

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНЫ ПРОРЫВА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВОЗМОЖНОГО УЩЕРБА, ВЫЗВАННОГО ЗАТОПЛЕНИЕМ ЗЕМЕЛЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРУШЕНИЯ ПЛОТИНЫ

Степанов К.А.

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии

Приводится описание методики предотвращения возможного ущерба вызванного затоплением, подтоплением и размывом земель в результате обрушения плотины. Она показывает хорошие результаты на масштабных моделях, но при этом не требует несоизмеримых вычислительных затрат. С ее помощью возможно без использования сложных и дорогих программных средств рассчитывать зоны затопления, вызванные волной паводка или волной прорыва, что позволит специалистам оптимизировать работы по организации противопаводковых мероприятий. Для прогнозирования распространения волны прорыва на основе методики создана компьютерная программа, использование которой позволяет при минимальном наборе исходных данных проводить подробное моделирование распространения волны прорыва по руслу реки. Проведенные тестовые испытания и результаты показали, что созданная программа способна рассчитывать параметры волны прорыва и вычислять зоны затопления, ранжированные по глубине. Существенное отличие разработанной программы заключается в минимальном требуемом наборе начальных параметров и в простых и наглядных результатах. Так в созданной программе выводится итоговая 2D карта с изображением затопленных участков, ранжированных по глубине затопления и другие параметры распространения волны прорыва.

Ключевые слова: Моделирование распространения волны прорыва, защита земель от затопления, методика моделирования волны прорыва, влияние шероховатости поверхности на процесс распространения волны прорыва.

BREAK WAVE SIMULATION METHODOLOGY TO PREVENT POSSIBLE DAMAGE CAUSED BY THE FLOODING OF LAND DUE TO THE COLLAPSE OF THE DAM

Stepanov K. A.

BSE "ARSRIHR"

The description of the methods to prevent possible damage caused by the flooding, flooding and erosion of land due to the collapse of the dam. It shows good results in scale models but this requires disparate computational cost. With its help it is possible without the use of complicated and expensive software to calculate the flood zone, or flood wave caused by a wave of breakthrough that will allow specialists to optimize the organization of anti-flood measures. To predict the propagation of a wave breaking on the basis of methodology developed a computer program, which allows the use of the minimum set of input data to conduct detailed modeling of wave propagation through on the riverbed. Conducting tests and the results showed that the created program can compute the break wave and calculate the flood zone, ranged in depth. The essential difference between the developed program is a required minimum set of initial parameters in simple and intuitive results. So to set up the program displays the final 2D map of the flooded areas, ranging in depth of flooding and other parameters of the wave break.

Keywords: Wave breaking modeling, protection land from flooding, wave breaking simulation method, effect of surface roughness on the modelling of waves breaking.

В настоящее время можно привести множество примеров затопления, подтопления и размыва земель, вызванного как прохождением паводка, так и распространением волны прорыва.

Одними из основных причин, приводящих к авариям на гидротехнических сооружениях, являются как природные, так и техногенные факторы, такие как:

- при прохождении экстремальных расходов возможно переполнение водохранилища и

нарушение штатной работы сбросных сооружений, что приводит к переливу воды через гребень плотины и образованию прорана;

- вследствие длительных сроков эксплуатации возможен износ основных сооружений плотины и гидромеханического оборудования, что может привести к образованию прорана в теле плотины;

- вследствие ошибок персонала, связанных с отсутствием мониторинга опасных ситуаций и недостаточности прогнозных данных по паводкам;

- вследствие возможного террористического акта, приводящего к разрушению плотины.

Одним из примеров прохождения паводка является недавнее наводнение на Дальнем Востоке в августе 2013 года. От наводнения на Дальнем Востоке пострадало более чем 135 000 человек. В Дальневосточном федеральном округе пострадало от паводка около 14 000 домов, 1600 километров дорог, 174 моста, 825 социально значимых объектов.

Гибель же сельскохозяйственных культур в результате наводнения на Дальнем востоке произошла на площади 390 800 га., по данным Министерства сельского хозяйства РФ ущерб составил 8,2 млрд. рублей.

Попытки разрешить конфликт между необходимостью использования пойменных и прибрежных земель и убытками от возможных наводнений предпринимались неоднократно многими специалистами. Но до сих пор этот конфликт не разрешен. Для решения задачи о возможности использования прибрежных земель необходимо проводить анализ возможного ущерба при наводнениях.

