этом РВС № 2, 3 и 5 находились полностью в огне. Кроме того, огнем были охвачены здания, расположенные на производственной территории. Общая площадь пожара составляла свыше 5 га.

Быстрому распространению огня способствовало воздействие ветра со скоростью 14 м/с, что привело к угрозе перехода пожара на нефтеналивную эстакаду НПЗ и строения, расположенные за железнодорожным мостом. Через 3 часа после начала пожара из арматуры канализационного колодца, расположенного в обваловании РВС № 1, начала фонтанировать горящая нефть. Выбрасываемая на высоту 10–12 м и подхваченная ветром, она попадала на РВС № 1, что привело к появлению очагов горения на дыхательной арматуре и крыше. Бурное горение нефти продолжалось в обваловании РВС № 2, 3 и 5 на площади около 10000 м<sup>2</sup>, вытекающей из образовавшихся в резервуарах трещин. Примерно через 4 часа от начала аварии произошло полное разрушение РВС № 2, находившегося в очаге пожара. Волной горячей нефти залило всю площадь обвалования РВС № 1 и часть площади обвалования РВС № 158, которые также оказались в огне. Выброшенная за обвалование горящая нефть начала быстро растекаться по территории, что привело к увеличению площади пожара разлива до 100000 м<sup>2</sup> (рис. 1.9). От воздействия горячей волны погибли 22 сотрудника пожарной охраны и два работника объекта. Пожар был ликвидирован только через 23 часа, в тушении которого участвовало более 200 человек, специальная и тяжелая техника. Таким образом, авария одного РВС вовлекла в цепочку разрушений еще пять резервуаров и вызвала реальную угрозу соседним объектам, так как пожар распространился по фронту более чем на километр.

Из общего количества зарегистрированных разрушений РВС 48,7 % аварий сопровождались пожаром при разливе нефти или нефтепродукта, из них в 41,3 % случаях пожары носили групповой характер. Непосредственно от действия высоких температур пожара разлива разрушилось 17 резервуаров, еще 54 были сильно деформированы. Остальные разрушения РВС не сопровождались пожарами, причем 17,3 % разрушений произошло при проведении гидравлических испытаний резервуаров.

