

УДК 53.072.12 : 532.543 : 532.592.7 : 627.131

PhD

И.В. Шенбергер¹Е.М. Гоконова²Д.М. Бурлибаева¹

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВОЛНЫ ПРОРЫВА ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ
КЫЗЫЛАГАШСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MIKE BY
DHI**

Ключевые слова: плотина, водохранилище, алгоритм, волна прорыва, гидротехническое сооружение, поперечное сечение, гидродинамическая модель, зона затопления

В статье рассматриваются вопросы построения гидравлических моделей распространения волны прорыва при гидродинамической аварии на водоподпорных гидротехнических сооружениях (плотинах). Описана структура алгоритма расчета распространения волны прорыва на основе применения программного комплекса Mike by DHI. Приведены теоретические основы гидродинамических расчетов прорыва грунтовой плотины. Рассмотрены случаи поверхностного и глубинного размыва тела грунтовой плотины.

Структура алгоритма расчета распространения волны прорыва. Современная практика эксплуатации плотин и других гидротехнических сооружений речных гидроузлов показала, что сооружения, создающие водохранилища и воспринимающие напор воды, могут привести при авариях к возникновению чрезвычайных ситуаций на больших территориях с человеческими жертвами и огромными материальными ущербами.

Мировой опыт показывает возросшую вероятность аварий гидротехнических сооружений и прежде всего из-за прохождения паводков,

¹ТОО «Казахстанское агентство прикладной экологии», г. Алматы, Казахстан

²ООО «ЭКХАЙДЕН», г. Москва, Россия

превышающих расчетные проектные значения уровней воды (недостаточен срок наблюдений за экстремальными паводками, климатические и антропогенные воздействия на сток). Среди техногенных катастроф по тяжести последствий и величине ущерба одно из первых мест занимают гидродинамические аварии, возникающие при разрушении плотин. Другой частой причиной аварий является старение сооружений.

Примером тому могут служить разрушение плотины на р. Кызылагаш в Аксуском районе Алматинской области произошедшее в марте 2010 г. в результате перелива воды через гребень.

В 2019 г. ТОО «КАПЭ» был выполнен проект «Разработка методической основы расчета волны прорыва, определения возможных зон затопления и объектов, попадаемых в данные зоны в результате разрушения тела плотины водоподпорного гидротехнического сооружения».

Одной из целей проекта была разработка алгоритма расчета распространения волны прорыва при гидродинамической аварии, что является очень важной задачей при разработке подобного рода проектов, т.к. от правильности его составления зависит конечный результат.

Для проведения моделирования были собраны, проанализированы и использованы следующие исходные данные [1]:

- гидрологические данные;
- данные по шероховатостям русла и поймы;
- поперечные сечения русла и поймы (для 1D модели);
- карты местности – топогеодезические и батиметрические данные по проектной территории (водохранилище, река и ее пойма, территории населенных пунктов и т.д.);
- цифровые модели рельефа (местности) пойменных территорий (для 2D модели);
- данные по сооружениям на реке и режиме их работы.

Детальность и точность модели и стоимости ее разработки напрямую зависят от наличия и качества этих данных. При этом возможно моделирование, как отдельных сооружений, так и каскада. В случае отсутствия требуемых исходных данных необходимо проведение определенного ряда дополнительных полевых изысканий (топогеодезические и батиметрические работы и т.д.), которые были выполнены в рамках указанного выше проекта.

Разработанный алгоритм расчета распространения волны прорыва при гидродинамической аварии, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм расчета распространения волны прорыва при гидродинамической аварии.

Первый блок из восьми стадий называется «создание гидравлической модели реки», т.е. по сути непосредственная разработка самой модели с применением специального программного обеспечения на основе использования методов аппарата математической статистики, математического моделирования, имитационного моделирования, речной гидравлики и физики природных процессов.

Второй блок – это непосредственно само моделирование на основе полученной модели и разработанных и принятых сценариев (вариантов) развития ситуации. При этом, обычно, с помощью модели просчитываются самые неблагоприятные сценарии, при самых неблагоприятных сочетаниях различных факторов, влияющих на моделируемую систему.

И третий блок – это полученные результаты моделирования речной системы, включая определение различных гидравлических показателей по поперечникам (расходы, уровни, скорости течения, параметры пропускной способности реки), границы зон затопления при различных сценариях, характеристики зон затопления (глубина, скорости течения потока, в различных точках и в различные моменты времени), перечни объектов, попадающих в зоны затопления при различных сценариях.

