

УДК 502/504:532.5

Разработка программного обеспечения для моделирования речного потока и определения участков затопления в условиях паводка

К. А. Степанов

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, Москва, Россия

В настоящее время для моделирования речного потока в критические моменты при дождевых паводках, весеннем половодье и волнах пропуска с водохранилищ требуется использование комплексного подхода, основанного на применении современных методов математического моделирования с использованием геоинформационных технологий.

Для качественного моделирования речного потока необходимо применение комплексного гидрологического подхода, который сможет дать полную и достоверную оценку при моделировании речного потока в критические моменты.

При обрушении волны прорыва и последующим ее распространением по руслу реки встает вопрос об оценке обстановки при прохождении волны прорыва, включающей обрушение берегов, деформацию русел, пойм и других нежелательных явлений. Требуется прогнозировать ущерб, вызванный прохождением волны прорыва, для защиты и безопасности населения при гидродинамических авариях. Также необходимо знать, как поведет себя волна при распространении по пойме реки, какие участки местности окажутся подвержены риску затопления. В таких случаях необходимо проводить анализ возможных последствий для различных исходных данных и при различных коэффициентах шероховатости подстилающей поверхности.

Очевидно, что при разных показателях расхода и объема волны масштаб катастрофических последствий, вызванных прохождением волны, будет различным. Задача программного комплекса состоит в том, чтобы уметь рассчитывать участки затопления в зависимости от конкретных данных высоты и объема волны. Также программное обеспечение должно вычислять скорость распространения волны и время, прошедшее от начала образования волны прорыва до затопления исследуемого участка. Таким образом, можно будет комплексно исследовать требуемую область на предмет затопления его участков вследствие прохождения критической волны по руслу реки.

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

В предлагаемой мною программе задача исследования влияния сбросного расхода воды с водохранилища заметно упрощается, поскольку при изменении исходных данных будем сразу получать зоны затопления, таким образом можно достаточно точно и без особых затрат найти допустимую величину сбросного расхода воды в нижний бьеф.

Ход решения

Для решения задачи по расчету зон затопления, вследствие прохождения волны по руслу реки, следует знать различные параметры волны, такие как ее

скорость, высота, объем, и многие другие.

При квазимгновенном разрушении плотины скорость распространения волны прорыва будет зависеть только от высоты плотины и определяться по формуле Лагранжа:

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

Тогда для того, чтобы узнать на каком расстоянии волна прорыва не будет представлять опасности, введем H_2 – безопасный уровень волны и H_1 – первоначальная высота волны.

Угол наклона между H_2 и H_1 будет равным:

$$\alpha = \frac{(H_2 - H_1)}{L}, \quad (2)$$

где L - расстояние между H_2 и H_1 .

Тогда время пробега волны будет равно:

$$T = \int_0^L \frac{dl}{\sqrt{gH_1 + l \cdot tg\alpha}} = \frac{2L}{\sqrt{gH_1} + \sqrt{gH_2}}, \quad (3)$$

Средняя скорость волны прорыва будет равна:

$$V_B = \frac{\sqrt{gH_1} + \sqrt{gH_2}}{2}, \quad (4)$$

Можно определить длину распространения волны прорыва из условия, что объем волны прорыва $F = L \cdot h \cdot b$, где h - безопасный уровень волны прорыва, b – средняя ширина реки. Если на исследуемом участке ширина реки сильно изменяется или первоначальный уровень волны настолько велик, что вода будет растекаться по пойме, разобьем исследуемый участок на подучастки i :

$$F = \sum_{i=1}^N L_i \cdot h_i \cdot b_i. \quad (5)$$

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

На расстоянии, где волна прорыва не будет представлять опасности, следует ее рассчитывать из условия спокойного, не турбулентного течения жидкости. В таком случае скорость добегания волны прорыва можно находить из соотношения:

$$V = n^{-1} I^x H^z, \quad (6)$$

где n – коэффициент шероховатости; I – уклон русла; H – средняя глубина потока; x, z – эмпирические показатели, отражающие особенности конкретного русла.

