

УДК 389.17:006.  
ББК 69.68  
К 59

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Ведущий научный сотрудник Института аграрных проблем РАН  
доктор экономических наук С.А. Андрющенко  
Заведующий лабораторией надежности и взрывобезопасности  
ДОО «ВНИПИГаздобыча», кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник В.А. Сорокованов

Одобрено  
редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета

**Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.**

К 59      **Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков.** Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 178 с.

ISBN 5-7433-1018-1

Рассмотрены теоретические основы и практика анализа техногенных рисков, обоснованы вероятностные методы количественной оценки опасностей объектов техносферы.

Монография адресована инженерам и экологам, экономистам и менеджерам, работникам государственных органов власти, специалистам в области промышленной безопасности, студентам и аспирантам технических и экономических вузов.

Ил. 88. Табл. 63. Библ. 261 наим.

**УДК 389.17:006**  
**ББК 69.68**

© Саратовский государственный  
технический университет, 2002  
© Козлитин А.М., Попов А.И.,  
Козлитин П.А., 2002

ISBN 5-7433-1018-1

<http://risk-2005.narod.ru/>

[kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

## ГЛАВА 3

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА АВАРИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

#### 3.1. Детерминированные методы количественной оценки экологической опасности аварий на гидротехнических сооружениях

Огромную роль в профилактике повреждения гидроузлов в условиях их эксплуатации для конкретных регионов играет прогноз опасных явлений, предсказание силы, частоты, характера и зоны распространения стихийных бедствий и связанных с ними аварий и катастроф.

Типизация стихийных бедствий (СБ) – первый, довольно сложный этап прогноза. При всем разнообразии СБ их можно дифференцировать прежде всего по скорости распространения (мгновенно или постепенно распространяющиеся), а также по возможности ограничения зоны их воздействия.

Мировая статистика свидетельствует о том, что ежегодно в мире по различным причинам на плотинах происходит более 3000 аварий, нередко с большим материальным ущербом и гибелью людей. В мирное время основными причинами катастроф являются недостаточное гидрологическое и инженерно-геологическое обоснование проектов. Так, обычно при проектировании плотин расчет ведется на очень редкие события. Например, в нашей стране для водосливных плотин крупных ГЭС за расчетный расход принимается максимальный расход воды, повторяемостью не чаще 1 раза в 10 тысяч лет. Кроме того, для защиты плотин предусматривается ряд дополнительных мероприятий, в том числе форсирование уровней в верхних бьефах гидроузлов сверх нормальных подпорных отметок. Рассчитываются также сценарии и последствия гипотетических аварий. Однако, при недостаточном гидрологическом обосновании проектов возможно, из-за неопределенности и неоднозначности исходной информации, занижение экстремальных максимальных и расчетных сбросных расходов и размеров водосбросов.

В результате недостаточных размеров водосбросов не обеспечивается пропуск высоких половодий и паводков редкой повторяемости, что влечет за собой переполнение водохранилищ, перелив воды через гребень плотин и их повреждение и разрушение, особенно если они грунтовые. В таких случаях в нижний бьеф обрушивается волна прорыва, разрушая хозяйственные объекты, населенные пункты, пастбища и т.д.

Переливы через гребень плотин были связаны не только с нерасчетными паводками, но и с рядом причин, в том числе с оползнями и обрушением в водохранилища массивов неустойчивых горных пород на значительных участках их берегов. Следствием этого явилось формирование волн вытеснения, размеры которых превышали пропускную способность водосбросов.

В истории плотиностроения известен ряд случаев образования подобных волн, вызвавших перехлест воды через плотину [50]. Самые трагические последствия (большие разрушения и человеческие жертвы) были вызваны волной вытеснения, образовавшейся в результате обрушения в 1963 г. в водохранилище Вайонт (Италия) скального оползня объемом 260-300 млн. м<sup>3</sup>. Высота всплеска у берегов водохранилища достигла при этом 270 м, а толщина слоя воды, переливающейся через гребень плотины, 70 м. Бетонная плотина выдержала перегрузки, но волной вытеснения объемом 25 млн. м<sup>3</sup> были почти полностью разрушены г. Лангароне и ряд деревень. Число жертв составило 1899 человек, а ущерб достиг 100 млн. долларов.

Переливы воды из водохранилища через гребень плотины могут быть связаны и с чисто техническими причинами - отказом затворов водосбросных сооружений вследствие редкого использования, отсутствия профилактики и периодической проверки их на эксплуатационную надежность. Подобные отказы приводили к аварийным ситуациям на ряде плотин. Так, из-за отсутствия подачи электроэнергии к механизмам управления затворами водосбросов в 1958 г. был разрушен участок плотины Кадда в Индии длиной 137 м при высоте переливающегося слоя воды в 45 м.

Из-за неисправности электрооборудования и невозможности открыть все 18 пролетов для пропуска паводка (удалось открыть только три) были усугублены последствия аварии в 1979 г. на плотине Марху II (также в Индии). Число жертв составило 2000 человек [50].

В России аналогичная авария произошла 7 августа 1994 г. на плотине Тирлянского водохранилища (объемом 7 млн. м<sup>3</sup>) в бассейне р. Белой, когда после интенсивных дождей вследствие изношенности механизмов не смогли открыть все отверстия берегового водосброса (работало только одно из них) и вода из переполненного водохранилища хлынула через гребень земляной плотины. Плотина была разрушена в течение нескольких часов, 7-метровая волна прорыва снесла пос. Тирлян, погибли 28 человек [50].

Изучение причин аварий плотин различных типов специалистами показало, что большинство повреждений бетонных и грунтовых плотин связано с их основаниями.

В Сибири подобные явления (трещинообразование и фильтрация воды) были зарегистрированы на бетонных плотинах Братской, Усть-Илимской и Саяно-Шушенской ГЭС, что связано не только с наличием зон растяжения или сжатия, но и с прочностью скальных оснований.

Таким образом, основными факторами повреждения или разрушения плотин являются экстремальные, сверхрасчетные расходы воды, недостаточная пропускная способность водосбросных сооружений, неисправность механического оборудования, нарушение прочности (устойчивости) сооружений, нарушение фильтрационной прочности различных частей гидроузлов, большие потери на фильтрацию. Непосредственными причинами

повреждений и нарушений могут быть как случайные отклонения от расчетных значений, так и ошибки в прогнозах и расчетах при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений, а также нештатные ситуации, вызванные спонтанно проявляющимися явлениями природы и преднамеренными или непреднамеренными действиями людей.

На основе проведенного анализа условий возникновения чрезвычайных ситуаций на гидросооружениях разработаны и обоснованы вероятные сценарии аварий с разрушением плотины одного из конкретных гидроузлов Волжского каскада (далее по тексту ГЭС).

Рассмотрим вероятные сценарии аварий при различных подпорных уровнях в верхнем бьефе водохранилища, а в нижнем бьефе берем среднегодовые начальную глубину и абсолютный уровень реки, затем берем те же величины, но при максимальном подъеме паводковых вод.

Все вышеперечисленные условия, в виде сценариев возможных аварийных ситуаций, сведем в табл.3.1.

Таблица 3.1

Характеристики вероятных аварийных сценариев на ГЭС

| <b>Нижний бьеф</b>  | <b><math>V_r=15.00</math> м<br/><math>n_0=20.00</math> м</b> | <b><math>V_r=21.76</math> м (**)<br/><math>n_0=26.76</math> м</b> |
|---------------------|--|---|
| <b>Верхний бьеф</b> |  |   |
| Но=31,40 м          | 1-й сценарий   | 5-й сценарий  |
| Но=28,00 м          | 2 -й сценарий  | 6-й сценарий  |
| Но=26,50 м          | 3-й сценарий   | не реализуемый  |
| Но=32,10 м (*)      | 4-й сценарий   | 8-й сценарий  |

(\*) - при прорыве гидроузла верхнего бьефа.

(\*\*) - максимальный уровень подъема паводковых вод нижнего бьефа (статистические данные за 20 лет).

**Примечание:** При указанных в табл. 3.1 условиях в верхнем бьефе перелив через плотину не произойдет, т.к. максимальный уровень прорыва через тело плотины должен быть 35 м.

На основе анализа развития аварий на гидротехнических сооружениях выберем наиболее опасные сценарии для ГЭС, с точки зрения затопления нижнего бьефа. Эти данные сведены в табл.3.2.

Рассмотрим вероятные сценарии аварий, которые в мировой практике приводили к образованию прорана в теле русловой плотины. Тело станции представляет железобетонный монолит и в расчеты не берется. При определении вероятных сценариев аварий на ГЭС, учитывая суммарную пропускную способность гидроузла со сбросным расходом воды 69800 м<sup>3</sup>/с, исходили из предположения, что прорыв плотины возможен только при наложении на факторы, указанные в табл.3.2, дополнительных экстремальных факторов внешнего воздействия – оползневые подвижки в верхнем бьефе и, как следствие, засорение грунтом водосбросов; прорыв плотины верхнего бьефа; диверсионно-террористические акты и т.п.

Таблица 3.2

Характеристики наиболее опасных сценариев на ГЭС

| Верхний бьеф \ Нижний бьеф | $V_r=21.76$ м (**)<br>$n_0=26.76$ м | Вероятность обеспеченности рассматриваемого сценария |
|----------------------------|-------------------------------------|--|
| Но=31,40 м                 | 5-й сценарий                        | $10^{-4}$  |
| Но=28,00 м                 | 6-й сценарий                        | $10^{-4}$  |
| Но=26,50 м                 | 7-й сценарий                        | не реализуемый                                       |
| Но=32,10 м (*)             | 8-й сценарий                        | $10^{-4}$  |

(\*) - при прорыве гидроузла верхнего бьефе.

(\*\*) - максимальный уровень подъема паводковых вод нижнего бьефа (статистические данные за 20 лет).

**Примечание:** С учетом принятого в проекте расчетного сбросного расхода воды через плотину ГЭС - 69800 м<sup>3</sup>/с, форсирование уровня воды в верхнем бьефе возможно до отметки 31,4 м. При этом обеспеченность такого случая составляет 0,01%.

**Сценарий 5-А.** Совмещение случайных независимых событий: паводка с обеспеченностью 0,01% и катастрофического оползня правого берега р. Волги с попаданием в водохранилище не менее 30 млн.м<sup>3</sup> грунта с последующим «забитием» грунтом большей части водосбросов гидроузла. Перелив воды через гребень плотины с последующим разрушением русловой ее части вследствие недостаточной пропускной способности водосбросов.

*Исходные данные:* НПУ=31,4 м, абсолютный уровень нижнего бьефа - 21,76 м (максимальный паводок за 20 лет). Оползневые процессы в верхнем бьефе и, как следствие, засорение грунтом водосбросов (частота оползневых подвижек правого берега р. Волги на основании оценок [76]  $\lambda=8,3 \cdot 10^{-4}$  1/год). Повышение уровня в связи с паводком при стоке через водосбросы 69800 м<sup>3</sup>/с. Вероятность паводка с расходом 69800 м<sup>3</sup>/с составляет  $10^{-4}$ . Результирующая частота такого сценария – перелив воды через плотину, при одновременной реализации всех перечисленных выше событий, – может составить  $\lambda_{\Sigma} = 8,3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} = 8,3 \cdot 10^{-8}$  1/год.

