

1. Описание программного комплекса HEC-RAS

Система моделирования транспорта загрязнителей р. Селенга разработана на основе программного пакета HEC-RAS. Программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), разработана в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Программный комплекс реализует одномерный подход к гидравлическому моделированию речных потоков, работает в среде Windows и включает в себя графический интерфейс, компоненты гидравлического анализа, хранение и управление данными, графические и отчётные средства.

В версию программы HEC-RAS 4.1.0 входит четыре расчётных модуля:

- 1) расчёт профилей водной поверхности для установившегося движения воды;
- 2) расчёт неустановившегося движения воды;
- 3) моделирование транспорта наносов в деформируемых руслах;
- 4) анализ качества воды.

Для поставленной цели по оценке переноса загрязнителей для рек Туул и Орхон использовался модуль транспорта наносов. Для расчёта транспорта наносов используются три типа входных данных: геометрические, гидрологические и данные по наносам.

Расчёты транспорта наносов базируются на выходных данных блока расчёта движения воды, поэтому определенные части расчётов выполнялись в модуле установившегося движения воды.

Геометрические данные включают в себя: схему речной сети, на которой указываются названия рек и их частей (верхнее течение, нижнее и т.п.); поперечные профили для каждого из которых определяются параметры, учитывающие потерю на сопротивление, такие как коэффициенты шероховатости Маннинга, коэффициенты потери энергии на сжатие и расширение потока в связи с изменением морфометрии русла.

Геометрия потока моделируется путем задания его центральной линии и поперечных сечений с заданными пользователем расстояниями между ними. В поперечных сечениях, перпендикулярных центральной линии, задаются границы «мертвых» зон, где наблюдается стагнация речного течения.

На схеме речной сети можно указать места расположения мостов, гидротехнических сооружений, зданий и прирусловых валов.

К гидрологическим данным в первую очередь относятся расходы и уровни воды, задаваемые в виде кривых расходов на верхнем створе, а также температура воды.

Для моделирования транспорта наносов необходимо задать начальные и граничные условия, а также условия транспорта наносов. Необходимо выбрать одну из предложенных функций расчёта транспорта наносов (Тофалетти, Мейера-Питера, Акерса-Уайта, Янга и др.) или задать её вручную на основе полевых исследований, метод сортировки, метод расчета скорости осаждения частиц, ввести данные по гранулометрическому составу наносов (рис. 1.1).

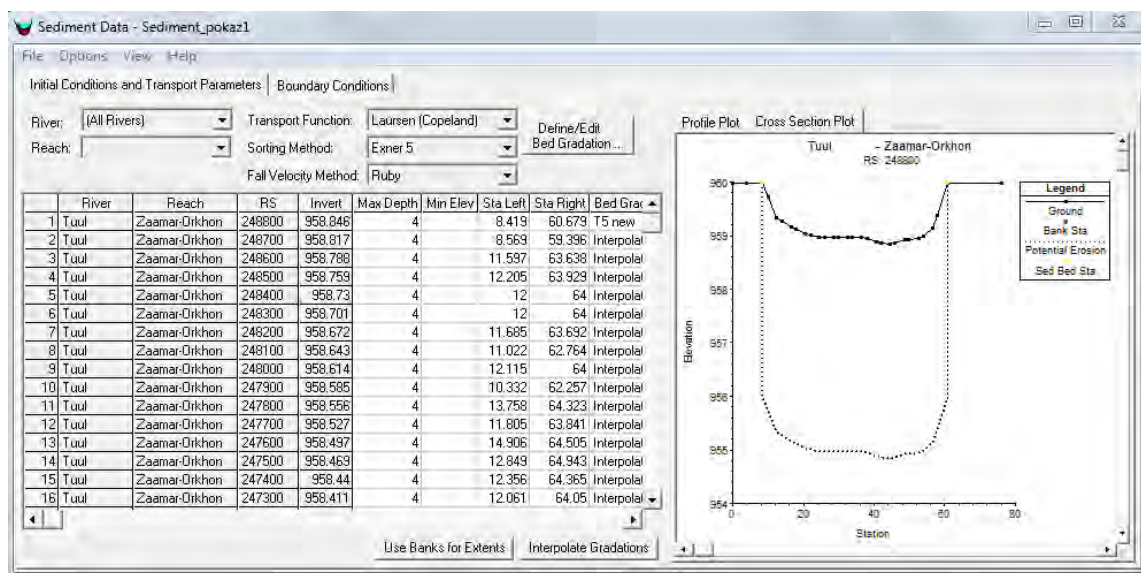


Рисунок 1.1 Окно ввода параметров наносов

Структура русловых отложений задаётся в зависимости от наличия отмостки (рис. 1.2). При наличии аллювиальной отмостки верхний слой представлен крупнообломочным материалом, который лимитирует эрозию в нижележащих слоях. Активными слоями в данном методе считаются верхний - покровный слой (cover layer) и подповерхностный слой (subsurface layer), ниже располагается неактивный слой дна (inactive layer). На данный момент «трехслойный» метод является основным в HEC-RAS (Gibson, 2006).