Общее описание гидродинамической модели. В настоящее время с развитием техники и технологий одним из методов, позволяющим прогнозировать уровеньный режим рек может служить имитационное или компьютерное моделирование. В данной работе в качестве метода моделирования была использован программный комплекс Mike by DHI, позволяющий моделировать одномерную и двумерную задачи гидродинамики, с использованием модуля прорыва плотины [1].

Используемый программный комплекс Mike 11 предназначен для разработки имитационных компьютерных моделей гидродинамических процессов, включая разрушение плотин, прорывные и паводковые волны и транспорт наносов.

Разработка компьютерной модели реки базируется на гидродинамическом модуле данного программного комплекса, который реализует неявную разностную схему расчета неустановившегося движения воды в водотоках основанную на уравнениях Сен-Венана [2..8]:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q , \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0, \quad (2)$$

где, Q – расход потока, q – боковой приток (отток), h – глубина потока, A – площадь сечения потока, R – гидравлический радиус, C – коэффициент Шези, α – коэффициент Буссинеска, g – ускорение силы тяжести, x – длина (свободная координата), t – время (свободная координата).

Уравнение (1) называется уравнение неразрывности, а (2) – уравнение количества движения (динамическое движение).

Численная схема позволяет рассчитывать докритические (спокойные) и сверхкритические (бурные) потоки.

В модуль включены блоки, описывающие работу гидротехнических сооружений, в т.ч. управляемых.

Гидравлическое сопротивление русла рассчитывается по формуле Маннинга:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = MR^{1/6}, \quad (3)$$

где C – коэффициент Шези, R – гидравлический радиус, n – коэффициент шероховатости (по Маннингу n), M – коэффициент шероховатости (по Маннингу M).

В Модели существует возможность описания сопротивления русла сложной формы с неоднородной шероховатостью, а также калибровки зависимости, описывающей сопротивление, по натурным данным [1].

Граничные условия в программном комплексе Mike 11 могут быть заданы двух видов:

- h или Q (глубины или расходы) как функции времени;
- связь между h и Q $f(h, Q)=0$ (только в устье).

Топология гидрографической сети задается описанием соединения между собой именованных линейных участков. Координатой в пределах участка является пикет. Местоположение любого створа, сооружения, притока и т.п. в дальнейшем задается парой имя участка/пикет.

В характерных створах задается геометрия сечения в виде описанных поперечников, т.е. набора координат X, Z , где Z – абсолютная отметка точки сечения, а X – расстояние точки до начала координат. В этом же поперечнике даются все дополнительные сведения о гидравлическом сопротивлении русла.

Между смежными створами геометрические и гидравлические характеристики при вычислениях интерполируются.

При наличии гидротехнических сооружений они привязываются к расчетной схеме (указывается имя участка и пикет) и снабжаются описанием, зависящим от типа сооружения.

В программном комплексе Mike 11 имеется возможность учета затопления земель, прилегающих к водотоку, как присоединенных емкостей (не учитываются при расчете динамики потока, но учитываются в уравнении неразрывности) [1].

Для расчета неустановившегося движения задаются начальные условия, т.е. состояние системы в нулевой (начальный) момент времени. Эти условия могут быть заданы различными способами:

- в виде начальных расходов и уровней в створах (между створами эти значения интерполируются);
- автоматически (система сама подбирает равновесное состояние, удовлетворяющее граничным условиям);
- заимствуются результаты предыдущего расчета по этой же модели (как продолжение расчета во времени).

Принятая в модели разностная схема предполагает задание сети расчетных точек, состоящей из перемежающихся точек, в которых вычисляется расход (Q-точки) и уровень (h-точки). Q-точки размещаются посредине между соседними h-точками, в то время как расстояние между h-точками может меняться. На гидротехнических сооружениях всегда размещаются Q-точки.

Густота расчетных точек задается пользователем, исходя из требуемой точности решения и обеспечения устойчивости вычислительного процесса.

Перед началом счета задается период расчета - начальное и конечное время. Граничные условия, зависящие от времени, должны перекрывать этот период.