Для защиты территорий от наводнений проводятся мероприятия по берегоукреплению. Основным способом на сегодняшний день является строительство дамб обвалования. Необходимо точно определять параметры и места строительства дамб обвалования, для предотвращения дальнейшего распространения волны. Ввиду того, что стоимость строительства дамб обвалования напрямую зависит от их протяженности, высоты и материала изготовления, необходимо оптимизировать их параметры. Наиболее рациональным выходом может стать проведение моделирования речного потока для определения возможных зон затопления перед проектированием и строительством берегоукрепительных средств. Опираясь на полученные результаты моделирования, специалисты смогут получить инженерные обоснования необходимых противопаводковых мероприятий. Такие расчеты позволят подбирать оптимальные параметры берегоукрепительных средств защиты территорий при наводнениях.

Оценить качество и точность моделирования распространения волны прорыва по руслу реки является непростой задачей. Истинный результат в таких исследованиях никому не известен, также не существует единственно верного способа позволяющего получить

достоверные результаты. При использовании любого из методов моделирования получают только ориентировочные данные о зонах затопления, получившихся в результате прохождения волны прорыва. Точность полученных результатов оценить сложно. Известно лишь, что трехмерные методы моделирования речного потока заведомо лучше двумерных, а двумерные заведомо лучше одномерных. Но качественные различия привести невозможно в результате многих причин. Одними из таких причин являются сложность оценки качества исходных данных, а также различие в способах калибровки моделей. Зачастую, когда требуется в кратчайшие сроки провести моделирование распространения волны прорыва и определить зоны затопления, исходных данных для проведения трехмерного моделирования оказывается недостаточно. В таких случаях возможно использование методов двумерного моделирования. Для калибровки таких моделей пользуются подбором коэффициентов шероховатости, что позволяет приблизить модель к реальным условиям. В данной статье рассмотрено упрощение задачи и возможность проведения экспресс моделирования распространения волны прорыва.

В начале, при начале работы с программой следует загрузить карту исследуемой области, далее должна быть построена прямоугольная расчетная сетка для последующих этапов работы программы. Следует также отметить некоторые параметры используемой расчетной сетки. В каждой ячейке сетки с координатами $X_{i,j}$ будет задана высота этой точки, соответствующая реальной высоте моделируемого участка местности. В качестве гидравлических параметров волны для моделирования течения жидкости следует задать начальный напор и характеристики прорыва. Исходя из этого, будет рассчитываться скорость распространения волны, в зависимости от того, распространяется ли волна прорыва в русле реки или на пойме.

Распространение волны будем рассчитывать последовательно для каждого момента времени. Для начального времени T_0 будем искать ближайшие точки с разницей высот меньше высоты начальной волны прорыва, и при нахождении таких точек, на следующем этапе будем вычислять в этих точках гидравлические параметры волны, а затем переходить на следующий шаг времени T_1 и искать ближайшие точки к уже найденным. Одновременно в конце каждого цикла будет рассчитываться оставшийся объем волны. В результате описанного алгоритма программы будет получаться наглядная 2D визуализация распространения волны по исследуемой территории.

Расчет расхода в створе плотины при ее прорыве будем определять по методическим рекомендациям Всесоюзного Научно-Исследовательского института транспортного строительства. Приведу краткие сведения о методике:

Расход в створе плотины при ее прорыве Q_n , м³/с равен:

$$Q_n = B_n H_n^{\frac{3}{2}} K_{пр} \quad (1)$$

B_n - длина плотины по урезу воды в верхнем бьефе при предельном наполнении водохранилища,

H_n - напор (разность отметок уровней воды в верхнем и нижнем бьефах до прорыва плотины), м;

$K_{пр}$ - коэффициент, учитывающий отношение возможной ширины прорыва к длине плотины B_n и условия истечения воды при прорыве.

При распространении волны прорыва расчёт максимального прорывного расхода волны в створе перехода $Q_{пм}$, м³/с, определяют по формуле:

$$Q_{пм} = \frac{W_0 Q_n}{W_0 + Q_n L_p \tau} + Q_m \quad (2)$$

L_p - расстояние от плотины до перехода, м;

τ - коэффициент, характеризующий условия прохождения волны прорыва по транзитному руслу, с/м;

W_0 - объем водохранилища при наивысшем уровне верхнего бьефа, м³;

Q_m - возможный бытовой расход водотока или расход сброса с водослива плотины в створе перехода на момент прохождения волны прорыва, м³/с.

Для улучшения быстродействия программы на больших картах был использован протокол MPI в рамках принципа распараллеливания вычислений. С помощью него удалось значительно уменьшить сложность разработки параллельных программ. Кроме того, использование MPI способствует большей эффективности параллельных вычислений. Помимо этого, при выполнении работы передо мной стояла задача грамотно организовать схему передачи данных между процессорами, чтобы свести к минимуму время обмена информацией. Это тоже весьма важно, поскольку при распараллеливании нужно учесть то, что большое ограничение на скорость поиска решения накладывает невысокая скорость передачи данных, то есть надо найти золотую середину, при которой каждый процессор будет иметь максимальную нагрузку при минимальных задержках при передаче данных.