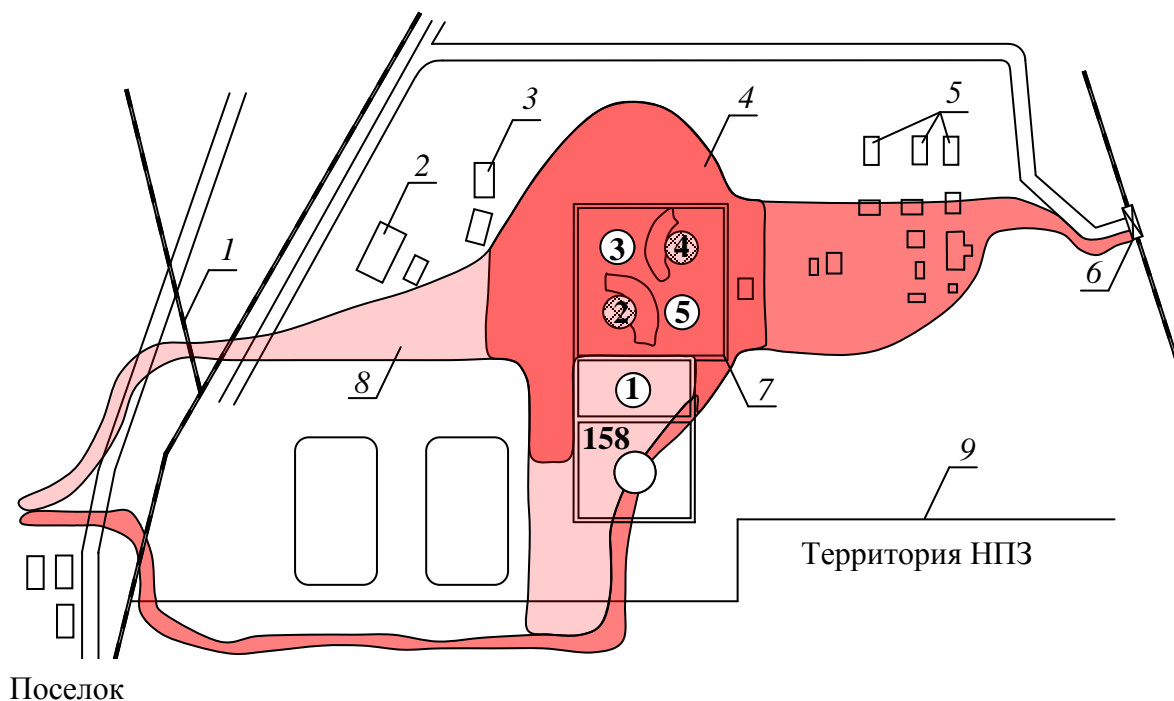


Рис. 1.9. Последствия разрушения РВС-4600 м<sup>3</sup> с нефтью:

1 – железная дорога; 2 – здание цеха изготовления металлических конструкций; 3 – гаражи и ремонтные боксы; 4 – площадь пожара разлива при разрушении РВС № 4 и № 5, равная 50000 м<sup>2</sup>; 5 – производственные и вспомогательные здания; 6 – железнодорожный мост; 7 – земляное обвалование; 8 – площадь пожара разлива при разрушении РВС № 2, равная 54000 м<sup>2</sup>; 9 – шлакоблочный забор, высотой 2,5 м; 1-5 – резервуары типа РВС-4600 м<sup>3</sup>; 158 – резервуар типа РВС-10000 м<sup>3</sup>

Наиболее часто разрушались (в 42 % случаев) резервуары РВС-5000 м<sup>3</sup>, что обусловлено, по всей видимости, их наибольшей распространенностью на производственных объектах по сравнению с другими номинальными объемами резервуаров. Важно отметить, что в последнее время, стали происходить и разрушения крупногабаритных резервуаров, в основном на объектах энергетики. Так, начиная с 1982 г., зарегистрировано 10 случаев разрушений РВС-10000 м<sup>3</sup>, 8 случаев разрушений РВС-20000 м<sup>3</sup> и 3 случая разрушений РВС-30000 м<sup>3</sup>; 36,7 % случаев разрушений резервуаров произошло при низких температурах окружающего воздуха и сильном ветре, что характерно в основном для объектов, находящихся в районах Крайнего Севера, Западной Сибири и Урала. В некоторых случаях отмечено разрушение даже частично заполненных РВС, которое происходило при взрыве паровоздушной смеси внутри РВС, в результате чего стенка отрывалась от днища на участке, достигающем 3/4 длины его окружности. Иногда такие разрушения РВС сопровождались полным отрывом корпуса от днища, его опрокидыванием или «полетом» на расстояние до 100 м.



Почти все разрушения РВС произошли в резервуарных парках, имеющих земляное обвалование или ограждающие стены из негорючих материалов. Анализ последствий разрушений РВС убедительно свидетельствует, что такие преграды во всех случаях не выполнили своего функционального назначения. Характер взаимодействия волны прорыва, образующейся при разрушении РВС, с защитной стеной, выполненной из бетона, кирпичной или каменной кладки, а также с земляным обвалованием таков, что в 46,7 % случаев аварий поток разрушал стену или размывал обвалование, выходя за пределы территории объекта, что приводило к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом, при этом в 8 случаях отмечено нанесение значительного вреда водным объектам. В 35,3 % случаев разрушений РВС поток продукта промывал земляные дамбы или перехлестывал через них, не разливаясь за пределы территории производственного объекта. Как правило, такие гидродинамические аварии происходили при разрушении резервуаров небольших объемов (до 2000 м<sup>3</sup>) или при частичном (до 2/3 высоты) заполнении РВС больших объемов. Остальные 18 % случаев приходится на разлив продукта в каре защитного обвалования, при небольшом уровне заполнения (менее 1/5 высоты) РВС, разрушившихся, как правило, от взрыва паровоздушной смеси вследствие самовозгорания пирофорных отложений, проявления разрядов статического электричества при отборе проб или замере уровня, появления фрикционных искр при проведении ремонтных работ и нарушении правил пожарной безопасности.