В результате расчета для каждого момента времени в пределах заданного периода, т.е. во всех точках временной сетки, определяются расходы во всех Q-точках и уровни во всех h-точках, а также скорости, глубины, площади живых сечений, ширины по урезу воды, объемы, гидравлические параметры и т.д. в соответствующих Q и h точках. Результаты могут быть выведены полностью или частично в табличной и/или графич-

ческой форме. Эта же информация сохраняется во внутреннем формате в файлах результатов для последующего возможного использования.

Расчет гидравлики прорыва грунтовой плотины. Большинство гидроузлов содержит один или несколько подводящих/отводящих каналов, резервуар или водохранилище, дамбу/плотину и иногда другие гидротехнические сооружения такие как поверхностные или донные водосбросы и т.д. Кроме того, в нижнем бьефе русло может быть пересечено мостами, водопропускными или другими регулирующими сооружениями. Именно поэтому к описанию речной сети при моделировании прорыва плотин нужно подходить с достаточной аккуратностью, чтобы получать качественные результаты расчётов. В модели MIKE 11 нет ограничений на количество прорываемых и прочих гидротехнических сооружений.

Описание речной сети поперечными сечениями для случаев расчёта прорыва сооружений производится точно также как и для любых других расчётных модулей. Однако ввиду высокой нестационарности характера распространения затоплений, необходимо описывать топографию речной сети по возможности детальнее, используя как можно больше поперечных сечений, особенно там, где наблюдается частая перемена параметров сечений.

Также немаловажным аспектом является описание высотных отметок поперечных сечений до отметок заведомо выше наблюдаемого на этом участке максимального уреза воды во время прохождения паводков или половодий. В случае если смоделированный уровень воды окажется выше отметок бровок поперечника, MIKE 11 будет экстраполировать обработанные данные (в редакторе поперечных сечений).

Для расчета гидравлики прорыва грунтовой плотины используется специальный модуль, в котором описывается специальное гидротехническое сооружение, именуемое "плотина с прораном" и представляющее собой плотину, в которой может образоваться изменяющаяся во времени брешь-проран (поверхностный размыв) или грифон (глубинный размыв). В этом плане, с точки зрения моделирования возможных гидродинамических аварий плотины в MIKE 11, типы образования прорана в теле плотины можно разделить согласно схеме, представленной на рис. 2 [1, 10].

Расчёт прорыва плотины может быть основан на уравнении энергии, либо альтернативным способом – на уравнении прорыва NWS

DAMBRK (National Weather Service – Национальная метеорологическая служба США).

Развитие прорана во времени рассчитывается программой на основании данных о материале тела плотины.

Описание основных сооружений.

Плотина. В Q-точке (точка на продольном профиле, где заданы расходы воды), где расположено прорываемое сооружение (Кызылагашская плотина), уравнение количества движения заменяется уравнением истечения через водослив. Течение может быть, как критическое, так и докритическое. В процессе расчёта программа определяет режим течения, проверяя уровень энергии на сооружении и в следующей по течению h-точке (точка на продольном профиле, где заданы уровни воды) [10].



Рис. 2. Типы описания проранов в MIKE 11.

Так как уравнение количества движения для этой Q-точки не используется, то ΔX , обычно используемый между поперечниками, в данном случае не имеет никакого значения. Однако максимальный шаг ΔX должен быть больше, чем расстояние между соседними пикетами во избежание вставки промежуточных интерполированных поперечных сечений.

Водосбросы и другие сооружения. Если водосбросное сооружение сопрягается с плотиной отдельным каналом, то его можно описать как показано на рис. 3.

В узле, где соединяются два речных участка в верхнем бьефе, площадь зеркала принимается как сумма площадей в каждой h-точке (точка на продольном профиле, где заданы уровни воды). Таким образом, если реальная площадь зеркала водохранилища уже задана в соответствующей h-точке водохранилища, то в h-точке водосброса дополнительную пло-

щадь описывать не нужно. В этом случае ширина сечения и площадь зеркала должны быть заданы нулём. Площадь поперечного сечения, гидравлический радиус и т.д. могут быть описаны как для участка водохранилища [10].

В действительности нет жесткой необходимости задавать водосброс отдельным речным участком. Водосброс и прорываемое сооружение могут быть заданы как комплекс сооружений в одной и той же расчётной точке (два разных типа сооружения на одном пикете) (рис. 4). Единственная разница между описанием комплексного сооружения и сооружений на разных участках в том, что в первом случае в файле результатов расход через водосброс и проран будут суммироваться и выдаваться единым графиком временных рядов. Во втором случае расходы сооружений будут получены отдельно.

