

# **"Оценка инженерной обстановки в условиях чрезвычайной ситуации"**

## **Методическая разработка для студентов всех специальностей дневной формы обучения**

Составители: В. А. Горишний, В. В. Волков, В. Б. Чернецов, Л.Н.Борисенко.

Методическая разработка написана в соответствии с требованиями программы обучения студентов вузов по дисциплине "Безопасность жизнедеятельности" (раздел 3. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях).

Рассмотрены такие стихийные бедствия, как землетрясения, наводнения и их характеристики, последствия, зоны ЧС, а также пожаро- и взрывоопасные объекты. Даны методики оценки инженерной обстановки в условиях таких чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Предназначена для студентов вузов и может быть полезной для преподавателей и руководителей объектов, управлений, отделов ГОЧС.

### **Введение**

Территория России подвержена воздействию практически всего спектра опасных природных явлений и процессов, т.е. стихийных бедствий. Наибольшую опасность из них представляют наводнения, землетрясения, сели, оползни и др. За последние 15 лет в РФ от ЧС природного происхождения погибло 3500 человек, пострадало 270 000 чел. Общий материальный ущерб составил 6-7% внутреннего валового продукта (ВВП) [10]. В 2003 г. в РФ зафиксировано 286 ЧС природного характера, в которых погибло 18 чел., пострадало 8971 чел. [1]. В 2002 г. почти два месяца из-за наводнения длилось катастрофическое затопление в Краснодарском крае и Республике Адыгея, где пострадало соответственно 285000 чел. и 150000 чел. В сентябре 2002 г. случилась катастрофа в Кармадонском ущелье: селевой поток, образовавшийся в результате схода ледника, уничтожил цветущую долину, опять человеческие жертвы. В 1995 г. произошло землетрясение в г. Нефтегорске (Сахалинской области), в результате которого погибло более 2000 чел. и полностью разрушен этот город [15, 10]. Кроме того, масштабы природных катастроф таковы, что даже высокоразвитые страны мира испытывают трудности в ликвидации их последствий, теряя 10-15% ВВП, а в развивающихся странах мира этот показатель достигает 30-40% [9]. В мире за последние 30 лет (на 2002 г.) из-за стихийных бедствий погибло более 4 млн человек, пострадало более 3 млрд чел., материальный ущерб составил более 350 млрд долл. США [10,15].

Обеспечение безопасности, защиты населения и территорий при ЧС, вызванных стихийными бедствиями и др., является одним из главных направлений государственной политики РФ [1], которую призвано решать МЧС России. Для успешного решения такой задачи важно знать теоретические основы предмета и методики оценки обстановки в ЧС.

### **1. Оценка инженерной обстановки при землетрясении и при наводнении**

Под инженерной обстановкой понимается совокупность последствий воздействия

аварий, катастроф, стихийных бедствий и применения современных средств поражения (ССП), оказывающих влияние на жизнедеятельность рабочих, служащих объекта экономики (ОЭ), населения и устойчивую работу ОЭ.

Оценка инженерной обстановки производится с целью определения объема и характера разрушений (зоны ЧС) и расчета необходимых сил и средств для проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ (АС и ДНР), т.е. ликвидации последствий ЧС.

Она включает:

- определение масштаба (зоны ЧС), степени разрушения объекта и его элементов;
- анализ влияния разрушений и других негативных воздействий ЧС на население и устойчивость функционирования ОЭ;
- разработку предложения по организации и ведению АС и ДНР.

### 1.1. Оценка инженерной обстановки при землетрясении

Наиболее опасными геологическими процессами являются **землетрясения**. Так, 20% территорий РФ подвержено воздействию землетрясений интенсивностью более 7 баллов, более 5% территорий – 8-9 баллов [9, 10]. К ним относят Северный Кавказ, Прибайкалье, Якутию, Сахалин, Камчатку и Курильские острова. Более 20 млн человек России постоянно подвержены угрозе разрушительных землетрясений. В течение года происходит свыше 100 000 землетрясений, которые регистрируются сейсмографами. В мире в среднем от землетрясений погибает примерно 10 000 человек [10]. В РФ за 1992-2000 гг. произошло более 120 ощутимых землетрясений и два сильных землетрясения: на о. Шикотан (4-5 октября 1994 г.) и в г. Нефтегорске (27 мая 1995 г.), которое привело к гибели 2000 чел. и полному разрушению города [15, 10].

**Землетрясения** – это сильные колебания, сотрясения или смещения земной коры, вызванные тектоническими или вулканическими процессами и приводящие к разрушению зданий, сооружений, пожарам и человеческим жертвам.

Область возникновения подземного толчка (удара) является **очагом землетрясения**. В его пределах и происходит процесс высвобождения накопившейся энергии. В центре очага условно выделяется точка, называемая **гипоцентром**, его проекция на поверхность земли носит название **эпицентр**. В период землетрясения из гипоцентра излучается сейсмическая энергия в форме **сейсмических волн**, т.е. упругих продольных и поперечных волн.

**Основными характеристиками землетрясений являются:**

- глубина очага землетрясения;
- магнитуда и интенсивность энергии на поверхности земли.

**Глубина очага** – это глубина места, где возникает подземный удар (толчок), т.е. очаг землетрясения [13]. Глубина очага землетрясения в различных сейсмических районах лежит в пределах от 0 до 720 км [ 13, 15 ]. В зависимости от глубины очага ( $H$ ) землетрясения подразделяются на : поверхностные ( $H=0 - 70$  км); промежуточные ( $H =70 - 300$  км); глубокие ( $H$  более 300 км). До сих пор не было зарегистрировано ни одного

землетрясения глубже 720 км [15]. Свыше 75% энергии, выделенной при землетрясении, принадлежит поверхностным и только 3% - глубоким [15]. Проявление землетрясений в тех или иных районах называют их **сейсмичностью**.

**Магнитуда** – мера общего количества энергии, излучаемой при сейсмическом толчке в форме упругих волн. Магнитуда является характеристикой очага землетрясения и определяет общую энергию землетрясения в нём. Магнитуда – безразмерная величина, представляет собой логарифм максимальной амплитуды ( $Z_m$ ) смещения почвы (поверхностной волны) в микронах (мкм), измеренной прибором сейсмографом (или по сейсмограмме) на расстоянии  $R = 100$  км от эпицентра землетрясения [9, 10, 15]:

$$M = \lg Z_m - 1,32 R \quad (1)$$

Магнитуда по вектору изменяется от 0 до 9. Однако магнитуда характеризует выход сейсмической энергии только в эпицентре землетрясения. Поэтому для более объективной оценки силы колебания земной поверхности, т.е. землетрясения в точках, которые удалены от эпицентра, введено понятие интенсивность землетрясения [13, 9, 10].

**Интенсивность землетрясения** – это интенсивность колебания грунта на поверхности земли, являющаяся разрушительной силой землетрясения. Она зависит от магнитуды ( $M$ ), расстояния от эпицентра ( $R$ ) и глубины очага землетрясения ( $H$ ). Интенсивность землетрясения (в баллах) в заданной точке на поверхности земли определяется зависимостью:

$$J = 3 + 1,5 \cdot M - 3,5 \cdot \lg \sqrt{R^2 + H^2}, \quad (2)$$

где 3, 1.5, 3.5 - региональные константы для РФ.

Следовательно, интенсивность землетрясения (сила, балльность или сейсмическая интенсивность) оценивает силу землетрясения на поверхности Земли. Факторами, которые определяют интенсивность землетрясений, помимо собственно сейсмической энергии, являются: расстояние до эпицентра, свойства грунта, качество строительства и др. Они характеризуют степень и масштаб разрушений, нанесенных стихией в данном конкретном месте. Интенсивность или сила землетрясения измеряется в баллах. При этом может применяться несколько шкал [10, 7, 15]:

- шкала Рихтера, которая использует величину магнитуды ( $1 < M < 9$ ), 9-балльная;
- шкала Меркалли интенсивности землетрясения - 12-балльная; модифицированная шкала Меркалли ММ - в США; в некоторых странах Европы - шкала Меркалли КЗ;
- шкала MSK-64 (шкала Медведева, Шпонхойера, Карника), рекомендо-ванная ЮНЕСКО, по интенсивности энергии - 12-балльная;
- шкала ИФЗ, весьма близкая к шкале Меркалли, рекомендована и положена в основу СНИП-11-7-81 "Строительство в сейсмических районах".

Все перечисленные шкалы близки между собой и интенсивность землетрясений измеряют по 12-балльной шкале [9, 10, 15]. В настоящее время в России и странах СНГ применяется международная 12-балльная шкала MSK-64 (шкала Медведева, Шпонхойера, Карника) [15, 10, 9, 7]. Итак, шкала MSK-64 подразделяет землетрясения по силе толчков на поверхности земли, т. е. по интенсивности землетрясения, на 12 баллов.

Шкала Меркалли (примерно и MSK-64) представлена в табл.1, а соотношения между шкалой Рихтера и MSK-64 - в табл.2. При этом интенсивность обозначают римскими цифрами, а магнитуду - арабскими [15, 9]. В зависимости от интенсивности землетрясения делят на: слабые (I-III балла); умеренные (IV балла); сильные (V-VI баллов); очень сильные (VII баллов); разрушительные (VIII-X баллов); катастрофические (XI баллов) и сильно катастрофические (XII баллов) [15, 10].

Землетрясение в Армении (1988 г.) характеризуется по шкале MSK-64 - X баллов, магнитудой  $M=7$ , глубиной очага - 10-20 км [15, 10].

Одной из причин землетрясения может быть извержение вулкана, обвал горных пород и т. п. Поэтому землетрясения в зависимости от причины возникновения бывают: тектонические, вулканические, обвальные и моретрясения [15, 10].

**Тектонические** - возникают в результате перемещения масс земной коры под влиянием внутренних напряжений.

**Вулканические** - возникают при извержении вулканов. При извержении подводных вулканов могут быть огромные волны цунами и образовываться новые острова.

**Обвальные** - наблюдаются при обрушении сводов подземных карстовых пустот.

**Моретрясения** - это резкие колебания воды в морях и океанах, возникающие при землетрясениях, очаг которых находится под дном моря (океана) или в прибрежных районах. Сильное моретрясение сопровождается образованием цунами - огромных волн высотой до 30 м, скоростью до 80 км/ч [9]. Достигая берега, она смывает береговые сооружения, приносит большие разрушения, вызывает человеческие жертвы [9, 15].

Основным способом снижения потерь и ущерба при землетрясениях является строительство сейсмостойких сооружений, сейсмическое районирование территорий, прогнозирование возможных землетрясений, сейсмическое наблюдение (мониторинг), проведение АС и ДНР в зоне ЧС и т. п. [15, 9].

Рассмотрим методику определения разрушения объекта при землетрясении, применяемую в практике оценки инженерной обстановки.

Максимальный ущерб объекту экономики от стихийных бедствий может быть причинён при землетрясении. Оценка предполагаемых масштабов разрушений при землетрясениях может быть произведена аналогично оценке разрушений при ядерном взрыве с той лишь разницей, что в качестве критерия берётся не значение избыточного давления ( $\Delta P_{\phi}$ ), а интенсивность землетрясения ( $J$ ) в баллах [9, 8, 17]. При этом  $J$  на конкретном объекте по 12-балльной шкале находят по формуле (2). Методика расчета разрушений зданий и сооружений при землетрясениях дана в работах [13, 10, 8, 9]. В практических расчетах при оценке устойчивости ОЭ к землетрясениям характер и степень разрушений определяют по табл. 3 для различных дискретных значений интенсивности ( $J$ , баллы) в интервале от величин, вызывающих слабые разрушения элементов ОЭ (зданий, сооружений, оборудования, сети КЭС и т. п.), до величин, вызывающих полные их разрушения [9, 8]. Во время землетрясений наряду с разрушениями зданий выходят из строя и системы жизнеобеспечения населения, т. е. сети коммунально-энергетического снабжения (КЭС). Оценку их устойчивости при землетрясении производят по табл. 4 [10]. Кроме этого, при расчетах могут быть определены и безвозвратные потери среди населения

(табл. 5) [10, 13, 17]. В этом случае при оценке инженерной обстановки при землетрясениях приходится зачастую решать следующую типовую задачу.