От воздействия волны прорыва и движущихся конструкций РВС было полностью разрушено 44 и повреждено 86 соседних резервуара различной вместимости. В 33,3 % случаев аварий РВС наблюдались сильные повреждения зданий, сооружений, технологических трубопроводов, как на территории производственных объектов, так и за их пределами. Наиболее серьезные негативные последствия отмечены при авариях на нефтебазах, расположенных непосредственно в черте плотной застройки населенных пунктов. В 14 % случаев аварий возникали чрезвычайные ситуации, при которых производилась эвакуация населения с привлечением значительного количества личного состава пожарной охраны, специальной и другой техники (рис. 1.10).

Также необходимо отметить, что из немногочисленных случаев разрушений РВС по причине противоправных действий людей, в техническом отношении, следует сделать вывод о том, что в таких случаях роль надежности конструкции резервуаров и их устойчивости резко ослабевает, а решающее значение приобретает превентивная система защиты от аварийного разлива и проникновения физических лиц на объект.

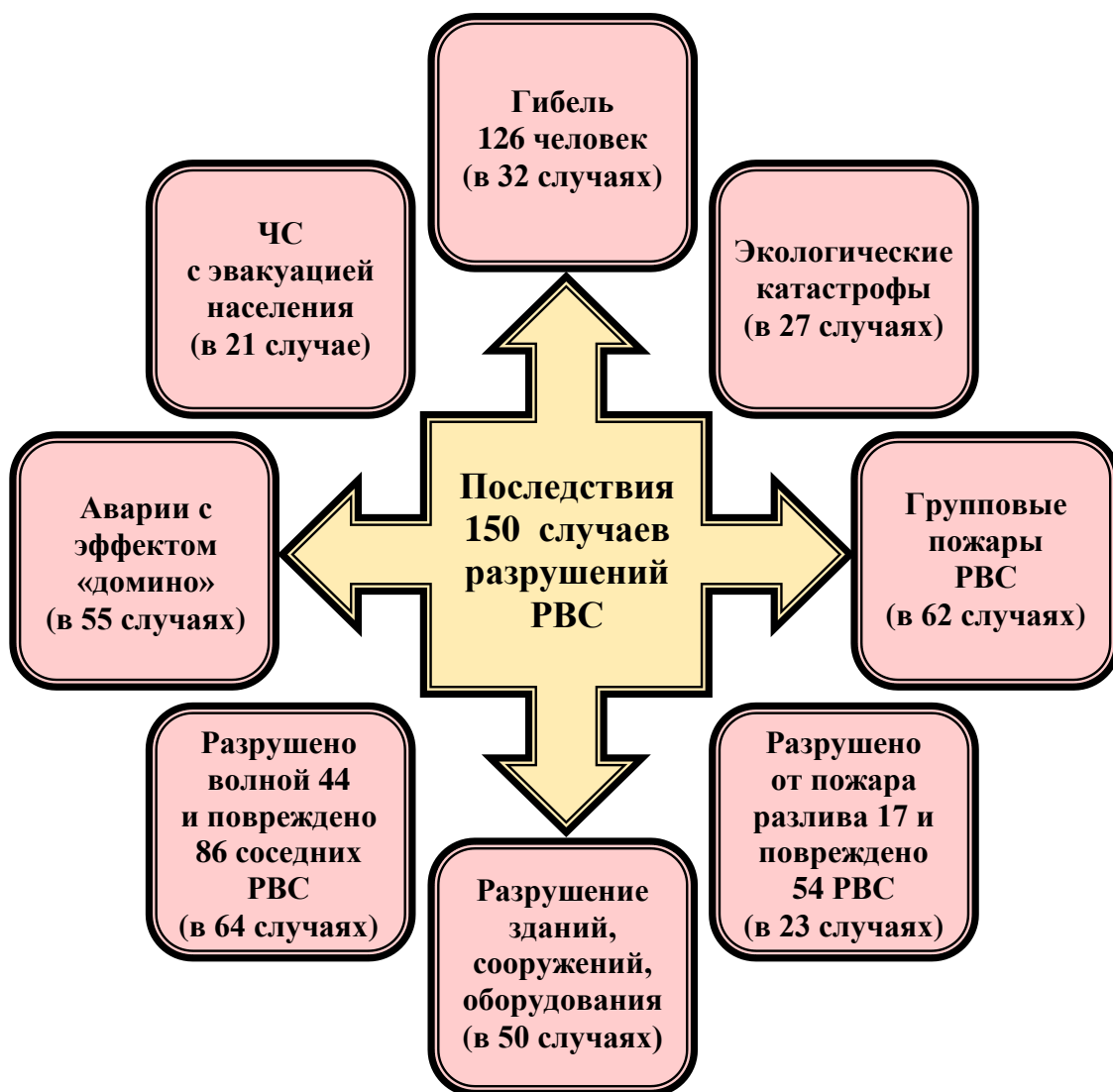


Рис. 1.10. Последствия квазимгновенных разрушений РВС

Так, в 2004 г. на Ставрополье, в резервуарном парке нефтепромыслов одной из нефтедобывающих компаний был осуществлен террористический акт с подрывом резервуара типа РВС-2000 м<sup>3</sup>. Вследствие полного разрушения резервуара, образовавшийся поток водно-нефтяной эмульсии перехлестнул через земляное обвалование парка и растекся по территории объекта на площади более 2500 м<sup>2</sup>. В зоне пожара оказались 6 