**Сценарий 5-Б.** Совмещение случайных независимых событий: катастрофического паводка с обеспеченностью 0,01% и аварийного прорыва плотины верхнего бьефа. Перелив воды через гребень левобережной дамбы, при набегающей волне прорыва гидроузла верхнего бьефа высотой 25 м, с последующим ее размывом. *Исходные данные:* прорыв плотины верхнего бьефа и, как следствие, НПУ - 32,10 м, при высоте волны у плотины ГЭС порядка 2,5 м. Частота установления НПУ = 32,10 м, в случае прорыва плотины верхнего бьефа, составляет  $\lambda=7 \cdot 10^{-4}$  1/год. Вероятность паводкового водосброса с расходом 69800 м<sup>3</sup>/с составляет  $10^{-4}$ . Результирующая частота такого сценария – перелив воды через плотину, при одновременной реализации всех перечисленных выше событий, – может составить  $\lambda_{\Sigma} = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} = 7 \cdot 10^{-8}$  1/год.

**Сценарий 5-В.** Совмещение случайных независимых событий: размыва части основания русловой плотины вследствие фильтрации воды через тело плотины и антропогенных тектонических подвижек в месте провисания русловой плотины. Как следствие, неравномерная осадка тела

плотины с образованием трещин на всю ее высоту с последующим катастрофическим размывом и образованием прорана. Результирующая частота такого сценария – катастрофический размыв основания русловой плотины и образование прорана, при одновременной реализации всех перечисленных выше событий, – может составить  $\lambda_{\Sigma} = 4,38 \times 10^{-7}$  1/год.

**Сценарий 6.** Исходные данные: НПУ=28,0 м, абсолютный уровень нижнего бьефа - 21,76 м. При профессиональном диверсионно-террористическом воздействии на тело плотины направленным взрывом частота сценария может составить  $\lambda = 10^{-4}$  1/год.

При разрушениях гидротехнических сооружений в нижнем бьефе формируются очаги поражения – определенная территория, в пределах которой произошло катастрофическое затопление местности, повреждения и разрушения зданий и сооружений, сопровождающиеся поражениями и гибелью людей, животных и урожая сельскохозяйственных культур, порчей и уничтожением сырья, топлива, продуктов питания, транспортных магистралей, загрязнением окружающей природной среды.

Последовательная картина затопления города – заливаются подвалы, внутренние двory, расположенные ниже улиц, затем улицы и первые этажи зданий. Местность покрывается слоем воды. Поток вырывает с корнем деревья, сносит большие каменные глыбы, каменные ограды и небольшие здания. Многие деревянные строения разваливаются и сносятся в течение 3÷4 часов. Сохранившиеся затопленные кирпичные и бетонные здания теряют капитальность – отваливается штукатурка, разрушается кирпичная кладка, металлические конструкции, сварные швы наружных несущих стеновых панелей и арматура железобетона интенсивно корродируют. На значительных площадях затопленной территории в течение первого часа нарушаются средства сообщения, выходят из строя телефонная связь и электроснабжение. Разрушаются мосты, мощные дороги, системы жизнеобеспечения.

На затопляемой территории принято выделять [90] четыре зоны катастрофического затопления в зависимости от скорости потока волны прорыва в среднем течении реки, высоты волны прорыва и расстояния от гидросооружения (рис.3.1).

**Первая зона** катастрофического затопления примыкает непосредственно к гидросооружению и простирается на 6-12 км, высота волны прорыва достигает нескольких метров (в зависимости от глубин и их соотношения в верхнем и нижнем бьефах). Волна прорыва в этой зоне характеризуется бурным потоком воды со скоростью 30 км/ч и более. Время прохождения волны прорыва примерно 30 мин.

**Вторая зона** – зона быстрого течения со скоростью потока воды 15-20 км/ч. Внешняя граница этой зоны проходит на расстоянии 15-25 км от плотины. Время прохождения волны прорыва 50-60 мин.

**Третья зона** – зона среднего течения со скоростью 10-15 км/ч и расстоянием от плотины до 30-50 км. Время прохождения волны прорыва 2-3 ч.

**Четвертая зона** – зона слабого течения (разлива). Скорость течения 6-10 км/ч. Ее протяженность будет зависеть от рельефа местности и может составить 36-70 км от гидросооружения.

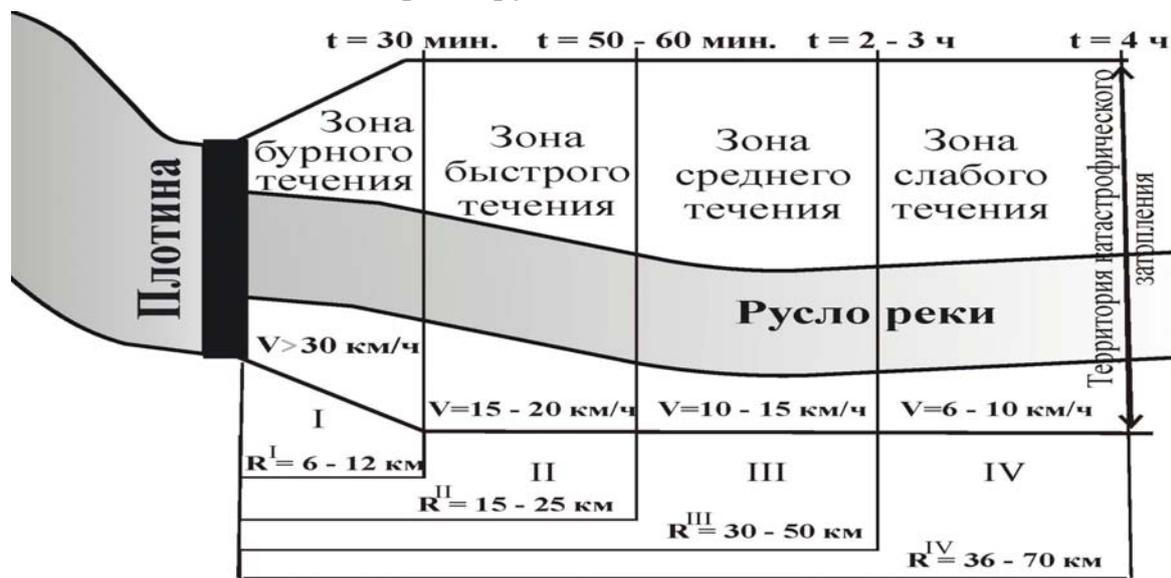


Рис.3.1. Зоны катастрофического затопления

**Детерминированная оценка** последствий катастрофического затопления при разрушении подпорного гидротехнического сооружения с возникновением волны прорыва проводилась по компьютерной методике и программ «PLOTINA», разработанным специалистами Саратовского регионального отделения РЭА и министерства по делам ГОЧС правительства Саратовской области на основе «Табличной методики оценки последствий воздействия волны прорыва на сооружения и оборудование промышленных объектов при авариях на гидротехнических узлах» (обобщена В.А. Мальцевым по результатам исследований ВПИ НИИ «Гидропроект» в работе [111]) и «Инструкции по определению зон возможных затоплений при прорыве напорных фронтов гидроузлов» (ВСН-Э-83 Минэнерго). Программное обеспечение написано на языке Borland Pascal с использованием библиотеки Turbo Vision, что позволяет использовать его на любых ПЭВМ, совместимых с IBM PC. \*

Для получения необходимой исходной информации о характере рельефа местности нижнего бьефа были построены профили долины реки Волги в сечениях, выполненных с шагом 4-5 км, а также в створах населенных пунктов на рассматриваемом участке реки. Полученные данные по профилям рельефа долины реки Волги, используя пакет прикладных программ геоинформационной системы и дигитайзер «Cal Comp», были введены с привязкой к топографии конкретной местности в базу данных программы «PLOTINA», что позволило проводить расчеты возможных последствий катастрофического затопления для реальных территорий.

\* Программное обеспечение разработано А.Ю. Бездельевым, ведущим специалистом отдела предупреждения ЧС министерства по делам ГОЧС правительства Саратовской области.

Результаты расчетов для «наихудшего» сценария в смысле максимума ожидаемых последствий приведены, в качестве примера, в табл. 3.3.

Для определения зоны затопления местности в нижнем бьефе при разрушении плотины по «наихудшему» сценарию в смысле максимума ожидаемых последствий (табл.3.3) определялись для каждого сечения:

- расстояние от плотины вдоль русла реки;
- высота волны прорыва над нормальным уровнем воды в реке;
- осредненная для рассматриваемых створов (4-5 км) абсолютная высота береговой линии.

Таблица 3.3

| Сценарий № 5  |                       |             |                      | Основные данные при возможной аварии на конкретной ГЭС Волжского каскада (по сценарию №5) |              |                 |                      |                      |                     |  |
|---|-----------------------|-------------|----------------------|---|--------------|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------|--|
| Общие исходные данные                               |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Тип плотины: 1                                      |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Тип реки : 1  |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Длина плотины по гребню 1275,00 м                   |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Объем водохранилища 12,90 км <sup>3</sup>           |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Макс. глубина водохранилища перед плотинной 31,40 м |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Средняя ширина водохранилища 7000,00 м              |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Коэффициент профиля дна водохранилища 1,25          |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Начальная глубина в нижнем бьефе 26,76 м            |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Абсолютный уровень реки 21,76 м                     |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| Усредненный уклон русла реки 6,0×10 <sup>-5</sup>   |                       |             |                      |   |              |                 |                      |                      |                     |  |
| №   | Расстояние от плотины | Ширина реки | Ширина долины (поНq) | Относит. проран   | Высота волны | Скорость потока | Время подхода фронта | Время подхода гребня | Длительн. затоплен. |  |
|   | км                    | м           | м                    |   | м            | м/с             | час                  | час                  | час                 |  |
| 1   | 6.10                  | 1874.45     | 29891.96             | 0.0463  | 5.14         | 1.69            | 1.14                 | 4.01                 | 46.13               |  |
| 2   | 12.21                 | 1458.92     | 25926.69             | 0.0533  | 5.37         | 1.69            | 2.84                 | 7.55                 | 76.81               |  |
| 3   | 16.53                 | 1560.03     | 22611.99             | 0.0612  | 5.18         | 1.46            | 4.26                 | 10.29                | 98.82               |  |
| 4   | 21.12                 | 1110.95     | 31150.50             | 0.0444  | 5.58         | 1.75            | 5.83                 | 13.02                | 116.92              |  |
| 5   | 28.99                 | 916.02      | 13734.34             | 0.1007  | 5.61         | 1.74            | 8.80                 | 16.77                | 128.63              |  |
| 6   | 35.02                 | 1714.84     | 13014.50             | 0.1063  | 4.73         | 1.06            | 10.91                | 19.50                | 137.01              |  |
| 7   | 42.26                 | 1639.99     | 6705.68              | 0.2062  | 7.03         | 1.44            | 10.44                | 20.03                | 147.55              |  |
| 8   | 48.83                 | 1294.59     | 7037.67              | 0.1965  | 7.20         | 1.61            | 13.31                | 24.19                | 164.94              |  |
| 9   | 54.55                 | 1927.49     | 5270.14              | 0.2624  | 7.65         | 1.37            | 13.29                | 25.26                | 176.47              |  |
| 10  | 59.89                 | 1397.77     | 4927.97              | 0.2806  | 8.35         | 1.66            | 15.23                | 28.22                | 188.42              |  |
| 11  | 63.54                 | 1590.17     | 6844.12              | 0.2020  | 6.78         | 1.27            | 19.05                | 32.98                | 202.04              |  |
| 12  | 68.36                 | 2248.61     | 4702.92              | 0.2940  | 7.19         | 1.14            | 18.43                | 33.12                | 208.50              |  |
| 13  | 73.83                 | 2064.12     | 8453.15              | 0.1636  | 5.49         | 0.96            | 25.79                | 42.11                | 234.81              |  |
| 14  | 79.64                 | 1400.93     | 15811.10             | 0.0875  | 4.79         | 1.04            | 32.75                | 50.66                | 259.58              |  |
| 15  | 83.11                 | 1476.98     | 14858.71             | 0.0931  | 4.68         | 0.97            | 34.69                | 53.46                | 270.92              |  |
| 16  | 84.85                 | 1822.61     | 17879.30             | 0.0773  | 4.40         | 0.83            | 35.68                | 54.89                | 276.64              |  |
| 17  | 86.89                 | 2019.04     | 14485.36             | 0.0955  | 4.27         | 0.77            | 36.85                | 56.58                | 283.40              |  |
| 18  | 91.17                 | 2533.62     | 23884.44             | 0.0579  | 3.97         | 0.65            | 39.34                | 60.19                | 297.66              |  |
| 19  | 96.40                 | 3128.36     | 29681.89             | 0.0466  | 3.75         | 0.56            | 42.48                | 64.72                | 315.31              |  |
| 20  | 102.12                | 3665.67     | 29054.97             | 0.0476  | 3.59         | 0.50            | 44.96                | 68.34                | 329.08              |  |
| 21  | 107.31                | 6738.66     | 29240.30             | 0.0473  | 3.08         | 0.27            | 45.65                | 69.38                | 332.24              |  |
| 22  | 113.20                | 9148.07     | 26810.51             | 0.0516  | 2.96         | 0.22            | 46.45                | 70.61                | 335.94              |  |
| 23  | 118.12                | 15639.69    | 33933.42             | 0.0408  | 2.92         | 0.20            | 47.15                | 71.66                | 339.14              |  |
| 24  | 124.64                | 14500.04    | 23902.74             | 0.0579  | 2.90         | 0.20            | 48.10                | 73.11                | 343.53              |  |
| 25  | 132.94                | 3846.53     | 19898.44             | 0.0695  | 4.25         | 0.71            | 49.37                | 75.04                | 349.44              |  |
| 26  | 139.48                | 7419.54     | 18905.28             | 0.0731  | 3.46         | 0.44            | 50.42                | 76.64                | 354.79              |  |
| 27  | 146.33                | 3259.47     | 10405.17             | 0.1329  | 5.09         | 0.86            | 48.33                | 74.91                | 354.73              |  |
| 28  | 152.29                | 9424.18     | 12927.99             | 0.1070  | 3.37         | 0.43            | 51.91                | 79.22                | 364.67              |  |
| 29  | 158.01                | 4815.75     | 7407.30              | 0.1867  | 5.49         | 0.71            | 44.78                | 72.04                | 355.14              |  |
| 30  | 163.49                | 10146.91    | 16699.33             | 0.0828  | 3.23         | 0.41            | 54.69                | 83.12                | 376.53              |  |

