

5 Быков, В. Д. Гидрометрия / В. Д. Быков, А. В. Васильев – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 448 с.

6 Орлова, В. В. Гидрометрия / В. В. Орлова. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 416 с.

7 Щедрин, В. Н. Теория и практика альтернативных видов орошения черноземов юга Европейской территории России: монография / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев. – Новочеркасск: Лик, 2011. – 435 с.

8 Духовный, В. А. Водохозяйственный комплекс в зоне орошения. Формирование, развитие / В. А. Духовный. – М.: Колос, 1982. – 152 с.

9 Обеспечение надежности и безопасности низконапорных гидротехнических сооружений: монография / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Баев [и др.]. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 283 с.

10 Косиченко, Ю. М. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов: монография / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. – 239 с.

УДК 626.8:627.512

А. А. Бубер, Н. М. Попова, Ю. А. Хомутов

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

РАСЧЕТ ПРОРЫВНОЙ ВОЛНЫ И ВЕРОЯТНОГО ВРЕДА ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ НА ГИДРОУЗЛЕ

В статье представлен технологический цикл расчета вероятного вреда при гидродинамической аварии на напорных сооружениях канала имени Москвы: формирование исходных данных, методика расчета прорывной волны, численное моделирование параметров гидродинамической аварии, расчет вероятного вреда. В качестве примера аналога взят реальный объект Гидроузел № 2 (северный склон канала имени Москвы, Талдомский район Московской области). В состав объекта исследования был включен участок канала имени Москвы, содержащий: исток канала № 282 (Иваньковское водохранилище), канал № 282, шлюз № 2, насосная станция № 182, отводящий канал насосной станции № 182, каналы № 283–288.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, MIKE 11, авария на ГТС, вероятный вред при аварии на ГТС, зона затопления, волна прорыва.

С учетом чертежей сооружений гидроузла, космических снимков и подробных топографических данных в настоящей работе была создана компьютерная квазидвумерная (без «перекосов» уровней в поперечных сечениях) гидродинамическая модель. Проведены модельные расчеты волны прорыва и нанесены зоны затопления по сценариям гидродинамической аварии на шлюзе, насосной станции и дамбах канала. В расчетах параметров волны прорыва получены максимальные уровни и зоны затопления, максимальные скорости течения, исследована динамика прохождения прорывной волны, определено время добегания волны до заданных створов, результаты отображены на картах, космических снимках, в табличной и графической форме.

Для решения поставленной задачи были собраны, обработаны и проанализированы исходные топографические и гидрологические данные, а также данные о наличии, составе и количестве шлюзований судов на рассматриваемой акватории; разработана цифровая модель рельефа (ЦМР); оцифрованы исходные поперечные сечения и поперечные сечения для пойменной части вдоль дамб каналов, созданные на основе ЦМР; разработаны сценарии возможных гидродинамических аварий; разработана компьютерная гидродинамическая модель распространения волны прорыва с применением квазидвумерных уравнений Сен-Венана на поперечных сечениях; рассчитаны параметры волны прорыва и представлены результаты.

Гидродинамическая модель (ГДМ) разрабатывалась в среде программного комплекса MIKE 11 Датского Гидравлического института. MIKE 11 предназначен для разработки имитационных компьютерных моделей гидродинамических процессов, включая разрушение плотин, прорывные и паводковые волны и транспорт наносов, позволяющий рассчитывать размыв земляной плотины и определять основные гидравлические параметры (время добега волн, время и площади затопления, скорость и глубину и т. д.) гидродинамической волны в нижнем бьефе. Математическая модель реализует квази-двумерную неявную разностную схему решения уравнений Сен-Венана, описывающих неустановившееся движение воды в речных сетях [1, 2].

Для создания гидродинамической модели была разработана координатная привязка карты – топоосновы для моделирования в среде MIKE 11.

