

На правах рукописи

ВОРОБЬЕВ
Владимир Викторович

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПРЕГРАДЫ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАЗЛИВА
НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ РАЗРУШЕНИЯХ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ**

Специальность: 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль, технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной
службы МЧС России на кафедре пожарной безопасности
технологических процессов

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Горячев С.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Шебеко Ю.Н.

кандидат технических наук,
доцент Нигметов Г.М.

Ведущая организация: Российский Государственный
Университет нефти и газа
им. И.М. Губкина

Защита состоится 20 июня 2008 г. в 14 часов на заседании диссер-
тационного совета Д 205.002.02 в Академии Государственной проти-
вопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б.
Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии
ГПС МЧС России.

Автореферат разослан 19 мая 2008 г., исх. № 6/35.

Отзыв на автореферат с заверенной подписью и печатью просим
направить в Академию ГПС МЧС России по указанному адресу.

Телефон для справок: 8 (495) 683-19-05.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Пузач С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Производственные объекты предприятий и организаций, осуществляющих разведку месторождений нефти, ее добычу, транспортировку и переработку, а также хранение и реализацию нефтепродуктов потребителям, в соответствии с федеральными законами «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» относят к категории опасных производственных объектов. Повышенную пожарную опасность на таких объектах имеют резервуарные парки, аварии в которых приводят к чрезвычайным ситуациям самого различного масштаба по количеству пострадавших в них людей, размерам материального и экологического ущерба.

Одним из характерных и наиболее опасных по своим последствиям видов чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках является разлив нефти или нефтепродукта при полном разрушении вертикального стального резервуара (РВС). Площадь разлива хранимых продуктов при разрушениях резервуаров достигает сотен тысяч квадратных метров. Ежегодно в России регистрируется две-три такие аварии. В то же время исследования, проведенные сотрудниками Центрального научно-исследовательского и проектного института строительных металлоконструкций им. Н. П. Мельникова, позволили установить, что общее число аварий в 3–5 раз больше регистрируемых, в связи с чем частота аварийных разрушений РВС оценивается достаточно высоким значением – $3 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$. Согласно статистическим данным примерно половина всех зарегистрированных аварий квалифицировалась как крупные или катастрофические, 17 из которых привели к гибели 98 человек. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов наносят ущерб окружающей природной среде и приводят к значительным материальным и финансовым потерям, нарушают условия жизнедеятельности людей и производственной деятельности предприятий. Зарубежные специалисты классифицируют аварийные разрушения резервуаров с нефтью и нефтепродуктами как промышленные катастрофы, а согласно российскому законодательству они идентифицируются как чрезвычайные ситуации.

Опасность эксплуатации резервуарных парков объектов нефтепродуктообеспечения усугубляется тем обстоятельством, что в результате интенсивного градостроительства в России, особенно за последние 20–30 лет, около четверти из них оказалось в черте плотной городской застройки, а половина – располагается на возвышенных площадках по отношению к отметкам смежных объектов или имеет уклоны промплощадок в сторону дорог, рек, портов и причалов. Кроме того, в целом по России более 60% резервуаров на объектах хране-

ния и транспортировки нефти и нефтепродуктов эксплуатируется свыше 30 лет, и их износ достигает 60–80%.

Для защиты от растекания нефтепродуктов при авариях на РВС в отечественной и мировой практике применяются замкнутые земляные обвалования или ограждающие стены из негорючих материалов. Согласно действующим нормативным документам такие преграды рассчитывают только на гидростатическое давление относительно медленно вытекающего из поврежденного РВС продукта, поэтому они не могут удержать мощный поток жидкости, образующийся при квазигнновенном разрушении резервуара. Отличительными признаками такого разрушения являются: полная потеря целостности корпуса РВС, выход в течение короткого промежутка времени всей хранящейся в резервуаре жидкости в виде волны прорыва, которая характеризуется нестационарностью потока, наличием резкого фронта в виде бора (вала), достигающего значительной высоты и движущегося с большой скоростью. Волна обладает большой разрушительной силой, часто приводящей к повреждению соседних резервуаров в каре обвалования, размыву тела земляного обвалования или разрушению ограждающей стены. Даже при сохранении целостности и устойчивости нормативного ограждения через него происходит перелив значительного объема жидкости.

В последнее время для предотвращения аварийного разлива нефти и нефтепродуктов находят применение двустенные резервуары (в этом случае допускается не устраивать обвалования и ограждающие стены), а для локализации площади разлива вместо нормативных ограждений предлагается использовать защитные стены с волноотражающим козырьком. Заменить все РВС, находящиеся в эксплуатации, на двустенные резервуары не представляется возможным. Кроме того, при определенных достоинствах такие резервуары значительно дороже РВС, при их эксплуатации возможно образование горючей паровоздушной смеси в межстенном пространстве, а также имеются трудности при обслуживании основного резервуара и другие недостатки. Защитные стены с волноотражающим козырьком не рационально использовать для защиты резервуаров на нефтепромыслах, резервуарных парков небольших нефтебаз, при недостаточной несущей способности грунта, так как они представляют собой монументальные сооружения, высота которых соизмерима с высотой защищаемых резервуаров, а толщина стен у основания достигает 1,5 м и более.

В ряде нормативно-технических документов рекомендуется за нормативным ограждением на наиболее опасных направлениях устраивать дополнительные защитные преграды, служащие для сбора разлившихся жидкостей и отвода их в аварийные емкости. Параметры таких сооружений в нормативной и специальной литературе не приводятся. В связи с указанным выполнены исследования различных

дополнительных защитных преград, служащих не только для сбора разлившегося продукта, но и для удержания волны прорыва, перехлестывающей через нормативное ограждение.

Целью диссертационной работы является определение параметров рвов и защитных стен, используемых в качестве дополнительных защитных преград для ограничения разлива нефти и нефтепродуктов при разрушениях РВС в резервуарных парках с нормативными ограждениями (земляными обвалованиями и ограждающими стенами).

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ последствий разрушений РВС и требований нормативных документов по защите от разлива нефтепродуктов;

- теоретически обосновать взаимодействие волны прорыва с нормативными ограждениями и разработать программу расчета параметров процесса;

- разработать математические модели взаимодействия волны прорыва с нормативными ограждениями и дополнительными защитными преградами, лабораторные стенды и методики проведения экспериментов;

- обосновать виды дополнительных защитных преград, способных удержать волну прорыва и локализовать разлив хранимой в резервуаре жидкости в пределах заданной площади;

- разработать методические указания для размещения дополнительных защитных преград и определения их оптимальных параметров.

Объектом исследования является система: нормативное ограждение – дополнительная защитная преграда, способная удержать волну прорыва и ограничить разлив нефтепродукта при разрушении РВС.

В качестве **предмета исследования** рассматривается процесс взаимодействия образующейся при полном разрушении РВС волны прорыва с защитными преградами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснована область применения дополнительных защитных преград в резервуарных парках с нормативными ограждениями (земляными обвалованиями и ограждающими стенами) с резервуарами типа РВС вместимостью до 5000 м³, заполненных нефтью, бензином, водой, дизельным топливом и керосином.

2. Разработан алгоритм и программа расчета параметров процесса взаимодействия волны прорыва, образующейся при разрушении РВС, с вертикальной стеной ограниченной высоты. В результате обработки теоретически полученных данных установлена аппроксимационная зависимость степени перелива жидкости через вертикальную стену от безразмерных параметров.

3. Получены экспериментальные зависимости степени перелива жидкости для отдельно стоящего резервуара с нормативным ограждением (земляным обвалованием или ограждающей стеной).

4. Найдены аппроксимационные зависимости, позволяющие определять максимальные расстояния, на которые обрушится волна после взаимодействия с нормативными ограждениями.

5. Получены аппроксимационные зависимости и предложены номограммы для определения геометрических параметров дополнительных защитных преград, способных удержать в пределах защищаемой зоны волну прорыва и существенно ограничить площадь разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенных разрушениях РВС, а также мест их размещения за нормативными ограждениями (земляными обвалованиями или защитными стенами).

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы состоит в том, что предложено использовать дополнительные защитные преграды, способные локализовать весь объем пожароопасной жидкости, перелившийся через нормативное ограждение при разрушении РВС, обеспечив безопасность людей и прилегающих территорий от воздействия волны прорыва и опасных факторов пожара разлившейся жидкости, и найдены их основные конструктивные параметры.