На основе указанных данных вычислялись для каждого сечения значения высотных отметок местности, попадающих под затопление, и в виде точек наносились на топографическую карту. Линия, соединяющая указанные точки, определила границу зоны затопления. Анализ по топографическим картам зон возможного затопления территории рассматриваемой области при прорыве плотины конкретного водохранилища Волжского каскада, показал:

- затоплению подвергается около 77 тыс. га земель в пойме р. Волга на территории области, которые используются в сельскохозяйственном производстве. Ущерб характеризуется полным уничтожением посевов на всей затопляемой территории, так как длительное нахождение под водой в вегетативный период вызывает гибель всех посевов и нарушает плодородие почвы пашни на 40%. Гибель лесонасаждений и садов при скоростях волны прорыва менее 2 м/с маловероятна;
- прорыв плотины в межень на расположенные в нижнем бьефе крупные города рассматриваемой области влияния не окажет;
- в зону возможного затопления попадают незначительная прибрежная территория г. Н-ска, где имеется несколько строений лесозавода, 10 сельских населенных пунктов рассматриваемой области. (табл.3.4), а также отдельные участки внутрихозяйственных дорог (III категории) общей протяженностью 22 км, линии энергопередач и связи общей протяженностью около 8 км.

Таблица 3.4

Перечень населенных пунктов, попадающих в зону катастрофического затопления в случае разрушения плотины гидроузла

| № пп | Наименование населенного пункта с указанием берега реки | Номер сечения на карте | Расстояние от плотины, км | Высота волны прорыва, м | Время подхода фронта волны прорыва, ч |
|------|---|------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1    | «N-ск 1» (правый)                                       | 2                      | 7,39                      | 5,9                     | 1,24                                  |
| 2    | «N-ск 2» (правый)                                       | 4                      | 16,78                     | 5,61                    | 3,87                                  |
| 3    | «N-ск 3» (левый)  | 5                      | 21,37                     | 5,18                    | 5,08                                  |
| 4    | «N-ск 4» (левый)  | 7                      | 31,75                     | 7,67                    | 6,00                                  |
| 5    | «N-ск 5» (левый)  | 9                      | 37,20                     | 7,10                    | 7,67                                  |
| 6    | «N-ск 6» (левый)  | 10                     | 39,45                     | 6,32                    | 8,30                                  |
| 7    | «N-ск 7» (левый)  | 11                     | 41,21                     | 6,33                    | 8,82                                  |
| 8    | «N-ск 8» (левый)  | 13                     | 45,41                     | 7,40                    | 10,20                                 |
| 9    | «N-ск 9» (левый)  | 14                     | 47,56                     | 8,88                    | 10,91                                 |
| 10   | «N-ск 10» (левый)                                       | 15                     | 49,24                     | 8,74                    | 11,49                                 |

Данные расчеты достаточно коррелируют с расчетами, выполненными институтом «Гидропроект» им. С.Я. Жука в 1988 году.

### 3.2. Математические модели и методы количественной оценки экологического и интегрированного риска

В районах расположения водных объектов, имеющих гидротехнические сооружения (плотины, дамбы и др.), всегда существует вероятность их разрушения в силу различных причин, связанных с возможными воздействиями или отказами подсистемы «плотина-основание». Основными причинами могут быть стихийные бедствия (землетрясения, оползни, катастрофические паводки - выше расчетной величины), просчеты, допущенные в период изысканий, проектирования, отступления при строительстве, ошибки при эксплуатации, естественное старение гидросооружения, диверсионно-террористические акты и другое. По оценкам специалистов (д.т.н. Э.С. Калустян [74]), уровень годовой интенсивности отказов бетонных плотин с учетом фактической наработки на отказ составляет: по разрушению –  $0,34 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>, а по повреждению –  $0,45 \times 10^{-3}$  год<sup>-1</sup>.

Частоты возникновения возможных внешних воздействий варьируются от  $10^{-4}$  до  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup> и определяются эколого-геоморфологическими, сейсмическими, климатическими и антропогенными особенностями региона [4;112;238].

В табл.3.5 приведены данные распределения 240 аварий бетонных плотин вследствие внешних воздействий по уровням значимости [73;245].

Таблица 3.5  
Распределение аварий бетонных плотин вследствие внешних воздействий (по данным стран-членов SIGB\* [245] и д.т.н. Э.С. Калустян [73])

| Внешнее воздействие                        | Всего отказов | %   | В том числе разрушений | %   |
|--|---------------|-----|------------------------|-----|
| Давление воды при заполнении водохранилища | 186           | 78  | 8                      | 45  |
| Чрезвычайные паводки                       | 34            | 14  | 7                      | 39  |
| Сейсмические воздействия                   | 10            | 4   | 2                      | 11  |
| Другие (температурные, заиления и др.)     | 10            | 4   | 1                      | 5   |
| Всего                                      | 240           | 100 | 18                     | 100 |

Так как различные внешние силовые воздействия на плотины и дамбы имеют независимую природу проявления во время эксплуатации сооружения, поэтому при оценке риска прорыва плотины гидроузлов в пределах расчетного периода времени эксплуатации сооружения эти воздействия анализировались раздельно.

\* SIGB (Society international grand barrage) – Международная комиссия по большим плотинам.

Остановимся более подробно на методах количественной оценки интегрированного риска аварий на примере конкретного гидротехнического сооружения (плотины) Волжского каскада ГЭС.

Частоты событий прорыва плотины рассматриваемого гидроузла получены на основе анализа сценариев развития возможных аварий на конкретной ГЭС Волжского каскада, разработанных авторами и подробно описанных в первом параграфе данной главы.

Граничная выборка сценариев возможных аварий катастрофического типа с прорывом плотины ГЭС приведена в табл.3.6.

Таблица 3.6

Вероятные сценарии и частоты возможного прорыва плотины

| № сценария | Характеристика сценария  | Частота реализации сценария, 1/год |
|------------|--|------------------------------------|
| 5-А        | Совмещение случайных независимых событий: паводка с обеспеченностью 0,01% и катастрофического оползня правого берега р. Волга с попаданием в водохранилище не менее 30 млн.м <sup>3</sup> грунта с последующим «забитием» грунтом большей части водосбросов гидроузла. Перелив воды через гребень плотины с последующим разрушением русловой ее части вследствие недостаточной пропускной способности водосбросов. | $8,3 \times 10^{-8}$               |
| 5-Б        | Совмещение случайных независимых событий: катастрофического паводка с обеспеченностью 0,01% и аварийного прорыва плотины верхнего бьефа. Перелив воды через гребень левобережной дамбы, при набегающей волне прорыва гидроузла верхнего бьефа высотой 25 м, с последующим ее размывом.   | $7 \times 10^{-8}$                 |
| 5-В        | Совмещение случайных независимых событий: размыва части основания русловой плотины вследствие фильтрации воды через тело плотины и антропогенных тектонических подвижек в месте провисания русловой плотины. Как следствие, неравномерная осадка тела плотины с образованием трещин на всю ее высоту с последующим катастрофическим размывом и образованием прорана.   | $4,38 \times 10^{-7}$              |
| 6          | Реализация террористического акта с взрывом русловой части плотины   | $10^{-4}$                          |

Для оценки ожидаемого ущерба от возможного прорыва плотины ГЭС параметры волны прорыва, полученные для середины русла реки, были пересчитаны на расположенную на расстоянии  $R_i$  от русла реки территорию каждого населенного пункта, попадающего в зону возможного затопления. При этом определялись высота затопления  $h_{зат}$  и наибольшая скорость потока  $V_{зат}$  через территорию населенного пункта с учетом изменения рельефа местности в рассматриваемых створах по мере удаления ( $R_i$ ) от середины русла реки (рис.3.2).