При распространении волны на исследуемой местности объем волны будет постепенно уменьшаться по мере затопления все больших участков. Объем оставшейся части волны F_i :

$$F_i = F_0 - \sum_{i=1}^N S_i \cdot h_i, \quad (3),$$

считая, что h – безопасный уровень, при котором волна не будет представлять ущерба для окружающей среды, S_i площадь ячейки, $i = 1 \dots N$ – количество затопленных ячеек.

Для определения глубины текущей ячейки будем использовать следующий метод.

$$h_{n+1} = \sum_{k=1}^N \frac{h_k}{s_k}, \quad (4)$$

где h_{n+1} – глубина текущей ячейки, h_k – глубина предыдущей ячейки, s_k – количество ячеек, на которые произошёл разлив потока из h_k ячейки.

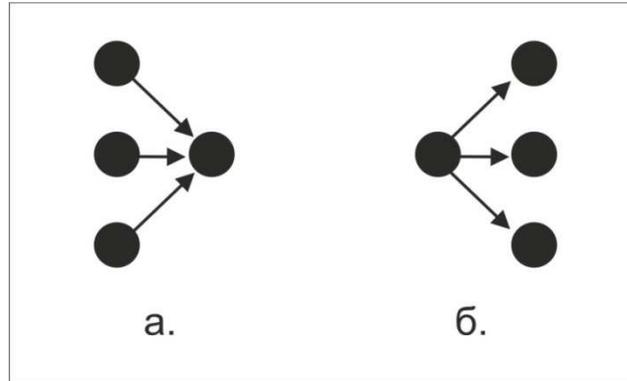


Рис. 1 – Схема распространения волны прорыва.

Таким образом при распространение волны прорыва по ширине, будем получать уменьшение глубины волны. (рис. 1а) При сужении площади потока будет получаться подъем уровня воды. (рис. 1б).

Распространение волны будет происходить при выполнении условия:

$$Z_{n+1} \leq Z_n + h_k, \quad (5)$$

где Z_n, Z_{n+1} – высота рельефа в текущей и следующей ячейках.

Приведём преимущества разработанной методики и созданного на её основе программного продукта:

- Моделирование волны прорыва производится по упрощенным формулам, что позволяет проводить исследования при минимальном количестве исходных данных, при этом ошибка расчетов, в сравнении с ресурсозатратными методами незначительна.
- Моделирование речной системы занимает минимальное время (от загрузки цифровой модели рельефа до получения итоговых результатов требуется около часа).
- В результате одного цикла моделирования выводится вся информация, включающая карту и площадь зон затопления. Это позволяет при изменении исходных параметров, сразу получать результаты в виде 2D изображения исследуемой местности с изображением затопленных участков.

Для проведения моделирования требуются следующие исходные данные (рис. 2):

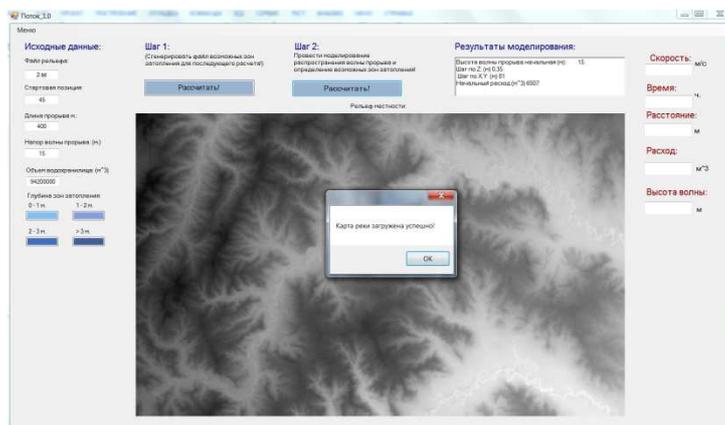


Рис. 2 – Пример результатов работы программы.

- Цифровая модель рельефа, подгружаемая из файла .txt
- Координаты места образования прорыва (стартовая позиция)
- Параметры образовавшегося прорана (длина прорана, напор волны прорыва)
- Объем водохранилища.

В результате процесса расчетов получаем следующие параметры:

1) Параметры, рассчитываемые перед началом процесса моделирования:

- Шаг координатной сетки по координатам: X, Y и Z. (находится в зависимости от загруженного файла с ЦМР),
- Начальный расход волны прорыва.

2) Параметры, рассчитываемые во время процесса моделирования (последовательно для каждого конкретного момента времени):

- Текущее время, пройденное с момента образования прорана
- Текущая скорость волны прорыва для фронта волны
- Пройденное расстояние
- Текущий расход для фронта волны
- Текущая высота фронта волны прорыва.

