

УДК 502/504:532.5

## **Разработка метода моделирования речного потока при прохождении экстремальных расходов**

**Волынов М.А., Степанов К.А.**

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, Москва, Россия.

В настоящей работе преследуется цель показать возможность расчета речного потока в условиях пропуска критических объемов, например при дождевых паводках, весеннем половодье и волнах пропуска с водохранилищ на основании комплексного подхода, основанного на применении современных методов математического моделирования с использованием геоинформационных технологий.

Рассмотренные ниже методы моделирования речного потока позволяют исследовать решения многих прикладных задач с большей практической направленностью и сформировать дальнейшие пути развития. Исследуемый комплексный подход моделирования речного потока позволит рассматривать не отдельные небольшие участки местности, а перейти к эффективной схеме расчета и прогноза потока крупных речных систем, заметно расширяя области применения. Применение комплексного гидрологического подхода позволяет повысить точность расчетов и тем самым повысить практическую значимость предложенного метода в различных прикладных задачах.

В обычных случаях задачу о расчете территории затопления разрешают в 3 этапа. На первом этапе по имеющимся топографическим картам необходим перевод их в цифровую модель рельефа, где для каждой ячейки сетки, представляющей собой единицу масштаба, задаются ее координаты и высотная отметка. Также на этом этапе задаются параметры и геометрия поперечников русла реки.

На втором этапе, используя предварительно созданную цифровую модель рельефа, проводится моделирование волны, например в программе MIKE 11, в результате чего получают поперечники, в которых произошел перелив волны.

На третьем этапе по полученным поперечникам находят зоны, которые окажутся затопленными в результате прохождения волны паводка.

Такой подход к решению задачи о поиске зон затопления не позволяет проводить исследования для различных исходных параметров волны. Зачастую все три этапа выполняются разными специалистами, что намного усложняет процесс получения искомого результата.

В случае, когда требуется провести моделирование речного потока в критических условиях с другими исходными данными, требуется заново проводить моделирование волны, получать искомые поперечники, а затем по ним строить карту зон затопления. Так происходит при каждом изменении исходных данных.

Предлагаемая программа способна объединить второй и третий этап, что позволяет значительно сократить трудоемкость вычислений. Таким образом, при изменении исходных данных будем сразу получать итоговые данные о зонах затопления, то есть такой подход позволит рассчитывать ущерб, вызванный прохождением волны, для различных начальных данных.

При моделировании речного потока в условиях пропуска критических объемов потока зачастую получают только ориентировочные данные о зонах

затопления. Точность полученных зон затопления оценить сложно. Для калибровки моделей используют подбор коэффициентов шероховатости, что позволяет приблизить модель к реальным данным.

Теперь стоит остановиться на следующем этапе создания моделей – калибровке моделей. Сложность моделирования течения жидкости заключается в том, что построенные, но неоткалиброванные под реальные значения расходов модели, дают очень большую ошибку в расчетах. Для того чтобы модель можно было использовать для получения достоверных результатов требуется откалибровать её с помощью подбора коэффициента шероховатости. Это нужно делать, чтобы получить результат, как можно более похожий на наблюдаемый в реальности. Коэффициент шероховатости, благодаря которому производят калибровку моделей, не характеризуют действительную шероховатость, а являются лишь подобранными значениями, которые связывают гидравлический радиус и площадь поперечного сечения с расходом и гидравлическим уклоном. Значения коэффициентов шероховатости могут быть верными только для конкретных исходных данных, поскольку на них оказывают влияние различные географические и климатические условия. Также этот параметр подвержен сезонным и многолетним циклическим изменениям. При проведении калибровки коэффициент шероховатости включает в себя, как естественную шероховатость в данный момент времени, так и качество введенных исходных топографических и гидрологических данных. Таким образом, на качество результата в первую очередь влияют точные исходные данные, а уже затем различные методы аппроксимации исследуемой области и многие другие параметры.

В описываемой программе возможно моделирование зон затопления с различными коэффициентами шероховатостей и без учета трения на дне. Таким образом, при моделировании волны без учета трения можно получить самый худший вариант ее распространения. Такие данные представляют особый интерес, поскольку рассчитывают максимальный ущерб, который может вызвать распространение волны на исследуемой территории.