Таким образом, общую скорость добегания волны прорыва на исследуемую длину L , на которой волна прорыва будет влиять на течение воды в реке, можно найти как сумму:

$$V_{общая} = V + V_B, \quad (7)$$

Создание программы для расчета прогнозируемых участков затопления буду реализовывать на языке программирования C#, с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2012.

Вначале работы с программой следует загрузить карту исследуемой области, далее должна быть построена прямоугольная расчетная сетка для последующих шагов 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 начальную высоту и объем волны прорыва. Исходя из этого, будет рассчитываться скорость распространения волны по формуле Лагранжа, где скорость волны зависит только от ее высоты и вычисляется по формуле (1).

При распространении волны на исследуемой местности объем волны будет постепенно уменьшаться по мере затопления все больших участков. Будем рассчитывать это по формуле:

$$F_i = F_0 - \sum_{i=1}^N S_i \cdot h_i, \quad (8)$$

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.

Распространение волны будем рассчитывать 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, ближайшие 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: исследована вся область либо закончился объем волны. В таком случае будет найдена вся территория, которая окажется затопленной при прохождении волны по руслу реки.

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 была поставлена 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.

Результаты и их анализ

В качестве результатов приведу примеры работы программы.

Пример 1 (рис. 1).

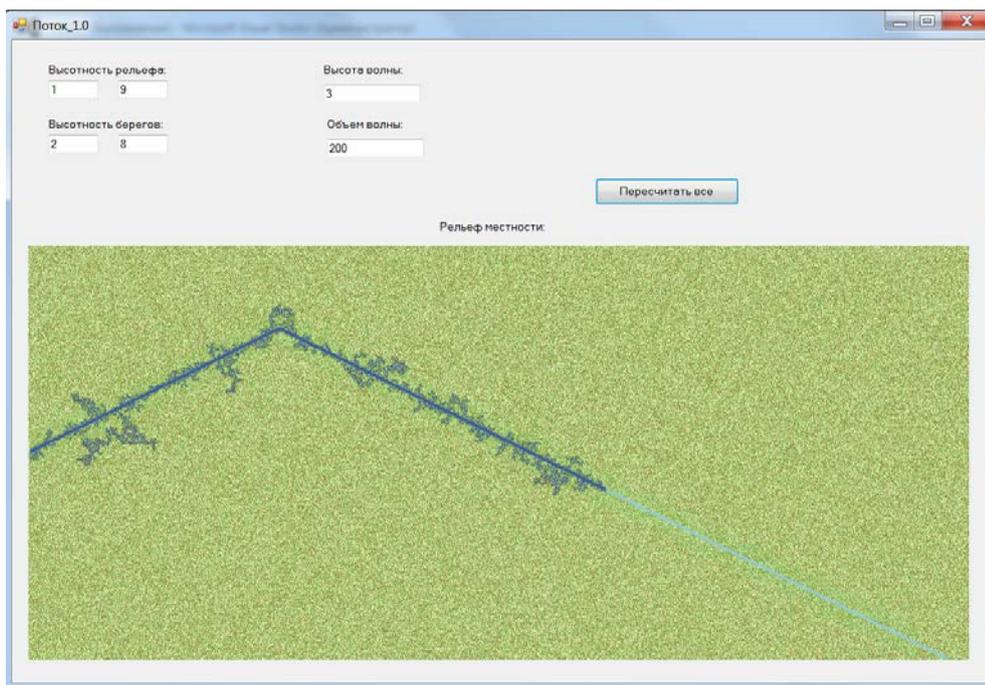


Рисунок 1 - Расчет на тестовом рельефе со случайными высотными отметками

В данном случае расчет был произведен 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.

Пример 2 (рис. 2).