Применение дополнительных защитных преград позволит уменьшить количество сил и средств, необходимых для ликвидации последствий гидродинамической аварии и возможного пожара при разрушении РВС.

Материалы диссертации реализованы при:

а) разработке методических указаний «Расчетное определение параметров дополнительных защитных преград для локализации разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара».

б) разработке плана по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на нефтебазе ООО «Октан-Сервис».

в) разработке лекционного материала по курсу «Пожарная безопасность технологических процессов» в Академии ГПС МЧС России.

Основные результаты работы были доложены на:

второй Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность объектов» (г. Иваново, Ивановский институт государственной противопожарной службы, 2006).

научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008)

На защиту выносятся:

- анализ статистических данных о последствиях полных разрушений РВС;

- результаты теоретического исследования процесса образования и взаимодействия волны прорыва с вертикальной стеной;
- закономерности, полученные при экспериментальных исследованиях процессов удержания волны прорыва системой защитных преград;
- виды и параметры дополнительных защитных преград, способных удержать объем жидкости, перелившейся через нормативное ограждение

Публикации: По теме диссертации опубликовано 7 научных работ.

Структура, объем работы и ее основные разделы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Содержание работы изложено на 156 страницах текста, включает в себя 12 таблиц, 93 рисунка, список использованной литературы из 103 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализированы объект и предмет исследования, показана научная новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе приводится анализ последствий полных разрушений РВС и систем защиты от растекания нефтепродуктов.

Анализ результатов наблюдений квазимгновенных разрушений РВС был произведен по материалам зарегистрированных и описанных случаев аварий и пожаров, которые произошли в резервуарных парках объектов хранения нефти и нефтепродуктов в СССР, а после его распада в России и странах СНГ за период с 1950 по 2007 гг. Согласно полученным данным, в течение исследуемого периода зарегистрировано 140 случаев квазимгновенных разрушений РВС. Произведено разбиение общей совокупности статистических данных по таким существенным количественным и атрибутивным признакам, как ведомственная принадлежность объекта, номинальная емкость резервуара, вид продукта в аварийном резервуаре и др.

Согласно имеющимся данным, доля разрушившихся резервуаров вместимостью до 5000 м³ составила 85%, 10000-20000 м³ – 12,8%, 30000 м³ и более – 2,2%.

Выявлено, что доля разрушившихся резервуаров с жидкостями, вязкость которых соизмерима с вязкостью воды (нефть, бензин, керосин, дизельное топливо) составила 59,3%, с водой – 18,6%, с мазутом и другими вязкими жидкостями – 22,1%.

При разрушении РВС волна прорыва в 45,0% случаев аварий разрушала ограждающую стену или размывала обвалование, выходя за пределы территории объекта, что приводило к катастрофическим по-

следствиям с большим материальным ущербом. В 38,6% случаев разрушений РВС поток продукта только 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 м³) или при частичном (до 2/3 высоты) заполнении РВС больших объемов. Остальные 16,4% случаев приходится на разлив продукта в каре защитного обвалования, при небольшом уровне заполнения (менее 1/5 высоты) РВС, разрушившихся, как правило, при взрыве паровоздушной смеси в резервуаре.

Проведенный анализ требований нормативных документов показал, что для защиты от растекания нефтепродуктов при авариях на РВС в отечественной и мировой практике применяются замкнутые земляные обвалования или ограждающие стены из негорючих материалов. Согласно действующим нормативным документам такие ограждения рассчитывают только на гидростатическое давление, а их высоту определяют исходя из равенства объема жидкости, хранимого в РВС, и объема, заключенного внутри обвалования. Поэтому земляные обвалования и ограждающие стены, как показывает практика, не удерживают мощный поток жидкости, образующийся при квазимгновеном разрушении резервуара. Даже при сохранении целостности и устойчивости нормативного ограждения через него происходит перелив значительного объема жидкости. В связи с этим за нормативным ограждением на наиболее опасных направлениях рекомендуется устраивать дополнительные защитные преграды, служащие для удержания волны, сбора разлившегося продукта и отвода его в аварийную емкость. Параметры таких сооружений в нормативной и специальной литературе не приводятся.

Согласно нормативным документам для предотвращения распространения пожара на соседние объекты между ними и резервуарным парком устраивают противопожарные разрывы. Анализ требований, предъявляемых к противопожарным разрывам, показал, что их размеры в несколько раз меньше радиуса зоны возможного поражения волной прорыва, возникающей при разрушении РВС. Это обстоятельство не позволяет предотвратить поражение волной прорыва соседние объекты, а увеличение противопожарных разрывов до сотен метров нерационально.

Таким образом, применяемые системы защиты от растекания нефтепродуктов являются малоэффективными при квазимгновенных разрушениях РВС. Одним из способов предотвращения проявления негативных социальных, экономических и экологических последствий аварий такого рода в резервуарных парках с нормативными ограждениями можно считать применение дополнительных защитных пре-

град, способных ограничить разлив нефти или нефтепродукта, вышедшего за пределы нормативного ограждения.

Во второй главе приводится обзор исследований образования волны прорыва, ее распространения и взаимодействия с защитными преградами различной конфигурации. В рассмотренных работах содержится постановка задачи, начальные и граничные условия, указывается на метод численного решения, а также интерпретируются результаты единичных расчетов, что не позволяет использовать эти материалы для оценки взаимодействия волны прорыва с нормативными защитными ограждениями в достаточно широком диапазоне a/H_p , D_p/H_p и L/H_p (здесь a – высота защитной преграды, H_p – уровень разлива жидкости в резервуаре, D_p – диаметр резервуара, L – расстояние от стенки резервуара до защитной преграды). В связи с этим возникла необходимость разработки алгоритма решения задачи о взаимодействии волны прорыва с защитной преградой.

Рассматривалась плоская одномерная задача: между двумя створами $x = -r$; 0 имеется канал, заполненный жидкостью с постоянной глубиной H_p (рис. 1). На расстоянии $x=L$ расположена вертикальная стена высоты a . В начальный момент времени $t=0$ створ канала с координатой $x=0$ мгновенно разрушается и покоящаяся до этого жидкость приходит в движение в направлении вертикальной стены. Необходимо определить степень перелива (долю жидкости, которая выйдет за пределы преграды при разрушении резервуара).

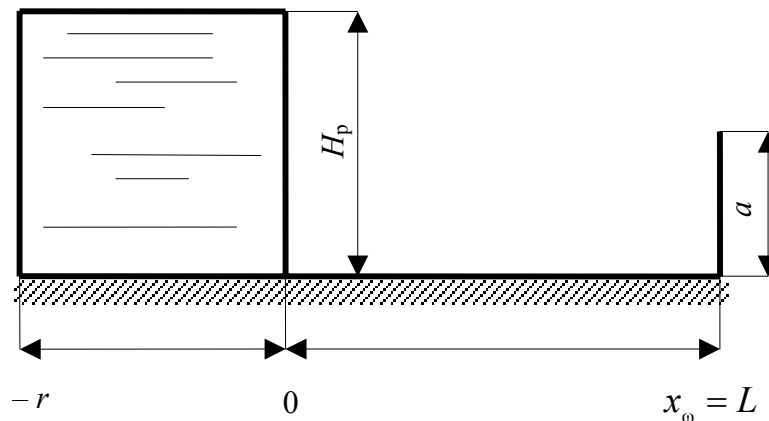


Рис. 1. Схема резервуара и вертикальной стены нормативной высоты

Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение жидкости, имеет вид:

$$\begin{cases} 2\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x}\right) + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где u – осредненная скорость потока по глубине; $c = \sqrt{gh}$ – местная

скорость звука; g – ускорение свободного падения; h – глубина потока; x – координата; t – время.