**Задача.** Ожидаемая интенсивность землетрясения на территории объекта – IX баллов по шкале MSK-64. На его территории имеются производственные и административные здания с металлическим каркасом и крановым оборудованием 25-50 т, складские кирпичные здания, трубопроводы на металлических и железобетонных эстакадах. Определить характер разрушения элементов объекта при данном землетрясении.

#### Решение

По табл. 3 находим, что при IX баллах промышленные, административные здания и трубопроводы получают средние разрушения, а складские здания – сильные разрушения.

**Пример для самостоятельного решения.** Ожидаемая интенсивность землетрясения на территории объекта - VII баллов по шкале MSK-64. На объекте имеются производственные и административные здания с металлическим каркасом и бетонным заполнением, складские кирпичные здания и трубопроводы на металлических эстакадах. Определить характер разрушения элементов объекта при таком землетрясении, устойчивость систем жизнеобеспечения, а также возможные безвозвратные потери среди населения.

### 1.2. Оценка инженерной обстановки при наводнении

В ряду стихийных бедствий, особенно в последние годы, наводнения занимают лидирующее место по числу их повторов, охвату территорий, а также по суммарному среднегодовому экономическому ущербу, который они приносят.

**Наводнение** – это значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере, водохранилище, вызываемое различными причинами, которое наносит большой материальный ущерб и приводит к человеческим жертвам.

**Основными причинами наводнений являются:** весеннее снеготаяние (**половодье**); выпадение ливневых или дождевых осадков (**паводки**); ветровой нагон воды; заторы льда на реках; прорыв плотин и ограждающих дамб; завалы рек при землетрясениях, горных обвалах или селевых потоках и т.п.

На территории России угроза наводнений существует примерно для 746 городов и нескольких тысяч населенных пунктов [10]. При наводнениях и паводках, в том числе вызванных длительными ливневыми дождями, практически на всех реках РФ возможно образование зон подтопления, в которые попадают свыше 3500 городов и населенных пунктов с населением более 5,5 млн человек [13, 15].

**По масштабам распространения наводнения бывают:** низкие или малые – с затоплением до 10% земель; высокие – с затоплением 10-15% земель; выдающиеся (большие) – с затоплением 50-70% земель и ряда населенных пунктов [10, 9, 14].

Большую опасность **при половодье** представляют зажоры и заторы. **Зажоры** – это скопление шуги и мелкобитого льда, образующихся в зимнее время, т.е. в период формирования ледового покрова. **Заторы** – скопления льдин в русле рек во время весеннего разрушения ледового покрова, т.е. весеннего ледохода.

**Поражающее действие наводнений и их материальный ущерб** заключаются в затоплении территорий, повреждении при этом жилых и производственных зданий, автомобильных и железных дорог, линий электропередач (ЛЭП) с возможным пожаром, разрушении и других сетей коммунально-энергетического снабжения (КЭС), разрушении гидротехнических сооружений и др. **Зоной ЧС** при наводнении называется территория, в пределах которой произошли затопления местности, повреждения зданий, сооружений и других объектов, сопровождающиеся поражениями или гибелью людей, животных, растений и загрязнением окружающей природной среды (ОПС).

Масштабы наводнений зависят от высоты и продолжительности стояния опасных уровней воды, площади и времени затопления (весной, летом, зимой).

**Методика** определения размеров зоны затопления и характеристик наводнения **при паводке** подробно рассматривается в работах [10, 16, 13].

### **1.2.1. Оценка инженерной обстановки при гидродинамической аварии**

В ряду стихийных бедствий, особенно в последние годы, наводнения занимают лидирующее место по числу их повторов, охвату территорий, а также по суммарному среднегодовому экономическому ущербу, который они приносят.

**Наводнение** – это значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере, водохранилище, вызываемое различными причинами, которое наносит большой материальный ущерб и приводит к человеческим жертвам.

**Основными причинами наводнений являются:** весеннее снеготаяние (**половодье**); выпадение ливневых или дождевых осадков (**паводки**); ветровой нагон воды; заторы льда на реках; прорыв плотин и ограждающих дамб; завалы рек при землетрясениях, горных обвалах или селевых потоках и т.п.

На территории России угроза наводнений существует примерно для 746 городов и нескольких тысяч населенных пунктов [10]. При наводнениях и паводках, в том числе вызванных длительными ливневыми дождями, практически на всех реках РФ возможно образование зон подтопления, в которые попадают свыше 3500 городов и населенных пунктов с населением более 5,5 млн человек [13, 15].

**По масштабам распространения наводнения бывают:** низкие или малые – с затоплением до 10% земель; высокие – с затоплением 10-15% земель; выдающиеся (большие) – с затоплением 50-70% земель и ряда населенных пунктов [10, 9, 14].

Большую опасность **при половодье** представляют зажоры и заторы. **Зажоры** – это скопление шуги и мелкобитого льда, образующихся в зимнее время, т.е. в период формирования ледового покрова. **Заторы** – скопления льдин в русле рек во время весеннего разрушения ледового покрова, т.е. весеннего ледохода.

**Поражающее действие наводнений и их материальный ущерб** заключаются в затоплении территорий, повреждении при этом жилых и производственных зданий, автомобильных и железных дорог, линий электропередач (ЛЭП) с возможным пожаром, разрушении и других сетей коммунально-энергетического снабжения (КЭС), разрушении гидротехнических сооружений и др. **Зоной ЧС** при наводнении называется территория, в пределах которой произошли затопления местности, повреждения зданий, сооружений и других объектов, сопровождающиеся поражениями или гибелью людей,

животных, растений и загрязнением окружающей природной среды (ОПС).

Масштабы наводнений зависят от высоты и продолжительности стояния опасных уровней воды, площади и времени затопления (весной, летом, зимой).

**Методика** определения размеров зоны затопления и характеристик наводнения **при паводке** подробно рассматривается в работах [10, 16, 13].

### 1.2.1 - 1. Гидротехнические сооружения: классификация, основные понятия и определения

**Гидротехнические сооружения (ГТС)** – инженерные сооружения, предназначенные для использования водных ресурсов или для борьбы с разрушительным действием воды.

**К основным гидротехническим сооружениям**, разрушение (прорыв) которых приводит к ГА, **относят**: плотины (дамбы, перемычки, запруды и др.), водозаборные и водосборные сооружения (шлюзы) [14, 9].

**Плотины** – гидротехнические сооружения напорного типа (искусственные плотины) или природные образования (естественные плотины), создающие разницу уровней воды по руслу реки.

Следовательно, **плотина (дамба, шлюз, перемычка и др.)** перегораживает реку или иной водосток для подъема уровня воды перед ней с целью создания напора воды на её площадь и образования водохранилища.

**Искусственные плотины** представляют собой гидротехнические сооружения, созданные человеком для своих нужд и включающие собственно плотины гидроэлектростанций, водозаборов и ирригационные системы, дамбы, перемычки, запруды и т. п.

**Естественные плотины** – образования в виде запруд и др., созданные действием природных сил, например, в результате оползней, землетрясений, селей, обвалов, лавин, заторов и зажоров.

В зависимости от высоты плотины делят [9, 10, 14] на низконапорные (до 10м), средненапорные (от 10 до 50м) и высоконапорные (свыше 50м). В зависимости же от использованных строительных материалов **плотины бывают** – бетонные, железобетонные, гравитационные, контрфорсные, арочные, каменные, грунтовые (дамбы и т.п.), деревянные [9, 14].

Перед плотиной вверх по водотоку накапливается вода и образуются искусственные и естественные водохранилища. Наиболее крупные из них: Братское водохранилище на р. Ангара – 169,3 км<sup>3</sup>, Красноярское водохранилище на р. Енисей – 73,3 км<sup>3</sup> [10, 14, 15].

Участок реки между двумя соседними плотинами на реке или участок канала между двумя шлюзами называется **бьефом**. **Гидравлический уклон реки** – превышение (в метрах) высоты уровня реки на 1000 м длины.

**Верхним бьефом** плотины называется часть реки выше подпорного сооружения (плотины, шлюза), а часть реки ниже такого сооружения – **нижним бьефом**. Тело

плотины образует **нулевой створ**. Высота уровня воды в верхнем бьефе плотины – это **уровень воды в водохранилище**. Водоохранилища могут быть кратковременными или долговременными [14, 9]. В борьбе с наводнениями велика роль плотин, дамб. Однако из-за их неудовлетворительного состояния от натиска воды в XX веке в мире погибло более 9 млн человек [3].

Состояние гидротехнических сооружений – одна из наиболее острых проблем и в России. В настоящее время на территории РФ эксплуатируются свыше 28500 водохранилищ, в их числе – 330 крупных (емкостью более 10 млн м<sup>3</sup>) с общей емкостью более 800 км<sup>3</sup> и 1500 накопителей промышленных стоков и отходов [1-3, 6, 10]. В стране используется 37 водохозяйственных систем, каналов общей протяженностью свыше 3000 км, 12000 коммунальных и 51000 ведомственных систем водопроводов [2]. В нижних бьефах ГТС, в зонах потенциального затопления, проживает около 10 млн человек [1]. Всего же в составе водохозяйственного комплекса страны насчитывается до 65000 водохозяйственных объектов, из которых большинство составляют водоподпорные сооружения малых и средних водохранилищ, находящихся в эксплуатации 30 и более лет [2,3].

**В Нижегородской области** промышленными и сельскохозяйственными предприятиями эксплуатируются 1882 гидротехнических сооружений суммарной емкостью около 2500 млн м<sup>3</sup> на площади 3000 м<sup>2</sup>. Из них 297 являются потенциально опасными [12]. В самом центре области сходятся магистральные водные пути рек Волги и Оки, на Севере – Горьковского водохранилища, чуть выше по течению реки Волги – Рыбинское, а на границе с Чувашией – Чебоксарское.

Вызывает серьезные опасения ухудшение технического состояния и эксплуатации напорных ГТС (плотин) – 12%, т.е. 200 водохранилищ, из которых и 20% (56) накопительных стоков в РФ на 2004 г. находится в аварийном состоянии [2, 3, 10, 15]. Вместе с тем, на многих таких объектах отсутствуют службы их эксплуатации, и из-за финансовых трудностей не выполняются в полном объеме текущие и капитальные ремонтно-восстановительные работы [1]. Кроме того, значительная часть сооружений (в основном пруды) являются бесхозными [2].

В период с 1996-2005 гг. Министерство природных ресурсов и МЧС РФ проводит инвентаризацию всех водных объектов (водохранилищ, прудов, накопителей сточных вод и др.), и ими разработан “Комплексный план мероприятий по повышению безопасности ГТС на 2003-2008 годы” [2]. Кроме этого, учитывая жизненную важность проблемы, разработан и введен в действие с 24 октября 2002 г. Государственный стандарт ГОСТ Р 22.1.11-2002, который входит в комплекс стандартов “Безопасность в ЧС” [2]. Этот стандарт [5, 2] устанавливает общие требования к составу и содержанию работ по наблюдению (мониторингу) водоподпорных ГТС и их оснований как потенциальных источников техногенных ЧС, а также общие требования к прогнозированию возможных последствий этих ЧС (гидродинамических аварий) на указанных сооружениях [2]. Следовательно, в системе МЧС РФ разработан и принят важный документ [5], регламентирующий управление и мониторинг безопасности многочисленных объектов, зданий и сооружений, попадающих в зону аварии или прорыва ГТС в нижних бьефах гидроузлов [2].