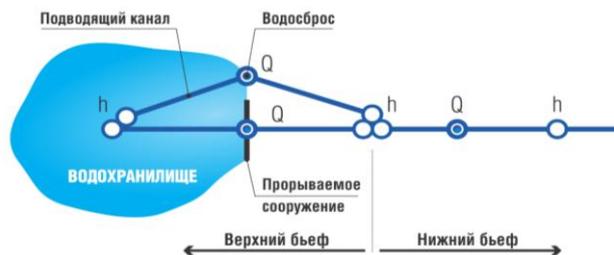


Рис. 3. Схематичное описание прорываемой плотины и водосбросного канала.

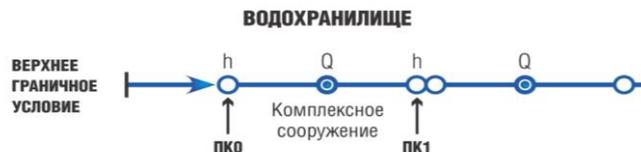


Рис. 4. Схема описания водосброса и прорываемого сооружения в одной точке.

Поверхностный размыв тела плотины (проран). При расчете развития прорана при поверхностном размыве тела грунтовой плотины задаются следующие параметры [1, 10]:

- размеры прорываемого сооружения;
- материал тела плотины: размер частиц D_{60} ; плотность частиц; пористость; критическое напряжение на сдвиг; коэффициент боковой эрозии.

- начальные условия развития прорана;
- ограничения развития прорана.

В случае поверхностного размыва (образование и развитие прорана) перелив через плотину похож на поток через водослив с широким порогом, но имеются два отличия:

- форма плотины изменяется со временем, т.к. проран увеличивается и гребень плотины укорачивается. Вследствие этого характеристика свободного перелива ($Q-h$) через гребень и проран не может быть рассчитана заранее.
- характеристики $Q-h$ для гребня плотины и для прорана отличаются друг от друга, и поэтому поток через гребень и поток через проран рассчитываются отдельно (рис. 5). Для обоих потоков используются уравнения водослива с широким порогом.



Рис. 5. Комбинированный поток через проран и гребень.

Целесообразно рассчитывать оба потока в рамках одного сооружения, т.к. они зависят от одной и той же геометрии. Проран изначально имеет форму трапеции. В процессе развития прорана трапеция увеличивается в размерах и изменяет форму. Начальная форма прорана описывается тремя параметрами (рис. 6): отметка дна прорана (НВ); ширина прорана по дну (WB); заложение откоса прорана (SS).

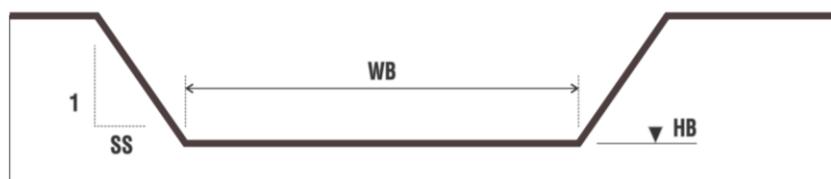


Рис. 6. Параметры геометрии прорана.

Развитие прорана может быть задано в двух вариантах: как известная функция времени и смоделировано, исходя из транспортирующей способности потока в проране (эрозионный процесс) [1, 10].

Параметры прорана с известной функцией во времени задаются во временных рядах в базе данных граничных условий самим пользователем. Время задается относительно начала перелива. Между заданными временами параметры линейно интерполируются, как показано на рис. 7. При этом, необходимо знать заранее и задать отметку дна прорана, ширину прорана и заложение откосов прорана как функцию времени. Данный метод может применяться, например, в случае моделирования разрушения затвора плотины или секции плотины, когда геометрические размеры образовавшегося прорана определены и известны.

Если выбран режим развития прорана вследствие размыва (эрозионный процесс), то должны быть заданы начальная и конечная формы прорана. Развитие прорана в течение шага времени рассчитывается, исходя из существующих условий в самом проране. Используется формула транспорта наносов Энгелунда-Хансена для расчета транспорта частиц в проране.