При решении задачи приняты следующие допущения:

- рассматривается одномерная задача;
- движение происходит в канале прямоугольного сечения;
- время разрушения резервуара много меньше характерного времени движения волны прорыва до обвалования;
- жидкость является невязкой;
- трение жидкости о подстилающую поверхность отсутствует;
- поверхность канала является плоской;
- уклон канала постоянен и равен нулю.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} -r \leq x \leq 0 \quad & u(x;0) = 0; \\ & c(x;0) = \sqrt{gH_p}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 0 < x \leq L \quad & u(x;0) = 0; \\ & c(x;0) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничное условие на вертикальной стене ($x = L$):

$$u = \frac{(c^2 - c_0^2)^{3/2}}{c^2} H(c - c_0), \quad (4)$$

где $c_0 = \sqrt{ga}$, $H(c - c_0)$ – функция Хэвисайда, которая использовалась для включения различных граничных условий в одну формулу:

$$H(c - c_0) = \begin{cases} 1, & (c - c_0) > 0; \\ 0, & (c - c_0) \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Граничное условие на левом створе канала ($x = -r$):

$$u = 0. \quad (6)$$

Для решения данной задачи разработан алгоритм расчета, в основу которого был положен метод характеристик с фиксированным шагом сетки по времени (схема Хартри). Сущность метода сводится к решению уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u + c; \\ u + 2c &= const; \\ \frac{dx}{dt} &= u - c; \\ u - 2c &= const. \end{aligned} \quad (7)$$

Состояние перед разрывом (u_f, c_f) и за разрывом (u_b, c_b) удовлетворяют уравнению ударной адиабаты:

$$u_b - u_f = -\frac{c_f}{\sqrt{2}} \left(\frac{c_b^2}{c_f^2} - 1 \right) \sqrt{1 + \frac{c_f^2}{c_b^2}}. \quad (8)$$

Скорость распространения ударной волны записывали в виде:

$$U = u_f - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{c_b^2}{c_f} \sqrt{1 + \frac{c_f^2}{c_b^2}}. \quad (9)$$

Степень перелива определяли по выражению:

$$z = \frac{H_p}{r} \int_0^T u_\omega(t) c_\omega^2(t) dt, \quad (10)$$

где u_ω и c_ω – соответственно осредненная скорость потока и местная скорость звука над вертикальной стеной.

Программа написана на языке *Turbo Pascal* (версия 7.0) и позволяет определять значения степени перелива, максимального подъема жидкости на стену, а также выводить графики местной скорости звука, осредненной скорости потока и его глубины в режиме реального времени. Аналитическое уточнение параметров потока на вертикальной стене для малого промежутка времени после взаимодействия жидкости с преградой проводилось с помощью программы *Mathcad* (версия 13). Правильность получаемых результатов оценивалась по графикам изменения параметров процесса в зависимости от координаты и времени.

На рис. 2–8 представлены графики расчета параметров потока для РВС-2000 с ограждающей стеной нормативной высоты, равной 2,4 м и расположенной на расстоянии 9,0 м от стенки резервуара. График осредненной скорости потока более темный по отношению к графику местной скорости звука. График глубины потока является верхней границей заштрихованной площади.

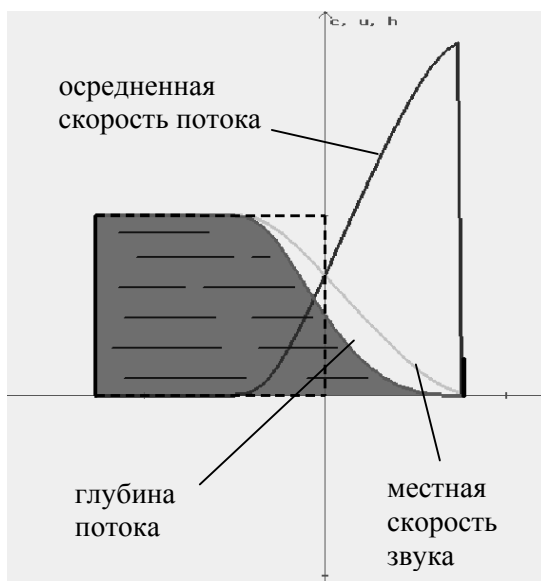


Рис. 2. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 0,375

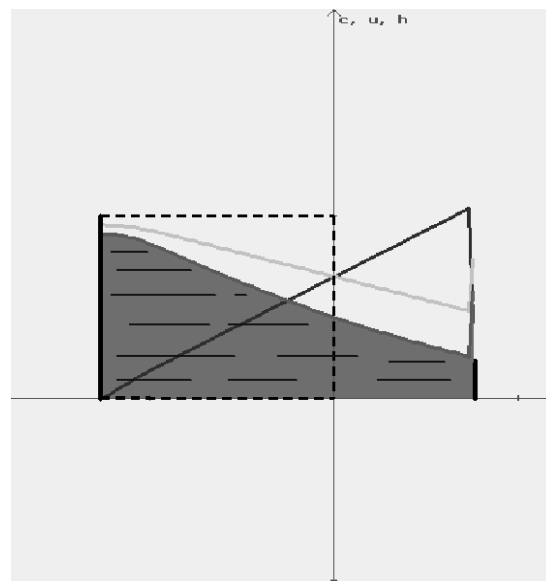


Рис. 3. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 1,2

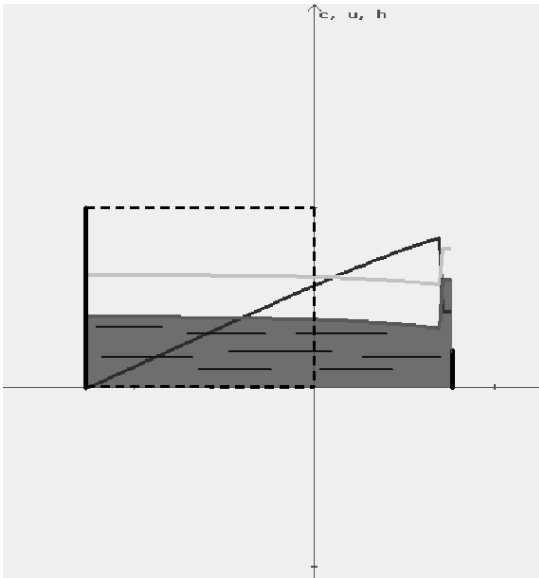


Рис. 4. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 2,4

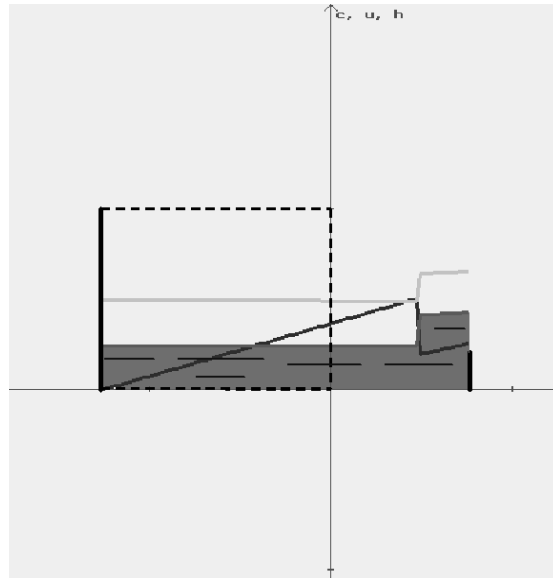


Рис. 5. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 3,6

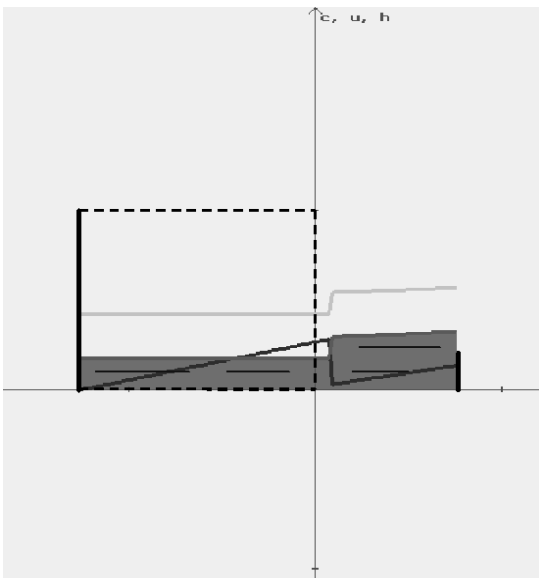


Рис. 6. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 4,8

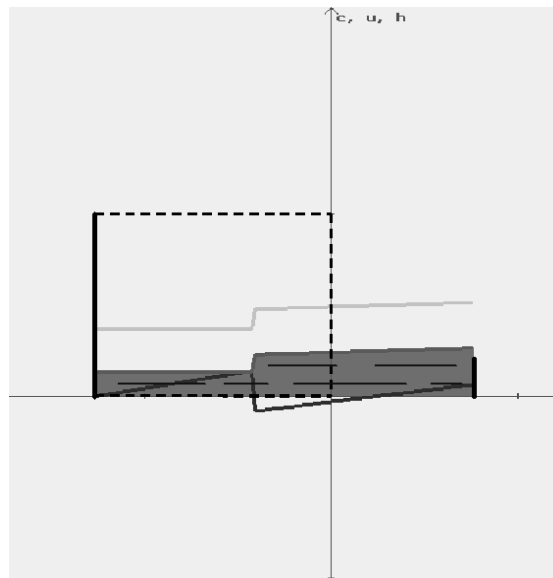


Рис. 7. Безразмерное время с момента разрушения резервуара 6,0

Степень перелива через вертикальную стену для рассмотренного случая равна 0,6654, т.е. почти 1380 м^3 жидкости при данной высоте преграды выйдет за пределы нормативного ограждения (расчетной области).