соседних резервуаров, заполненных нефтью. Пожар разлива угрожал рядом расположенным зданиям насосной, котельной, установке сепарации и административно-бытовому блоку. Только благодаря оперативным действиям пожарных подразделений пожар удалось локализовать и не допустить каскадного его развития.

Отличительной особенностью разрушения крупногабаритного РВС (емкостью 10000 м<sup>3</sup> и более) является не только уничтожение земляного обвалования или железобетонной ограждающей стены, но и отмеченное в каждом втором случае полное разрушение или сильная деформация соседних резервуаров, повреждения зданий, сооружений и технологических установок, что приводило к значительному экономическому ущербу. При этом поток жидкости практически всегда выходил далеко за территорию предприятия, создавая угрозу соседним объектам и приводя к загрязнению окружающей природной среды. По статистике общий материальный ущерб от таких аварий резервуаров превышал в 500 и более раз первичные затраты на их сооружение.

В качестве характерного примера может быть рассмотрен случай полного разрушения РВС-20000 м<sup>3</sup> (№ 2), произошедший 5 июля 1985 г. в резервуарном парке Невинномысской ГРЭС Ставропольского края. Мазутное хозяйство состояло из трех однотипных РВС-20000 м<sup>3</sup>. Внешнее ограждение парка было расположено на расстоянии 12 м от стенки РВС и по конструктивному исполнению состояло из железобетонных плит 6000×2500×300, закрепленных между собой сваркой на опорных колоннах сечением 450×450, заглубленных в грунт на 1,5 м (рис. 1.11), внутреннее ограждение – из железобетонных блоков 1300×1000×150.

