

УДК 626.8

**К. А. Степанов** (ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии)

## **УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ПРОРЫВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЗЕМЕЛЬ ОТ НАВОДНЕНИЯ**

Цель исследований – разработка методики для учета трения при упрощенном моделировании распространения волны прорыва для обеспечения защиты земель от наводнений. Разработанная методика дает возможность получения качественных результатов, не прибегая к высокочувствительным компьютерным моделям для моделирования волны прорыва по руслу реки. Приведенный в методике способ калибровки позволяет учитывать трение при помощи введения дополнительной функции, зависящей от коэффициента шероховатости подстилающей поверхности. Разработанный алгоритм позволяет проводить автоматическую начальную калибровку модели, используя данные из цифровой модели рельефа. В результате примененного алгоритма существенно повышена точность моделирования.

Ключевые слова: моделирование, волна прорыва, защита земель от затопления, коэффициент шероховатости, распространение волны прорыва.

**К. А. Stepanov** (SSE “ARSRIHR”)

## **SIMPLIFIED METHOD FOR SIMULATION OF A DAM-BREAK WAVE PROPAGATION TO PROTECT LANDS FROM FLOODING**

The objective of the research is to develop the method for accounting friction in the simplified simulation of a dam-break wave propagation to protect lands from flooding. The developed method gives the opportunity to obtain high-quality results without resorting to high-cost computer models to simulate the dam-break wave along the riverbed. The developed algorithm enables to include friction by using additional function which depends on the roughness factor of underlying surface. The developed algorithm allows for automatic initial calibration of the model using data from a digital elevation model. As a result, the algorithm significantly improves the accuracy of the simulation.

Keywords: simulation, dam-break wave, land protection from flooding, roughness factor, dam-break wave propagation

В настоящее время можно привести множество примеров затопления, подтопления и размыва земель, вызванных таким чрезвычайным происшествием, как прорыв плотины.

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

- 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.

Из недавних событий можно вспомнить наводнение в Якутии в мае 2013 года. Тогда ущерб от масштабного весеннего паводка составил почти 1 млрд руб. По данным МЧС в зоне затопления оказались около 500 домов, в которых проживало более 1700 человек.

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, вызванных в частности разрушением плотин. В сельскохозяйственных районах особенно велики убытки, вызванные затоплением сельскохозяйственных угодий. Так наводнения наносят ущерб сельскохозяйственным культурам, повреждают различные инженерные и мелиоративные системы.

Для защиты территорий от наводнений проводятся мероприятия по берегоукреплению. Основным способом на сегодняшний день является строительство дамб обвалования. Возведение дамб обвалования требует точного определения их размеров, поскольку при переливе через них дамбы оказываются смытыми и польза от них стремится к нулю. Необходимо

точно определять места строительства дамб обвалования для предотвращения дальнейшего распространения воды. Ввиду того, что стоимость строительства дамб обвалования напрямую зависит от их протяженности и высоты, необходимо оптимизировать их параметры. Наиболее рациональным выводом может стать использование при проектировании и строительстве берегоукрепительных средств, проведение моделирования речного потока для определения возможных зон затопления. Далее, опираясь на полученные результаты моделирования, можно рассчитать параметры дамб обвалования. Такие расчеты позволят подбирать оптимальные параметры берегоукрепительных средств защиты территорий от последствий наводнения.

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 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. Автором

проведены исследования по дальнейшему упрощению задачи и возможности расчета скорости волны прорыва по формулам с введением в них дополнительной функции, учитывающей зависимость от характера подстилающей поверхности.