При расчете гидродинамической нагрузки на вертикальные стены необходимо знать распределение осредненных скоростей в потоке. В рассмотренных литературных источниках эти данные отсутствуют в явном виде, хотя и используются при расчетах. Разрабатывая программу взаимодействия волны прорыва с защитной преградой, было учтено это обстоятельство: графики и значения осредненной скорости потока могут быть выведены на монитор и печать.

Анализ результатов расчетов позволил сделать следующие выводы:

- в исследуемом диапазоне изменения параметров высота вертикальной стены, необходимой для полного удержания жидкости в пределах защищаемой зоны, сравнима с высотой уровня жидкости в резервуаре;

- положительные значения осредненной скорости потока в области за ударной волной характеризуют нарастание уровня жидкости на стене;

- отрицательные значения осредненной скорости потока в области за ударной волной характеризуют понижение уровня на стене и движение жидкости обратно к резервуару;

- по мере увеличения высоты стены скорость распространения ударной волны также увеличивается, что обусловлено ростом разности параметров потока за и перед ударной волной.

В третьей главе проводятся данные по экспериментальному исследованию системы: нормативное ограждение – дополнительное защитное сооружение.

Анализ критериев подобия процессов взаимодействия волны прорыва с защитными преградами показал, что при создании модельных стендов для воспроизведения волны прорыва и нахождения параметров дополнительных защитных преград необходимо обеспечить только геометрическое подобие моделей и природы, соблюдая постоянное отношение между линейными размерами всех величин. В качестве рабочей жидкости при проведении экспериментов использовали воду.

Для определения доли жидкости, вышедшей за пределы нормативного ограждения, была изготовлена модель резервуара РВС-1000 в масштабе 1:50. Для уточнения параметров дополнительных защитных преград была использована имеющаяся модель РВС-2000 в масштабе 1:30.

Боковая поверхность экспериментальных резервуаров (стенка) представляла собой два полуцилиндра 1, соединенных между собой поворотным механизмом 2, который обеспечивал их раскрытие на 180° (рис. 8). Разъемное устройство 3 воспроизводило разрушение резервуара по вертикальной образующей корпуса модели. В собранном виде элементы резервуара образовывали замкнутую цилиндрическую оболочку, установленную на подставку 4 и скрепленную с ней косыной поворотного механизма.

Экспериментальные резервуары, предназначенные для гидродинамических опытов (многократного воспроизведения процессов и явлений, имеющих место при разрушении РВС) обеспечивали:

- а) герметичность конструкции при заполнении ее жидкостью;

- б) имитацию разрушения РВС по вертикальному шву со свободным раскрытием стенок под действием напора жидкости на 180° ;
- в) образование волны прорыва и ее взаимодействие с защитными преградами.

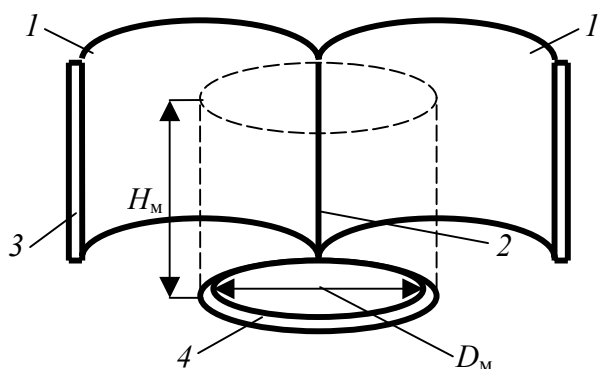


Рис. 8. Принципиальная схема модели РВС-1000

На различных расстояниях от макета резервуара устанавливали защитную преграду нормативной высоты, моделирующую вертикальную стену или трапециевидное обвалование с углом откоса 45° . В качестве дополнительных защитных преград рассматривали рвы различной конфигурации и вертикальные стены. Схемы проведения экспериментов представлены на рис. 9–14:

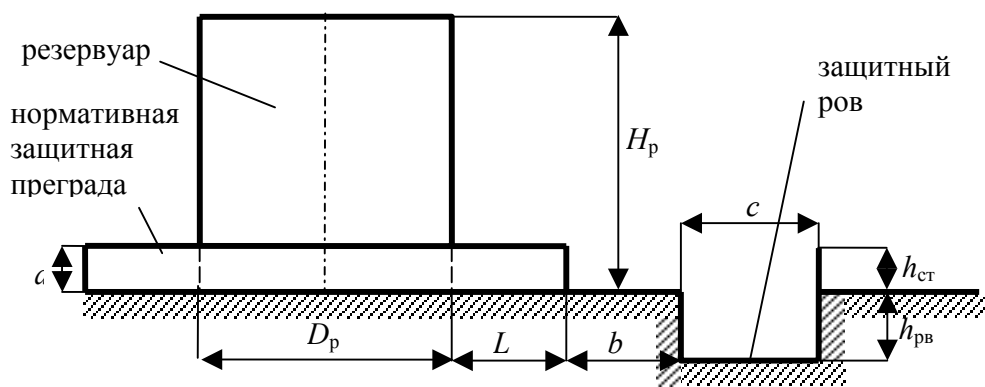


Рис. 9. Схема проведения экспериментов серии А

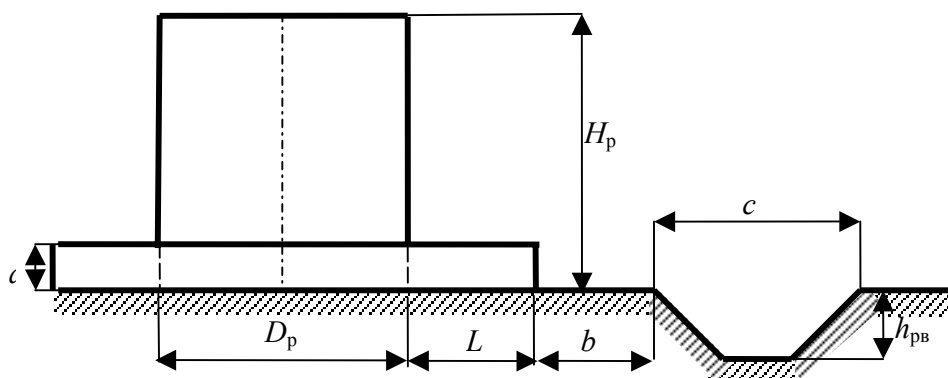


Рис. 10. Схема проведения экспериментов серии Б

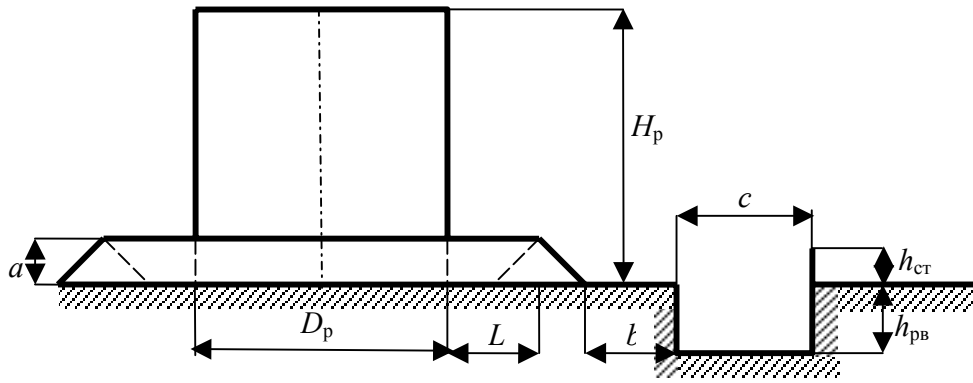


Рис. 11. Схема проведения экспериментов серии В

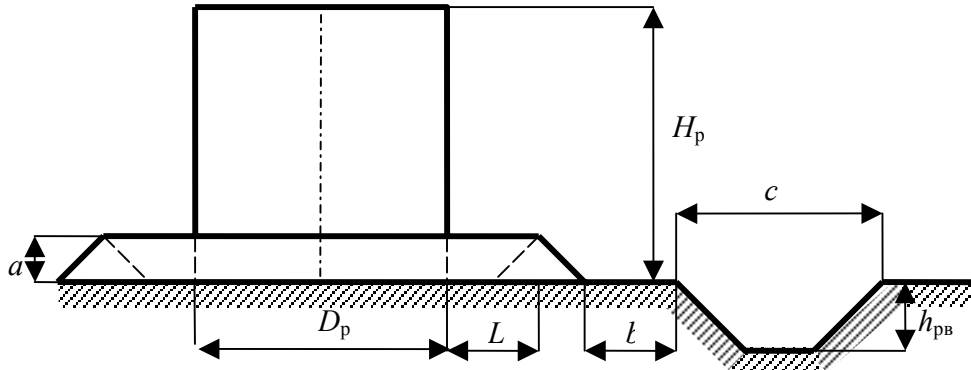


Рис. 12. Схема проведения экспериментов серии Г

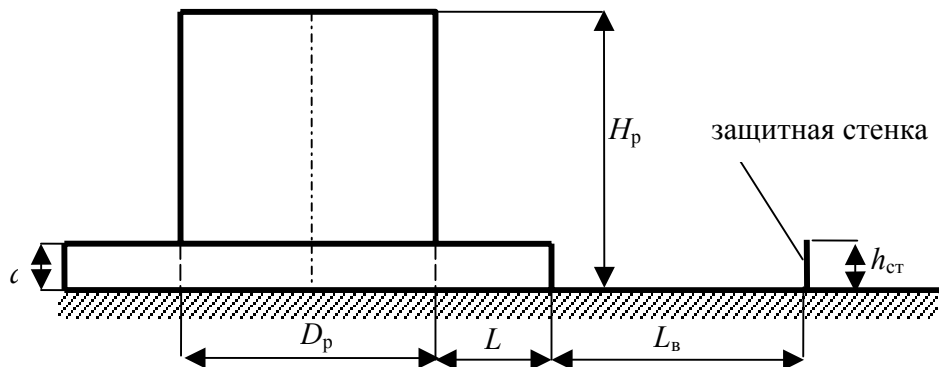


Рис. 13. Схема проведения экспериментов серии Д

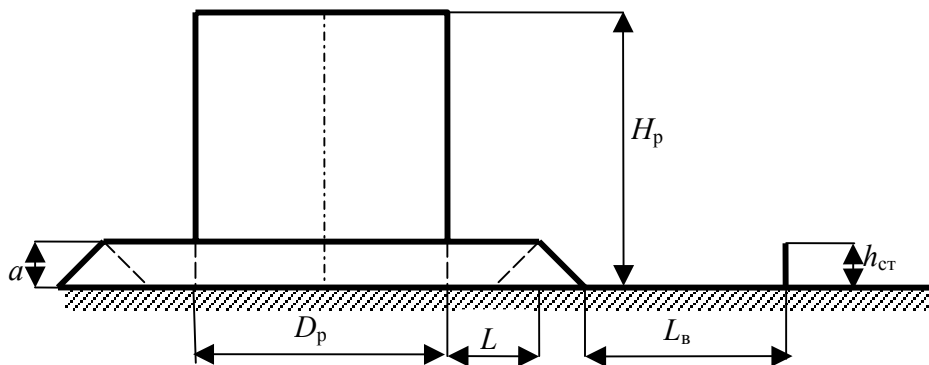


Рис. 14. Схема проведения экспериментов серии Е

где: D_p – диаметр модельного резервуара; H_p – уровень жидкости в модельном резервуаре; L – расстояние от резервуара до нормативного ограждения; a – высота ограждения; b – расстояние от ограждения до переднего откоса рва; c – ширина рва; $h_{рв}$ – глубина рва; $h_{ст}$ – высота

дополнительной защитной стены; L_B – максимальное расстояние, на которое обрушится волна.

Примечание: первоначально эксперименты серий А и В проводились без установки вертикальной стенки на противоположном откосе рва.

Модель резервуара заполняли определенным объемом воды, постоянным для всех экспериментов конкретной серии и имитировали разрушение стенки резервуара. Каждый эксперимент повторялся не менее трех раз с фиксацией процесса цифровой видеокамерой.

Параметры, определяемые в ходе проведения экспериментов:

- степень перелива жидкости через нормативное ограждение;
- максимальное расстояние, на которое обрушится волна после взаимодействия с нормативным ограждением;
- геометрические параметры дополнительных защитных преград для полного удержания потока жидкости, перелившегося через нормативное ограждение.

Максимальная относительная погрешность проведения экспериментов не превышала 28%.

В результате проведения экспериментов:

- определена степень перелива жидкости через нормативное ограждение при разрушении резервуара. Выявлено, что степень перелива существенно зависит от вида ограждения, его высоты и слабо зависит от расстояния, на котором оно установлено от резервуара;
- определено максимальное расстояние, на которое обрушивается волна после взаимодействия с нормативным ограждением. Это расстояние зависит от вида ограждения, его высоты, а также от расстояния, на котором оно установлено от резервуара;
- в качестве дополнительных защитных преград предлагается использовать рвы трапецеидального сечения с вертикальным откосом ($h_{ст}=0$), вертикальные стены ($h_{рв}=0$), а также их комбинацию (рис. 15).

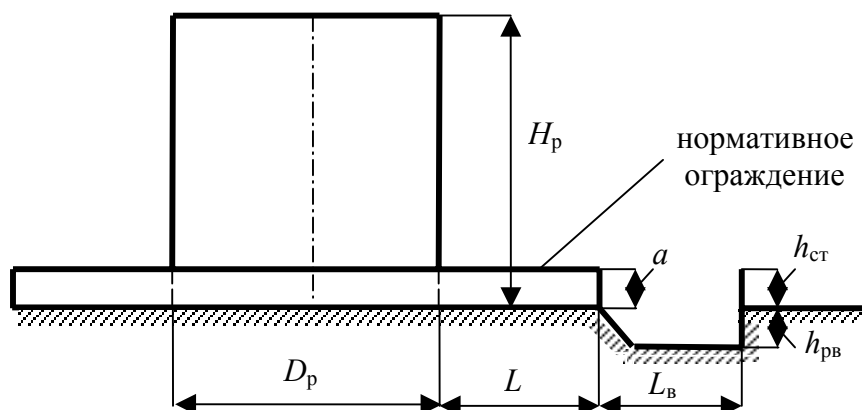


Рис. 15. Общая принципиальная схема дополнительных защитных преград

- применение рвов трапецеидального сечения (рис. 10, 12) в зоне действия гидродинамической волны является неэффективным защитным мероприятием.

В четвертой главе приведены результаты обработки и анализа теоретически и экспериментально полученных данных, результаты натурального эксперимента, а также приведена методика определения геометрических параметров дополнительных защитных преград. Аппроксимация результатов исследований проводилась с помощью программы *STATGRAPHICS* (версия 5.1).

Для приведения результатов компьютерного моделирования к инженерному уровню были аппроксимированы полученные данные по степени перелива жидкости через вертикальную стену. Рассмотрено 72 варианта, учитывающих весь модельный ряд РВС и всю область применения защитных преград. Среднее время расчета одного варианта составило 40 мин, общее время – 48 ч.

Безразмерными параметрами в теоретической модели процесса взаимодействия волны прорыва с защитной преградой являются отношения a/H_p , r/H_p , L/H_p , где r – приведенный диаметр, рассчитываемый по формуле: $r = \sqrt{\pi D_p} / 2$.

Исследуемый диапазон изменения параметров составил:

$$\begin{aligned} 0 &\leq a/H_p \leq 0,8; \\ 0,8085 &\leq r/H_p \leq 3,1458; \\ 1,0 &\leq L/H_p \leq 2,8. \end{aligned}$$

Результаты обработки данных показали, что параметры r/H_p и L/H_p в разработанной математической модели являются незначимыми.