3) Параметры, рассчитываемые по окончании процесса моделирования:

- Площади зон затопления ранжированные по глубине (менее 1 метра, от 1 до 2 метров, от 2 до 3 метров, более 3 метров).

• График зависимости расхода от расстояния от места образования волны прорыва. (рис. 3)

3)

- График зависимости скорости волны прорыва от гидравлического радиуса, для всех сечений

- Графики скоростей в зависимости от удаления от начального створа.

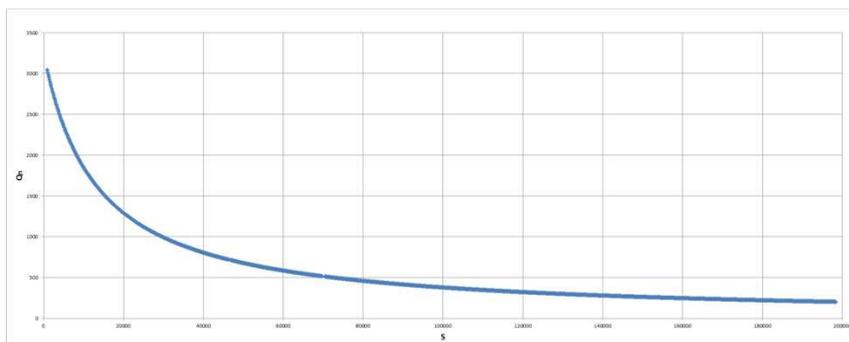


Рис. 3– График зависимости расхода от расстояния до плотины.

Для расчета безопасности гидротехнических сооружений необходима оценка ущерба вызванного возникновением и развитием гидродинамической аварии при разрушении напорного фронта плотины с образованием волны прорыва и ее последующим распространением и затоплением прилегающих территорий. Такое развитие событий нанесет ущерб для населения, экономики рассматриваемого региона.

При этом следует рассматривать сценарий, мгновенного разрушения плотины, вследствие неустановленной причины, повлекшее за собой образование волны прорыва и дальнейшее её распространением по руслу реки и на прилегающую территорию.

Созданная методика позволяет оптимизировать работы по предотвращению возможного ущерба вызванного затоплением, подтоплением и размывом земель в результате обрушения плотины. Она показывает хорошие результаты на масштабных моделях, но при этом не требует несоизмеримых вычислительных затрат. С ее помощью возможно без использования сложных и дорогих программных средств рассчитывать зоны затопления, вызванные прохождением волны паводка или волны прорыва, что позволяет оптимизировать работы по организации противопаводковых мероприятий. Для прогнозирования распространения волны прорыва на основе методики создана компьютерная программа, использование которой позволяет при минимальном наборе исходных данных проводить подробное моделирование распространения волны прорыва по руслу реки. Проведенные тестовые испытания и результаты показали, что созданная программа способна рассчитывать параметры волны прорыва и вычислять зоны затопления, ранжированные по глубине. Существенное отличие разработанной программы заключается в минимальном требуемом наборе начальных параметров и в простых и наглядных результатах. Так в созданной программе выводится итоговая 2D карта с изображением затопленных участков, ранжированных по глубине затопления и другие параметры распространения волны прорыва.

Представленные в статье методики опробованы для решения, как тестовых, так и практических задач по моделированию волн прорыва для получения инженерных обоснований необходимых противопаводковых мероприятий. Полученные результаты позволяют специалистам оптимизировать работу по предотвращению ущерба для земель, вызванного последствиями распространения волн прорыва.

Список литературы

1. Алешкевич В.А. Механика сплошных сред [Текст]: учебное пособие / – В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев – Москва : Издательство физического факультета МГУ, 1998. – 92 с.
2. Бритвин С.О., Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Компьютерное моделирование — современный инструмент решения задач речной гидравлики. Прогнозирование паводков в проекте "Волга-Рейн". //В сб. "Безопасность энергетических сооружений". Вып. П. ОАО НИИЭС, М., 2003. стр.126-132
3. Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами Рос.акад.наук. Ин-т вод.пробл.. - М.: Физматлит, 2002. - 494 с
4. Henderson F.M. Open Channel Flow / F. M. Henderson. – New-York, USA: MacMilan Company, 1966. – 522 p.
5. Montes J.S. Hydraulics of Open Channel Flow / J. S. Montes. – New-York, USA: ASCE Press, 1998. – 697 p.

Рецензенты:

Кирейчева Л.В., д.т.н., профессор, заместитель директора по науке, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, г.Москва.

Сухарев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры мелиорации и рекультивации МГУП, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства», г.Москва.