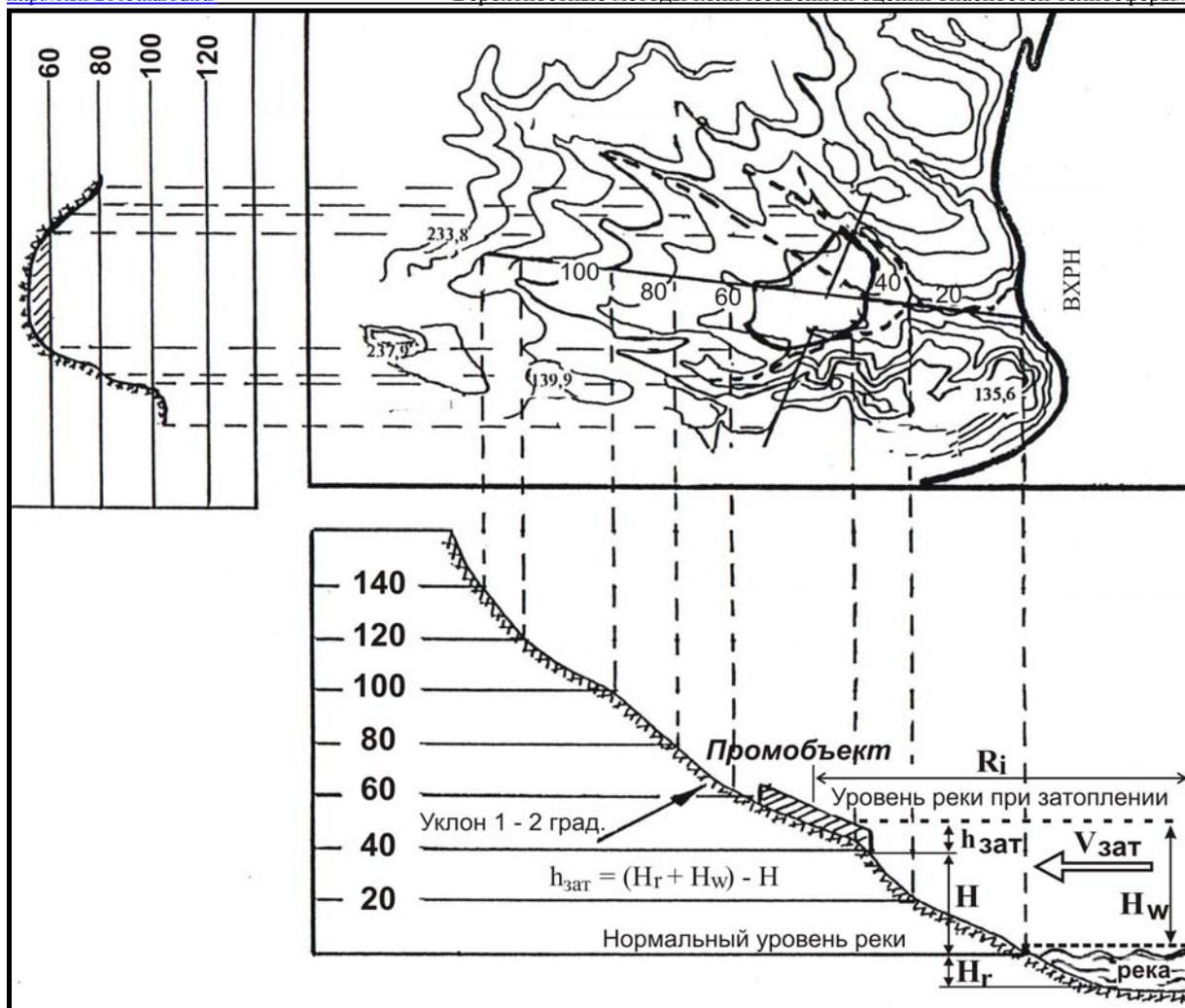


Рис.3.2. Последовательность оценки параметров катастрофического затопления  $h_{зат}$  и  $V_{зат}$  с учетом изменения рельефа местности в рассматриваемом створе на удалении  $R_i$  от середины русла реки

Результаты пересчета параметров волны прорыва применительно к территории населенных пунктов (на примере левобережных поселков «N-ск 8», «N-ск 9» и «N-ск 10») приведены в табл. 3.7-3.9.

Используя данные табл.3.7 – 3.9 о количественных характеристиках волны прорыва, дошедшей до рассматриваемого населенного пункта, было проведено зонирование территории населенных пунктов с учетом рельефа местности и удаленности от середины русла реки. В качестве критериев, определяющих границы зон катастрофического затопления, рассматривались:

$h_{зат}$  – высота волны прорыва в рассматриваемой точке поперечного разреза населенного пункта;

$V_{зат}$  – скорость потока воды в рассматриваемой точке;

$\tau_M$  – длительность затопления рассматриваемой территории до полного спада воды ниже нулевой отметки.

Таблица 3.7

Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 8»

| <i>Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта</i>                          |   |  |  |                       |   |
|--|---|--|--|-----------------------|---|
| Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м                        | 29,16   | Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с |  |                       | 1,61  |
| Абсолютный уровень реки $H_r$ , м  | 21,76   | Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м            |  |                       | 7,40  |
| Расстояние от плотины, км  | 45,4  | Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м            |  |                       | 4314,0  |
| Номер сечения на карте   | 13  | Доля затопленной территории населенного пункта, %                |  |                       | 100   |
| <i>Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта</i> |   |  |  |                       |   |
| Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м                                   | Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки | Доля затопленной территории, %                                   | Абсолютная высота рельефа местности, м | Глубина затопления, м | Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с |
| 2600   | 0,89  | 0  | 23,53                                  | 5,63                  | 1,43  |
| 2690   | 0,86  | 10   | 23,83                                  | 5,33                  | 1,38  |
| 2780   | 0,82  | 20   | 24,12                                  | 5,04                  | 1,33  |
| 2870   | 0,79  | 30   | 24,42                                  | 4,74                  | 1,28  |
| 2960   | 0,76  | 40   | 24,71                                  | 4,45                  | 1,22  |
| 3050   | 0,73  | 50   | 25,01                                  | 4,15                  | 1,17  |
| 3140   | 0,70  | 60   | 25,31                                  | 3,05                  | 1,12  |
| 3230   | 0,66  | 70   | 25,60                                  | 3,56                  | 1,07  |
| 3320   | 0,63  | 80   | 25,90                                  | 3,26                  | 1,02  |
| 3410   | 0,60  | 90   | 26,19                                  | 2,97                  | 0,97  |
| 3500   | 0,56  | 100  | 26,49                                  | 2,67                  | 0,90  |

Таблица 3.8

Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 9»

| <i>Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта</i>                          |   |  |  |                       |   |
|--|---|--|--|-----------------------|---|
| Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м                        | 30,64   | Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с |  |                       | 2,59  |
| Абсолютный уровень реки $H_r$ , м  | 21,76   | Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м            |  |                       | 8,88  |
| Расстояние от плотины, км  | 47,6  | Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м            |  |                       | 5051,0  |
| Номер сечения на карте   | 14  | Доля затопленной территории населенного пункта, %                |  |                       | 100   |
| <i>Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта</i> |   |  |  |                       |   |
| Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м                                   | Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки | Доля затопленной территории, %                                   | Абсолютная высота рельефа местности, м | Глубина затопления, м | Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с |
| 3100   | 0,82  | 0  | 24,60                                  | 6,04                  | 2,13  |
| 3190   | 0,80  | 10   | 24,88                                  | 5,76                  | 2,07  |
| 3280   | 0,77  | 20   | 25,16                                  | 5,40                  | 2,00  |
| 3370   | 0,75  | 30   | 25,44                                  | 5,20                  | 1,94  |
| 3460   | 0,72  | 40   | 25,72                                  | 4,92                  | 1,87  |
| 3550   | 0,70  | 50   | 26,00                                  | 4,64                  | 1,81  |
| 3640   | 0,67  | 60   | 26,27                                  | 4,37                  | 1,74  |
| 3730   | 0,65  | 70   | 26,55                                  | 4,09                  | 1,68  |
| 3820   | 0,62  | 80   | 26,83                                  | 3,81                  | 1,61  |
| 3910   | 0,60  | 90   | 27,11                                  | 3,53                  | 1,55  |
| 4000   | 0,56  | 100  | 27,39                                  | 3,25                  | 1,46  |

Таблица 3.9

*Параметры волны прорыва на территории населенного пункта «N-ск 10»*

| <i>Параметры волны прорыва в створе рассматриваемого населенного пункта</i>                          |   |  |  |                       |   |
|--|---|--|--|-----------------------|---|
| Максимальная абсолютная глубина затопления в рассматриваемом створе $H_0$ , м                        | 30,50   | Скорость потока волны прорыва в среднем течении реки $V_w$ , м/с |  |                       | 2,49  |
| Абсолютный уровень реки $H_r$ , м  | 21,76   | Высота волны прорыва в среднем течении реки $H_w$ , м            |  |                       | 8,74  |
| Расстояние от плотины, км  | 49,3  | Затопление берега в рассматриваемом сечении $R_0$ , м            |  |                       | 3708,0  |
| Номер сечения на карте   | 15  | Доля затопленной территории населенного пункта, %                |  |                       | 73  |
| <i>Характеристики затопления местности в пределах территории рассматриваемого населенного пункта</i> |   |  |  |                       |   |
| Удаление рассматриваемой точки населенного пункта от русла реки, м                                   | Коэффициент смещения населенного пункта от русла реки | Доля затопленной территории, %                                   | Абсолютная высота рельефа местности, м | Глубина затопления, м | Скорость течения потока воды через территорию населенного пункта, м/с |
| 2900   | 0,51  | 0  | 27,68                                  | 2,82                  | 1,28  |
| 3010   | 0,47  | 10   | 28,07                                  | 2,43                  | 1,16  |
| 3120   | 0,42  | 20   | 28,45                                  | 2,05                  | 1,04  |
| 3230   | 0,36  | 30   | 28,83                                  | 1,67                  | 0,90  |
| 3340   | 0,28  | 40   | 29,22                                  | 1,28                  | 0,71  |
| 3450   | 0,20  | 50   | 29,60                                  | 0,90                  | 0,51  |
| 3560   | 0,12  | 60   | 29,99                                  | 0,51                  | 0,29  |
| 3670   | 0,03  | 70   | 30,37                                  | 0,13                  | 0,07  |

Характер распределения населения и территории сельских населенных пунктов по зонам катастрофического затопления приведен в табл.3.10-3.11.

Таблица 3.10

**Распределение территории населенных пунктов по зонам возможных разрушений при катастрофическом затоплении нижнего бьефа**

| № пп                         | Населенные пункты (села), попадающие в зону катастрофического затопления | Площадь территории населенного пункта, попадающего в зону возможных разрушений, га |   |  |  |
|------------------------------|--|--|---|--|--|
|                              |  | зона сильных разрушений<br>$V_{зат} > 1,5$ м/с<br>$h_{зат} > 3,5$ м                | зона средних разрушений<br>$V_{зат} > 1,0$ м/с<br>$h_{зат} > 2,5$ м | зона слабых разрушений<br>$V_{зат} > 1$ м/с<br>$h_{зат} > 1$ м | зона легких разрушений<br>$V_{зат} > 0,5$ м/с<br>$h_{зат} > 1$ м |
| 1                            | «N-ск 1»   | 34,5   | 13,8  | 13,5   | 6,9  |
| 2                            | «N-ск 2»   | 250,0  | 50,0  | -  | -  |
| 3                            | «N-ск 3»   | 100,0  | 40,0  | 20,0   | 20,0   |
| 4                            | «N-ск 4»   | 88,8   | 22,0  | -  | -  |
| 5                            | «N-ск 5»   | -  | -   | -  | 24,0   |
| 6                            | «N-ск 6»   | 90,0   | -   | -  | -  |
| 7                            | «N-ск 7»   | -  | -   | -  | -  |
| 8                            | «N-ск 9»   | 30,0   | 90,0  | 30,0   | -  |
| 9                            | «N-ск 9»   | 100,8  | 11,2  | -  | -  |
| 10                           | «N-ск 10»  | -  | 7,0   | 7,2  | 21,0   |
| Суммарная заселенная площадь |  | 694,1  | 234,2   | 70,7   | 71,9   |

Примечание: Зонирование территории по характеру возможных разрушений выполнено для деревянных зданий, как основного типа застройки.