Полученная зависимость для определения степени перелива имеет вид:

$$z = 1 - 1,204 a / H_p, \quad (11)$$

Статистические характеристики:

$$R^2 = 97,7\%; F_{кр} = 3,96; F_m = 3792,27; \Delta = 0,085,$$

где R^2 – величина достоверности аппроксимации; $F_{кр}$ – критическое значение F -критерия Фишера; F_m – значения F -критерия Фишера в модели; Δ – доверительный интервал при уровне значимости $\alpha=5\%$.

Графическая интерпретация результатов теоретического исследования представлена на рис. 16.

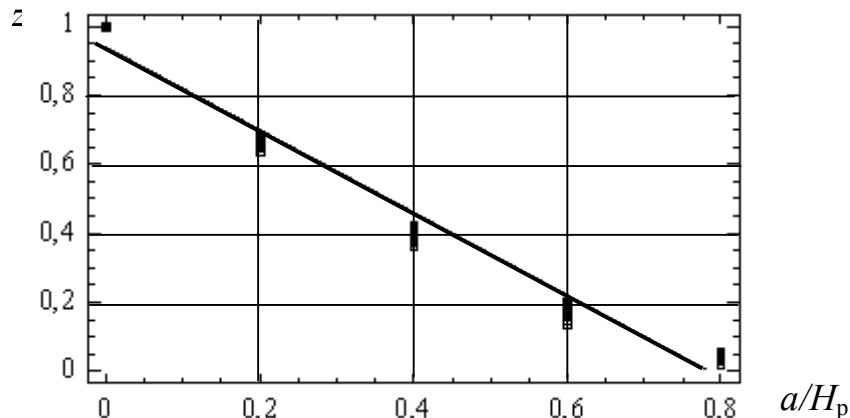


Рис. 16. Зависимость степени перелива от высоты вертикальной стены

Для использования результатов экспериментального исследования на практике был проведен регрессионный анализ опытных данных, и введены некоторые ограничения по области применения полученных аппроксимационных выражений.

При проведении экспериментов в качестве рабочей жидкости использовали воду. Сравнение теоретически полученных данных с экспериментальными проводилось также для воды. Вязкости нефтепродуктов, хранимых в РВС, изменяются в широком диапазоне и зависят не только от их видов, но и от температуры. В связи с невозможностью моделирования вязкости при проведении экспериментов представленные выше аппроксимационные зависимости могут быть распространены только на бензин, керосин, дизельное топливо и нефть, а также иные жидкости, вязкость которых находится в диапазоне:

$$0,5 \cdot 10^{-6} \leq \nu \leq 2,0 \cdot 10^{-6},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости нефтепродукта, $\text{м}^2/\text{с}$.

Так как экспериментальные данные по определению степени перелива, максимального расстояния, на которое обрушится волна, и геометрических параметров дополнительных защитных преград были получены на моделях РВС-1000 и РВС-2000 область применения приведенных выше аппроксимационных выражений по параметру D_p/H_p ограничивается диапазоном:

$$0,87 \leq D_p/H_p \leq 1,58.$$

Диапазон изменения параметров, варьируемых при проведении экспериментов, составил:

$$0,1 \leq a/H_p \leq 0,25;$$

$$0,4 \leq L/D_p \leq 1,0;$$

Учитывая принятые допущения и погрешности, а также другие неучтенные при проведении экспериментов обстоятельства, которые могут повлиять на движение волны прорыва (например, влияние соседних резервуаров в каре обвалования), в полученные аппроксимационные зависимости был введен коэффициент запаса надежности:

$$k = 2(E + \Delta), \quad (12)$$

где E – доверительный интервал, учитывающий случайную и систематическую погрешности проведения экспериментов; Δ – доверительный интервал аппроксимации экспериментальных данных для одностороннего теста. Доверительные интервалы в работе определялись при уровне значимости $\alpha=5\%$.

Полученные уравнения с учетом коэффициента запаса надежности, номограммы, величины достоверности аппроксимации R^2 , критические значения F -критерия Фишера $F_{кр}$, значения F -критерия Фишера в моделях F_m , а также доверительных интервалов аппроксимации экспериментальных данных Δ представлены ниже.

Степень перелива жидкости через нормативное ограждение:

- для нормативной вертикальной стены:

$$z = -k_1 - m_1 \ln(a/H_p) - n_1 \ln(L/D_p); \quad (13)$$

$R^2 = 99,3\%$; $F_{кр} = 3,96$; $F_m = 1194,75$; $\Delta = 0,014$.

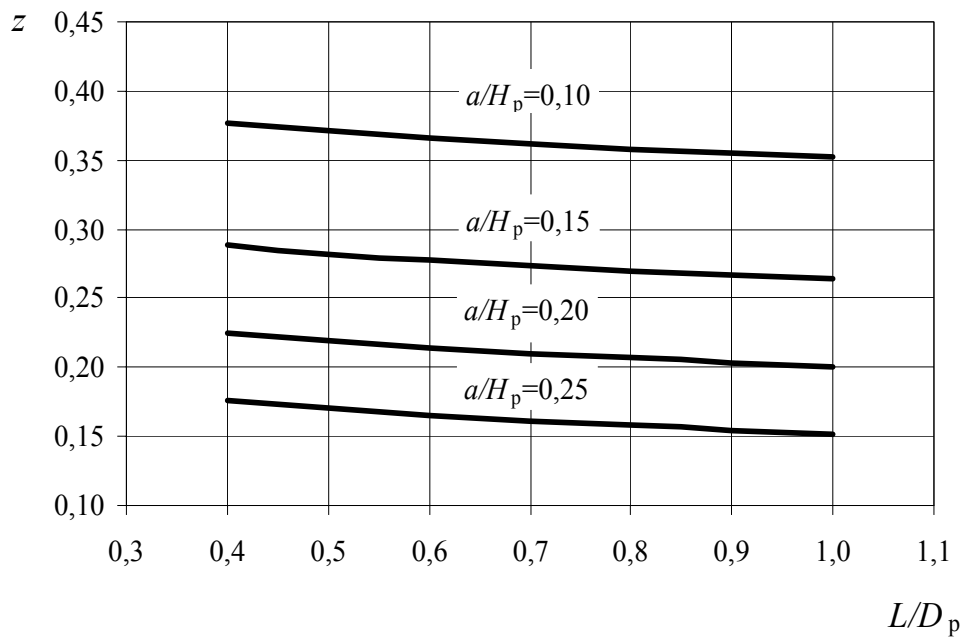


Рис. 17. Номограмма для определения степени перелива жидкости через нормативную вертикальную стену

- для нормативного трапецеидального обвалования:

$$z = -k_2 - m_2 \ln(a/H_p) - n_2 \ln(L/D_p); \quad (14)$$

$R^2 = 99,6\%$; $F_{кр} = 3,59$; $F_m = 2275,87$; $\Delta = 0,007$.

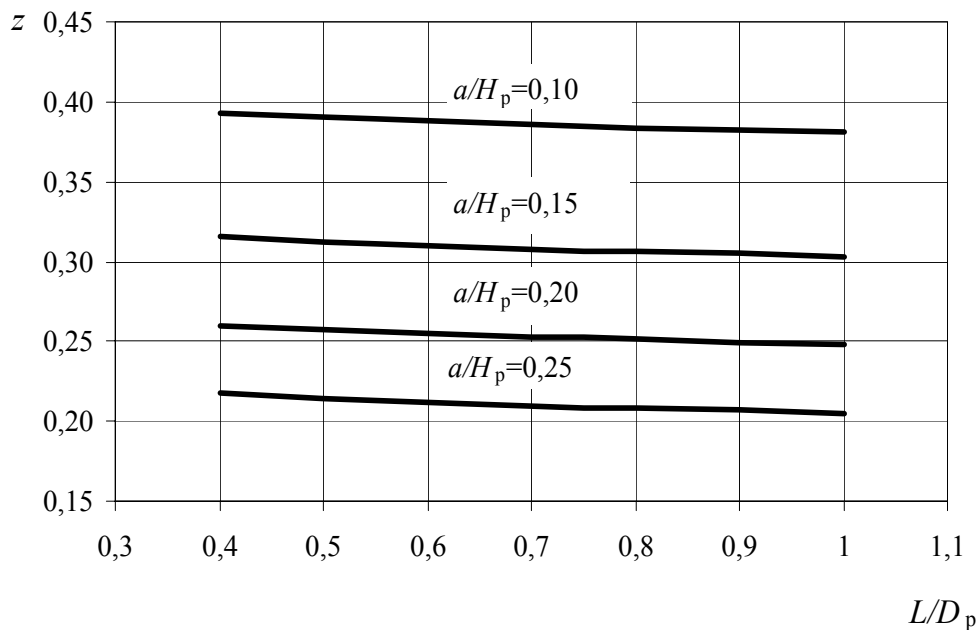


Рис. 18. Номограмма для определения степени перелива жидкости через нормативное трапецеидальное обвалование