Следует сказать, что для оценки состояния ГТС ВНИИ ГОЧС МЧС РФ разработан и внедряется новый метод с применением “Мобильного диагностического комплекса техсредств оценки сейсмоопасности, устойчивости зданий, сооружений и др. строительных конструкций” [2]. Такое обследование чрезвычайно важно в современных

условиях, когда многие ГТС эксплуатируются 30-40 лет (срок эксплуатации гидроузлов Волжско-Камского каскада 50-60 лет), и некоторые из них находятся в аварийном состоянии, и возрастает реальная угроза проведения террористических актов на ГТС (предотвращены теракты на Цимлянском водохранилище в 2001 г. – разрушение плотины Волжской ГЭС). На основании полученных данных разрабатываются декларация безопасности ГТС и паспорт технического состояния [2].

### **1.2.1 - 2. Гидродинамическая авария: поражающий фактор и его параметры, последствия и характеристика зоны наводнения**

Устойчивость и прочность гидротехнического сооружения проектируется на основе максимальных расчетных значений уровня воды водоема, скорости ветра, высоты волны [9].

**Причинами разрушения (прорыва) ГТС** могут быть природные явления или стихийные бедствия (землетрясения, обвалы, оползни, паводки, размыв грунтов, ураганы и т.п.) и техногенные факторы (разрушение конструкций сооружения, эксплуатационно-технические аварии, конструктивные дефекты или ошибки проектирования, нарушение режима водосбора и др.), а также в ЧС военного времени – современные средства поражения (ССП) и террористические акты [14, 9].

**Начальной фазой** гидродинамической аварии (ГА) является **прорыв плотины**, который представляет собой процесс образования прорана и неуправляемого потока воды водохранилища из верхнего бьефа через проран в нижний бьеф. Во фронте устремляющегося в проран потока воды образуется **волна прорыва**.

**Проран** – узкий проток в теле (насыпи) плотины, косе, отмели, в дельте реки, или спрямленный участок реки, образовавшийся в результате размыва излучины в половодье.

**Волна прорыва** – волна, образующаяся во фронте проходящего в проран потока воды, имеющего значительную скорость движения и обладающего большой разрушительной силой.

Следовательно, **поражающее действие волны прорыва ГА** связано с распространением с большой скоростью воды, создающей угрозу возникновения ЧС.

**Поражающий фактор ГА** – волна прорыва гидротехнического сооружения. **Основными параметрами** ее поражающего действия являются скорость, высота и глубина волны прорыва, температура воды, время существования волны прорыва [9].

По своей физической сущности **волна прорыва** представляет собой неустановившееся движение потока воды, при котором глубина, ширина, уклон поверхности и скорость течения изменяются во времени (рис.1) [7].

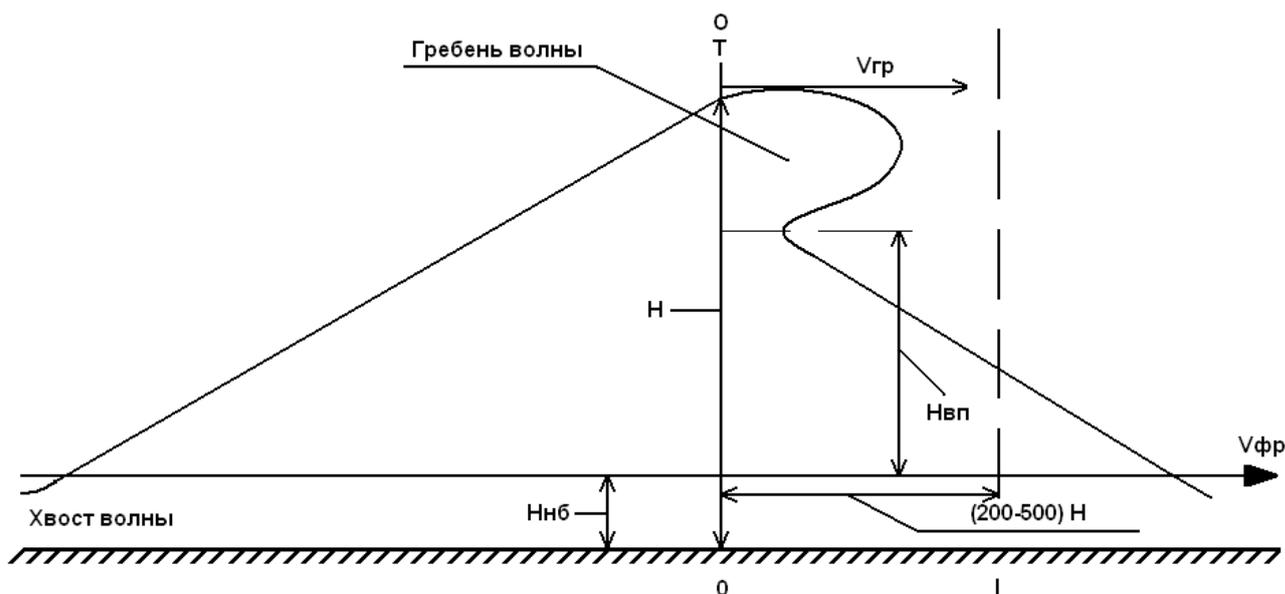


Рис.1. Волна прорыва и ее сущность

**Высота волны прорыва и скорость ее распространения** зависят от объема и глубины водохранилища, площади зеркала водного бассейна, размеров прорана, разницы уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, гидрологических и топографических условий русла реки и ее поймы. В районе нулевого створа (тела плотины) высота волны прорыва ( $H_{вп}$ ) определяется по формуле [7]

$$H_{вп}=0,6(H - H_{нб}), \quad (3)$$

где  $H$  – глубина водохранилища у плотины, м;  $H_{нб}$  - высота нижнего бьефа, м.

Высота волны прорыва, как правило, находится в пределах 2-12м и может достигать 10-30м. Скорость распространения волны прорыва составляет 3-25 км/ч, а для горных и предгорных районов – до 100 км/ч [14, 7].

Примечание. Скорость движения волны прорыва  $V=2,5-5$  м/с принимается для зон катастрофического затопления и опасного затопления, а для участков возможного затопления -  $V=1,5-2,5$  м/с.

При этом статическое давление потока воды – не менее 20 кПа ( $0,2 \text{ кг/см}^2$ ) с продолжительностью действия не менее 0,25ч [7].

**Характер воздействия на объект поражающего фактора** определяется гидродинамическим давлением потока воды (гидропотоком), высотой, глубиной и скоростью потока воды, уровнем и временем затопления, деформацией речного русла, загрязнением гидросферы, почв, грунтов, размыванием и переносом грунтов.

Основным последствием гидродинамической аварии является катастрофическое затопление местности.

**Катастрофическое затопление** – это бедствие из-за гидродинамической аварии, являющееся результатом разрушения плотины и заключающееся в стремительном затоплении волной прорыва нижерасположенной местности и возникновении наводнения. **Катастрофическое затопление характеризуется следующими параметрами** [14, 7]:

- максимально возможными высотой и скоростью волны прорыва;
- расчетным временем прихода гребня и фронта волны прорыва в соответствующий створ (местность);
- максимальной глубиной затопления участка местности;
- длительностью затопления территории;
- границами зоны возможного затопления.

Катастрофическое затопление распространяется со скоростью волны прорыва и приводит через некоторое время после прорыва плотины к затоплению обширных территорий слоем воды более 0,5-10м. При этом образуются зоны затопления. Так, в РФ при разрушениях или авариях на ГТС (плотины, дамбы, перемычки, шлюзы и т.п.) в зоне затопления окажутся десятки миллионов человек, тысячи населенных пунктов, предприятий, сооружений, сельскохозяйственных земель и др. Возможный ущерб от такой гидродинамической аварии в РФ составит 250 млрд рублей [2, 10, 15].

Недавние катастрофы на реках РФ – прорыв плотины Киселевского водохранилища (Свердловская обл.) на р. Каква в 1993 г. (общий ущерб – 63,3 млрд руб.), разрушение плотины Тирлянского водохранилища в 1994 г. (Башкортостан) на притоке р. Белой (суммарный ущерб 52,3 млрд руб.), наводнение в Приморье (сентябрь 1994 г.), в Якутии (1999 г. и 2001 г.). Наводнение в Краснодарском крае (июль 2002 г.) привело к разрушению его гидроузла, унесло жизни 114000 человек и причинило материальный ущерб на сумму в 15 млрд руб. [3, 6, 15]. Прорыв плотины Горьковской ГРЭС представляет опасность как для г. Н.Новгорода, так и для области. При прорыве плотины ГРЭС возможно образование зоны катастрофического затопления с общей площадью 1210 км<sup>2</sup>, в которую частично попадают 5 городов и 61 населенный пункт с численностью населения 188600 человек. Высота подъема воды в г. Н.Новгороде составит 0,3-1,9м. Частично подтапливаются Сормовский и Московский районы. Время прихода волны прорыва к г. Н.Новгороду – 3,5ч. Время наступления максимального уровня воды в городе – 48-51ч, время спада воды до нормального уровня – 10-12 суток. Высота подъема воды у плотины ГРЭС – 15-17м [7].

**Зоной затопления** при разрушении ГТС называется часть прилегающей к реке (озеру, водохранилищу) местности, затопляемой водой. В зависимости от последствий воздействия потока воды из-за разрушения ГТС на территории возможного затопления выделяют зону катастрофического затопления (ЗКЗ). Часть зоны затопления, в пределах которой распространяется волна прорыва, вызывающая массовые потери людей, разрушения зданий и сооружений, уничтожение других материальных ценностей и называется **зоной катастрофического затопления**. На ее внешних границах высота гребня волны прорыва ( $H_{вп}$ ) превышает 1м (рис.1), а скорость ее движения – более 10 м/с. Время, в течение которого затопленные территории могут находиться под водой, колеблется от 4ч до нескольких суток [14, 7]. Параметры зоны затопления зависят от размеров водохранилища, напора воды и других характеристик конкретного гидроузла, а также от гидрологических и топографических особенностей местности.

**Основные поражающие факторы катастрофического затопления** – разрушительная **волна прорыва, водный поток и спокойные воды**, затопившие территорию суши и объекта. Воздействие волны прорыва на ОЭ, людей во многом аналогично действию ударной волны ядерного взрыва. Существенными отличиями этих поражающих факторов являются гораздо меньшая скорость и более высокая плотность вещества (воды) у волны прорыва [14,17].

Зона катастрофического затопления определяется заранее на стадии проектирования ГТС. В границах этой зоны выделяют участок возможного (вероятного) чрезвычайно опасного затопления, т.е. территорию, через которую волна прорыва проходит в течение 1ч после аварии на ГТС. На этой территории возможны наибольшие потери среди населения, сильные разрушения ОЭ и жилых построек. **Параметры волны прорыва** на данном участке принимаются: высота гребня волны (рис. 1) – более 4м, а скорость движения – свыше 2,5 м/с [7, 9]. Для каждого водохранилища (особенно объемом 50 млн м<sup>3</sup>), на котором авария приводит к высоте подъема воды более 1м, по результатам прогноза разрабатываются атласы или карты затопления и характеристики волны прорыва [2, 9].

Весьма важным является **прогнозирование развития и масштабов возможных последствий гидродинамических аварий** на подпорных ГТС. Перечень основных прогнозируемых параметров аварии (волны прорыва) на водоподпорных ГТС, определяющих размеры бедствия и ущерб в зоне возможного затопления, приведен в табл. 6.

Чрезвычайную ситуацию, вызванную гидродинамической аварией, относят к федеральным ЧС [3].