С шагом 1 км по ЦМР построены поперечные сечения (87). В среде MIKE 11 с помощью редактора поперечных сечений введены координаты X , Z и плановое положение поперечных сечений привязано к карте-подложке. Сформирована конфигурация поперечных сечений и рассчитаны обработанные данные гидравлических параметров сечений в зависимости от уровней воды (площадь сечения, гидравлический радиус, ширина по урезу воды, присоединенная площадь для водохранилища и т. д.). В среде MIKE 11 построена трасса расчетного участка.

На основе сформированной и введенной в редактор речной сети MIKE 11 таблицы технических характеристик гидроузла была разработана ГДМ для 4 сценариев возможного разрушения элементов гидроузла. Исходя из результатов гидравлических расчетов, полученных в табличном и графическом виде, с помощью ГИС системы сформированы карты с зонами затопления возможного разрушения напорного фронта.

Назначение сценариев гидродинамических аварий выполнялись на основании рекомендаций, изложенных в Приказе МЧС РФ № 528, Минтранса РФ № 143 от 2 октября 2007 г. «Об утверждении Методики определения размера вреда ...» [3].

Предварительный перечень сценариев возможных аварий составлялся исходя из особенностей конструкции, условий эксплуатации, оценки риска аварий, предварительной оценки потенциальных зон затопления, последствий аварий [4].

Поражающие факторы, возникающие при авариях на гидротехнических сооружениях, определялись в соответствии с составом этих сооружений и особенностями их работы. Из предварительного перечня были выделены сценарии с наиболее тяжелыми и наиболее вероятными авариями.

Из четырех рассмотренных в работе сценариев наиболее тяжелыми аварийными ситуациями являются сценарии 1 и 3.

Сценарий 1 (Авария на шлюзе № 2). Аварийное разрушение нижних двустворчатых ворот шлюза при открытом сегментном затворе верхней головы во время шлюзования пассажирского судна класса Карл Маркс.

Сценарий 3 (Авария на восточной дамбе отводящего канала насосной станции № 182). Снижение фильтрационной прочности грунта обратной засыпки восточной дамбы, повышение градиента напора в нижний бьеф до критического значения, незатухающий суффозионный вынос грунта обратной засыпки, образование сквозного хода из ВБ в НБ глубиной 2,02 м от бечевника ниже уровня НПУ (130 м БС) на 0,02 м, шириной 0,2 м, с вымыванием обратной засыпки, прорыв напорного фронта. Через 3 дня проран ликвидирован и авария устранена.

Исходные данные для моделирования формировались на основе Акта преддекларационного обследования гидроузла и Декларации безопасности по гидроузлу [5, 6].

Коэффициенты шероховатости для уравнений Сен-Венана (Маннинга) назначались в соответствии с рекомендациями [3]. Коэффициенты шероховатости были приняты равными 0,024 для всего расчетного участка (Малые водотоки с хорошим состоянием русла, чистые прямолинейные без перекатов или глубоких омутов, без растительно-

сти, берега обычно крутые, дно сложено из гравия, булыжника и редких валунов, состояние русла нормальное). Для задамбовых пойменных территорий коэффициенты шероховатости были приняты равными 0,08.

Результаты моделирования представлялись за весь расчетный интервал времени в табличном и графическом виде. Расчет выполнялся при следующих условиях: на участке от НБ Гидроузла № 3 до нижних ворот шлюза № 2 (верхние ворота открыты) задавался уровень НПУ = 130,00 м, на участке от нижних ворот шлюза, включая Ивановское водохранилище НПУ = 124 м.

На рисунке 1 представлен продольный профиль расчетного участка канала имени Москвы от истока канала № 282 (Ивановское водохранилище) до гидроузла № 6 в среде MIKE 11.