Максимальное расстояние, на которое обрушится волна после взаимодействия с нормативным ограждением:

- для нормативной вертикальной стены:

$$L_B/D_p = -k_3 - m_3 \ln(a/H_p) - n_3 \ln(L/D_p); \quad (15)$$

$R^2 = 96,3\%; F_{кр} = 3,59; F_m = 221,29; \Delta = 0,012.$

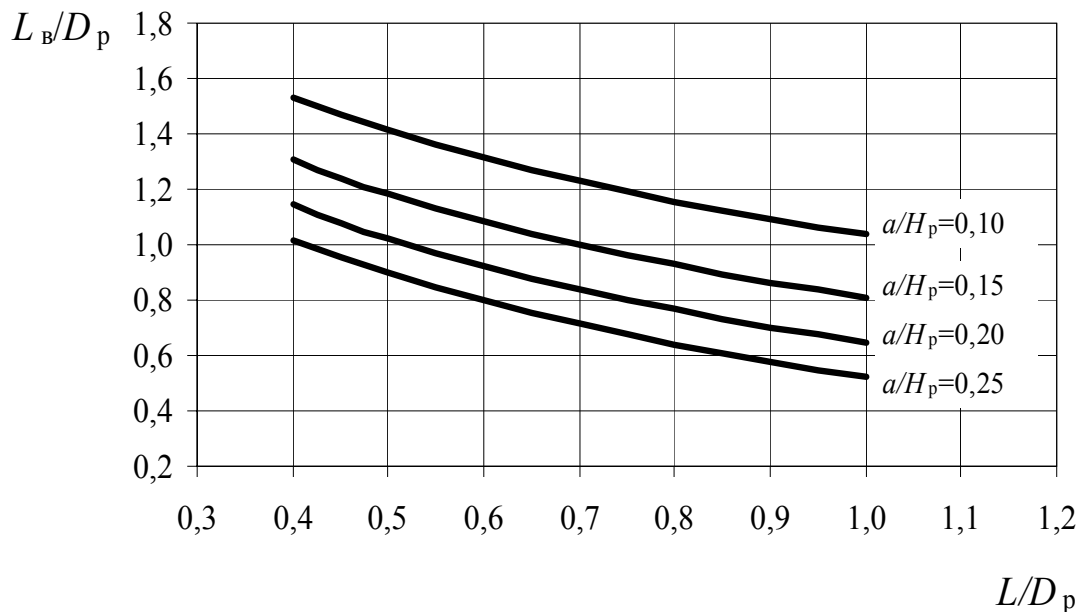


Рис. 19. Номограмма для определения максимального расстояния, на которое обрушится волна, при нормативной вертикальной стене

- для нормативного трапецеидального обвалования:

$$L_B/D_p = k_4 - m_4 (a/H_p)^p - n_4 (L/D_p)^q. \quad (16)$$

$R^2 = 90,1\%; F_{кр} = 3,59; F_m = 77,78; \Delta = 0,064.$

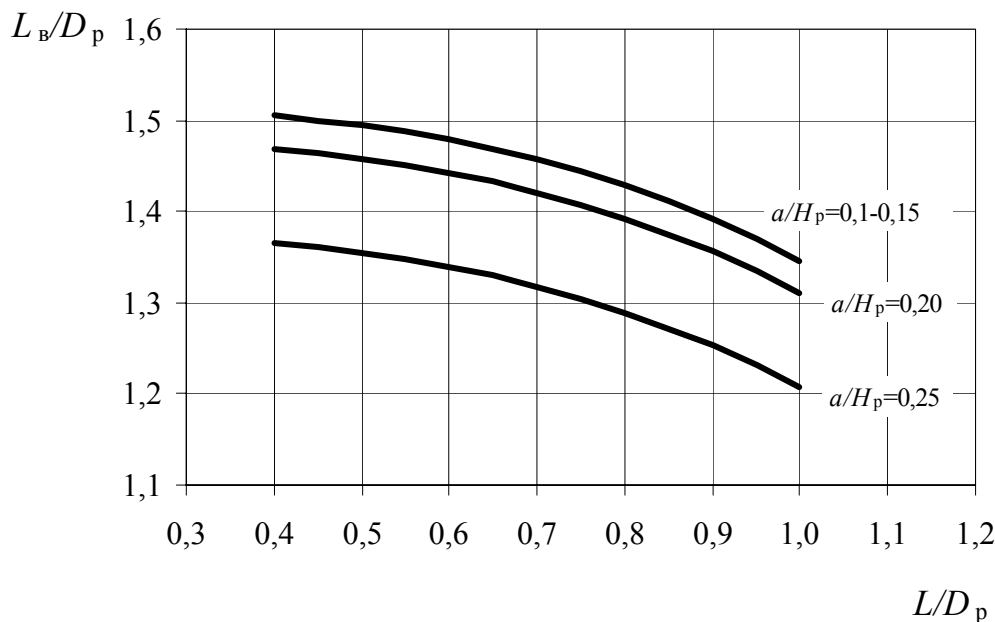


Рис. 20. Номограмма для определения максимального расстояния, на которое обрушится волна, при нормативном трапецеидальном обваловании

В формулах 13–16 k_i, m_i, n_i, p и q – константы уравнений регрессии.

Высота вертикального откоса рва и вертикальной стены:

$$h_{ст}/H_p = 0,272 - 0,781(h_{рв}/H_p). \quad (17)$$

$R^2 = 98,6\%$; $F_{кр} = 7,71$; $F_m = 275,80$; $\Delta = 0,022$.

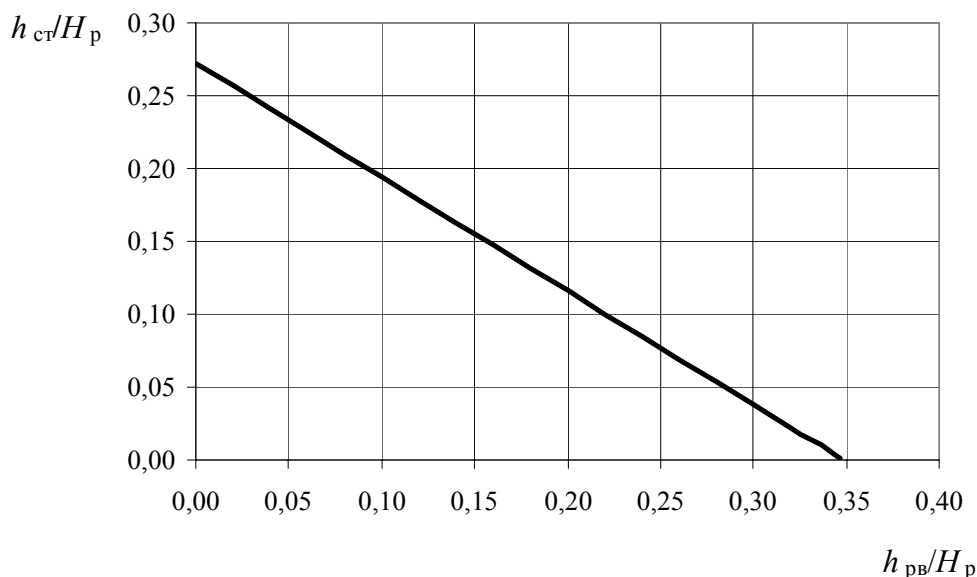


Рис. 21. Влияние глубины рва на высоту стены

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований по степени перелива жидкости через нормативные ограждения показало, что теоретически полученные данные имеют завышенные значения, что объясняется допущениями, принятыми при разработке математической модели. Одно из наиболее существенных допущений: математическая модель описывает разрушение стенки хранилища жидкости, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с распространением волны прорыва в канале прямоугольного сечения, ширина которого равна ширине разрушившейся стенки. Таким образом, результаты теоретического исследования могут быть использованы для прогнозирования обстановки при разрушении резервуаров любой вместимости, но необходимо иметь в виду, что степень перелива жидкости будет завышена.