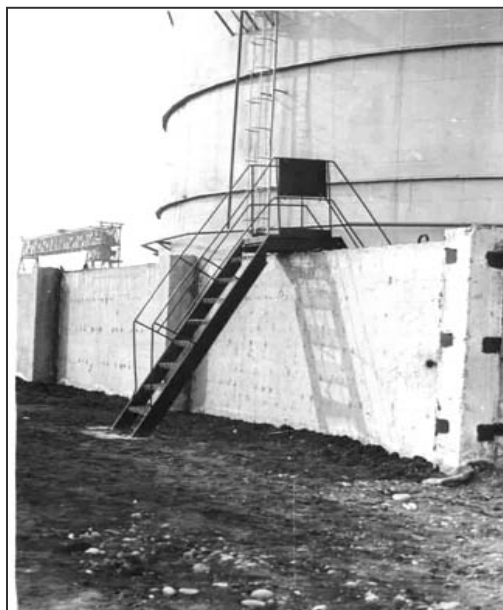


Рис. 1.11. Общий вид ограждения до аварии РВС № 2

При разрушении РВС № 2 образовавшийся поток воды развернул стенки резервуара, оторвал их от днища и кровли и реактивной силой отбросил в сторону РВС № 3 и внешнего ограждения (рис. 1.12). При этом конструкциями разрушившегося резервуара был поврежден и сдвинут с фундамента на 1 м РВС № 3. Стенка РВС № 3 была оторвана по окружности от днища на 11,3 м и деформирована до уровня шестого пояса с глубиной вмятины 1,12 м во втором поясе (рис. 1.13).

Разрушение РВС № 2 произошло в сторону РВС № 1, в котором хранилось 2,5 т мазута. При ударном воздействии потока воды на соседний резервуар произошла сильная деформация его стенки и отрыв днища от обечайки по сварному соединению. Общая деформация стенки составила более 80 м с глубиной вмятины 2,52 м на уровне четвертого пояса (6 м).



Рис. 1.12. Общий вид аварийного РВС № 2 после разрушения



Рис. 1.13. Общий вид поврежденного РВС № 3

Потоком воды и падающими конструкциями РВС разрушено обвалование парка (внутренние ограждающие стены – полностью; наружные ограждающие стены – на 70 %), полностью снесена эстакада трубопроводов на протяжении 130 м, конструкции стен отброшены на 40 м в сторону промышленной площадки (рис. 1.14).

Рис. 1.14. Общий вид разрушенного железобетонного ограждения



Железобетонные элементы разрушенного ограждения, подхваченные потоком воды, повредили соседний резервуар с мазутом, который разлился по окружающей территории на площади более 90 тыс. м<sup>2</sup>, в результате мазут попал в р. Барсучки и частично – в р. Кубань, что привело к большому экологическому ущербу (рис. 1.15).