Сначала рассчитывается сопротивление потока в виде безразмерного касательного напряжения, основываясь на формулировке Энгелунда. Затем оно сравнивается с критическим касательным напряжением (критерий Шильдса), задаваемым пользователем.

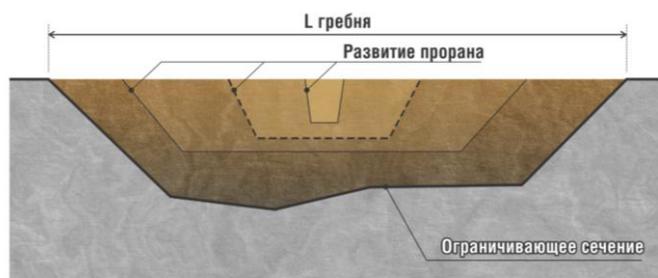


Рис. 7. Пример развития прорана при поверхностном размыве тела грунтовой плотины. Проран задан для времени 0 часов и 1 час. Пунктирная линия - результат интерполяции для времени 0,5 часа.

Если рассчитанное касательное напряжение больше критического, то рассчитывается транспорт наносов, иначе он принимается равным нулю.

Глубинный размыв тела плотины (грифон). При расчете развития прорана при глубинном размыве тела грунтовой плотины (грифон) задаются следующие параметры [1, 10]:

- размеры прорываемого сооружения;
- материал тела плотины;
- параметры размываемого отверстия: начальная отметка оси отверстия; начальный диаметр; шероховатость; коэффициент обрушения K ; коэффициент боковой эрозии;
- коэффициент выносимого материала после обрушения.

В случае глубинного размыва (грифона) протечка происходит сквозь тело плотины. Эрозия грунта вдоль образовывавшейся "трубы" вызывает расширение трубы и увеличение потока. В определенный момент времени плотина обрушивается в пустоту, образовавшуюся в результате подмыва. Такой сценарий моделируется как разновидность развития прорана вследствие размыва, т.е. имеются два варианта начала прорыва плотины:

- начало аварии из-за перелива;
- начало аварии из-за просачивания с образованием грифона (после обвала процесс размыва возвращается к случаю перелива, описанному выше).

Принятые допущения для аварии и типу грифона,

- сечение трубы круглое;
- труба горизонтальная;
- труба всегда работает полным сечением.

Положение центра трубы в поперечном сечении должно быть внутри поперечного очертания прорана и ограничивающего контура, если последний задан. Если окружность трубы выходит за эти пределы, гидравлические параметры берутся для сокращенного сечения, как показано на рис. 8.



Рис. 8. Корректировка сечения трубы.

Момент обрушения плотины определяется отношением диаметра трубы к расстоянию от гребня до верха трубы, как показано на рис. 9. Это

отношение задается пользователем, при превышении этого отношения часть плотины обрушивается, образуя проран [1, 10].

Форма прорана после разрушения верхней части показана рис. 10. Начальная ширина прорана приравняется к диаметру трубы. Обычно не весь обрушившийся материал выносится без выпадения на дно прорана. Это учитывается коэффициентом потери объема f_{lost} , который выражает долю материала, выносимого вниз немедленно после обрушения. Оставшийся материал равномерно располагается в проране, как показано на рис. 10. Следует заметить, что эти вычисления производятся с поперечными сечениями, а не с объемами, т.е. длина прорана и заложения откосов плотины не принимаются во внимание.



Рис. 9. Авария с образованием грифона. Схема и определение момента обрушения (Коэффициент обрушения – предельное отношение диаметра трубы D к толщине свода Y).

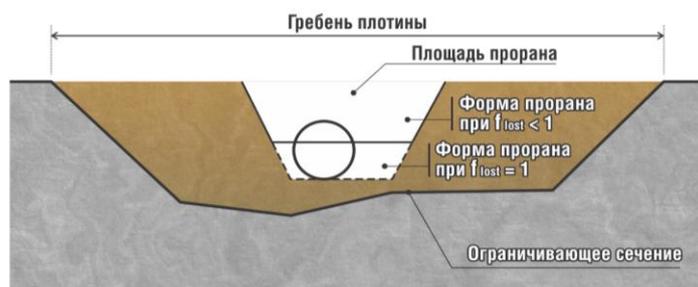


Рис. 10. Форма прорана после обрушения.