Таблица 3.11

Распределение населения по зонам возможного катастрофического затопления в случае прорыва плотины гидроузла

| № пп  | Населенные пункты с указанием берега реки, попадающие в зону катастрофического затопления | Количество людей в зонах затопления, чел.     |   |   |  |
|-------|---|---|---|---|--|
|       |   | зона бурного течения >2 м/с ( $h_3 \geq 3$ м) | зона сильного течения 1-2 м/с ( $h_3 \geq 2$ м) | зона среднего течения 0,5-1 м/с ( $h_3 \geq 1$ м) | зона слабого течения <0,5 м/с ( $h_3 < 1$ м) |
| 1     | «N-ск 1» (правый)   | 105   | 175   | 70  | -  |
| 2     | «N-ск 2» (правый)   | -   | 3570  | 1530  | -  |
| 3     | «N-ск 3» (левый)  | 450   | 600   | 300   | 150  |
| 4     | «N-ск 4» (левый)  | -   | 760   | -   | -  |
| 5     | «N-ск 5» (левый)  | -   | -   | 24  | 36   |
| 6     | «N-ск 6» (левый)  | -   | 610   | -   | -  |
| 7     | «N-ск 7» (левый)  | -   | -   | -   | 44   |
| 8     | «N-ск 8» (левый)  | -   | 248   | 62  | -  |
| 9     | «N-ск 9» (левый)  | 102   | 408   | -   | -  |
| 10    | «N-ск 10» (левый)   | -   | 60  | 90  | 60   |
| Всего |   | 657   | 6431  | 2075  | 290  |

Прогностическая оценка ожидаемого интегрированного ущерба и риска (*социального, материального и экологического*) от возможного катастрофического затопления территории нижнего бьефа при прорыве плотины ГЭС проводилась в соответствии с методологией количественной оценки антропогенных опасностей и риска, разработанной нами в [82].

**Материальный ущерб.** Материальный ущерб от затопления в городе связан, главным образом, с площадью, глубиной и, отчасти, продолжительностью затопления. Для сельского хозяйства решающее значение имеют время (сезон) и продолжительность затопления.

При оценке ожидаемого материального ущерба от затопления заселенных территорий учитывались удельная стоимость 1 га, которая составляет для заселенной сельской местности по А.Л. Рогозину [175] 1 млн. 200 тыс. руб./га, а для городов по В.А. Котляревскому [95] 0,7 – 3,4 млн. руб./га (в зависимости от численности городского населения). При этом учитывалась степень снижения капитальности зданий и сооружений в зависимости от вида разрушения (номограмма рис.3.3) [11;140].

При оценке ожидаемого ущерба от затопления земель, используемых в сельскохозяйственном производстве, исходили из нормативов стоимости сельскохозяйственных земель [169]. При оценке ожидаемого ущерба от затопления и повреждения коммуникаций (автодорог, железных дорог, линий электропередачи и связи) использовали данные [2].

Результаты расчетов ожидаемого материального ущерба (взвешенного по вероятности потерь) при катастрофическом затоплении территории конкретной области в случае прорыва плотины ГЭС приведены в табл.3.12.

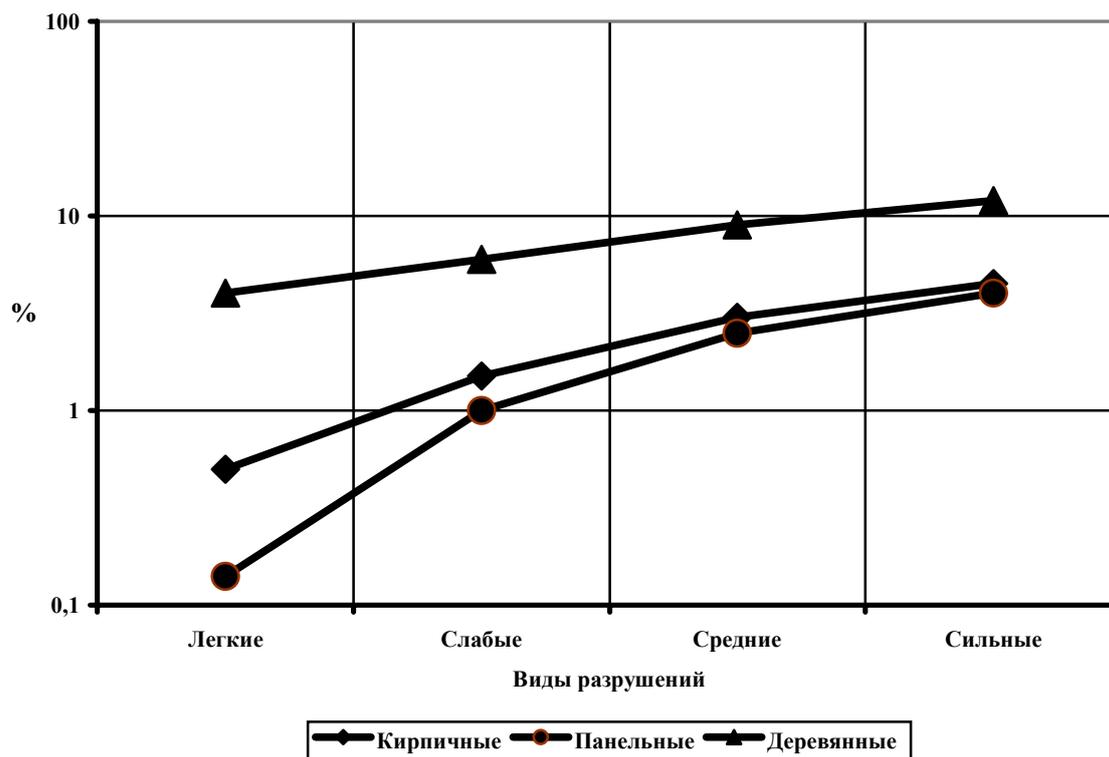


Рис.3.3. Номограмма снижения капитальности зданий и сооружений в зависимости от степени их разрушений при затоплении волной прорыва

Таблица 3.12

Прогнозируемый материальный ущерб при катастрофическом затоплении территории конкретной области в случае прорыва плотины ГЭС

| № пп  | Элементы объектов экономики промышленного региона с указанием берега реки | Математическое ожидание материального ущерба, от поражающего воздействия, млн. руб. |
|---|---|---|
| 1   | «N-ск 1» (правый)   | 7,764   |
| 2   | «N-ск 2» (правый)   | 41,400  |
| 3   | «N-ск 3» (левый)  | 21,120  |
| 4   | «N-ск 4» (левый)  | 15,240  |
| 5   | «N-ск 5» (левый)  | 1,152   |
| 6   | «N-ск 6» (левый)  | 12,960  |
| 7   | «N-ск 7» (левый)  | -   |
| 8   | «N-ск 8» (левый)  | 16,200  |
| 9   | «N-ск 9» (левый)  | 15,720  |
| 10  | «N-ск 10» (левый)   | 2,280   |
| Суммарный материальный ущерб заселенной территории  |   | 133,826   |
| 11  | Земля, используемая в сельскохозяйственном производстве                   | 55,440  |
| 12  | Внутрихозяйственные дороги  | 132,0   |
| 13  | Линии электропередач  | 151,2   |
| 14  | Линии связи   | 9,0   |
| Суммарный материальный ущерб от прорыва плотины ГЭС |   | 189,568   |

**Экологический ущерб.** В статье рассмотрены вопросы расчета экологического ущерба и риска для различных случаев воздействия при ава-

рийных ситуациях на окружающую природную среду. Основное негативное воздействие заключается в том, что бытовые и производственные отходы потоком воды будут перенесены в несанкционированные места и нанесут определенный ущерб. Наибольшее негативное воздействие оказывается для случая, когда бытовые и производственные отходы, а также различные нефтепродукты попадают в водоемы.

Базой для расчетов экологического ущерба явились количество вредных и опасных химических веществ, попадающих в водоток в зонах затопления, и нормативы платы за аварийное загрязнение водоемов [235] с соответствующим рассматриваемому году коэффициентом индексации.

По имеющейся информации, складов с ядохимикатами на данной территории не имеется.

В табл.3.13 приведены различные варианты расчета экологического ущерба при прорыве плотины ГЭС.

Таблица 3.13

Экологический ущерб от прорыва плотины ГЭС

| Наименование показателей  | Размерность | Варианты |         |        |
|---|-------------|----------|---------|--------|
|   |             | I        | II      | III    |
| Количество сброшенных в водоемы нефтепродуктов                    | т           | 9,3      | 19,08   | 28,6   |
| Норматив платы за аварийный сброс нефтепродуктов                  | тыс.руб./т  | 89,36    | 89,36   | 89,36  |
| Ущерб от сброса нефтепродуктов в водоемы                          | млн.руб.    | 0,812    | 1,65    | 2,54   |
| Количество сброшенного азота аммонийного                          | т           | 1431,45  | 1908,6  | 2385,9 |
| Норматив платы за аварийный сброс азота аммонийного               | млн.руб.    | 11,173   | 11,173  | 11,173 |
| Ущерб от аварийного сброса азота аммонийного                      | млн.руб.    | 15,48    | 21,223  | 26,6   |
| Количество сброшенного азота нитритного                           | т           | 28,63    | 381,7   | 477,1  |
| Норматив платы за аварийный сброс азота нитритного                | тыс.руб./т  | 221,65   | 221,65  | 221,65 |
| Ущерб от аварийного сброса азота нитритного                       | млн.руб.    | 63,27    | 84,2    | 105,44 |
| Количество сброшенных взвешенных веществ                          | т           | 1145,16  | 1526,88 | 1908,6 |
| Норматив платы за аварийный сброс взвешенных веществ              | тыс.руб./т  | 5,84     | 5,84    | 5,84   |
| Ущерб от аварийного сброса взвешенных веществ                     | млн.руб.    | 6,69     | 8,9     | 11,1   |
| Суммарный экологический ущерб от сброса вредных веществ в водоемы | млн.руб.    | 86,75    | 115,97  | 145,68 |

**Социальный ущерб.** При оценке ожидаемого прямого социального ущерба учитывались две его составляющие – безвозвратные и санитарные потери, взвешенные по соотношению наступления случайного события – летального исхода или нанесения травм различной степени тяжести вол-

ной прорыва. При этом человеческая жизнь оценивалась в стоимостном выражении. В качестве такой величины использовалась цена спасения жизни, ЦСЖ – средневзвешенная по наиболее значимым и рисковым областям и сферам жизнедеятельности величина затрат для дополнительного спасения жизни каждого следующего индивидуума. Количественные показатели ЦСЖ обоснованы в [82]. Для определения ущерба от возможных травм различной тяжести введен взвешивающий коэффициент  $\sigma_{тр}$ , сопоставляющий затраты на восстановление трудоспособности индивидуума с ценой спасения жизни. Величина  $\sigma_{тр}$  определена экспертно.

Как показано профессором В.В. Мешковым в [148], ожидаемые потери ощутимо варьируются по времени суток. Это связано с неадекватностью поведения человека в чрезвычайной ситуации в дневное и ночное время. В свою очередь, доля светлого и доля темного времени суток в значительной степени зависят от времени года (рис.3.4), что требует детализации расчетов в пределах рассматриваемого сезона (безледоставный или зимний) с последующим суммированием средним арифметическим полученной последовательности результатов.