Наиболее предпочтительный способ определения параметров волны прорыва – использование ЭВМ и программного обеспечения “Волна – 2”, разработанного во ВНИИ ГОЧС [3]. Это позволяет спрогнозировать последствия прорыва гидроузлов, сопровождающегося образованием волны прорыва. Последствиями такой гидродинамической аварии станут разрушения зданий, сооружений, дорог, мостов, потенциально опасных объектов (ПОО) и др., находящихся в зоне воздействия этой волны [3]. По результатам анализа и оценки возможной обстановки, используя программу “Волна – 2”, органом управления ГОЧС могут быть представлены предложения по профилактике и предупреждению гидродинамической аварии.

Таким образом, **основным следствием гидродинамической аварии (ГА)** является **образование зоны катастрофического затопления местности. Поражающий фактор ГА** – волна прорыва. Важные **параметры** ее поражающего действия на объект экономики – высота и скорость движения (течения) волны прорыва. Нагрузки на ОЭ и его элементы (здания, оборудование, сети КЭС и т.п.) при ГА создаются действием волны прорыва – гидропотока воды, критическими параметрами которого служат высота и скорость волны прорыва, а также глубина воды перед ГТС [2, 14]. Это и необходимо учитывать при оценке устойчивости ОЭ, определении ее критерия при возникновении ГА [17, 9, 10]. Возможные степени разрушения ОЭ в зависимости от высоты ( $h$ ) и скорости ( $V$ ) движения (течения) волны прорыва определяются по табл. 7 [10, 16, 17].

### 1.2.1 - 3. Методика оценки инженерной обстановки при гидродинамической аварии

Эта методика позволяет выполнить оценку параметров зоны наводнения (затопления) и волны прорыва при аварии или разрушении ГТС и ее воздействия на работу объекта экономики, его персонал и население. Заметим, что на практике органы управления ГОЧС для расчетов широко используют ЭВМ и программу “Волна – 2” [16, 3]. Следовательно, в результате расчетов находятся параметры поражающего фактора гидродинамической аварии – волны прорыва ГТС, зоны затопления и их влияния на устойчивую работу ОЭ и жизнедеятельность его персонала и населения.

Рассмотрим **две методики** на примере **расчета** типовых задач.

## А) Определение параметров волны прорыва и зоны затопления при прорыве (разрушении) плотины водохранилища

Исходные данные для расчетов:

- объем водохранилища -  $W$ , м<sup>3</sup>;
- глубина воды перед плотиной (глубина прорана) -  $H$ , м;
- ширина прорана или участка перелива воды через гребень плотины –  $B_3$ , м;
- средняя скорость движения волны прорыва (попуска) -  $V$ , м/с;
- расстояние от плотины (водоёма) до объекта, -  $R$ , км.

При этом определяются параметры волны прорыва (попуска) на заданное расстояние  $R$  от плотины (рис. 1) при ее разрушении.

Последовательность расчетов [8, 9]:

1. Находится время подхода волны прорыва (попуска) на заданное расстояние  $R$  (до объекта):

$$t_{\text{пр}} = \frac{R}{3600V}, \text{ ч} \quad (4)$$

Значение  $V=2,5-5$  м/с принимаются для зон чрезвычайно опасного и опасного затоплений; для участков возможного затопления –  $V= 1,5-2,4$  м/с.

2. Определяется высота волны прорыва (попуска)  $h$  на расстоянии  $R$  до объекта, используя табл. 8:

$$h = mH, \text{ м}, \quad (5)$$

где  $m$  – коэффициент в табл. 2, зависящий от расстояния ГТС до объекта.

3. Время опорожнения водохранилища (водоема) находится по формуле

$$T = \frac{W}{3600NB_3}, \text{ ч}, \quad (6)$$

где  $N$  – максимальный расход воды на 1м ширины прорана (участка перелива воды через гребень плотины), м<sup>3</sup>/с 1м, определяемый по табл. 9.

4. Рассчитывается продолжительность (время) прохождения волны прорыва (попуска)  $t$  на заданном до объекта расстоянии  $R$

$$t = m_1 T, \text{ ч}, \quad (7)$$

где  $m_1$  – коэффициент (табл. 8), зависящий от расстояния до плотины (водоёма).

По данным расчета по табл. 7 могут быть определены степень разрушения элементов объекта при ГА [10, 17].

**Задача 1.** Объем водохранилища  $W=70 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>, ширина прорана  $B_3=100$ м, глубина воды перед плотиной (глубина прорана)  $H=50$ м, средняя скорость движения волны прорыва

(попуска)  $V=5\text{м/с}$ . Определить параметры волны прорыва (попуска) на расстоянии  $R=25\text{км}$  от плотины до объекта экономики при ее разрушении.

### Решение

1. Время подхода волны прорыва (попуска) на заданное расстояние (до объекта)  $R=25\text{км}$ :

$$t_{\text{пр}} = \frac{R}{V} = \frac{25 \cdot 10^3}{5 \cdot 3600} = 1,4 \text{ (ч)}.$$

2. Высота волны прорыва (попуска)

По табл.8 при  $R=25\text{км}$  находим коэффициент  $m=0,2$  и тогда

$$h=mH \text{ и } h=0,2H=0,2 \cdot 50=10 \text{ (м)}.$$

3. Время опорожнения водохранилища:

$$T = \frac{W}{3600NB}$$

Значение  $N$  по табл.9 при  $H=50\text{м}$ :

$$N=350\text{м}^3/\text{с 1м}.$$

Тогда

$$T = \frac{70 \cdot 10^6}{350 \cdot 100 \cdot 3600} = 0,55 \text{ (ч)}.$$

4. Продолжительность прохождения волны прорыва (попуска)  $t$  до объекта на расстоянии  $R$  и время опорожнения водохранилища  $T$

По табл.8 при  $R=25\text{км}$  определим коэффициент  $m_1=1,7$ :

$$t=m_1T \text{ и } t=1,7T=1,7 \cdot 0,55=1 \text{ (ч)}.$$

Ответ:  $h=10\text{м}$ ;  $t_{\text{пр}}=1,4\text{ч}$ ;  $T=0,55\text{ч}$ ;  $t=1\text{ч}$ .

### Примеры для самостоятельного решения:

Пример 1

Условие задачи то же, но  $R = 50\text{км}$ .

Ответ:  $h=7,5\text{м}$ ;  $t_{\text{пр}}=2,8\text{ч}$ ;  $T=0,55\text{ч}$ ;  $t=1,5\text{ч}$ .

Пример 2

Условие задачи то же, но  $R = 100\text{км}$ .

Ответ:  $h=3,75\text{м}$ ;  $t_{\text{пр}}=5,6\text{ч}$ ;  $T=0,55\text{ч}$ ;  $t=2,2\text{ч}$ .

### Пример 3

Условие задачи то же, но  $W=60 \cdot 10^6\text{м}^3$ ,  $B_3=80\text{м}$ ,  $H=50\text{м}$ ,  $V=3\text{ м/с}$ ,  $R=50\text{км}$ .

Определить степень разрушения здания ОЭ, по конструкции - здание с легким металлическим каркасом.

### Б) Определение параметров волны прорыва и зоны наводнения (затопления) при разрушении ГТС на малых и больших реках

Данная упрощенная методика используется в расчетах на ЭВМ применительно к ГТС (плотина, дамба, запруда и т.п.) на малых и больших реках, а также - к грунтовым напорным сооружениям [16, 10].

В этом случае при разрушении ГТС и при недостаточном водосбросе (перелив воды через гребень плотины) также образуется волна прорыва (рис. 1), характеризующаяся параметрами – высотой и скоростью.

Последовательность расчетов следующая [10, 16, 13].

Исходные данные:

- высота плотины или высота уровня воды в верхнем бьефе плотины (уровень воды в водохранилище), м;  $H_0$
- параметр прорыва в безразмерном виде ( $l$  – длина плотины)  $B=B_3/l$
- гидравлический уклон реки;  $i$
- удаленность створа объекта от ГТС, км;  $L$
- высота месторасположения объекта, м;  $h_m$

1. Определяется высота волны прорыва  $h$ , м:

$$h = \frac{A_1}{\sqrt{B_1 + L}}, \quad (8)$$

где  $A_1$  и  $B_1$  – коэффициенты, зависящие от  $H_0$ ,  $B$  и  $i$ , значения которых на- ходятся по табл.10.

2. Находится скорость волны прорыва ( $V$ , м/с):

$$V = \frac{A_2}{\sqrt{B_2 + L}}, \quad \text{м/с}, \quad (9)$$

где  $A_2$  и  $B_2$  – коэффициенты, зависящие от  $H_0$ ,  $B$  и  $i$ , значения которых на- ходятся по табл.10.

3. Время подхода гребня волны  $t_{\text{гр}}$  и фронта волны  $t_{\text{фр}}$  прорыва определяются по табл. 12 при известных  $L$ ,  $H_0$ ,  $i$ .

**Примечание:** в методике [16] для ЭВМ расчет ведется с учетом эквивалента коэффициента шероховатости по створу ( $n_3$ ) и находят дополнительно среднюю скорость волны прорыва:

$$V_{cp} = \frac{1}{\left( h_{зат}^{2/3} i^{1/2} n_3 \right)} \quad \text{или} \quad V_{cp} = \frac{1}{\left( n_3 \sqrt[3]{h_{зат}^2} \sqrt{i} \right)}, \text{ м/с. (10)}$$

При этом эквивалентный коэффициент шероховатости:

$$n_3 = \frac{\left( h_{cp}^{2/3} i^{1/2} \right)}{V} \quad \text{или} \quad n_3 = \frac{\left( \sqrt[3]{h_{cp}^2} \sqrt{i} \right)}{V}, \text{ (11)}$$

где  $h_{зат}$  – максимальная высота затопления участка местности по створу

(задаваемая величина), м;

$h_{cp}$  – высота прямоугольника, эквивалентного по площади смоченному периметру в створе при максимальной глубине затопления (задаваемая величина), м.

4. Продолжительность затопления территории объекта ( $t_{зат,ч}$ ) рассчитывается по формуле

$$t_{зат} = \beta(t_{гр} - t_{ф})(1 - h_m / h), \text{ (12)}$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от высоты плотины ( $H_0$ ) и отношения  $iL/H_0$  и находится по табл. 11.

5. Степень разрушения элементов объекта экономики (здания, оборудования, сети КЭС и т. п.) в зависимости от скорости и высоты волны прорыва (рис. 1) находится по табл. 7.

**Задача.** В результате весеннего половодья произошел подъём уровня воды в реке Ижорка, через которую наведен металлический мост. Близь реки расположен пос. Коптяевка, и недалеко от него имеется водохранилище с плотиной. После переполнения водохранилища и прорыва плотины через проран в ней с параметром в безразмерном виде  $B=0,5$  началось резкое увеличение уровня воды в р. Ижорке, и гидропоток воды устремился к пос. Коптяевка. Известны высота уровня воды в верхнем бьефе плотины  $H_0=80$  м, удаление створа объекта от плотины  $L=5$  км, гидравлический уклон водной поверхности реки  $i = 1 \cdot 10^{-3}$ , а также высота месторасположения объекта  $h_m=2$  м, максимальная высота затопления участка местности (поселка) по створу объекта  $h_{зат}=8$  м и высота прямоугольника, эквивалентного по площади смоченному периметру в створе объекта,  $h_{cp}=5$  м. Объект экономики: здания – каркасные панельные; склады – кирпичные; оборудование - сети КЭС: кабель подземный. В поселке 57 одноэтажных кирпичных домов, их подвалы – каменные. В каждом доме проведены трубы газоснабжения. В поселке проходит дорога с асфальтобетонным покрытием. Определить параметры волны прорыва – высоту, скорость и степень возможных разрушений на объекте и в поселке.