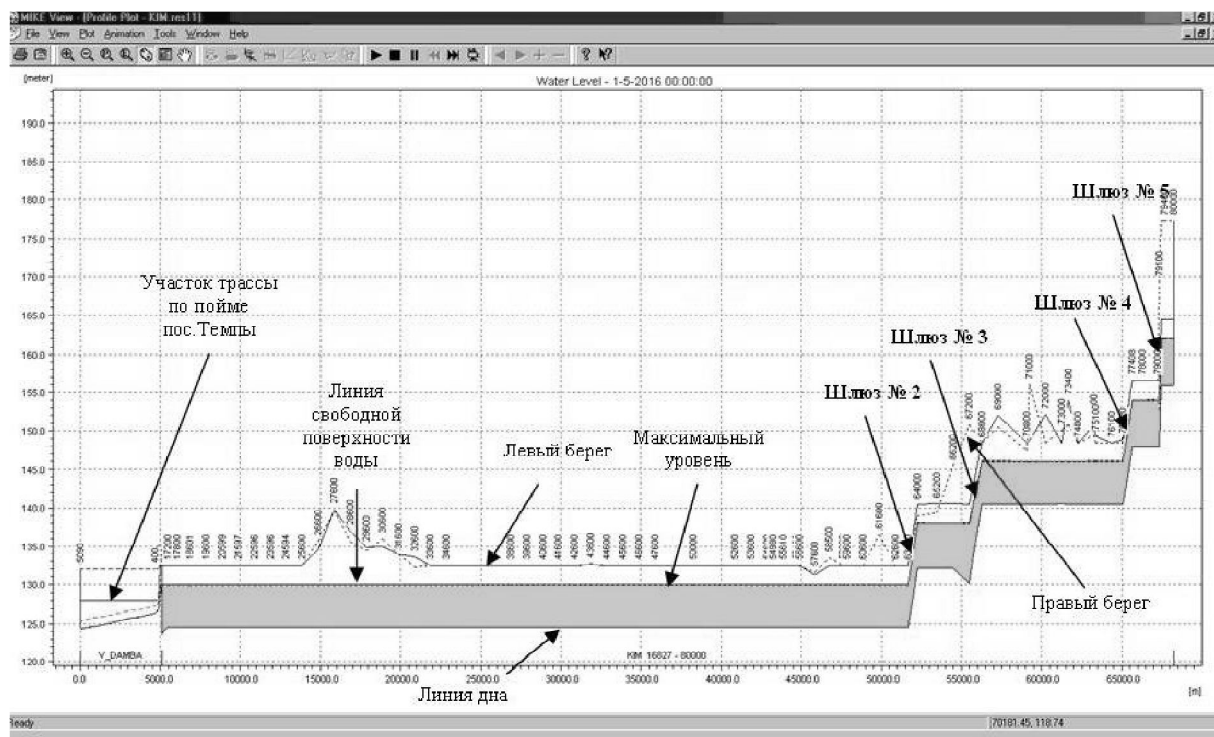


Рисунок 1 – Продольный профиль участка ГУ № 2–6 и участка трассы движения воды по пойме пос. Темпы при разрушении восточной дамбы

При возникновении аварии по сценарию 1 максимальный расход в створе составит $542,4 \text{ м}^3/\text{с}$ через 43 с после начала аварии, через 18 ч после аварии расход излива снижается до $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$. Пик волны прорыва и дальнейшие колебания на протяжении первых минут после аварии обуславливаются истечением объема воды, находящимся в камере шлюза перед аварией.

Максимальные значения скоростей течения в створе разрушенных нижних ворот шлюза составят 0,6 м/с, в районе нижних ворот – 5,5 м/с, вблизи шлюза в нижнем бьефе гидроузла № 2 скорости падают до 0,6 м/с и далее по всей области канала находятся в пределах 0,5–0,7 м/с.

Уровень ВБ снижается через 1 ч 30 мин после начала аварии на 3,5 м от НПУ, через 51 час – на 4 м. Максимальные уровни воды в НБ достигаются через 0,18 ч.