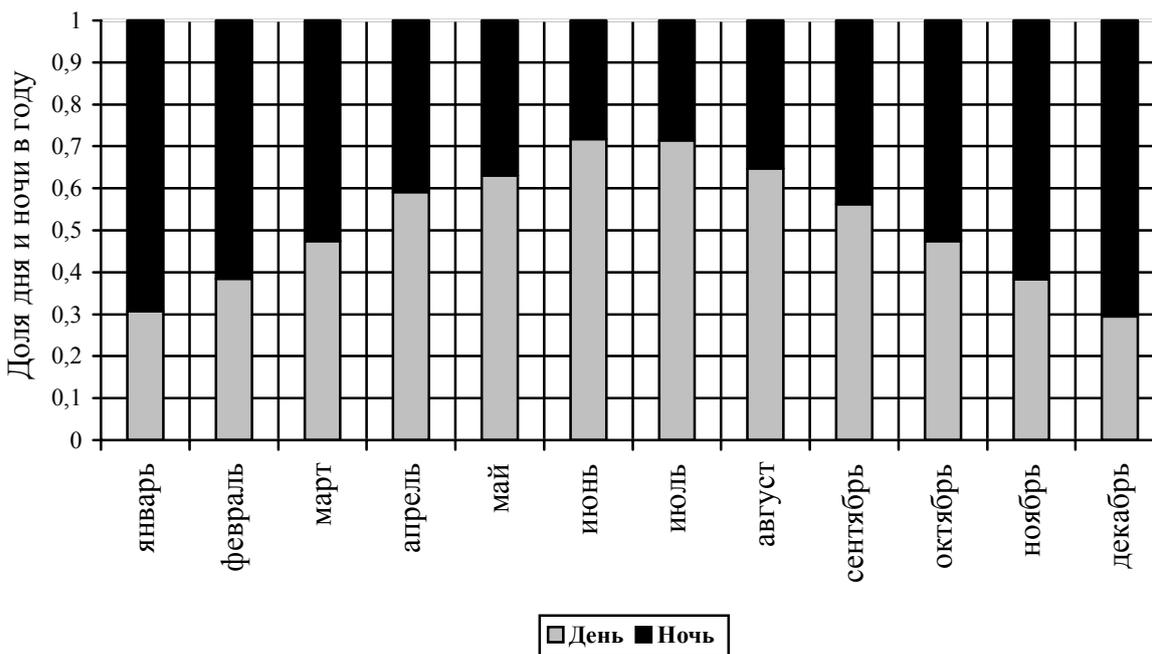


Рис.3.4. Характер изменения соотношения светлого и темного времени суток в течение года

Обобщая сказанное, запишем выражение для оценки ожидаемого (взвешенного по вероятности поражения человека) прямого социального ущерба в стоимостном эквиваленте:

$$Y_{\text{соц}} = \sum_{l=1}^t \left[ \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n A_{lr}^* \cdot \left( M_{lr}^{\text{БП}} + \sigma_{\text{тр}} \cdot M_{lr}^{\text{СП}} \right) \cdot \text{ЦСЖ} \right], \quad (3.1)$$

где  $Y_{\text{соц}}$  – математическое ожидание полного социального ущерба в стоимостном выражении;  $M_{lr}^{\text{БП}}$ ;  $M_{lr}^{\text{СП}}$  – матрица потерь соответственно безвозвратных и санитарных, для  $l$ -го времени суток рассматриваемого  $l$ -го сезона (безледоставный, зимний);  $A_{lr}^*$  – матрица распределения доли светлого или темного времени суток в течение рассматриваемого  $l$ -го сезона;  $\sigma_{\text{тр}}$  – коэффициент, сопоставляющий затраты на лечение и восстановление трудоспособности индивидуума с ценой спасения его жизни; ЦСЖ – цена спасения жизни индивидуума;  $n$  – количество членов арифметической суммы (степень детализации расчетов).

Элементом матрицы потерь в уравнении (3.1) является математическое ожидание потерь  $k$ -й степени тяжести, возникающих в очагах поражения при прорыве плотины гидроузла. Ожидаемые потери зависят от расположения людей по зонам катастрофического затопления, времени суток (день или ночь), времени года (безледоставный период IV-XI месяцы или зимний период XII, I-III месяцы), а также зависят от степени неадекватности действий спецслужб и населения при чрезвычайной ситуации и определяются выражением:

$$M_{ijk}(N) = \sum_{i=1}^S \beta \cdot w_j(t) \cdot P_{ik} \cdot N_{ij}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (3.2)$$

где  $M_{ijk}(N)$  – математическое ожидание потерь  $k$ -й степени тяжести в  $i$ -й зоне катастрофического затопления  $j$ -го очага поражения (населенного пункта);  $N_{ij}$  – число людей в  $i$ -й зоне катастрофического затопления  $j$ -го очага поражения (населенного пункта);  $P_{ik}$  – вероятность нанесения человеку в  $i$ -й зоне катастрофического затопления поражения  $k$ -й степени тяжести;  $w_j(t)$  – функция, характеризующая степень неадекватности действий спецслужб и населения при ЧС в зависимости от интервала времени с момента прорыва плотины до прихода фронта волны в  $j$ -й населенный пункт;  $\beta$  – взвешивающий коэффициент, сопоставляющий степень поражения в безледоставный и зимний периоды (экспертная оценка);  $S$  – число зон катастрофического затопления, для которых определена статистическая вероятность поражения человека;  $m$  – число возможных очагов поражения людей (населенных пунктов) в нижнем бьефе водохранилища.

В уравнении (3.2) рассматриваются две степени тяжести поражения человека – безвозвратные потери (летальные исходы) и санитарные потери (ранения и травмы различной степени тяжести).

Вероятность нанесения человеку  $k$ -й степени поражения ( $P_{ik}$ ) определялась с помощью номограмм рис.3.5. Потери на представленной номо-

грамме даны в логарифмическом масштабе в % от числа жителей в i-й зоне затопления.

Данные номограммы построены на основании статистических данных о потерях в зонах катастрофического затопления, приведенных д.м.н., профессором В.В. Мешковым в монографии [148].

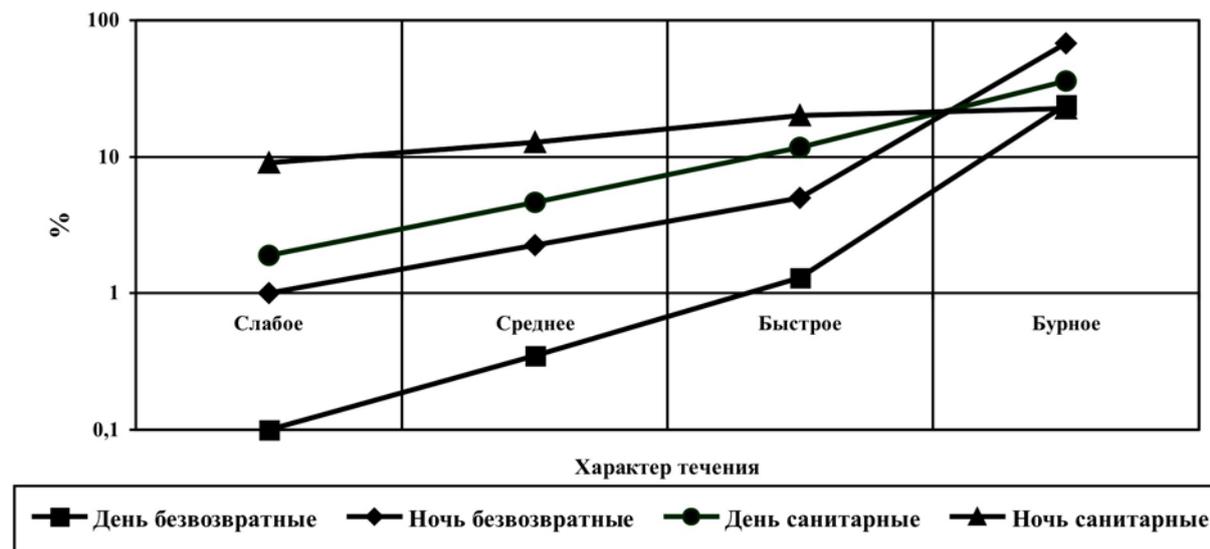


Рис.3.5. Номограмма распределения потерь по зонам катастрофического затопления

Прорыв плотины, являясь случайным событием, всегда происходит неожиданно не только для населения, но и для спецслужб МЧС области, предназначенных для проведения спасательных и других неотложных работ в очагах поражения. Поэтому структура потерь в очагах катастрофического затопления в значительной степени будет определяться и неадекватностью действий в ЧС человека. С этой целью в уравнении (3.2) введена функция времени  $w_j(t)$ , характеризующая степень неадекватности действий спецслужб и населения при ЧС в зависимости от интервала времени с момента прорыва плотины, до прихода фронта волны в j-й населенный пункт. График функции  $w(t)$  для различных значений параметра В приведен на рис.3.6

Графики функций  $w(t)$  построены по диаграммам Агентства по защите окружающей среды (EPA) США, для различных значений параметра  $B = 1,065 \cdot S^{0,33} \cdot \gamma^{0,4}$ , где S – площадь, на которой должны проводиться мероприятия раннего оповещения, эвакуации, спасательные и другие неотложные работы ( $\text{км}^2$ ),  $\gamma$  - плотность населения в зоне проведения неотложных мероприятий (количество людей на  $\text{км}^2$ ) [185].

В условиях ЧС при отсутствии какого-либо конкретного плана действий можно предположить, что поведение населения в очаге поражения будет полностью неадекватным (консервативная оценка), т.е.  $w(t)=1$ .

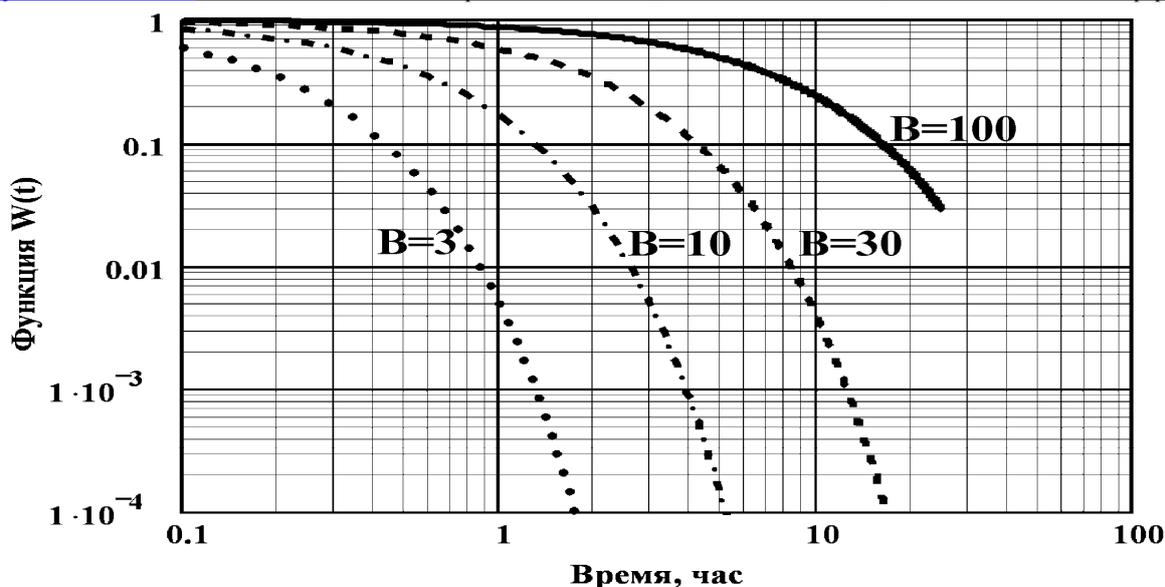


Рис.3.6. График функции, характеризующей степень неадекватности действий населения и служб МЧС

Структура ожидаемых потерь для данного случая приведена в табл.3.14.