Максимальный ущерб можно использовать для задач, когда требуется оценить безопасный сбросной расход водохранилища. Зачастую требуется найти допустимую величину сбросного расхода воды в нижний бьеф, при котором не будет наблюдаться негативных явлений и затопления прилегающих к реке территорий. В таком случае для расчета допустимой величины сбросного расхода воды в нижний бьеф требуется провести моделирование при различных начальных параметрах. При использовании традиционного подхода потребуются значительно больше вычислений, поскольку необходимо будет несколько раз проводить одни и те же операции. То есть для каждого случая с различными исходными данными необходимо заново проводить моделирование, а затем находить зоны затопления.

В предлагаемой программе задача определения безопасного сбросного расхода с водохранилища заметно упрощается, поскольку при изменении исходных данных будем сразу получать зоны затопления. В таком случае можно без особых затрат найти достоверную допустимую величину сбросного расхода воды в нижний бьеф.

При разных показателях высоты волны и объема волны масштаб катастрофических последствий, вызванных прохождением волны, будет различным. Описываемый программный комплекс способен рассчитывать участки затопления в зависимости от конкретных исходных данных высоты и объема волны. Также программный комплекс реализует возможность вычисления

скорости распространения волны и времени, прошедшего от образования волны прорыва до затопления исследуемого участка. Таким образом, можно будет комплексно исследовать требуемую область на предмет затопления его участков вследствие прохождения волны по руслу реки.

При квазимгновенном разрушении плотины скорость распространения волны прорыва зависит только от высоты плотины и определяется по формуле Лагранжа:

$$c_0 = \sqrt{gh_0}, \quad (1)$$

Время пробега волны, после которого она не будет представлять опасности, равно:

$$T = \int_0^L \frac{dl}{\sqrt{gH_1 + l \cdot tg\alpha}} = \frac{2L}{\sqrt{gH_1} + \sqrt{gH_2}}, \quad (2)$$

где  $H_1$  – безопасный уровень волны и  $H_2$  – первоначальная высота волны.

Средняя скорость волны прорыва будет равна:

$$V_s = \frac{\sqrt{gH_1} + \sqrt{gH_2}}{2}, \quad (3)$$

Если на исследуемом участке ширина реки сильно изменяется или первоначальный уровень волны прорыва настолько велик, что вода будет растекаться по пойме, тогда разобьем исследуемый участок на подучастки  $i$ :

$$F = \sum_{i=1}^N L_i \cdot h_i \cdot b_i, \quad (4)$$

где  $h$  – безопасный уровень волны прорыва,  $b$  – средняя ширина реки,  $F$  – общий объем волны.

В результате можем найти длину пробега волны, после которого волна прорыва не будет представлять опасности для находящихся вблизи берегов построек, и не будет влиять на результат дальнейшего моделирования речного потока.

Программа для определения прогнозируемых участков затопления реализована на языке программирования C#, с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2012.

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

$$F_i = F_0 - \sum_{i=1}^N S_i \cdot h_i, \quad (5)$$

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

Распространение волны будет рассчитываться последовательно для каждого момента времени. Для начального времени  $T_0$  будем искать ближайшие точки с высотой 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 точки, ближайšie к уже найденным. Одновременно в конце каждого цикла будет рассчитываться оставшийся объем волны. В результате описанного алгоритма программы будет получаться наглядная картина распространения волны по исследуемой территории. Окончание работы программы расчета будет в

следующих случаях: исследуема вся область либо закончился объем волны. В таком случае будет найдена вся территория, которая окажется затопленной при прохождении волны по руслу реки.

Проведем тестирование программы на тестовом рельефе со случайными высотными отметками (рис. 1).