При сценарии 1 волна прорыва проходит в бровках дамб обвалования (ниже бечевника более чем на 1 м) канала, поэтому затоплений в нижнем бьефе не происходит. Скорости прохождения волны – не размывающие. В зону сильных разрушений попадает пассажирское судно Карл Маркс, находящееся в момент аварии в шлюзе. В зону слабых разрушений попадает грузовое судно Окский-45, находящееся в нижнем бьефе шлюза.

При возникновении аварии по сценарию 3 максимальный расход в проране составит $4 \text{ м}^3/\text{с}$ через 9 ч после начала аварии. Максимальные расходы воды в НБ дамбы – $3,6 \text{ м}^3/\text{с}$, на нижних участках – $3,0\text{--}3,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Уровень ВБ снижается через 8 часов после начала аварии на 0,02 м от НПУ, через 72 ч – на 0,11 м. Максимальное затопление участка поймы пос. Темпы происходит через 8,5 ч.

При развитии аварии в соответствии со сценарием 3 происходит затопление жилых домов, расположенных на ул. Московская (2 дома, № 5 и № 7) и ул. Дмитровское шоссе (2 дома, нумерация отсутствует), улица Ленина (2 дома, нумерация отсутствует). Зоны затопления при аварии по сценарию 3 представлены на рисунке 2.

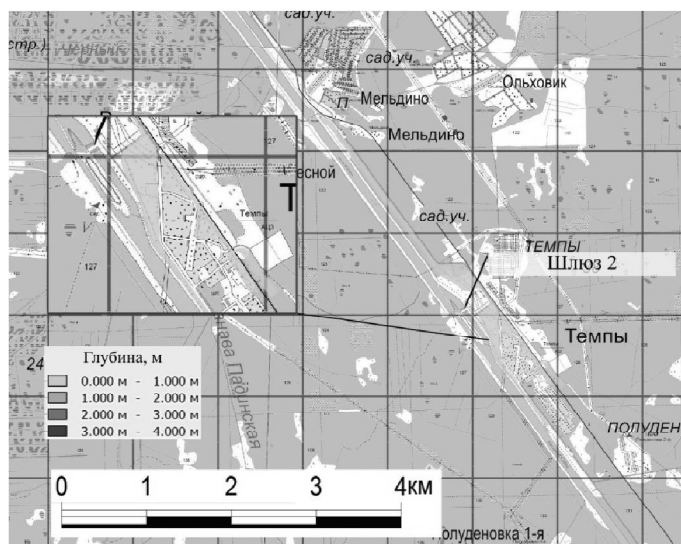


Рисунок 2 – Зоны затопления на карте при прохождении волны прорыва по пойме участка трассы пос. Темпы (сценарий 3)

Основными документами, регламентирующими размер вреда от возможных гидродинамических аварий гидроузлов, являются: «Методика определения размера вреда ...» утверждена Приказом МЧС России и Минтранса России от 02.10.2007 № 528/143; «Порядок определения размера вреда ...», утвержденного совместным приказом МЧС России, Минэнерго России, МПР России, Минтранса России, Госгортехнадзора России от 18.05.02 № 243/150/270/68/89 [3]. Расчет вреда проводился с учетом Федерального закона от 27 июля 2010 г. № 225-ФЗ, который увязывает страховые суммы и предельные размеры страховой выплаты потерпевшему [7].

Стоимостная оценка ущерба от аварии СГТС состоит из следующих расчетов: ущерба основным и оборотным фондам; ущерба готовой продукции предприятий; ущерба элементам транспорта и связи; ущерба жилому фонду и имуществу граждан; определение числа погибших и пострадавших при возникновении аварии; расходы на ликвидацию последствий аварии; ущерб сельскому, лесному и рыбному хозяйству, а также экологический ущерб; ущербы по верхнему бьефу; прочие виды реального ущерба; социальный ущерб следует определять в натуральном выражении (в виде возможного числа погибших и пострадавших при аварии СГТС).