При этом, могут иметь место границы нерегулярной формы, за пределы которых проран не может развиваться. Это может быть скала или натуральное дно долины. Такой "жесткий" неразмываемый контур может быть задан в исходных данных, и в этом случае только часть трапеции в пределах этого контура будет использоваться при расчете прорана (рис. 11).

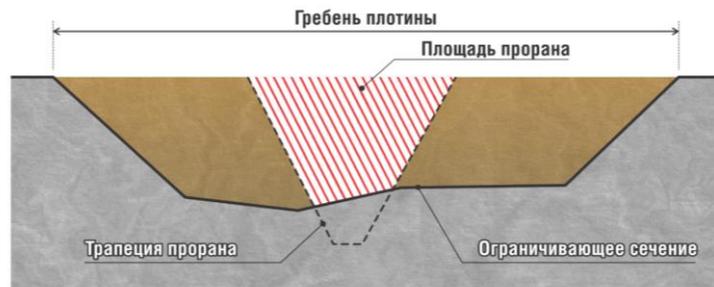


Рис. 11. Проран (заштрихованная площадь) – часть трапеции в пределах ограничивающего контура.

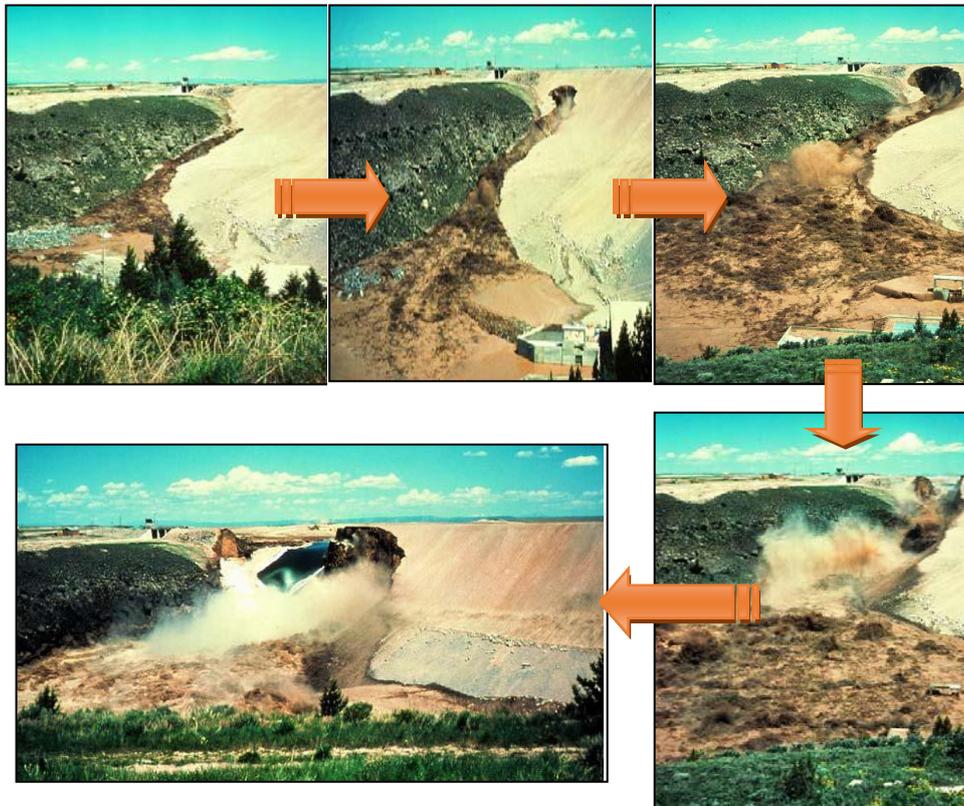


Рис. 12. Пример динамика развития прорана при глубинном размыве тела грунтовой плотины (плотина Титон в США, Teton Dam) [9].