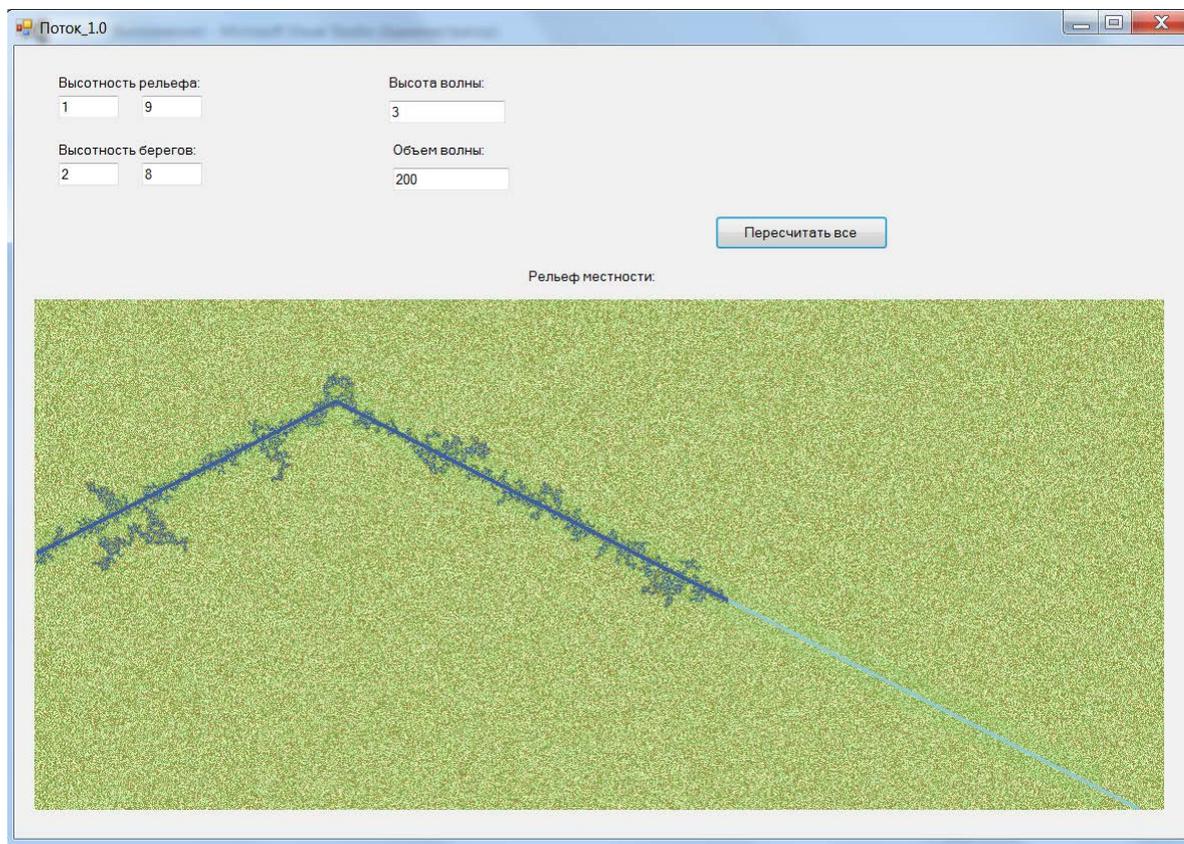


Рисунок 1 - Тестирование программы на тестовом рельефе со случайными высотными отметками

Как видно из рисунка 1 программа произвела расчет зон затопления при заданных параметрах высоты и объема волны. Получены зоны затопления вблизи береговой линии. При таком развитии событий оценить вред для исследуемой области можно как средний, так как только некоторые участки местности оказались затопленными.

### **Выводы**

В статье была показана возможность расчета речного потока в условиях пропуска критических объемов с применением созданной программы. Проведенные тестовые испытания и результаты доказывают, что полученная программа способна вычислять зоны затопления в условия пропуска критических объемов. При условии задания реальных карт местности программа будет достоверно рассчитывать зоны затопления. Исследованные методы моделирования речного потока позволяют найти решения многих прикладных задач. С помощью разработанной программы возможно рассчитывать возможный ущерб, возникающий в случаях пропуска критических объемов, а также получить итоговую карту исследуемой местности с изображением пострадавших участков. Таким образом, примененный комплексный подход позволяет проводить моделирование речного потока не на отдельных участках местности, а рассматривать крупные речные системы. Применение описанного гидрологического подхода позволяет повысить

точность расчетов и тем самым повысить практическую значимость предложенного метода в различных прикладных задачах.

#### **Литература**

1. Волков, Е. А. Численные методы 2-е изд. – М.: Наука, – 1987. – 248 с.
2. Петкевич В. В. Основы механики сплошных сред . – М.: УРСС, – 2001. – 400 с.
3. А. С. Петросян Дополнительные главы гидродинамики тяжелой жидкости со свободной границей. Москва 2010.
4. Козлитин А.М., Яковлев Б.Н. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка: детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: Учебное пособие / Под ред. А.И. Попова. Саратов: СГТУ. 2000. 124 с.
5. Швырков С.А., Семиков В.Л., Швырков А.Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1996. Вып.5. С.39-50.