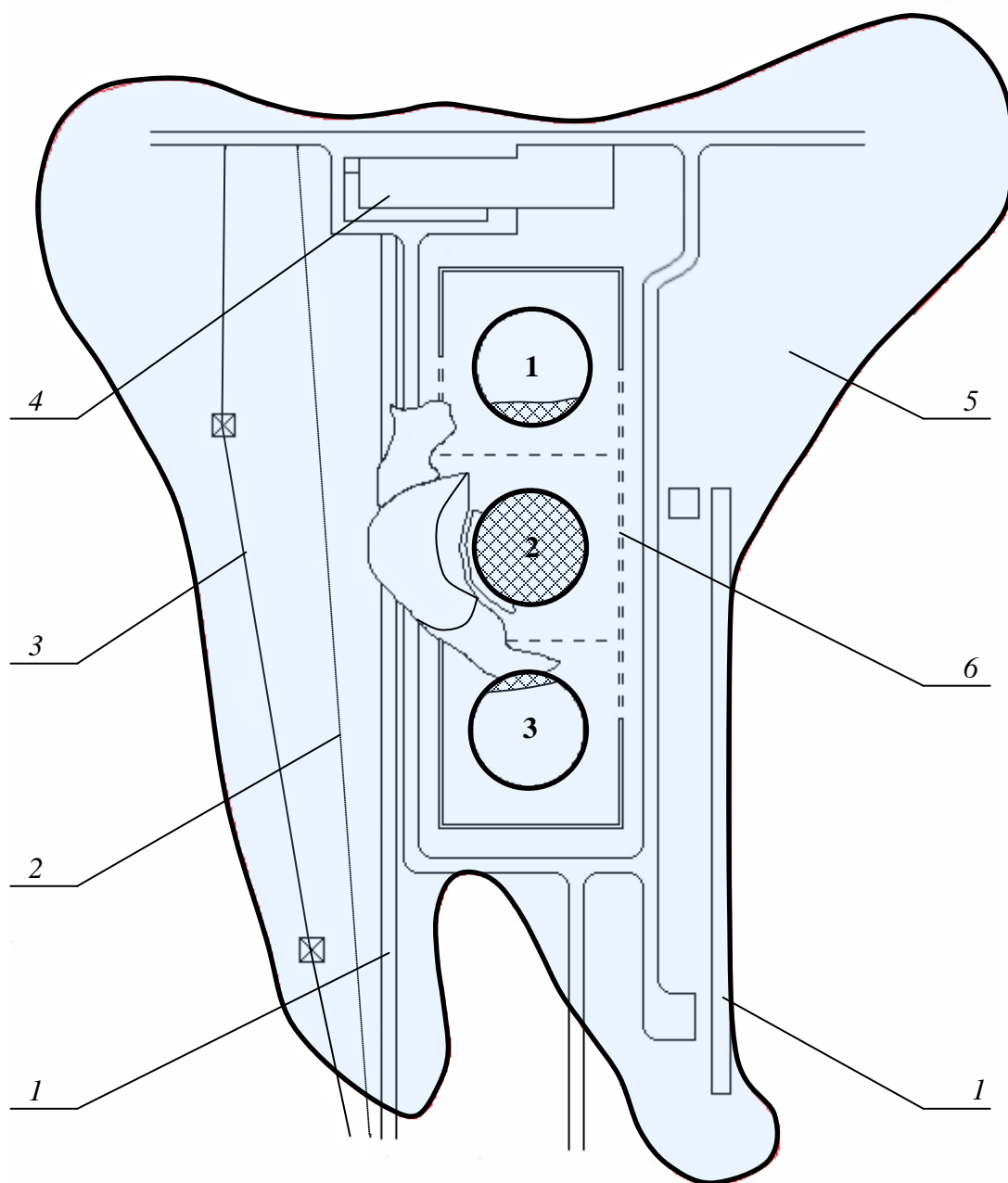


Рис. 1.15. Последствия разрушения РВС-20000 м<sup>3</sup> с водой:  
 1 – котлован, глубиной 3 м; 2 – ограждение территории ГРЭС; 3 – линия электропередач;  
 4 – здание насосной перекачивающей станции; 5 – площадь разлива воды, равная 95400 м<sup>2</sup>;  
 6 – разрушенное железобетонное ограждение, высотой 1,5 м; 1, 3 – резервуары типа  
 РВС-20000 м<sup>3</sup> с мазутом; 2 – аварийный резервуар

Авария выявила недостаточную несущую способность ограждения (на сдвиг и опрокидывание), выполненного из железобетонных элементов. В соответствии с нормативными требованиями ограждение было рассчитано на гидростатическое давление разливающейся жидкости. Ошибочный подход к принципу расчета ограждения привел к тому, что авария одного резервуара повлекла за собой повреждение еще двух соседних.

Статистика разрушений РВС свидетельствует, что несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние годы в резервуаростроении, гидродинамические аварии в резервуарных парках продолжают иметь место. В связи с этим есть основания считать, что вопросы обеспечения конструктивной надежности резервуаров остаются не решенными. Кроме того, нормативные защитные сооружения не способны удержать продукт в пределах защищаемой территории при разрушении РВС. Поэтому при наличии крупных резервуаров на нефтебазах и терминалах, расположенных в населенных пунктах, морских и речных портах, около объектов федерального значения, возникает острая необходимость в разработке мер защиты населения и территорий от разлива нефти и нефтепродуктов в случае разрушения РВС.