Решение

1. Высота волны прорыва (рис. 1):

$$h = A_1 / \sqrt{B_1 + L}$$

Из табл.10 для  $B=0,5$ ,  $H_0 = 80$  м,  $i = 1 \cdot 10^{-3}$ , находим  $A_1=320$ ,  $B_1=166$ . Тогда

$$h = A_1 / \sqrt{B_1 + L} = 320 / \sqrt{166 + 5000} = 4,45 \text{ (м)}.$$

2. Скорость волны прорыва:

$$V = A_2 / \sqrt{B_2 + L}$$

Из табл.10 для  $B=0,5$ ,  $H_0 = 80$  м,  $i = 1 \cdot 10^{-3}$  находим  $A_2=61$ ,  $B_2=52$ . Тогда

$$V = A_2 / \sqrt{B_2 + L} = 61 / \sqrt{52 + 5000} = 0,858 \text{ (м/с)}.$$

3. Время прихода гребня ( $t_{гр}$ ) и фронта ( $t_{фр}$ ) волны прорыва.

Определяем по табл. 12 при  $H_0 = 80$  м,  $L = 5$  км,  $i = 1 \cdot 10^{-3}$ , что  $t_{гр} = 0,2$  ч = 12 мин и  $t_{фр} = 0,1$  ч = 6 мин.

4. Время (продолжительность) затопления территории объекта:

$$t_{зат} = \beta(t_{гр} - t_{фр})(1 - h_m / h).$$

Коэффициент  $\beta$  находим по табл. 11 при  $H_0/h_0 = 80/8 = 10$ , т. е. при  $H_0=10h_0$  и отношении  $iL/H_0 = 10^{-3} \cdot 5000/80 = 0,0625$ . Следовательно, при  $iL/H_0 = 0,0625$  и  $H_0 = 10h_0$  по табл.11 коэффициент  $\beta$  найдем методом интерполяции:

$$\beta = 14 + (15,5-14)(0,0625 - 0,05) / (0,1-0,05) = 14 + 1,5 \cdot 0,0125/0,05 = 14,375.$$

$$\text{Тогда } t_{зат} = 14,375 \cdot (0,2 - 0,1)(1 - 2 / 4,45) = 0,79 \text{ (ч)} = 47,4 \text{ (мин)}.$$

5. Возможные разрушения волны прорыва находят также по табл. 7 при  $h = 4,45$  и  $V = 0,858$  м/с  $\cdot$   $0,9$  м/с.

а) **На объекте:** здания получают слабые разрушения. Склады – сильные разрушения.

б) **В поселке:** дома, мост, дорога – сильные разрушения.

### Пример для самостоятельного решения.

Условие задачи то же. Изменить исходные данные:  $H_0 = 20$  м,  $L = 20$  км,  $B = 0,25$ ,  $i = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $h_m = 1,5$ ,  $h_0 = 8$  м,  $h_{зат} = 3,5$  м,  $h_{ср} = 4$  м.

Характеристики объекта экономики: здания и склады – кирпичные, оборудование – крановое 20 т;

пос. Коптяевка : здания – деревянные, дорога – с гравийным покрытием, мост – деревянный.

Ответ:  $h = 0,282$  м,  $V = 0,106$  м/с,  $t_{гр} = 2$  ч,  $t_{ф} = 5$  ч,  $t_{заг} = 126$  ч. Степени возможных разрушений определяются по табл. 7.

## 2. Оценка инженерной обстановки при ЧС на пожаро- и взрывоопасных объектах

Особую опасность с точки зрения возможных потерь и ущерба представляют взрывы.

В различных отраслях промышленности России эксплуатируются более 1000 пожаро- и взрывоопасных объектов (ВОО) [1, 10]. По данным МЧС РФ в 2003 г. из 518 ЧС техногенного характера наибольшее количество людей пострадало по причине взрывов в зданиях, сооружениях жилого и социально-бытового назначения – 1835 человек [1].

**Пожаро- и взрывоопасные объекты** – предприятия, на которых хранятся, используются, производятся, транспортируются вещества приобретающие при определенных условиях способность к возгоранию или взрыву [14, 10, 9].

**К взрывоопасным объектам относятся** : предприятия оборонной, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и газовой, фармацевтической, текстильной промышленности, склады легковоспламеняющихся горючих жидкостей (ЛВГЖ) и газов (сжиженных, сжатых и т.п.), хранилища современных средств поражения (ССП) и др. В последние годы ЧС со взрывами происходят и из-за террористических актов. Так в 2003 г. было совершено 19 террористических актов, при которых погибло 252 человека, пострадало 916 [1]. Кроме того, в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) 230000 км магистральных и свыше 350000 км промысловых нефте- и газопроводов; степень износа их в нефтяной промышленности достигла 80 %, в газовой – 70%, в угольной – более 60% [1, 10].

**Взрыв** – это процесс быстрого освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. При этом в окружающей среде образуется и распространяется взрывная волна. Взрыв несет опасность поражения людей и обладает разрушительной способностью. Взрывы могут быть направленными или объёмными [10,14,19]. По виду взрывного вещества (ВВ) различают взрывы конденсированных ВВ (тротил, гексоген, порох и т. п.), взрывы газопаровоздушных смесей и взрывы аэрозолей (пылевоздушных смесей) [7,10].

**На ВОО возможны следующие виды взрывов [14]:**

- неконтролируемое резкое высвобождение энергии за короткий промежуток времени и в ограниченном пространстве (взрывные процессы);
- образование облаков топливно-воздушных смесей (ТВС) или других химических газообразных, пылеобразных веществ, их быстрые взрывные превращения (объемный взрыв);
- взрывы трубопроводов, сосудов, находящихся под высоким давлением или с перегретой жидкостью, прежде всего резервуаров со сжиженным углеводородным газом.

**Основными поражающими факторами взрыва** являются: воздушная ударная волна (УВ), осколочные поля, создаваемые летящими обломками разного рода объектов техногенного образования, строительных деталей и т. д. Основными параметрами

поражающих факторов взрыва являются : воздушной ударной волны – избыточное давление во фронте ( $\Delta P_{\phi}$ ), скоростной напор воздуха ( $\Delta P_{ск}$ ) и время действия  $\Delta P_{\phi}$ ; осколочного поля – количество осколков, их кинетическая энергия и радиус разлета [9, 8, 10, 20]. Однако на практике в качестве определяющего параметра воздушной УВ принимают избыточное давление во фронте волны. За единицу измерения  $\Delta P_{\phi}$  в системе СИ принят Паскаль (Па), внесистемная единица – кгс/см<sup>2</sup> : 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup> = 0,102 кгс/см<sup>2</sup>; 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98,1 кПа  $\approx$  100 кПа.

Опыт ликвидации последствий аварий со взрывом газо- и паровоздушных смесей (ГВС) углеводородных веществ [21, 14, 7] в нашей стране и за рубежом [21] показывает, что наиболее сложная обстановка складывается в зонах взрыва газо- и пылевоздушных смесей (ПВС), паровых облаков и сгорания нефтепродуктов, масел и др. опасных веществ. При возникновении таких аварий возможны два варианта развития ситуации: детонационный взрыв и дефлаграционное (или взрывное) горение [21, 19].

**В зоне детонационного взрыва**, как показывает анализ, скорость распространения пламени может превысить даже скорость звука. При этом  $\Delta P_{\phi}$  в детонационной волне достигает в ряде случаев 1000-1200 кПа, а температура горючих газов повышается до  $t = 1500-3000$  °С. Это может вызвать полное разрушение зданий и сооружений, гибель людей, сложную пожарную обстановку. Сформировавшаяся в зоне детонации УВ распространится на десятки, сотни и даже тысячи метров от места взрыва.

**При дефлаграционном (или взрывном) горении** скорость распространения пламени не превышает 100-200 м/с, а давление – 20-100 кПа. При скорости меньше 1 м/с ударные волны не образуются. При таком горении наиболее опасна пожарная обстановка.

На промышленных предприятиях наиболее взрывоопасными являются образующиеся в нормальных или аварийных условиях ГВС и ПВС [7, 14, 10]. Из ГВС наиболее опасны взрывы смесей с воздухом углеводородных газов, а так же паров ЛВГЖ. Взрывы ПВС происходят на мукомольном производстве, на зерновых элеваторах, при обращении с красителями, при производстве пищевых продуктов, лекарственных препаратов, на текстильном производстве [10, 14].

В результате действия поражающих факторов взрыва происходит разрушение или повреждение зданий, сооружений, технологического оборудования, транспортных средств, элементов объекта экономики (ОЭ), гибель людей. Степени разрушений (слабое, среднее, сильное, полное) элементов объекта (здание, оборудование, сети КЭС и т. п.) приводятся в таблицах литературы [17, 10, 7].

**Рассмотрим методики решения типовых задач при взрывах на ВОО**, которые целесообразно знать руководителям аварийно-спасательного формирования (АСФ) и аварийно-спасательной службы (АСС) ОЭ при оценке инженерной обстановки [13, 7, 17, 19]. В работах [7, 8, 19, 21] рассмотрены методики:

- при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (тротил, гексоген, дымный порох, пироксилин и др.). Их взрывы протекают в режиме детонации;
- при взрыве газо- и паровоздушных углеводородных веществ [21];
- при взрывах пылевоздушных смесей и аэрозолей.

Так как для взрывоопасных ОЭ наиболее характерны аварии с выбросом газо- и паровоздушных смесей углеводородных веществ с образованием детонационных взрывов,

а в случае террористических актов и др. характерны взрывы конденсированных ВВ, то ниже даются методики оценки зон разрушений именно для этих случаев.

### Взрывы газо- и паровоздушных смесей (ГВС)

Такие взрывы могут происходить в неограниченном (открытая атмосфера) и ограниченном (в замкнутом объеме) пространстве в результате разрушений газопроводов, разлива сжиженного горючего газа, его испарения, неисправностей технологической аппаратуры, трубопроводов, утечек газа в помещениях и т.д. При этом имеют место детонационные взрывы [7, 10, 21, 22]. К ГВС относят: метан, пропан, бутан, этилен, пропилен, бутилен и др.

#### 1. Взрывы ГВС в открытой атмосфере [7, 21]

Имеется не одна методика расчетов. Все они основаны на принципе подобия Хопкинсона и подчинены закону “кубического корня”. В практике широко используют две методики, которые дают достоверные результаты.

#### Первая методика определения параметров зон разрушения

Это упрощенная и достаточно объективная методика, рассмотренная в работах [21, 7, 10, 22]. На основе анализа и обобщения материалов аварий со взрывом ГВС в очаге поражения (взрыва) на открытой местности (атмосфере) **выделяют две зоны**: детонации (детонационной волны); распространения (действия) ударной волны (УВ).

Условный (расчетный) **радиус зоны детонации** (детонационной волны)  $r_0$  определяют по эмпирической формуле

$$r_0 = 18,5\sqrt[3]{kQ}, \quad (13)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий объем газов или паров веществ, переходящих во взрывоопасную смесь. Его значения в расчетах принимают  $k=0,4$ – $0,6$  [18, 16];

$Q$  – количество вещества, разлившегося из разгерметизированной емкости (хранилища);

18,5 – эмпирический коэффициент, который позволяет учесть различные условия возникновения взрыва (характеристики ГВС, состояние атмосферы, форму облака, мощность источника воспламенения, место его инициирования и др.).

За пределами зоны детонации избыточное давление ударной волны ( $\Delta P_\phi$ ) резко снижается до атмосферного. В литературных источниках [21, 22, 7, 10] предлагаются те или иные зависимости для расчета максимальных значений  $\Delta P_\phi$  в зоне детонации с учетом расстояния до места взрыва, например во второй методике, приведенной ниже. В этой же методике для расчетов используются обобщенные данные изменения избыточного давления ( $\Delta P_\phi$ ) исходя из расстояния, выраженного в долях от радиуса зоны детонации ( $r_1/r_0$ ) и максимального давления ( $P_{\max}$ ) в зоне детонации (табл.14) [21]. При этом  $P_{\max}$  для различных ГВС находится по табл.13 из справочников [7, 22].