На рис. 12 представлен пример демонстрирующий динамику развития прорана при глубинном размыве тела грунтовой плотины Титон (Тетон) в США (Teton Dam). Авария произошла 5 июня 1976 г. на каменно-

земляной плотине Титон (США), которая была сооружена в бассейне р. Снейк [9]. Плотина имела высоту 93 м, длину по гребню 1050 м; объём водохранилища 380 млн. м³. За два дня до аварии в правобережной части плотины была отмечена небольшая фильтрация – около 75 л/мин. 5 июня примерно в 5 м от правого борта и в 40...43 м ниже гребня фильтрация резко увеличилась и за 2 часа достигла 28 м³/с. Начался интенсивный вымыв грунта. Вскоре в верхнем бьефе образовался водоворот, свидетельствующий о том, что сооружение прорвано, и в течение 30 мин было смыто 40 % объёма плотины (около 3 млн. м³ грунта). Волна прорыва, хлынувшая из водохранилища, размывла и затопила около 120 млн. га плодородных земель; были полностью разрушены тысячи зданий учреждений, предприятий и жилых домов в городах Титон, Шугар-Сити, Ньюдейл, Рексбург и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MIKE 11. Компьютерное моделирование систем рек и каналов. Краткое руководство пользователя. НКФ «Волга». – Москва, 2006. – 73 с.
2. Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Даденков В.Ю. Справочник по гидравлике – Киев: Вища школа, 1977. – 279 с.
3. ВОДГЕО. Справочник по гидротехнике. – М.: ГИЗЛ по строительству и архитектуре, 1955. – 828 с.
4. Гришин М., Слиский С., Антипов А., Воробьев Г., Иванищев В., Орехов В., Пашков Г., Поспелов В., Рассказов Л. Гидротехнические сооружения. Часть 1. – Москва: Высшая школа, 1979. – 615 с.
5. Гришин М., Слиский С., Антипов А., Воробьев Г., Иванищев В., Орехов В., Пашков Г., Поспелов В., Рассказов Л. Гидротехнические сооружения. Часть 2. – Москва: Высшая школа, 1979. – 336 с.
6. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 418 с.
7. Киселев П.Г. (ред.) Справочник по гидравлическим расчетам. 4-е изд, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
8. Недрига В.П. Гидротехнические Сооружения – Справочник проектировщика. – Москва: Стройиздат, 1983.
9. Официальный сайт. <https://www.tetonwater.org/get-out/photo-gallery/teton-dam-series-9/>.
10. Применение моделирующей системы MIKE 11 для гидравлических расчётов прорыва плотин и накопителей. НКФ «Волга». – Москва, 2013. – 18 с.

Поступила 28.11.2020

PhD

И.В. Шенбергер
Е.М. Гоконова
Д.М. Бурлибаева

**MIKE BY DHI БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНІН ПАЙДАЛАНА
ОТЫРЫП, ҚЫЗЫЛАҒАШ СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ
ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ АВАРИЯСЫ КЕЗІНДЕ БҰЗЫЛУ
ТОЛҚЫНЫНЫҢ ТАРАЛУЫН ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІН ӘЗІРЛЕУ**

Түйін сөздер: бөгет, су қоймасы, алгоритм, серпінді толқын, гидротехникалық құрылым, көлденең қимасы, гидродинамикалық моделі, су басу аймағы

Мақалада гидравликалық құрылыста (бөгеттерде) суды ұстау кезінде гидродинамикалық апат кезінде серпінді толқынның таралуына арналған гидравликалық модельдердің құрылысы туралы айтылады. DHI бағдарламалық пакетімен Майкты қолдану негізінде серпінді толқынның таралуын есептеу алгоритмінің құрылымы сипатталған. Жер бөгетінің ашылуының гидродинамикалық есептеулерінің теориялық негіздері келтірілген. Жер бөгеті денесінің беткі және терең эрозия жағдайлары қарастырылады.

I.V. Schenberger, E.M. Gokonova, D.M. Burlibaeyva

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CALCULATION OF
BREAKTHROUGH WAVE PROPAGATION IN A HYDRODYNAMIC
ACCIDENT OF A KYZYLAGASH RESERVOIR USING THE MIKE BY
DHI SOFTWARE COMPLEX**

Key words: dam, reservoir, algorithm, breakthrough wave, hydraulic structure, cross section, hydrodynamic model, flood zone

The article deals with the construction of hydraulic models for the propagation of a breakthrough wave in a hydrodynamic accident at water-retaining hydraulic structures (dams). The structure of an algorithm for calculating the propagation of a breakthrough wave based on the use of the Mike by DHI software package is described. The theoretical foundations of hydrodynamic calculations of the breakthrough of an earth dam are given. Cases of surface and deep erosion of the earth dam body are considered.