Для моделирования волны прорыва возможны следующие методы: физический эксперимент, лабораторный эксперимент, численное компьютерное моделирование. Физический эксперимент невозможен, поскольку волна прорыва случается очень редко и зачастую измерить ее параметры является невозможным. Лабораторный эксперимент является очень затратным способом для определения параметров возможной волны прорыва. Единственным на сегодняшний день возможным способом является численное компьютерное моделирование. По методике компьютерного моделирования проводится моделирование распространения волны прорыва и показываются зоны затопления, чтобы специалисты, основываясь на полученные данные, могли дать рекомендации по их защите. Численное моделирование волн прорыва можно разделить на одномерное, двумерное, трехмерное моделирование. Так одномерное моделирование не дает точных результатов и не позволяет выводить двумерные результаты. Двумерное и трехмерное моделирование в существующих программных комплексах, таких как, например MIKE 21, Flow Vision, требует высококлассных специалистов и высокопроизводительных компьютеров. Но даже в таком случае расчеты могут занять несколько дней на масштабных моделях.

Автором разработана методика моделирования волны прорыва, при помощи которой возможно учитывать трение и проводить калибровку модели. При использовании такого метода для прогнозирования распространения волны прорыва будет требоваться минимальное число исходных данных. Результаты моделирования, полученные по данной методике, будут сопоставимы с более сложными методами расчета. Разрабатываемое программное обеспечение приблизится по качеству результатов к более

сложным продуктам, но при этом будет оперативно проводить моделирование волны прорыва и определять зоны затопления, выводя их в 2D визуализации рассматриваемого региона.

В статье приведен пример расчета речного потока в условиях пропуска критических объемов, например, при дождевых паводках, весеннем половодье и волнах пропуска с водохранилищ на основании предлагаемой методики, которая использует для расчета упрощенные формулы и разработанную калибровочную функцию.

Для проведения моделирования распространения волны прорыва было разработано программное обеспечение, которое позволяет проводить расчеты скорости распространения волны.

Скорость распространения фронта волны прорыва в сухом русле [1]:

$$C_s = 2\sqrt{gd_0} . \quad (1)$$

Скорость распространения фронта волны прорыва в смоченном русле [2]:

$$\frac{C_s}{\sqrt{gd_1}} = \frac{0,63545 + 0,3286 \frac{d_1^{0,65167}}{d_0}}{0,00251 + \frac{d_1^{0,65167}}{d_0}} , \quad (2)$$

где  $d_1$  – глубина воды в нижнем бьефе, м;

$d_0$  – напор волны прорыва, м.

Скорость распространения фронта волны прорыва по формуле Шези [3]:

$$V_{ch} = C\sqrt{RI} , \quad (3)$$

где  $V_{ch}$  – средняя скорость потока, м/с;

$C$  – коэффициент сопротивления трения по длине (коэффициент Шези), являющийся интегральной характеристикой сил сопротивления;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$I$  – гидравлический уклон, м/м.

Для решения поставленной задачи было проведено моделирование распространения волны прорыва на участке реки Малая Узень двумя способами:

- по формуле Шези (3) с учетом коэффициента сопротивления ( $C$ ), определяемого по формуле Н. Н. Павловского [3]:

$$C_s = \frac{1}{n} R^y,$$

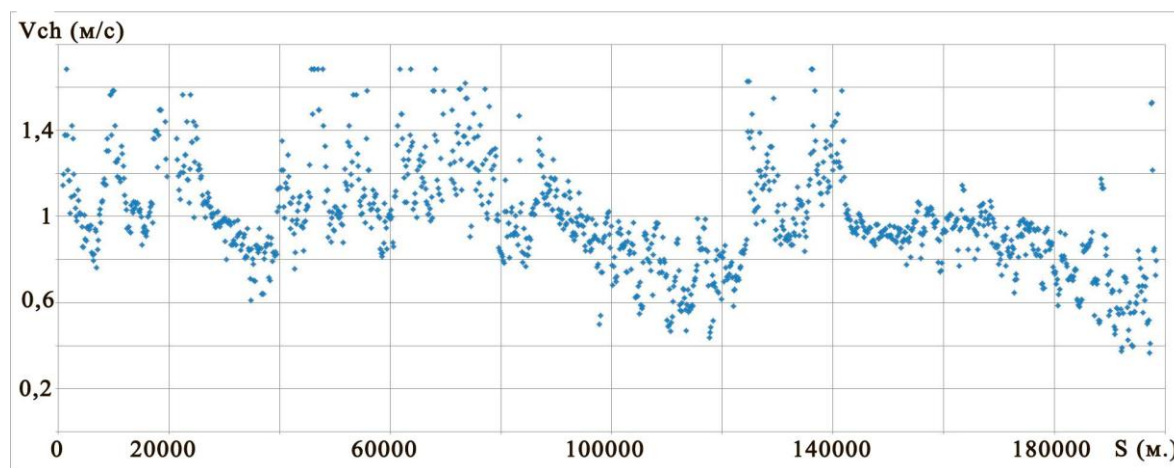
где  $n$  – коэффициент шероховатости, принимаемый в зависимости от типа подстилающей поверхности;