Таблица 3.14

Структура ожидаемых потерь в зоне катастрофического затопления в условиях *полной неадекватности* поведения населения при  $w(t)=1$

| Населенные пункты | Время подхода фронта волны прорыва, ч | Ожидаемые потери, чел.        |                   |                      |                   |                            |                   |                      |                   |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                   |                                       | безледоставный период (IV-XI) |                   |                      |                   | зимний период (XII, I-III) |                   |                      |                   |
|                   |                                       | день                          |                   | ночь                 |                   | день                       |                   | ночь                 |                   |
|                   |                                       | безвозвратные потери          | санитарные потери | безвозвратные потери | санитарные потери | безвозвратные потери       | санитарные потери | безвозвратные потери | санитарные потери |
| «N-ск 1»          | 1,24                                  | 27,73                         | 61,54             | 81,21                | 67,53             | 41,04                      | 91,06             | 120,25               | 99,94             |
| «N-ск 2»          | 3,87                                  | 51,76                         | 488,84            | 212,93               | 909,08            | 76,60                      | 723,74            | 315,14               | 1345,43           |
| «N-ск 3»          | 5,08                                  | 117,0                         | 249,0             | 342,0                | 273,0             | 173,16                     | 368,52            | 506,16               | 404,04            |
| «N-ск 4»          | 6,00                                  | 9,88                          | 88,92             | 38,0                 | 152,0             | 14,62                      | 131,6             | 56,24                | 224,96            |
| «N-ск 5»          | 7,67                                  | 0,12                          | 1,8               | 0,9                  | 6,3               | 0,18                       | 2,66              | 1,33                 | 9,32              |
| «N-ск 6»          | 8,30                                  | 7,93                          | 71,4              | 30,5                 | 122,0             | 11,74                      | 105,67            | 45,14                | 180,56            |
| «N-ск 7»          | 8,82                                  | 0,044                         | 0,84              | 0,44                 | 3,96              | 0,065                      | 1,24              | 0,65                 | 5,86              |
| «N-ск 8»          | 10,20                                 | 3,44                          | 31,9              | 13,8                 | 57,5              | 5,1                        | 47,2              | 20,42                | 85,1              |
| «N-ск 9»          | 10,91                                 | 29,8                          | 84,46             | 89,3                 | 104,6             | 44,1                       | 125,0             | 132,1                | 154,75            |
| «N-ск 10»         | 11,49                                 | 1,16                          | 12,35             | 5,63                 | 28,88             | 1,7                        | 18,3              | 8,33                 | 42,74             |
| Суммарные потери  |                                       | 248,86                        | 1091,05           | 814,71               | 1724,85           | 368,3                      | 1614,75           | 1205,77              | 2552,78           |

Как видно из табл.3.14, наибольшее число безвозвратных потерь можно ожидать в *ночное время* в поселке «N-ск 3», в наименьшей степени пострадает население поселков «N-ск 5» и «N-ск 7».

При срабатывании систем раннего оповещения и наличии планов действия в ЧС вероятность неадекватного поведения населения уменьшается, что ведет к снижению ожидаемых потерь. Структура ожидаемых потерь для этого случая показана в табл.3.15.

Таблица 3.15

Структура ожидаемых потерь в зоне катастрофического затопления в условиях адекватности действий при ЧС в функции времени подхода фронта волны прорыва

| Населенные пункты | Время подхода фронта волны прорыва, ч | Ожидаемые потери, чел.        |                   |                      |                   |                            |                   |                      |                   |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                   |                                       | безлюдственный период (IV-XI) |                   |                      |                   | зимний период (XII, I-III) |                   |                      |                   |
|                   |                                       | день                          |                   | ночь                 |                   | день                       |                   | ночь                 |                   |
|                   |                                       | безвозвратные потери          | санитарные потери | безвозвратные потери | санитарные потери | безвозвратные потери       | санитарные потери | безвозвратные потери | санитарные потери |
| «N-ск 1»          | 1,24                                  | 23,2                          | 51,5              | 67,9                 | 56,5              | 34,3                       | 76,1              | 100,5                | 83,6              |
| «N-ск 2»          | 3,87                                  | 29,8                          | 281,1             | 122,4                | 522,7             | 44,1                       | 416,0             | 181,2                | 773,6             |
| «N-ск 3»          | 5,08                                  | 56,6                          | 120,5             | 165,5                | 132,1             | 83,8                       | 178,4             | 244,2                | 195,6             |
| «N-ск 4»          | 6,00                                  | 4,2                           | 37,8              | 16,2                 | 64,6              | 6,2                        | 55,9              | 23,9                 | 95,6              |
| «N-ск 5»          | 7,67                                  | 0,04                          | 0,603             | 0,302                | 2,1               | 0,06                       | 0,89              | 0,446                | 3,1               |
| «N-ск 6»          | 8,30                                  | 2,4                           | 21,8              | 9,3                  | 37,3              | 3,6                        | 32,3              | 13,8                 | 55,3              |
| «N-ск 7»          | 8,82                                  | 0,013                         | 0,239             | 0,125                | 1,13              | 0,02                       | 0,353             | 0,185                | 1,67              |
| «N-ск 8»          | 10,20                                 | 0,805                         | 7,47              | 3,23                 | 13,5              | 1,19                       | 11,05             | 4,78                 | 19,9              |
| «N-ск 9»          | 10,91                                 | 6,3                           | 17,8              | 18,8                 | 22,1              | 9,3                        | 26,4              | 27,9                 | 32,7              |
| «N-ск 10»         | 11,49                                 | 0,226                         | 2,41              | 1,1                  | 5,63              | 0,332                      | 3,57              | 1,62                 | 8,34              |
| Суммарные потери  |                                       | 128,98                        | 541,22            | 404,86               | 857,66            | 182,9                      | 800,96            | 599,23               | 1269,41           |

Результаты расчетов ожидаемого (взвешенного по вероятности поражения человека) полного социального ущерба приведены в табл.3.16.

Таблица 3.16

Прогнозируемый социальный ущерб при катастрофическом затоплении

| Наименование населенного пункта | Расстояние от гидроузла, км | Время подхода фронта волны прорыва, ч | Математическое ожидание социального ущерба |                                     |                                   |                                 |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                                 |                             |                                       | в натуральных единицах, чел.               | в стоимостном эквиваленте, млн.руб. |                                   |                                 |
|                                 |                             |                                       |  | нижний уровень ЦСЖ, 100 тыс. руб    | средний уровень ЦСЖ, 600 тыс. руб | верхний уровень ЦСЖ, 1 млн. руб |
| «N-ск 1»                        | 7,4                         | 1,24                                  | 59,495                                     | 5,9                                 | 35,7                              | 59,49                           |
| «N-ск 2»                        | 16,8                        | 3,87                                  | 135,934                                    | 13,6                                | 81,6                              | 135,9                           |
| «N-ск 3»                        | 21,4                        | 5,08                                  | 144,434                                    | 14,4                                | 86,7                              | 144,4                           |
| «N-ск 4»                        | 31,8                        | 6,00                                  | 17,882                                     | 1,8                                 | 10,730                            | 17,880                          |
| «N-ск 5»                        | 37,2                        | 7,67                                  | 0,358                                      | 0,036                               | 0,22                              | 0,368                           |
| «N-ск 6»                        | 39,5                        | 8,30                                  | 10,304                                     | 1,030                               | 6,2                               | 10,3                            |
| «N-ск 7»                        | 41,2                        | 8,82                                  | 0,161                                      | 0,02                                | 0,1                               | 0,2                             |
| «N-ск 8»                        | 45,4                        | 10,20                                 | 3,581                                      | 0,36                                | 2,15                              | 3,6                             |
| «N-ск 9»                        | 47,6                        | 10,91                                 | 17,0                                       | 1,7                                 | 10,2                              | 17,0                            |
| «N-ск 10»                       | 49,3                        | 11,49                                 | 1,244                                      | 0,124                               | 0,75                              | 1,2                             |
| Суммарный социальный ущерб      |                             |                                       | 390,393                                    | 39,02                               | 234,35                            | 390,3                           |

Гистограмма распределения социального ущерба по населенным пунктам, попадающим в зону катастрофического затопления, показана на рис.3.7.

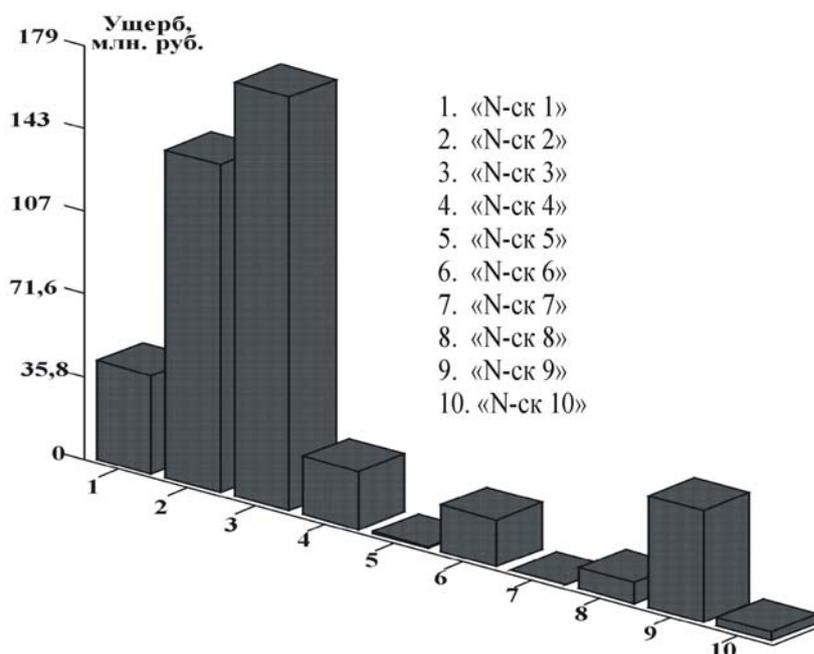


Рис.3.7. Гистограмма распределения социального ущерба по населенным пунктам, попадающим в зону катастрофического затопления

Ожидаемый интегрированный ущерб, включающий составляющие социальных и материальных потерь, наносимых волной прорыва плотины Саратовского гидроузла, приведен в табл.3.17.

Таблица 3.17

Интегрированный ущерб в случае прорыва плотины ГЭС

| Интегрированный ущерб (млн. руб.) при цене спасения жизни индивидуума в диапазоне значений |                                      |                                   |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| нижний уровень ЦСЖ<br>100 тыс. руб.  | средний уровень ЦСЖ<br>600 тыс. руб. | верхний уровень ЦСЖ<br>1 млн.руб. |
| 344,578  | 539,738                              | 695,938                           |

Величина интегрированного риска определялась для граничной выборки сценариев с катастрофическими последствиями затопления территории нижнего бьефа в случае прорыва плотины Саратовской ГЭС и нанесения волной прорыва интегрированного ущерба, взвешенного по степени возникновения определенного уровня потерь. Значение интегрированного риска, учитывающего вероятность реализации события, приведено в табл.3. 18.