Зону распространения (действия) УВ обычно разбивают на несколько ( $n$ ) зон [7] с радиусами: смертельных поражений или полных разрушений ( $R_{100}$ ) с избыточным давлением на внешней границе  $\Delta P_\phi=100$  кПа ( $\Delta P_\phi > 50$  кПа); сильных и полных

разрушений соответственно с  $\Delta P_{\phi}=30$  кПа и  $\Delta P_{\phi}=50$  кПа ( $R_{50}$ ); средних с  $\Delta P_{\phi}=20$  кПа и слабых с  $\Delta P_{\phi}=10$  кПа ( $R_{20}$ ) и безопасную зону с  $\Delta P_{\phi} < 10$  кПа, т.е.  $\Delta P_{\phi}=6-7$  кПа ( $R_{6,7}$ ).

Примечание. По международным нормам безопасным для человека является  $\Delta P_{\phi}=7$  кПа [7, 22].

Затем, определив  $P_{\max}$  (табл.13) для данной ГВС, вытекшей при аварии из емкости (хранилища), по табл.14 [7] при принятых зонах с  $\Delta P_{\phi 1}=100$  кПа,  $\Delta P_{\phi 2}=50$  кПа,  $\Delta P_{\phi 3}=20$  кПа,  $R_{6,7}=7$  кПа находим отношения  $r_1/r_0$  и, следовательно, радиусы ( $R_n$ ) принятых зон, зная  $r_0$  из (13):

$$\frac{r_1}{r_0} = \frac{R_n}{r_0} = c_n \quad \text{и} \quad R_n = c_n r_0, \quad (14)$$

где  $n$  – показатель той или иной принятой зоны;

$$c_n = \frac{r_1}{r_0} - \text{определяется по табл.14.}$$

По аналогии с характеристиками зон разрушений при воздействии воздушной УВ ядерных взрывов [7, 8, 10] определяют размеры опасных зон, в которых возникнут сильные, возможные (слабые) разрушения жилых и промышленных зданий в районах взрыва газо- и паровоздушных смесей углеводородных газов и жидкостей [21]. Следует сказать, что учитывая импульсный характер воздействия нагрузок от УВ, избыточное давление при взрыве ГВС, вызывающее сильные разрушения, будет примерно в 1,5-1,7 раза больше, чем при ядерном взрыве, т.е. примерно  $\Delta P_{\phi}^{\text{ГВС}}_{\text{ср}} \sim 50$  кПа, а возможные слабые разрушения –  $\Delta P_{\phi}^{\text{ГВС}}_{\text{сл}}=20$  кПа [21, 22]. Тогда радиусы зоны сильных ( $R_c$ ) и слабых ( $R_{\text{сл}}$ ) разрушений согласно (14):

$$R_{\text{сл}} = R_{20} = r_0 c_{20},$$

$$R_c = R_{50} = r_0 c_{50}. \quad (15)$$

Отношения  $R_{50}/r_0$  и  $R_{20}/r_0$  могут быть определены как по табл.14, так и по табл.15 [21]. В табл.15 приведены значения радиусов зон сильных ( $R_c = R_{50}$ ) и слабых ( $R_{\text{сл}} = R_{20}$ ) разрушений для количества разлившейся ГВС из разгерметизированной емкости ( $Q$ ) –  $Q=1-10000$  т и максимальных значений давлений  $P_{\max}=500-2000$  кПа [21].

Скорость распространения детонационной волны [7, 22] рассчитывается по зависимости

$$D = \sqrt{2(\gamma_c^2 - 1)Q_c}, \quad \text{м/с}, \quad (16)$$

где  $\gamma_c$  - показатель адиабаты продуктов детонации, определяемый по

табл.13.

$Q_c$  - теплота взрыва единицы массы ГВС или удельная теплота сгорания ГВС с воздухом, Дж/кг (табл.13).

Время полной детонации [7] облака ГВС находится по формуле

$$t_d = r_0 / D, \text{ с. (17)}$$

При аварийном вскрытии газопроводов и емкостей, разливах ГВС и их испарении облако, переобогащенное топливом, не детонирует, а интенсивно горит с внешней поверхности, вытягивается и образует огненный шар, который, поднимаясь, принимает грибовидную форму. Поражающее действие огненного шара характеризуется его размерами и временем теплового воздействия на объекты и людей, которое определяется временем горения (временем существования) огненного шара. Их величина зависит от общей массы жидкости в емкости в момент взрыва. В работах [21, 7] приводятся расчетные зависимости для определения радиуса и времени существования огненного шара.

Таким образом, алгоритм определения размеров опасных зон в районах взрыва газо- и паровоздушных смесей в открытой атмосфере можно представить в следующем виде:

1. Найти величину максимального давления в зоне детонации при взрыве заданной ГВС ( $P_{\max}$ , кПа) в воздушном пространстве, используя табл. 13.
2. Определить радиус детонации  $r_0$  по формуле (13);
3. Найти отношения  $r_1/r_0$  по табл.14 при  $\Delta P_{\phi 1}=100$  кПа,  $\Delta P_{\phi 2}=50$  кПа,  $\Delta P_{\phi 3}=20$  кПа,  $R_4=7$  кПа;
4. Рассчитать радиусы зон  $R_{100}$ ,  $R_{50}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_7$  по формуле (14);
5. Определить (дополнительно) по табл.15 радиусы зон сильных ( $R_c=R_{50}$ ) и слабых ( $R_{сл}=R_{20}$ ) разрушений, а также  $R_{50}/r_0$  и  $R_{20}/r_0$

при известном количестве ГВС разлившейся из разгерметизированного хранилища (емкости)  $Q$  и  $P_{\max}$ .

**Задача 1.** В результате разгерметизации емкости с сжиженным пропаном в количестве  $Q=10$ т, произошел взрыв пропано-воздушной смеси. Определить радиусы зон разрушений при  $\Delta P_{\phi 1}=100$  кПа,  $\Delta P_{\phi 2}=50$  кПа,  $\Delta P_{\phi 3}=20$  кПа,  $R_4=7$  кПа, приняв  $K=6$ .

Решение

1.  $r_0 = 18,5 \sqrt[3]{KQ} = 18,5 \sqrt[3]{6 \cdot 10} = 18,5 \cdot 1,8 = 33$  (м).
2. Из табл.13 для пропана  $P_{\max}=860$ кПа  $\approx 900$ кПа.
3. Из табл.14 при  $P_{\max}$  и  $\Delta P_{\phi 1}=100$  кПа:  $r_1/r_0=1,8$ ,  $R_{100}/r_0=1,8$ ; при  $\Delta P_{\phi 2}=50$  кПа:  $r_1/r_0=2,9$ ,  $R_{50}/r_0=2,9$ ; при  $\Delta P_{\phi 3}=20$  кПа:  $r_1/r_0=5$ ,  $R_{20}/r_0=5$ ; при  $\Delta P_{\phi 4}=7$  кПа:  $r_1/r_0=10$ ,  $R_7/r_0=10$ .

Примечание. Аналогично по табл.15 при  $P_{\max}=900$ кПа и  $Q=10$ т:  $r_{50}/r_0=2,9$  или  $R_{50}/r_0=2,9$ ;  $r_{20}/r_0=5$  или  $R_{20}/r_0=5$ .

4. Радиусы зон разрушений согласно (14):

$$R_{100}=1,8r_0=1,8 \cdot 33=60(\text{м}); R_{50}=2,9r_0=2,9 \cdot 33=95(\text{м});$$

$$R_{20}=5r_0=5 \cdot 33=165(\text{м}); R_7=10r_0=10 \cdot 33=330(\text{м}).$$

Примечание. Радиусы зоны сильных ( $R_c$ ) и слабых разрушений ( $R_{сл}$ ) и  $r_0$  определим по табл.15 (дополнительно) при  $Q=10т$  и  $P_{max}=900кПа$ :  $R_c=R_{50}=95м$ ,  $R_{сл}=R_{20}=165м$  и  $r_0=33м$ .

$$5. D = \sqrt{2(\kappa^2 - 1)Q_c} = \sqrt{2(1.257^2 - 1) \cdot 2,8 \cdot 10^6} = 1802 \text{ (м/с)},$$

где  $\kappa=1,257$  и  $Q_c=2,8 \cdot 10^6$  Дж/кг определены для пропано-воздушной смеси по табл.13. В общем случае по табл.13 можно было определить и  $D=1850$  м/с [7].

$$6. t_d=r_0/D, t_{д1}=33/1802=0,018 \text{ с.}$$

**Пример для самостоятельного решения.** При взрыве ацетилено-воздушной смеси произошла разгерметизация емкости, в которой хранится ацетилен в количестве 10т. Определить радиусы зон разрушений  $R_{100}$ ,  $R_{50}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_7$ , приняв  $K=6$ .

**Задача 2.** В населенном пункте с автономной системой газоснабжения располагается емкость со сжиженной пропан-бутановой смесью в количестве  $Q=100т$ . Определить размеры зон сильных и слабых разрушений при полной разгерметизации емкости и  $K=0,6$ .

Решение

1.  $P_{max}=900$  кПа для пропан-бутановой смеси по табл. 13.
2.  $r_0 = 18,5\sqrt[3]{KQ} = 18,5 \cdot \sqrt[3]{0,6 \cdot 100} = 18,5 \cdot 3,9 = 72$  (м).
3. По табл. 15 при  $P_{max}=900$  кПа и  $Q=100т$  находим:  $R_c=R_{50}=208$  м,  $R_{сл}=R_{20}=360$  м.

**Пример для самостоятельного решения.** В населенном пункте расположена емкость с ацетилен-воздушной смесью в количестве 100т. Определить радиусы зон сильных и слабых разрушений при полной разгерметизации емкости и  $K=0,6$ .

Ответ:  $r_0=72$  м,  $R_c=216$  м,  $R_{сл}=382$  м,  $P_{max}=1003$  кПа.

### Вторая методика расчета параметров зоны ЧС (разрушений)

При взрыве ГВС образуется зона ЧС с ударной волной, вызывающей разрушения зданий, оборудования и т. п. аналогично тому, как это происходит от УВ ядерного взрыва. В данной же методике зону ЧС при взрыве ГВС **делят на 3 зоны**: зона детонации (детонационной волны); зона действия (распространения) ударной волны; зона воздушной УВ [19, 22].

**Зона детонационной волны (зона I)** находится в пределах облака взрыва. Радиус этой зоны  $r_1, м$  приближенно может быть определен по формуле

$$r_1 = 17,5\sqrt[3]{Q}, \quad (18)$$

где  $Q$  - количество взрывоопасной смеси ГВС, хранящейся в емкости, т.

В пределах зоны I действует избыточное давление ( $\Delta P_{ф}$ ), которое принимается постоянным  $\Delta P_{ф1} = 1700$  кПа [19].