$y$  – показатель степени рассчитываемый по формуле [3]:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1);$$

- по формулам (1), (2) без учета сил трения.

В результате были получены данные о скоростях в различные моменты времени. На рисунке 1 приведен график зависимости скорости волны прорыва от расстояния до плотины, рассчитываемой по формуле Шези (с учетом трения). На рисунке 2 приведен график зависимости скорости волны прорыва от расстояния до плотины без учета трения.



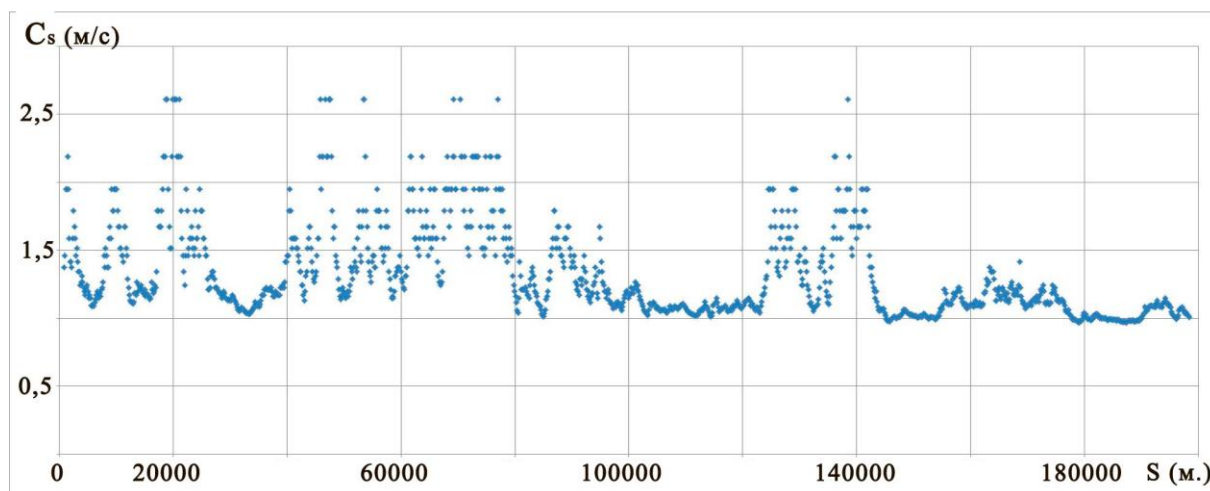
**Рисунок 1 – График зависимости скорости волны прорыва ( $V_{ch}$ ) от расстояния до плотины ( $S$ ), рассчитываемой по формуле Шези**

Далее был построен график калибровочной функции  $F(n)$  (рисунок 3) из условия:

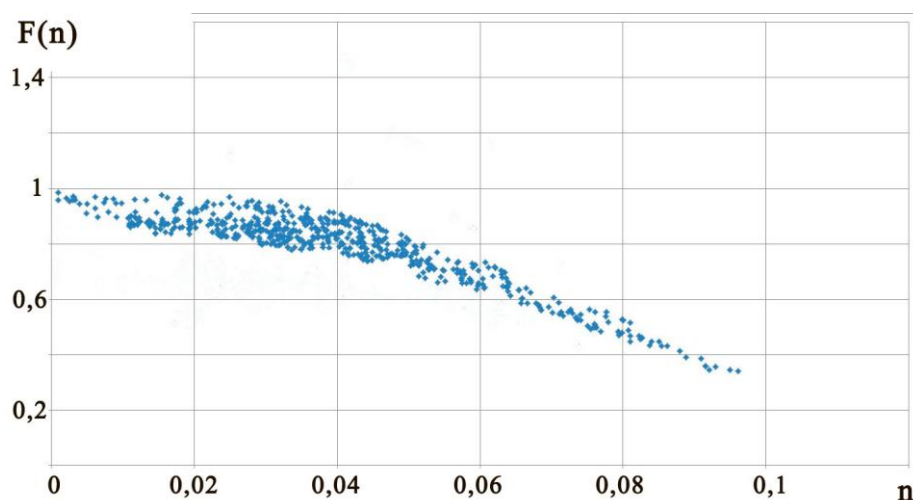
$$F(n) = \frac{V_{ch}}{C_s}$$

Затем по графику получили формулу для калибровочной функции:

$$F(n) = (1,017 - 0,1719n + 165,09n^2)^{-1}. \quad (4)$$



**Рисунок 2 – График зависимости скорости волны прорыва  $C_s$ , рассчитываемой по формулам (1), (2), от расстояния до плотины  $S$ .**



**Рисунок 3 – График распределения значений калибровочной функции**

Полученная зависимость калибровочной функции  $F(n)$  от коэффициента шероховатости поверхности  $n$  позволяет использовать ее для калибровки модели. Таким образом, возможен подбор конкретного значения функции  $F(n)$  при известном значении  $n$ .

Проводить моделирование распространения волны прорыва по руслу

реки возможно по следующим формулам:

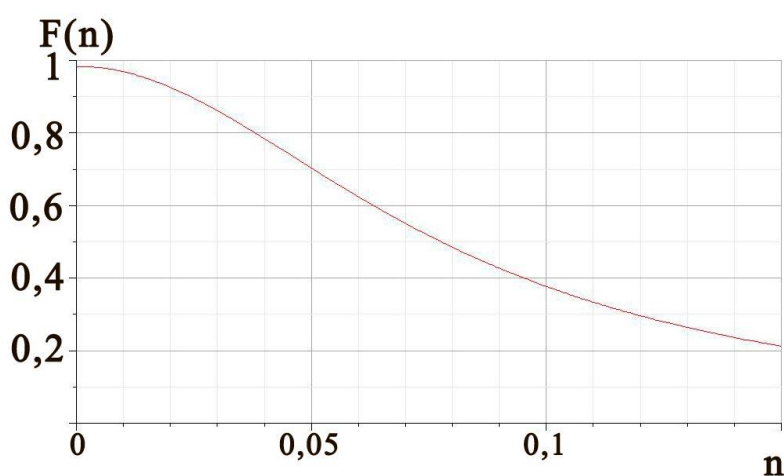
- для случая обрушения волны прорыва на сухую поверхность:

$$C_s = F(n)2\sqrt{gd_0};$$

- для случая обрушения волны прорыва на смоченную поверхность:

$$\frac{C_s}{\sqrt{gd_1}} = F(n) \frac{0,63545 + 0,3286 \frac{d_1^{0,65167}}{d_0}}{0,00251 + \frac{d_1^{0,65167}}{d_0}};$$

- для расчета  $F(n)$  будем использовать формулу (4) (рисунок 4).



**Рисунок 4 – График калибровочной функции**

В качестве выводов следует отметить, что описанный способ моделирования распространения волны прорыва позволяет легко находить решения прикладных задач. Для приблизительной оценки скорости распространения волны прорыва в зависимости от уровня воды в нижнем бьефе использованы упрощенные формулы расчетов. Если ранее было рассмотрено моделирование волны прорыва без учета трения, подходящее только для оценки максимально возможного ущерба, то теперь, благодаря введению калибровочной функции, возможно получение достоверных результатов, зависящих от шероховатости подстилающей поверхности. Найдена калибровочная функция, позволяющая ввести зависимость от трения в формулы для вычисления скорости (1), (2).