Таблица 3.18

Интегрированный риск нанесения ущерба при катастрофическом затоплении территории нижнего бьефа в случае прорыва плотины ГЭС

| Показатель прогнозируемых последствий прорыва плотины гидроузла | № сценария | Частота возникновения прорыва в плотине гидроузла, 1/год | Интегрированный риск при цене спасения жизни человека в диапазоне значений |                                    |                                   |
|---|------------|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|
|   |            |  | нижний уровень ЦСЖ<br>100000 руб.  | средний уровень ЦСЖ<br>600000 руб. | верхний уровень ЦСЖ<br>1 млн.руб. |
| Интегрированный риск, руб/год                                   | №5а        | $8,3 \times 10^{-8}$                                     | 28,5   | 44,8                               | 57,76                             |
|   | №5б        | $7 \times 10^{-8}$                                       | 24,12  | 37,78                              | 48,71                             |
|   | №5в        | $4,4 \times 10^{-7}$                                     | 150,9  | 236,4                              | 304,82                            |
|   | №6         | $1 \times 10^{-4}$                                       | 34457,8  | 53973,8                            | 69593,8                           |

Характер распределения потенциального риска летального исхода от воздействия на человека волны прорыва на прилегающей к плотине ГЭС территории приведен в табл.3.19.

Таблица 3.19

Характер распределения потенциального риска по населенным пунктам, попадающим в зону катастрофического затопления

| Населенные пункты<br><br>Зоны затопления | Потенциальный риск, 1/год |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|--|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | «N-ск 1»                  | «N-ск 2»             | «N-ск 3»             | «N-ск 4»             | «N-ск 5»             | «N-ск 6»             | «N-ск 7»             | «N-ск 8»             | «N-ск 9»             | «N-ск 10»            |
| Зона бурного течения                     | $3,5 \times 10^{-5}$      | $2,4 \times 10^{-5}$ | $2 \times 10^{-5}$   | $1,8 \times 10^{-5}$ | $1,4 \times 10^{-5}$ | $1,3 \times 10^{-5}$ | $1,2 \times 10^{-5}$ | $9,8 \times 10^{-6}$ | $8,8 \times 10^{-6}$ | $8,2 \times 10^{-6}$ |
| Зона сильного течения                    | $2,4 \times 10^{-6}$      | $1,6 \times 10^{-6}$ | $1,4 \times 10^{-6}$ | $1,2 \times 10^{-6}$ | $9,4 \times 10^{-7}$ | $8,6 \times 10^{-7}$ | $8 \times 10^{-7}$   | $6,6 \times 10^{-7}$ | $5,9 \times 10^{-7}$ | $5,5 \times 10^{-7}$ |
| Зона среднего течения                    | $9,4 \times 10^{-7}$      | $6,5 \times 10^{-7}$ | $5,5 \times 10^{-7}$ | $4,8 \times 10^{-7}$ | $3,8 \times 10^{-7}$ | $3,5 \times 10^{-7}$ | $3,2 \times 10^{-7}$ | $2,6 \times 10^{-7}$ | $2,4 \times 10^{-7}$ | $2,2 \times 10^{-7}$ |
| Зона слабого течения                     | $3,9 \times 10^{-7}$      | $2,7 \times 10^{-7}$ | $2,3 \times 10^{-7}$ | $2 \times 10^{-7}$   | $1,6 \times 10^{-7}$ | $1,4 \times 10^{-7}$ | $1,3 \times 10^{-7}$ | $1,1 \times 10^{-7}$ | $9,9 \times 10^{-8}$ | $9,1 \times 10^{-8}$ |

На диаграмме рис.3.8 показан характер изменения уровня потенциального риска в населенных пунктах в зависимости от расстояния до плотины ГЭС и времени добегания волны прорыва до рассматриваемого створа.

Наряду с количественной оценкой риска социальных и материальных потерь от прорыва плотины ГЭС, рассмотрены и возможные экологические последствия спуска водохранилища.

Моделирование гидродинамики Волжского каскада ГЭС при экстремальных ситуациях, проведенное в Институте экологии Волжского бассейна РАН [134], позволило установить, что при мгновенном разрушении плотины одного из гидроузлов каскада по всему ее периметру наблюдаются два вида волн перемещения: положительная нисходящая волна, перемещающаяся вниз по течению от плотины, и отрицательная восходящая волна, перемещающаяся вверх по водохранилищу от плотины.

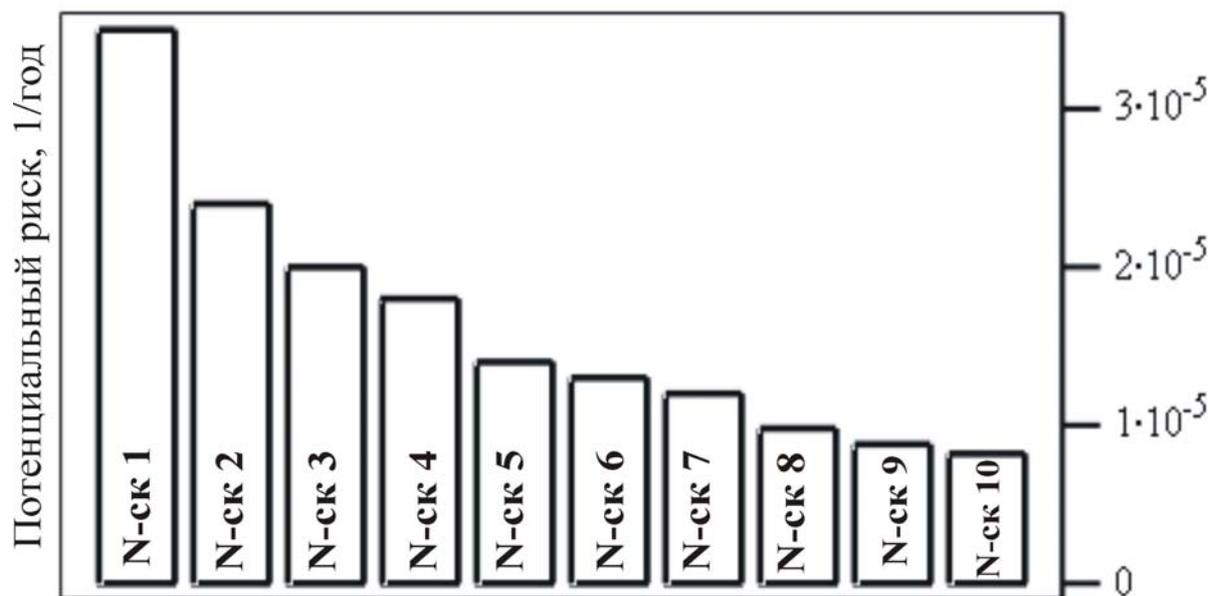


Рис.3.8. Распределение потенциального риска летальных исходов по населенным пунктам нижнего бьефа, попадающим в зону катастрофического затопления при прорыве ГЭС

Моделирование гидродинамики Волжского каскада ГЭС при экстремальных ситуациях, проведенное в Институте экологии Волжского бассейна РАН [134], позволило установить, что при мгновенном разрушении плотины одного из гидроузлов каскада по всему ее периметру наблюдаются два вида волн перемещения: положительная нисходящая волна, перемещающаяся вниз по течению от плотины, и отрицательная восходящая волна, перемещающаяся вверх по водохранилищу от плотины.

Оценивая возможные последствия прохождения обратной волны, важно отметить, что эти последствия с точки зрения человеческих жертв и разрушений должны быть менее значительными, чем в нижнем бьефе от прохождения волны прорыва. Однако опорожнение водохранилища конкретного гидроузла Волжского каскада может вызвать ряд неблагоприятных последствий.

Прежде всего, активизируются экзогенные процессы и особенно в створах с наименьшими сечениями, лимитирующими проходные расходы воды. На этих участках возможны наибольшие разрушения берегов.

У рассматриваемого водохранилища, как и у большинства водохранилищ Волжского каскада, велика протяженность абразионных берегов с интенсивностью их отступления на отдельных участках в 5-7,5 м в год и более. Спуск водохранилища и отступление уреза воды вызовут оживление оползней, обвалов, осыпей; возможно даже возникновение пыльных бурь на обнажающихся склонах.

По материалам Института экологии Волжского бассейна РАН и Саратовского государственного университета, мощные сбросы воды в нижний бьеф ГЭС могут спровоцировать местные землетрясения силой 1-2 балла в радиусе 3-4 км от плотины [232].

Эти местные очаги сейсмической активности могут при определенных условиях спровоцировать, в свою очередь, и более крупные землетрясения с разрушительными последствиями.

Зоны значительной активизации геоморфологических процессов, как видно из «Карты геоморфологической опасности территории Саратовско-Балаковского промышленно-энергетического узла (среднее Поволжье)», составленной С.К. Гореловым в лаборатории геоморфологии Института географии РАН в 1992 г., наиболее распространены в приплотинных участках водохранилища [109].

Аварийный спуск водохранилища может привести и к возникновению экстремальных бактериологических ситуаций в результате образования застойных, «мертвых» зон на мелководьях водохранилища, общая площадь которых составляет 20% от общей площади водохранилища при НПУ. Эти зоны чрезвычайно опасны с точки зрения качества воды и санитарного состояния обнажающегося дна.

При разрушении плотины ГЭС для верхнего бьефа весьма существенными могут быть не непосредственные, а косвенные потери, связанные с нарушениями водо- и электроснабжения, потерями непрерывных водных путей, вынужденной переориентацией водо- и энергоемких производств, а также потери, связанные с поступлением в нижний бьеф загрязненных вод и с необходимостью очистки ложа водохранилища от различных отложений, содержащих токсичные соединения, тяжелые металлы, пестициды, нефть и другие виды органических отложений, накапливающихся на дне водоема. При этом донные отложения сорбируют токсические вещества до уровней, намного превышающих их содержание в водной толще [39].

По исследованиям, проводившимся Институтом водных проблем РАН на Волжских водохранилищах, на определенном этапе их эксплуатации в придонных слоях формируются тонкодисперсные осадки с консистенцией геля. Гелеобразные осадки, с концентрацией загрязняющих веществ, на порядок превышающих ПДК, сосредотачиваются в застойных и слабопроточных зонах водохранилищ и любое воздействие на них движением воды может привести к катастрофе [48].

Таким образом, очень опасен спуск водохранилищ при аварийных ситуациях. При этом прогнозируемый прямой ущерб от материальных и социальных потерь в нижнем бьефе ГЭС, составляющий 539,7 млн. руб, при риске реализации такого события  $10^{-4}$  в год, может возрасти на порядок с учетом экологических последствий, связанных с обнажением дна водохранилища при аварийном прорыве плотины.

### **Выводы к главе 3**

Разработаны математические модели и методы количественной оценки интегрированного риска аварий на гидротехнических сооружениях. В качестве интегрированного риска рассматривается взвешенный по вероятности наступления негативных событий комплексный показатель прогнозируемого полного ущерба (социального, материального, экологического), от возможного катастрофического затопления территории нижнего бьефа при прорыве плотины ГЭС.

Впервые предложена и реализована математическая модель расчета социального риска в зонах катастрофического затопления с возможными безвозвратными и санитарными потерями среди населения. При этом человеческая жизнь оценивается в стоимостном эквиваленте.

В модель социального риска введен параметрический закон поражения человека, позволяющий оценивать вероятность нанесения человеку  $k$ -й степени поражения в зависимости от скорости потока и высоты волны прорыва с учетом времени суток, времени года, а также функции, характеризующей степень неадекватности действий людей при чрезвычайных ситуациях в момент прихода фронта волны прорыва в населенный пункт.

На основании разработанной методики проведен анализ безопасности и расчет экологического и интегрированного риска аварий в реальных конкретных условиях функционирования плотины ГЭС. Результаты анализа позволили обосновать и внедрить инженерные мероприятия по снижению интегрированного риска и охране окружающей среды на наиболее опасных участках левого берега Волгоградского водохранилища.