Расчет ущерба проводится с использованием комбинации методов: метода укрупненных показателей и планшетного метода. На основе параметров прорывной волны (уровень, скорость, продолжительность затопления), среднестатистических характеристик субъекта РФ (из ежегодных статистических сборников), а также картографических материалов по зонам затопления выполняется приближенная оценка величины ущерба.

Оценка вреда от возможной гидродинамической аварии гидротехнических сооружений судоходства проводилась с использованием рекомендаций «Особенности оп-

ределения размера вреда жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений» [8].

Особенностью возможных аварий ворот шлюзов является то, что все виды вреда от гидродинамических аварий связаны с повреждением судов и их груза и с нанесением ущерба здоровью пассажиров, а не с затоплением местности.

При оценке расходов на ликвидацию последствий аварии и прочих ущербов учитываются: ущерб судам (по аналогии с ущербом элементам транспорта и связи), перевозимым грузам (по аналогии с ущербом готовой продукции предприятий, хранящейся на складах), ущерб личной собственности экипажа (по аналогии с ущербом жилому фонду и личной собственности граждан).

При рассмотрении сценариев гидродинамических аварий были проанализированы данные о работе шлюза № 2 по судопропуску за навигации 2001–2010 гг. Особенностью возможных аварий шлюза № 2 и насосной станции № 182 является то, что они не приведут к затоплениям объектов, расположенных на берегу (кроме сценария 4). Ущерб будет связан исключительно с разрушением судов, которые могут попасть в зону воздействия аварии. При прорыве напорного фронта шлюза № 2 суда, находящиеся в шлюзе, могут получить сильные разрушения; суда, находящиеся у причальной стенки в нижнем бьефе, – слабые повреждения; другие суда, находящиеся в нижнем бьефе (НБ), повреждений не получают.

Было принято допущение, что при гидродинамической аварии, при прорыве шлюза № 2 (*сценарий 1*), в зоне аварии будет располагаться пассажирское судно Карл Маркс (154 пассажира и 63 экипаж), находясь в шлюзовой камере, попадает в зону сильных разрушений; грузовое судно Окский-45 (6 человек экипажа), находящееся в НБ, попадает в зону слабых разрушений. Пассажирское судно по сценарию 1, находящееся в момент гидродинамической аварии в шлюзовой камере, подвергается воздействию волны прорыва высотой до 6 м. Это приведет к значительному разрушению корпуса судна, из-за контактов с защитными стенками шлюза, а в дальнейшем к его полному разрушению и гибели пассажиров (нормативная высота волны для речных судов 1,2 м) [8].

При аварии, развивающейся по сценарию 1, предполагается, что при сильных повреждениях судов происходит утечка в водную среду топлива и машинного масла, при слабых повреждениях утечка не происходит. При аварии, развивающейся по сценариям 2, 4, суда, проходящие шлюзование или расположенные в нижнем бьефе не получают повреждений, в зону затопления населенные пункты не попадают.

Методика разделяет ущербы элементам транспорта и связи (I_3) и объекты водного транспорта в верхнем бьефе (I_{10}). При аварии, развивающейся по сценарию 1, суда, проходящие шлюзование или расположенные в нижнем бьефе, отнесены к элементам транспорта и связи, суда же, расположенные в верхнем бьефе, – к объектам водного транспорта в верхнем бьефе. При оценке расходов на ликвидацию последствий аварии и прочих ущербов учитывается ущерб судам I_{1c} , который рассчитывается, как ущерб основных фондов предприятий [8].