Таким образом, проведенный анализ квазимгновенных разрушений вертикальных стальных резервуаров показал, что:

- проблема обеспечения пожарной, промышленной и экологической безопасности при эксплуатации резервуарных парков остается не решенной и подтверждает необходимость рассматривать волну прорыва, образующуюся при квазимгновенном разрушении РВС, в качестве опасного фактора аварийной ситуации при оценке пожарных рисков на производственных объектах;

- расчет защитного сооружения от разлива нефти и нефтепродуктов должен производиться с учетом гидродинамической нагрузки от волны прорыва, образующейся при аварии РВС, с целью минимизации возможных трагических последствий;

- конструкция ограждения резервуара или резервуарного парка должна обеспечивать удержание волны прорыва в пределах защищаемой территории, то есть в пределах ограждения;

- в случае невозможности обустройства ограждения специальной конструкции, рассчитанной на удержание волны прорыва, например, ограждающей стены с волноотражающим козырьком, за нормативным обвалованием на наиболее опасных (ответственных) направлениях необходимо устраивать дополнительные защитные преграды (рвы, каналы, амбары, повышенные участки дорог и т. п.), служащие для удержания волны, сбора разлившегося продукта и отвода его в безопасную зону.

Поскольку в качестве объекта исследования в монографии рассматриваются процессы разрушения РВС с образованием волны прорыва и ее взаимодействия с различными видами ограждений, то для детального изучения этих явлений в прил. А приведены более полные описания характерных примеров разрушений РВС в резервуарных парках с ограждениями различного конструктивного исполнения, произошедших как в нашей стране, так и за рубежом (Прил. Б [11, 38, 77, 109–124]).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ РАЗРУШЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ, ТРЕБОВАНИЙ НОРМ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ РАЗЛИВА ЖИДКОСТЕЙ И ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА.....	8
1.1. Статистические данные о квазимгновенных разрушениях РВС.....	8
1.1.1. Источники информации .....	8
1.1.2. Анализ статистических данных.....	9
1.2. Анализ требований нормативных документов к обустройству ограждений резервуаров.....	23
1.3. Анализ нормативно-законодательных положений по оценке пожарного риска на производственных объектах.....	25
ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ РАЗРУШЕНИЙ РВС И УСЛОВНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ СЦЕНАРИЕВ ПРИ АВАРИЯХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ.....	30
2.1. Дифференцированный подход к определению частоты разрушений РВС.....	30
2.2. Особенности разработки сценариев возникновения и развития пожара (аварии) при разрушении РВС.....	36
2.3. Определение условных вероятностей реализации сценариев при квазимгновенном разрушении РВС.....	38
2.4. Особенности оценки потенциального риска при разрушении РВС.....	39
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛИТИЯ И ФОРМЫ ПЛОЩАДИ ПРОЛИВА ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ РВС.....	41
3.1. Дифференцированный подход к оценке параметров разлива.....	41
3.2. Статистическая оценка коэффициентов разлива.....	47
3.2.1. Подготовка статистических данных.....	51
3.2.2. Определение коэффициентов разлива.....	57
3.3. Оценка параметров формы площади пролива жидкости и зоны возможного затопления.....	58
3.4. Экспериментальное определение площади пролива жидкости при квазимгновенном разрушении РВС.....	64
3.5. Особенности определения условной вероятности поражения людей тепловым излучением пожара пролива.....	70
ГЛАВА 4. ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ ПРОРЫВА НА ЛЮДЕЙ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ.....	74
4.1. Характеристика потока жидкости при полном разрушении РВС.....	74
4.2. Анализ теоретических исследований характеристик волны прорыва при разрушении гидротехнических сооружений.....	76
4.3. Анализ теоретических исследований волны прорыва при разрушении наземного резервуара.....	81
4.4. Анализ экспериментальных исследований взаимодействия волн прорыва с защитными преградами.....	84
4.5. Анализ методик расчета максимальных параметров потока по трассе растекания при гидродинамических авариях.....	92
4.6. Разработка математической модели образования волны прорыва при разрушении РВС, ее распространения и воздействия на людей, здания и сооружения.....	100