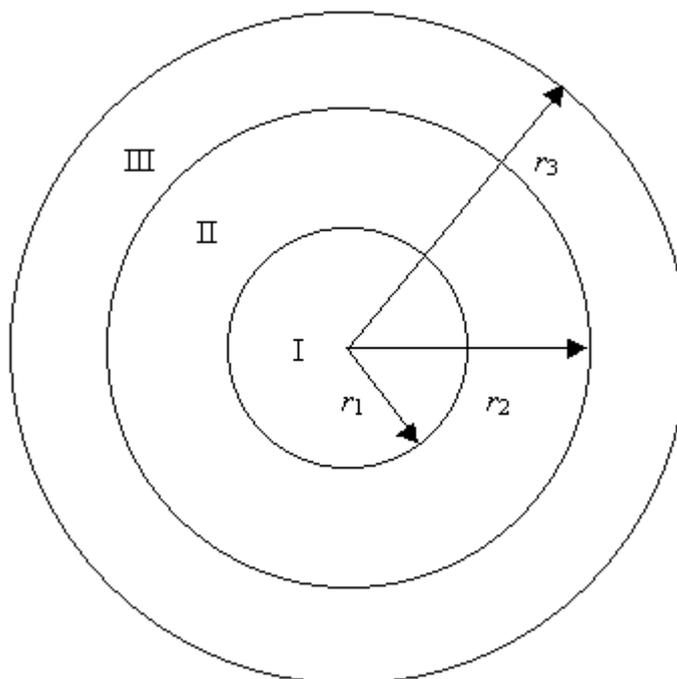
**Зона действия УВ взрыва (зона II)** – охватывает всю площадь разлета ГВС в результате ее детонации. Радиус этой зоны:

$$r_2 = 1.7r_1 \quad (19)$$

Избыточное давление в пределах зоны II изменяется от 1350 кПа до 300 кПа и находится

$$\Delta P_{\phi 2} = 1300(r_1/r) + 50, \quad (20)$$

где  $r$  – расстояние от центра взрыва до рассматриваемой точки, м.



**В зоне действия воздушной УВ (зона III)** – формируется фронт УВ, распространяющийся по поверхности земли. Радиус зоны  $r_3 > r_2$ , и  $r_3$  - это расстояние от центра взрыва до точки, в которой требуется определить избыточное давление воздушной УВ ( $\Delta P_{\phi 3}$ ):  $r_3 = r$ . Избыточное давление в зоне III в зависимости от расстояния до центра взрыва может быть определено по графику [19] или рассчитываться по формуле

$$\Delta P_{\phi 3} = 700/3(\sqrt{1 + 29.8\Psi^3} - 1), \quad \text{при } \Psi \leq 2 \quad (21)$$

или

$$\Delta P_{\phi 3} = 22 / (\Psi \sqrt{\lg \Psi + 0.158}), \quad \text{при } \Psi \geq 2 \quad (22)$$

где  $\Psi = 0,24r_3/r_1 = (0,24r)/(17,5 \sqrt[3]{Q})$  – относительная величина.

**Задача.** Определить избыточное давление в районе механического цеха при взрыве емкости со сжиженным пропаном в количестве  $Q=100$ т, если расстояние от емкости до цеха равно  $r=300$ м.

## Решение

1. Определим радиус зоны детонации (зона I):

$$r_1 = 17.5\sqrt[3]{Q} = 17.5\sqrt[3]{100} \approx 80 \text{ (м)}.$$

2. Вычислим радиус зоны действия продуктов взрыва (зона II):

$$r_2 = 1,7r_1 = 1,7 \cdot 80 = 136 \text{ (м)}.$$

3. Находим радиус зоны действия воздушной УВ (зона III)

$$r_3 = r = 300 \text{ (м)}.$$

Сравнивая расстояния от механического цеха до центра взрыва ( $r = 300$  м) с найденными радиусами зоны I ( $r_1 = 80$  м) и зоны II ( $r_2 = 136$  м), можно сказать, что цех находится в пределах этих зон и следовательно может оказаться в зоне воздушной УВ (зона III).

4. Определим относительную величину:

$$\psi = 0,24 r_3/r_1 = 0,24 \cdot 300/80 = 0,9.$$

Значит  $\psi < 2$ .

5. Избыточное давление воздушной УВ на механический цех :

$$\Delta P_{\phi 3} = \frac{700}{3}(\sqrt{1 + 29.8\psi^3} - 1) = \frac{700}{3}(\sqrt{1 + 29.8 \cdot 0.9^3} - 1) \approx 60 \text{ кПа}.$$

**Вывод.** Механический цех будет находиться в зоне полных разрушений ( $\Delta P_{\phi} > 50$  кПа) [8].

**Пример для самостоятельного решения.** Определить избыточное давление УВ в районе механического цеха объекта экономики при взрыве емкости со сжиженным пропаном в количестве  $Q=100$ т, если расстояния от емкости до цеха  $r = 600$  м.

Ответ:  $\psi=1,8$  и  $\Delta P_{\phi} = 20$  кПа.

## 2. Взрывы ГВС в замкнутых объемах

Горючие смеси газов (паров) с воздухом (окислителем) образуются в ограниченных объемах технологической аппаратуры в помещениях промышленных и жилых зданий вследствие утечки газа по различным причинам и воспламеняются от внешних источников зажигания [7, 22]. Горение ГВС в замкнутых объемах от точечного источника зажигания происходит послойно с дозвуковой скоростью распространения пламени (дефлограционное горение) при повышении давления и температуры во всем объеме. К концу полного выгорания смеси среднее значение температуры в помещении достигает

значений в 1,5-2 раза больших, чем при аналогичных взрывах в открытом пространстве [7, 22].

Согласно рекомендациям ГОСТ 12.1.004-85, избыточное давление взрыва ГВС в помещениях можно определить по формуле [7, 22]

$$\Delta P_{\phi} = (M_{\Gamma} Q_{\Gamma} P_0 Z) / (V_{\text{св}} \rho_{\text{В}} C_{\text{В}} T_0 K_1) = (\rho_{\Gamma} Q_{\Gamma} P_0 Z) / (\rho_{\text{В}} C_{\text{В}} T_0 K_1), \quad (23)$$

где  $M_{\Gamma} = V_{\text{св}} \rho_{\Gamma}$  – масса горючего газа, поступившего в помещение в результате аварии, кг;

$Q_{\Gamma}$  – удельная теплота сгорания ГВС, Дж/кг;

$P_0$  – начальное давление в помещении, кПа; его принимают в расчетах  $P_0 = 101$  кПа;

$Z$  – доля участия продуктов во взрыве, принимается в расчетах  $Z = 0,5$ ;

$V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>; допускается принимать 80% от полного объема помещения, т. е.  $V_{\text{св}} = 0,8 V_{\text{п}}$ ;

$V_{\text{п}}$  – полный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{В}}$  – плотность воздуха до взрыва, кг/м<sup>3</sup> при начальной температуре  $T_0$ , °К. Рекомендуется принимать в расчетах  $\rho_{\text{В}} = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{В}}$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°К); принимают  $C_{\text{В}} = 1,01 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°К);

$K_1$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, допускается принимать  $K_1 = 2$  или  $K_1 = 3$ ;

$T_0$  – начальная температура воздуха в помещении, °К.

**Задача.** В результате утечки бытового газа пропана в кухне квартиры площадью 10 м<sup>2</sup> и высотой 2,5 м при температуре 20°С образовалась равновесная пропано-воздушная смесь. Рассчитать избыточное давление взрыва такой смеси при  $K_1 = 2$  и  $K_1 = 3$ .

Решение

$$\Delta P_{\phi} = (M_{\Gamma} Q_{\Gamma} P_0 Z) / (V_{\text{св}} \rho_{\text{В}} C_{\text{В}} T_0 K_1). \quad (24)$$

1.  $M_{\text{В}} = M_{\Gamma} = \rho_{\text{В}} V_{\text{св}}$ ,  $V_{\text{св}} = 0,8 V_{\text{п}} = 0,8 \cdot 10 \cdot 2,5 = 20$  (м);

$$M_{\text{В}} = M_{\Gamma} = V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{В}} / K_1 = (20 \cdot 1,225) / 2 = 12,2$$
 (кг).

2.  $Q_{\Gamma} = 2,8 \cdot 10^6$  Дж/кг при  $T_0 = 293$  °К определим по табл. 13 для пропановоздушной смеси [7].

3.  $P_0 = 101$  кПа;  $Z = 0,5$ ;  $\rho_{\text{В}} = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{В}} = 1,01 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°К) – значения принимаются в расчетах.

4. Подставив эти значения параметров в формулу (24), получим

$$\Delta P_{\phi 1} = 119 \text{ кПа при } K_1 = 2; \Delta P_{\phi 2} = 80 \text{ кПа при } K_1 = 3.$$

**Пример для самостоятельного решения.** Условие задачи то же, но принять выброс в помещение метана и образование в нем метано-воздушной смеси.

### Список литературы

1. Состояние защиты населения и территорий России от чрезвычайных ситуаций в 2003 году (Государственный доклад). Гражданская защита, 2004 г., №7, с.18-23.
2. Пчёлкин В. И. Безопасность зданий и сооружений в зоне гидродинамических аварий на гидротехнических сооружениях. Технологии гражданской безопасности. Вестник ФЦ "ВНИИ ГОЧС", 2004, №2(4), с. 66-69.
3. Шангареев С. Инженерная защита гидротехнических сооружений. Гражданская защита, 2003, №5, с. 25-26.
4. Федеральный закон РФ О безопасности гидротехнических сооружений от 16 октября 1997 г., №132-ФЗ.
5. ГОСТ Р.22.1.11-2002. БЧС Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования.
6. Слишком велика вероятность. Военные знания, 1998, февраль, с. 32-33.
7. Чрезвычайные ситуации ( источники, прогноз, защита): учеб. пособие/ М.П. Пьянзин, А.Ф. Борисов. НГАСУ, Вента, Н.Новгород, 2004.
8. Гражданская оборона /под ред. Е. П. Шубина. - М.:Просвещение, 1991.
9. Безопасность в чрезвычайных ситуациях /под ред. Н. К. Шишкина. -М.:ГУУ, 2000.
10. Безопасность в чрезвычайных ситуациях/ Б.С. Мастрюков - М.: Изд. Центр "Академия", 2003.
11. Озеров А. Метод оперативного оповещения о землетрясениях на Камчатке. Гражданская защита. 2003, №11, с. 53-56.
12. Как бы с водой не выплеснуть ребенка. Гражданская защита. 2005, №1, с. 13-19.
13. Гражданская защита: учеб. пособие/ П.П. Титоренко. - М.: МГТУ, 1997.
14. Краткие справочные данные о ЧС техногенного, антропогенного и природного происхождения. - М.:Штаб ГО РФ, 1990.
15. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения и территорий при ЧС: учеб. пособие/ В.В. Денисов, И.А. Денисова. - М.:ИКЦ "МарТ", Ростов н/д: Издательский центр "МарТ", 2003.- 608 с.
16. Справочные данные по расчету ЧС техногенного и экологического происхождения. - М.: Штаб ГО СССР, 1990.
17. Устойчивость объектов экономики в ЧС.: учеб. пособие/ В.И. Васильев. - СПб: СПб ГПУ, 2002.
18. Стихийные бедствия, аварии, катастрофы. Вып.1//Библиотечка жур-нала "Военные знания".- М., 1998.
19. Демиденко Г. П. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения : Справ., Киев : ВШ, 1989.-287 с.
20. Основы защиты населения и территорий в ЧС / под ред. В. В. Тарасова. - М.:МГУ, 1998.
21. Цивилёв М. Размеры зон разрушений при детонационных взрывах газо- и паровоздушных смесей углеводородных веществ. Гражданская защита, 1995, №11, с. 57-60.
22. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М. В. Бесчастнов. - М.: Химия, 1991.