При прорыве восточной дамбы № 283 (*сценарий 3*) падение уровня воды в канале происходит медленно; суда в бьефе между гидроузлами № 2 и № 3 успеют уйти в другие бьефы и не получают повреждений. В зоне возможных разрушений оказывается 6 жилых домов в населенном пункте Темпы (24 чел.) (*сценарий 3*). Эти дома попадают в зону слабых разрушений по фактору скорости 0,5–0,6 м/с при глубине затопления до 1 м. При подсчете количества домов (*сценарий 3*), попавших в зону затопления, используется метод наложения слоев, далее полученная информация подвергается дополнительному редактированию вручную, уточняется при помощи снимков, опубликованных в сети Интернет, и по космоснимку (определяются жилые или нежилые строения и этажность).

Денежные оценки вероятного вреда, сгруппированные согласно показателям социально-экономических последствий аварий, сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Денежные оценки вероятного вреда, сгруппированные согласно показателям социально-экономических последствий аварий судоходных гидротехнических сооружений

В млн руб.

Вид ущерба	И	Вар. 1	Вар 2	Вар 3	Вар. 4
Основным фондам предприятий	И ₁	0,00	0,00	0,00	0,00
Оборотным фондам предприятий	И _{об}	0,00	0,00	0,00	0,00
Готовой продукции предприятий, хранящейся на складах	И ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Элементом транспорта и связи	И ₃	243,00	0,00	0,00	0,00
Жилому фонду и личной собственности граждан	И ₄	21,14	0,00	1,22	0,00
Расходы на ликвидацию последствий аварии	И ₅	52,83	0,00	0,24	0,00
Сельскохозяйственному производству	И ₆	0,00	0,00	0,00	0,00
От потери леса как сырья промышленности	И _{7с}	0,00	0,00	0,00	0,49
От затопления лесов (экологический)	И _{7э}	0,00	0,00	0,00	3,45
Окружающей природной среде	И ₈	0,83	0,00	0,00	0,00
Водоснабжению населенных пунктов	И ₉	0,00	0,00	0,00	0,00
Объектам водного транспорта	И ₁₀	0,00	0,00	0,00	0,00
Рыбному хозяйству	И ₁₁	0,00	0,00	0,00	0,00
Прочие виды реального ущерба	И ₁₂	31,70	0,00	0,15	0,05
Общий реальный ущерб	И _{общ}	349,50	0,00	1,61	3,99
Социальный вред при аварии, днем	И _{соц}	31,23	0,00	2,03	0,00
Социальный вред при аварии, ночью		66,03	0,00	3,52	0,00
Общий реальный ущерб с учетом соц. вреда	день	380,73	0,00	3,64	3,99
Общий реальный ущерб с учетом соц. вреда	ночь	415,53	0,00	5,13	3,99

Список использованных источников

- 1 Компьютерное моделирование речных потоков. Теоретические основы. – М.: Научная консалтинговая фирма «Волга», 2013. – С. 7–79.
- 2 Компьютерное моделирование систем рек и каналов Mike11. – М.: Научная консалтинговая фирма «Волга», 2013. – С.13–47.
- 3 Об утверждении Методики определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений: Приказ МЧС РФ и Минтранса РФ от 2 октября 2007 г. № 528/143: по состоянию на 23 июня 2016 г. // Гарант Эксперт 2017 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2017.
- 4 Прудовский, А. М. Образование прорана при прорыве земляной плотины / А. М. Прудовский // Безопасность энергетических сооружений: сборник. – М.: НИИЭС, 1998. – Вып. 2. – С. 67–79.
- 5 Декларация безопасности гидроузла № 2. Отчет / ФГУП «Канал имени Москвы». – М., 2014. – С. 9–25.
- 6 Акт преддекларационного обследования гидротехнических сооружений гидроузла № 2. Акт / ФГУП «Канал имени Москвы». – М., 2013. – С. 205–232.
- 7 Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте: Федеральный закон от 27 июля 2010 г. № 225-ФЗ // Гарант Эксперт 2017 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2017.
- 8 Особенности определения размера вреда жизни, здоровью, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий судоходных гидротехнических сооружений / В. А. Есиновский [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 6. – С. 4–10.