4.6.1. Результаты численного моделирования параметров воздействия волны прорыва на людей, здания и сооружения.....	107
4.6.2. Особенности распределения высоты и скорости волны прорыва по трассе растекания с уклоном.....	128
4.7. Экспериментальное исследование параметров волны прорыва при разрушении РВС-700 м <sup>3</sup> .....	130
4.7.1. Оценка скорости и высоты волны прорыва по трассе растекания.....	132
4.7.2. Оценка силового воздействия волны прорыва на элемент здания.....	133
<b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ОГРАЖДАЮЩЕЙ СТЕНЫ, УСТОЙЧИВОЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВОЛНЫ ПРОРЫВА ПРИ РАЗРУШЕНИИ РВС.....</b>	<b>136</b>
5.1. Принципы разработки ограждений РВС для снижения пожарного риска.....	136
5.2. Анализ дополнительных и альтернативных способов защиты от разлива нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках.....	139
5.3. Результаты экспериментального определения геометрических параметров ограждающей стены с волноотражающим козырьком.....	142
5.3.1. Определение критериев подобия.....	142
5.3.2. Разработка лабораторного стенда и методики проведения экспериментов....	144
5.3.3. Экспериментальное исследование и обработка данных.....	146
5.3.4. Техника измерений и оценка погрешностей измерений.....	156
5.4. Результаты теоретического исследования динамического воздействия волны прорыва на ограждающую стену с волноотражающим козырьком.....	157
5.5. Экспериментальное исследование динамических нагрузок от волны на ограждающую стену с волноотражающим козырьком.....	170
5.5.1. Критерии моделирования.....	170
5.5.2. Описание лабораторного стенда и приборного оборудования.....	174
5.5.3. Определение скоростных характеристик потока.....	181
5.5.4. Определение волновой нагрузки.....	183
5.5.5. Оценка погрешностей измерений.....	193
5.6. Численное моделирование экспериментальных исследований.....	195
5.6.1. Анализ скоростных характеристик потоков.....	196
5.6.2. Анализ гидродинамических нагрузок на преграду.....	197
<b>ГЛАВА 6. КОНЦЕПЦИЯ ОЦЕНКИ И СНИЖЕНИЯ ПОЖАРНОГО РИСКА ПРИ РАЗРУШЕНИИ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ.....</b>	<b>201</b>
6.1. Общие положения.....	201
6.2. Особенности квазигнновенного разрушения РВС.....	201
6.3. Частота разрушений РВС.....	202
6.4. Сценарии возникновения и развития аварии при разрушении РВС.....	203
6.5. Метод оценки формы и площади пролива жидкости при разрушении РВС.....	204
6.6. Метод определения условной вероятности поражения человека волной прорыва.....	206
6.7. Особенности определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением пожара пролива.....	207
6.8. Оценка потенциального риска при разрушении РВС.....	210
6.9. Способ снижения пожарного риска при разрушении РВС.....	210
6.9.1. Метод определения геометрических параметров ограждающей стены с волноотражающим козырьком.....	211
6.9.2. Метод определения динамических нагрузок от воздействия волны прорыва на ограждающую стену с козырьком.....	212



6.10. Оценка влияния ограждений на величину потенциального риска при квазимгновенном разрушении РВС.....	213
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	220
ЛИТЕРАТУРА.....	222
<i>Приложение А. ПРИМЕРЫ РАЗРУШЕНИЙ РВС С ОГРАЖДЕНИЯМИ РАЗЛИЧНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ.....</i>	239
А.1. Примеры разрушений РВС с земляными обвалованиями.....	239
А.2. Примеры разрушений РВС в резервуарных парках с ограждениями из кирпичной и каменной кладки.....	262
А.3. Примеры разрушений РВС в резервуарных парках с ограждениями из сборных железобетонных конструкций.....	265
А.4. Пример разрушения резервуара с двойной стенкой.....	271
<i>Приложение Б. СЛУЧАИ РАЗРУШЕНИЙ РВС ЗА РУБЕЖОМ.....</i>	276
<i>Приложение В. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН С ВОЛНООТРАЖАЮЩИМ КОЗЫРЬКОМ.....</i>	284

Швырков Сергей Александрович

**Пожарный риск  
При квазимгновенном разрушении  
нефтяного резервуара**

Монография

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 28.09.2015. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 31,2. Бумага офсетная.  
Тираж 500 экз. Заказ 430

Академия ГПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4