### Приложения

Таблица 1

Краткая характеристика возможной интенсивности землетрясений по 12-балльной шкале Меркалли (MSK-64) [15]

Баллы	Краткая характеристика землетрясений
I	Отмечается только сейсмическими приборами
II	Ощущается отдельными людьми, находящимися в полном покое
III	Ощущается небольшой частью населения
IV	Легкое дребезжание и колебания предметов, посуды и оконных стекол
V	Общее сотрясение зданий, колебание мебели, трещины в оконных стеклах и штукатурке
VI	Пробуждение спящих, падение со стен картин, откалываются отдельные куски штукатурки
VII	Трещины в стенах каменных домов, антисейсмические и деревянные постройки остаются невредимыми
VIII	Трещины на почве, сдвиг или опрокидывание памятников, сильное повреждение домов
IX	Сильное разрушение каменных домов, перекосы деревянных домов
X	Трещины в почве, иногда до метра шириной, оползни, обвалы со склонов, разрушение каменных построек, искривление железнодорожных рельсов
XI	Более широкие трещины в поверхностных слоях земли, многочисленные обвалы, каменные дома совершенно разрушаются, выпячивание железнодорожных рельсов
XII	Большие изменения ландшафта, многочисленные трещины, обвалы, оползни, возникновение водопадов, подпруд на озерах, изменение течения рек, ни одно сооружение не выдерживает

Таблица 2

Соотношение между шкалой Рихтера и MSK-64 [15]

Магнитуда по Рихтеру	4,0-4,9	5,0-5,9	6,0-6,9	7,0-7,9	8,0-8,9
Интенсивность по шкале MSK-64	IV-V	VI-VII	VIII-IX	IX-X	XI-XII

Таблица 3

Степень разрушения зданий, сооружений при землетрясении [8,9]

N п.п.	Характеристика зданий и сооружений	Разрушение, баллы			
		слабое	среднее	сильное	полное
1	Массивные промышленные здания с металлическим каркасом и крановым оборудованием грузоподъемностью 25-50 т	VII-VIII	VII-IX	IX-X	X-XII
2	Здания с легким металлическим каркасом и бескаркасной конструкции	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX	IX-XII
3	Промышленные здания с металлическим каркасом и бетонным заполнением с площадью остекления 30%	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX	IX-X
4	Промышленные здания с металлическим каркасом и сплошным хрупким заполнением стен и крыши	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX	IX-XI
5	Здания из сборного железобетона	VI-VII	VII-VIII	-	VIII-XI
6	Кирпичные бескаркасные производственно - вспомогательные одно- и многоэтажные здания с перекрытием (покрытием) из железобетонных сборных элементов	VI-VII	<u>VII-VIII</u>	VIII-IX	IX-XI
7	То же, с перекрытием (покрытием) из деревянных элементов одно- и многоэтажные	VI	VI-VII	VII-VIII	более VIII
8	Административные многоэтажные здания с металлическим или железобетонным каркасом	VII-VIII	VIII-IX	IX-X	X-XI
9	Кирпичные малоэтажные здания (один-два этажа)	VI	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX
10	Кирпичные многоэтажные здания (три и более этажей)	VI	VI-VII	VII-VIII	VIII-IX

11	Складские кирпичные здания	V-VI	VI-VIII	VIII-IX	IX-X
12	Трубопроводы на металлических или ж/б эстакадах	VII-VIII	VIII-IX	IX-X	-

Таблица 4

Устойчивость систем жизнеобеспечения, % [10]

Система	Степень повреждения, баллы				
Водоснабжение	80/90	53/80	48/53	36/48	24/36
Электроснабжение	85/95	75/85	60/75	43/60	32/43
Газоснабжение	90/95	85/90	77/85	62/77	50/62
Теплоснабжение	85/90	77/85	50/77	28/50	15/28
Транспорт	90/95	85/90	68/85	55/68	20/55
Канализация	100/100	90/100	82/90	55/68	45/60
Связь	100/100	90/100	82/90	55/82	30/55

Примечание: В числителе - % систем жизнеобеспечения, способных к функционированию немедленно, а в знаменателе - после восстановительных работ в течение суток.

Таблица 5

Безвозвратные (смертельные) потери населения при землетрясениях, % [7,16]

Тип зданий	Интенсивность землетрясения, баллы							
	Безвозвратные потери населения при землетрясениях, %							
Деревянные	0	0	0	0	3	40	65	85
Кирпичные малоэтажные (1-2 этажа)	0	0	10	15	50	55	75	85
Кирпичные многоэтажные	0	0	0	3	40	50	75	83

Кирпичные с неполной каркасной стеной	0	0	0	3	40	50	75	83
Каркасно-панельные с расчетной сейсмостойкостью в:								
VII баллов	0	0	0	0	15	40	60	80
VIII баллов	0	0	0	0	0	15	40	65
IX баллов	0	0	0	0	0	0	15	50
Промышленные с каркасом среднего типа и расчетной сейсмостойкостью в:								
VII баллов	0	0	0	0	15	40	60	80
VIII баллов	0	0	0	0	0	15	40	65
IX баллов	0	0	0	0	0	0	15	50
Промышленные с каркасом тяжелого типа и расчетной сейсмостойкостью в:								
VII баллов	0	0	0	0	15	40	60	80
VIII баллов	0	0	0	0	0	15	40	65
IX баллов	0	0	0	0	0	0	15	50

Таблица 6

Перечень основных прогнозируемых параметров ЧС на водоподпорных ГТС [2]

Наименование параметров волны прорыва	Характер воздействий волны прорыва
1. Ширина прорыва в ГТС, м	Степень затопления и разрушений, потерь
2. Максимальная глубина затопления от волны прорыва в нижнем бьефе гидроузла, м	То же
3. Максимальная скорость течения воды в волне прорыва в нижнем бьефе гидроузла, м/с	Степень разрушений
4. Время добегания фронта волны прорыва до створа объекта воздействия (время начала затопления объекта), ч	Количество пострадавшего населения, безвозвратные и санитарные потери. Материальный ущерб

5. Время достижения максимальной высоты волны прорыва, ч	То же
6. Температура воды в волне прорыва, °С	Степень воздействия на живые организмы, потери
7. Время существования волны прорыва. Продолжительность затопления, ч, сут	Величина общего ущерба. Санитарно-гигиеническое и эпидемическое состояние территории в зоне затопления
8. Величина падения уровня воды в верхнем бьефе, м	Состояние местности в верхнем бьефе
9. Скорость падения уровня воды в верхнем бьефе, м/ч	То же

Таблица 7

Параметры волны прорыва, приводящие к разрушению объектов

Объект	Степень разрушения					
	Слабая		Средняя		Сильная	
	$h$ , м	$v$ , м/с	$h$ , м	$v$ , м/с	$h$ , м	$v$ , м/с
Здания: Кирпичные(4 и более эт.) Кирпичные(1-2 этажа) Каркасные панельные Промышленные с легким металлическим каркасом и бескаркасные Промышленные с тяжелым металлическим каркасом или ж/б каркасом Бетонные и ж/б здания Деревянные дома (1-2 этажа) Сборные деревянные дома	2,5	1,5	4	2,5	6	3
	2	1	3	2	4	2,5
	3	1,5	6	3	7,5	4
	2	1,5	3,5	2	5	2,5
	3	1,5	6	3	8	4
	4,5	1,5	9	3	12	4
	1	1	2,5	1,5	3,5	2
Мосты: металлические железобетонные деревянные	0	0,5	1	2	2	3
	0	0,5	1	2	2	3

	0	0,5	1	1,5	1	2
Дороги:	1	1	2	1,5	4	3
с асфальтобетонным покрытием с гравийным покрытием	0,5	0,5	1	1,5	2,5	2
Пирс	6	5	4	3	1	1,5
Плавучий док	3	1,5	5	1,5	8	2
Плавучий кран	2,5	1,5	5	1,5	7	2

Таблица 8

Значения коэффициентов  $m$  и  $m_1$  при различных расстояниях от плотины до объекта

Наименование параметров	Расстояние от плотины до объекта ( $R$ ), км						
	0	25	50	100	150	200	250
коэффициент $m$	0,25	0,2	0,15	0,075	0,05	0,03	0,02
коэффициент $m_1$	1	1,7	2,6	4	5	6	7

Таблица 9

Максимальный расход воды на 1 м ширины прорана [9,8]

$H$ , м	5	10	25	50
$N$ , м <sup>3</sup> /с 1м	10	30	125	350

Таблица 10

Значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  при гидравлическом уклоне реки [10,13]

$B$	$H_0$ , м	$i=1 \cdot 10^{-4}$				$i=1 \cdot 10^{-3}$			
		$A_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$	$A_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$
<b>1,0</b>	20	100	90	9	7	40	10	16	21
	40	280	150	20	9	110	30	32	24
	80	720	286	39	12	300	60	62	29
	150	1880	500	78	15	780	106	116	34
	250	4000	830	144	19	1680	168	208	40

<b>0,5</b>	20	128	204	11	11	56	51	18	38
	40	340	332	19	14	124	89	32	44
	80	844	588	34	17	320	166	61	52
	150	2140	1036	62	23	940	299	113	62
	250	4520	1976	100	27	1840	470	187	79
<b>0,25</b>	20	140	192	8	21	40	38	15	43
	40	220	388	13	21	108	74	30	50
	80	880	780	23	21	316	146	61	65
	150	2420	1456	41	20	840	172	114	89
	250	4740	2420	67	16	1688	452	191	116

Таблица 11

Значения коэффициента  $b$  [10]

$iL/H_0$	Высота плотины ( $H_0$ ) в долях от средней глубины реки в нижнем бьефе ( $h_0$ )	
	$H_0=10h_0$	$H_0=20h_0$
0,05	15,5	18,0
0,1	14,0	16,0
0,2	12,5	14,0
0,4	11,0	12,0
0,8	9,5	10,8
1,6	8,3	9,9
3,0	8,0	9,6
5,0	7,6	9,3

Таблица 12

Время прихода гребня ( $t_{гр}$ , ч) и фронта волны прорыва ( $t_{фр}$ , ч) [10,13]

$L$ , км	$H_0=20\text{м}$		$H_0=40\text{м}$		$H_0=80\text{м}$	
	$i=10^{-3}$	$i=10^{-4}$	$i=10^{-3}$	$i=10^{-4}$	$i=10^{-3}$	$i=10^{-4}$



кПа																
500	500	270	15 5	11 5	90	55	48	25	1 5	8	5	4	3	2, 5	1, 5	1, 0
900	900	486	79	20 7	16 2	99	86	45	2 6	1 4	9	7	5	4, 5	2, 7	1, 8
1000	100 0	540	31 0	23 0	18 0	11 0	96	50	2 9	1 6	1 0	8	6	5	3	2
1700	170 0	918	52 7	39 1	30 6	19 5	16 3	82	5 0	2 8	1 8	1 3	1 0	8	5	3, 7
2000	200 0	108 0	62 0	46 0	36 0	22 0	19 2	10 0	5 8	3 2	2 0	1 6	1 2	1 0	6	4

Таблица 15

Радиусы зон сильных и слабых разрушений

P <sub>m</sub> ах, кПа	r <sub>50</sub> / r <sub>0</sub>	r <sub>20</sub> / r <sub>0</sub>	Радиусы зон сильных (R <sub>с</sub> ) и слабых (R <sub>сл</sub> ) разрушений, [м], вокруг емкостей с ГВС (ПВС), Q														
			1Т			10Т			100Т			1000Т			10000Т		
			r <sub>0</sub>	R <sub>с</sub>	R <sub>сл</sub>	r <sub>0</sub>	R <sub>с</sub>	R <sub>сл</sub>	r <sub>0</sub>	R <sub>с</sub>	R <sub>сл</sub>	r <sub>0</sub>	R <sub>с</sub>	R <sub>сл</sub>	r <sub>0</sub>	R <sub>с</sub>	R <sub>сл</sub>
50 0	1,9	3,5	15 ,6	3 0	55	3 3	63	115	7 2	13 7	252	1 5 0	28 5	525	3 3 0	62 7	11 55
90 0	2,9	5,0	-"-	4 5	78	- "	95	165	- "	20 8	360	- "	43 5	750	- "	95 7	16 50
10 00	3	5,3	-"-	4 7	83	- "	99	175	- "	21 6	382	- "	45 0	795	- "	99 0	17 50
17 00	4	7,6	-"-	6 2	119	- "	13 2	250	- "	28 8	547	- "	60 0	1140	- "	13 20	25 10
20 00	4,8	8,0	-"-	7 5	125	- "	15 8	264	- "	34 5	576	- "	72 0	1200	- "	15 84	26 40