Таким образом, можно производить автоматическую начальную калибровку модели следующим способом:

1 Для каждого из сечений реки получаем значение коэффициента шероховатости,  $n_{сеч}$  которое равно:

$$n_{сеч} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{i},$$

где  $k$  – количество клеток (минимальных площадей) в рассматриваемом сечении;

$n_i$  – коэффициент шероховатости для конкретной клетки, который зависит от координаты  $Z$  текущей клетки. Чем выше  $Z$ , тем больше коэффициент шероховатости, то есть, чем выше от уровня реки находится затопливаемый участок, тем выше его коэффициент шероховатости. Так при увеличении расстояния и высоты рельефа от русла реки коэффициент шероховатости будет увеличиваться.

2 По найденному значению коэффициента шероховатости  $n_{сеч}$  находится значение калибровочной функции, которое подставляется в формулу для расчета скорости в рассматриваемом сечении.

Использование полученного метода позволяет при минимальном наборе исходных данных проводить моделирование распространения волны прорыва по руслу реки.

Для прогнозирования распространения волны прорыва по методике создана компьютерная программа. Проведенные тестовые испытания и их результаты показали, что она способна рассчитывать параметры волны прорыва и вычислять зоны затопления, ранжированные по глубине.

Результаты, полученные по разработанной методике в сравнении с результатами, полученными в результате экспериментов при использовании программного комплекса МИКЕ 11, разнятся не более, чем на 7 % для любого рассматриваемого сечения. Результаты расчетов зон затопления приводятся в таблице 1.

**Таблица 1– Результаты расчетов зон затопления**

Тип зоны	Площадь затопления		Погрешность
	По разработанной методике (км <sup>2</sup> )	Расчеты в MIKE 11 (км <sup>2</sup> )	
от 0 до 1 м	58,82	62,7	-6,18%
от 1 до 2 м	42,77	41,4	-3,3%
от 2 до 3 м	23,85	24,42	+2,3%
3 и более м	12,62	12,46	-1,3%
Сумма	138,06	140,98	+2,1%

Погрешность можно объяснить результатами калибровки путем подбора коэффициентов шероховатости созданной полуэмпирической методики распространения волны прорыва. Следует отметить, что при более точном задании коэффициентов шероховатостей с использованием космоснимков возможно получение более качественных результатов. Такие результаты позволяют использовать разработанную методику для решения практических задач. В частности при решении задач по определению параметров волны прорыва, возникающей вследствие обрушения плотины.

Получен способ калибровки, который позволяет учитывать трение при помощи введения дополнительной функции, зависящей от коэффициентов шероховатости подстилающей поверхности. Разработанный алгоритм позволяет проводить автоматическую начальную калибровку модели с использованием данных из цифровой модели рельефа. Также в разработанном программном комплексе имеется возможность проводить последующую ручную корректировку коэффициентов шероховатостей. В результате примененного алгоритма существенно повышена точность моделирования.

#### **Список использованных источников**

1 Henderson, F. M. Open Channel Flow / F. M. Henderson. – New-York, USA: MacMilan Company, 1966. – 522 p.

2 Montes, J. S. Hydraulics of Open Channel Flow / J. S. Montes. – New-York, USA: ASCE Press, 1998. – 697 p.

3 Алешкевич, В. А. Механика сплошных сред: учебное пособие / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. – Москва: Издательство физического факультета МГУ, 1998. – 92 с.

---

**Степанов Константин Александрович** – Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, аспирант.  
Контактный телефон: +7 (929) 635-91-35  
E-mail: [stepanovkonstantin@me.com](mailto:stepanovkonstantin@me.com)

**Stepanov Konstantin Aleksandrovich** –State Scientific Establishment “All-Russian Scientific Research Institute for Hydraulic and Reclamation” (SSE “ARSRIHR), Postgraduate Student.  
Contact telephone number: +7 (929) 635-91-35  
E-mail: [stepanovkonstantin@me.com](mailto:stepanovkonstantin@me.com)