Натурный эксперимент по разрушению резервуара был проведен в июле 2004 г. на нефтебазе в Липецкой области, где был подвергнут разрушению один из восьми однотипных резервуаров РВС № 8 (номинальный объем 700 м^3 ; $D_p=10,4 \text{ м}$; $H_p=9 \text{ м}$), полностью заполненный водой. Для оценки наиболее опасных последствий взаимодействия волны прорыва с нормативной защитной преградой разрушение РВС-700 произвели со стороны земляного обвалования резервуарного парка. На рис. 22 представлена обстановка в резервуарном парке нефтебазы с указанием площади разлива жидкости после разрушения РВС.

Результаты натурного эксперимента подтвердили характер взаимодействия образовавшегося потока жидкости с земляным обвалованием. Значительный объем жидкости перехлестнул через обвалова-

ние, частично размыв его гребень и растеся на прилегающей территории. Кроме того, были повреждены и сдвинуты с фундамента соседние резервуары. Необходимо отметить, что разлив жидкости при разрушении резервуара на завершающем этапе был существенно ограничен расположенными в непосредственной близости естественными оврагами глубиной от 2,5 до 7,0 м, что привело к снижению фактической площади разлива.

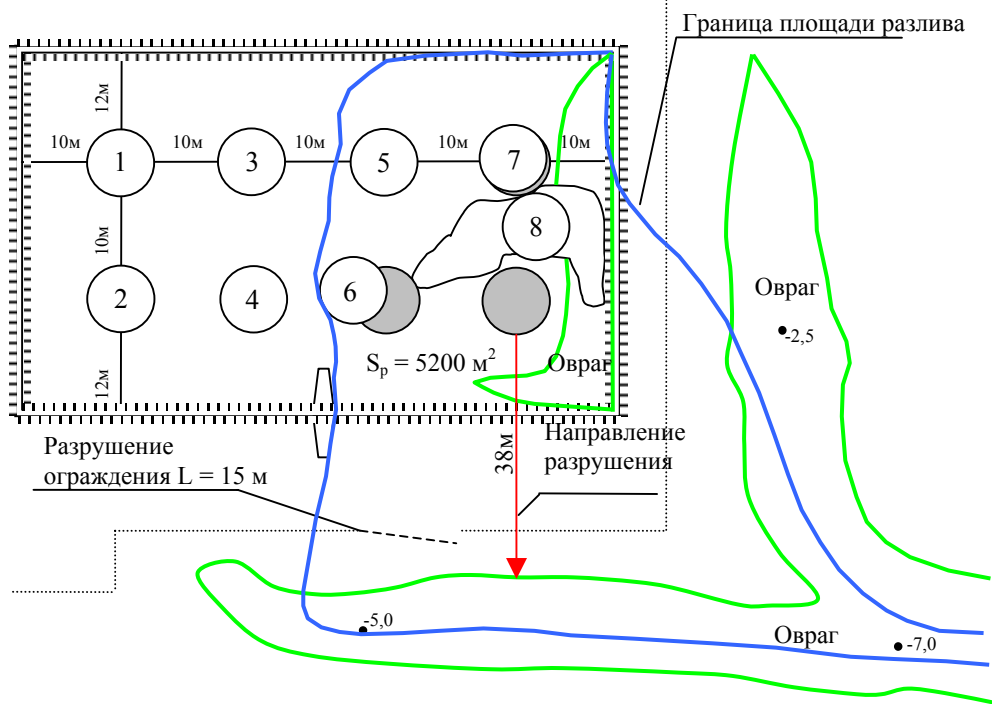


Рис. 22. Обстановка на нефтебазе после разрушения РВС № 8

Для оценки возможности использования результатов экспериментальных исследований на натуральных объектах можно сравнить максимальное расстояние, на которые обрушивается волна, в натурном эксперименте с рассчитанным расстоянием по формуле (17). В натурном эксперименте расстояние составило 10 м, а рассчитанное по формуле (17) – 10,55 м. Относительное расхождение результатов – 5,5%.

Таким образом, проведенные на экспериментальных стендах опыты удовлетворительно моделирует процессы разрушения резервуара и взаимодействия волны прорыва с защитными преградами.

Найденные закономерности использованы при разработке методических указаний «Расчетное определение параметров дополнительных защитных преград для локализации разлива нефти и нефтепродуктов при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара».

В приложении представлены акты внедрения, алгоритм расчета и текст программы, описывающей движение волны прорыва и ее взаимодействие с вертикальной стеной ограниченной высоты, приво-

дятся файлы обработки теоретически и экспериментально полученных данных.

ВЫВОДЫ

1. Анализ статистики и собранные данные по разрушениям РВС свидетельствуют, что гидродинамические аварии в резервуарных парках продолжают иметь место, а их последствия часто носят катастрофический характер.

2. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что применяемые нормативные ограждения (обвалования, стены) не удерживают в пределах защищаемой территории значительную часть жидкости, выходящую из аварийного РВС, а противопожарные разрывы между резервуарными парками и соседними объектами в несколько раз меньше протяженности зон возможного поражения волной прорыва.

3. На основании известных теоретических положений о неустановившемся быстро изменяющемся движении жидкости, разработан алгоритм расчета и создан программный продукт, описывающий процесс взаимодействия волны прорыва, возникающей при разрушении резервуара, с вертикальной стеной ограниченной высоты. Программа позволяет выводить графики местной скорости звука, осредненной скорости потока и его глубины в режиме реального времени, а также определять степень перелива жидкости через вертикальную стену и высоту стены, необходимую для полного удержания жидкости.

4. Разработаны лабораторные стенды и методики проведения экспериментальных исследований на основе анализа критериев подобия, полученных в результате физического и математического моделирования процессов взаимодействия волны прорыва с защитными преградами.

5. По результатам проведенных экспериментов найдены наиболее эффективные конфигурации дополнительных защитных преград, способных ограничить площадь разлива жидкости, перехлестнувшей через нормативное ограждение. Экспериментально определены их геометрические параметры.

6. Получены регрессионные математические модели для определения теоретической и экспериментальной степени перелива жидкости через нормативные ограждения, а также определения геометрических параметров дополнительных защитных преград.

7. Разработаны методические указания по определению параметров дополнительных защитных преград в резервуарных парках с нормативными ограждениями (земляными обвалованиями и ограждающими стенами).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Горячев С.А., Горячева М.Н., Швырков С.А., Воробьев В.В. Оценка рисков в резервуарном парке при квазимгновенном разрушении стального вертикального резервуара // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2005. – Вып. 7. – С. 7-8.

2. Швырков С.А., Горячев С.А., Швырков А.Н., Прохоров Ю.П., Воробьев В.В., Батманов С.В. Прогнозирование площади разлива нефтепродукта при квазимгновенном разрушении резервуара // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2005. – Вып. 7. – С. 8-12.

3. Швырков С.А., Горячев С.А., Швырков А.Н., Батманов С.В., Воробьев В.В. Прогнозирование площади пожара разлива жидкости при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара. Пожарная и аварийная безопасность объектов: Материалы II Международной науч.-практ. конф. – Иваново: Ивановский институт государственной противопожарной службы, 2006. С. 85-88.

4. Швырков С.А., Горячев С.А., Сорокоумов В.П., Батманов С.В., Воробьев В.В., Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – том 16. № 6. – С. 48-52.

5. Воробьев В.В., Горячев С.А., Швырков С.А. Определение параметров дополнительных защитных преград, предназначенных для ограничения разлива нефтепродукта при внезапном разрушении РВС // Охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. № 4. – С. 8-10.

6. Воробьев В.В. Применение дополнительных защитных преград для ограничения разлива нефтепродукта при квазимгновенном разрушении РВС. Актуальные проблемы пожарной безопасности. Материалы международной науч.-практ. конф; ч. 1. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. С. 248-251.

7. Воробьев В.В. Экспериментальные исследования дополнительных защитных преград для ограничения разлива нефтепродуктов при внезапных разрушениях резервуаров // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2008. – №2. – <http://ipb.mos.ru/ttb>

Академия ГПС МЧС России. Тираж 100 экз. Заказ №258.