Если изменить значения и рельеф местности, получим другую картину:

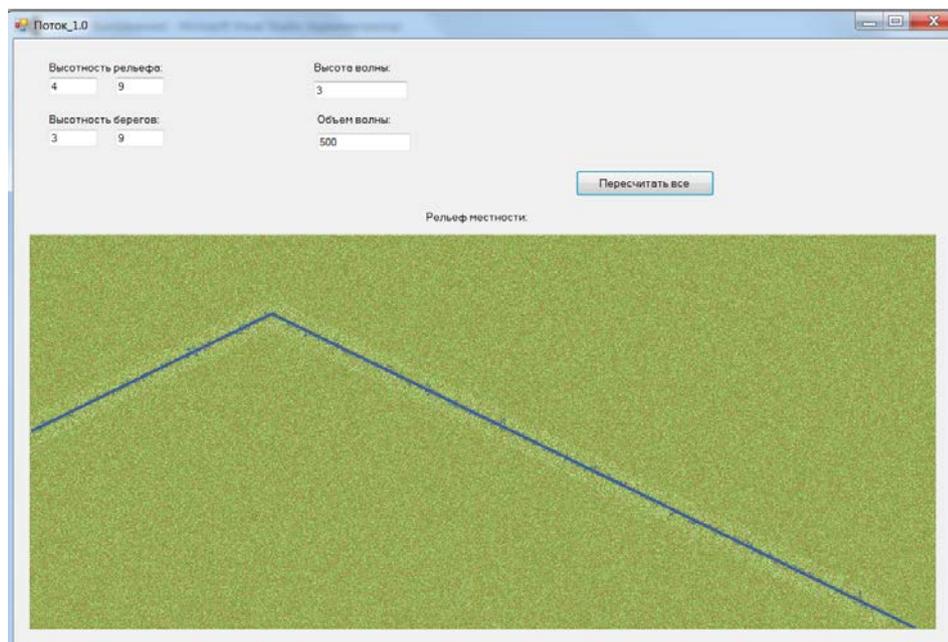


Рисунок 2 - Расчет на тестовом рельефе со случайными высотными отметками выше первоначальных

В этом случае расчет был произведен на тестовом рельефе со случайными высотными отметками, но высотные отметки были больше первоначальных. Этот тестовый рельеф больше свойственен горным районам, где река течет по

глубокому каньону. Как видно из рисунка 2, программа произвела расчёт зон затопления при заданных параметрах высоты и объема волны и получила зоны затопления только в самой близи от береговой линии. При таком развитии событий оценить вред для исследуемой области можно как незначительный.

Но в таком случае следует учитывать, что при данных параметрах рельефа волна дошла до конечной точки исследуемой области и опасность, скорее всего, возникнет на дальнейшем пути волны. В таком случае для оценки безопасности прохождения волны на исследуемой территории следует оценивать следующие участки рельефа.

Пример 3 (рис. 3).

В этом случае расчет был произведен на тестовом рельефе со случайными высотными отметками, но высотные отметки были, как в первом тестовом случае, а начальная высота волны была больше. Этот тестовый рельеф больше свойственен низинным районам, где высота берегов реки незначительна. Как видно из рисунка 3, программа произвела расчёт зон затопления при заданных параметрах высоты и объема волны и получила большие зоны затопления на исследуемой территории. При таком развитии событий оценить вред для исследуемой области можно как очень значительный. При таких параметрах рельефа и волны мы видим серьезные масштабы затопления исследуемой области.

Выводы

Тестирование программы было проведено на пробных картах рельефа со случайным расположением высот на карте. Но результаты показывают, как данная программа способна вычислять зоны затопления в результате прохождения волны по руслу реки. При условии задания реальных карт местности программа будет верно рассчитывать зоны затопления.



Рисунок 3 - Расчет на тестовом рельефе со случайными высотными отметками, как в первом тестовом случае, а начальная высота волны была больше

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. Нельзя также обойти стороной практическую значимость созданной программы. С ее помощью возможно без сложных вычислений

рассчитать возможный ущерб, вызванный прохождением волны паводка или прохождением волны прорыва в результате аварии. Существенное отличие разработанной программы заключается в простых и наглядных результатах. В созданной программе можно получить итоговую карту с изображением затопленных участков. Также возможно получить время, прошедшее с начала распространения волны прорыва до затопления исследуемого участка.

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. Бредшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.:Мир, 1974.
4. Кучмент Л.С, Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Развитие физико-математических моделей формирования речного стока и опыт их применения при недостатке гидрометрических наблюдений. Тезисы докладов VI Всероссийского гидрологического съезда.- СПб.: Гидрометеоздат, 2004.
5. Козлитин А.М., Попов А.И. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы. Саратов: СГТУ. 2000. 216 с.