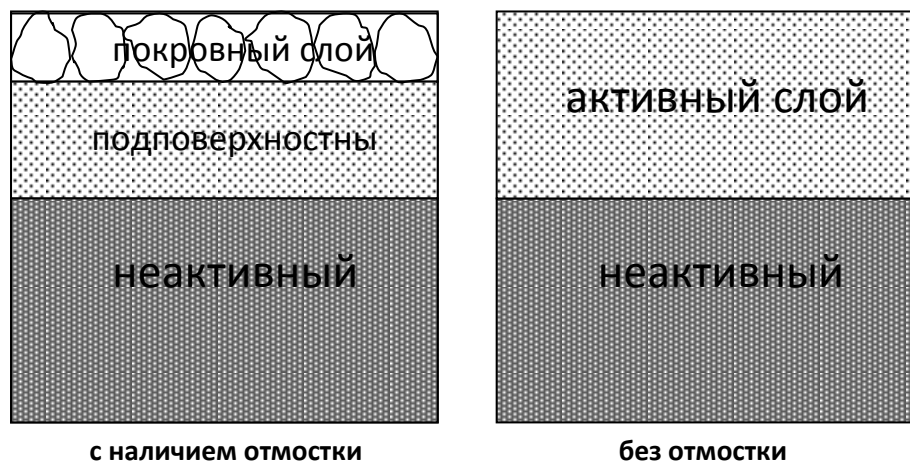


Рисунок 1.2 Методы сортировки наносов

Второй метод – упрощенный, с двумя слоями, толщина активного слоя задается равной d_{90} слоя, где d_{90} – такой диаметр, частицы с размером меньше которого занимают больше 90% русла. Данный метод подходит лишь для гравийных русел и предназначен для применения при использовании уравнения Вилкока.

Метод расчёта скорости осаждения частиц задается по одному из четырех способов: Toffaleti, Van Rijn, Rubey и Report-12. Один из методов выбирается в зависимости от коэффициента, учитывающего форму частиц, температуры и удельного веса частиц. Для метода Rubey скорость осаждения рассчитывается на основе закона Стокса.

Транспортирующая способность потока рассчитывается в каждом поперечном сечении на основе гидравлической информации, полученной в результате расчетов кривой свободной поверхности (т.е. данных о ширине, глубине, гидравлическом уклоне и скорости течения) и гранулометрического состава донного материала.

Расчёт транспорта наносов в программе ведется для различных размерных групп частиц. Транспортирующая способность для каждого размера частиц вычисляется с предположением, что данный класс занимает 100% донных отложений. Затем данное значение умножается на долю этого класса в составе. Путем суммирования вычисляется

общий транспорт наносов:
$$T_s = \sum_{j=1}^n \beta_j T_j$$
, где n – число размерных групп, β_j – процентное содержание группы j в составе наносов.

В программе существует используемая по умолчанию классификация гранулометрического состава, однако пользователь может ввести свою собственную классификацию. Далее вводятся данные по содержанию каждого класса в составе наносов.

Граничные условия задаются для одного или нескольких створов, выбирается один из трёх видов граничных условий: равновесное состояние, кривая расходов наносов, серии расходов наносов.

Первый вид граничных условий подходит лишь для верхнего створа, проводится подсчёт транспортирующей способности потока, которая принимается равной притоку наносов, таким образом, на данном поперечном профиле не будет происходить размыв или отложение наносов.

Кривая расходов представляет собой зависимость расхода наносов от расхода воды, данный тип граничных условий также применим только для верхнего створа. Вводятся значения расходов воды и наносов, а также сведения об их гранулометрическом составе.

Если расход наносов не привязан к верхнему створу, используются серии расходов наносов, в отличие от кривой расходов данный вид условий не зависит от вводимых граничных условий для квази-неустановившегося движения воды, на котором основывается подсчёт транспорта наносов.

Граничные условия для квази-неустановившегося движения задаются на двух на концах расчетного участка и, при необходимости, внутри него (внутренние граничные условия). Задаются серии расходов и расходов боковых притоков.

Для верхнего створа должны быть выбраны серии расходов, так же для любой серии должна быть указана продолжительность действия данного расхода воды. Так как транспорт наносов должен подсчитываться чаще, чем гидродинамические параметры, продолжительность расхода воды делится на периоды вычисления транспорта наносов (рис. 1.3).

Для замыкающего створа, как граничные условия используются: кривые расходов воды (зависимость расхода воды от уровня), серии отметок водной поверхности и нормальная глубина.

Для второго вида граничных условий задаются уровни воды и продолжительность каждого уровня. При выборе нормальной глубины, как граничного условия, вводится угол естественного откоса. Программа рассчитывает глубину на нижнем створе для каждой серии расходов путем решения уравнения Шези-Маннинга (гидравлический метод).

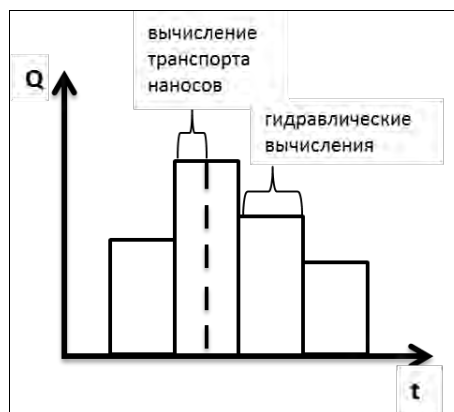


Рисунок 1.3 Периоды вычисления гидравлических параметров и транспорта наносов

Расчёт транспорта наносов можно представить схематически в следующем виде (рис.1.4).

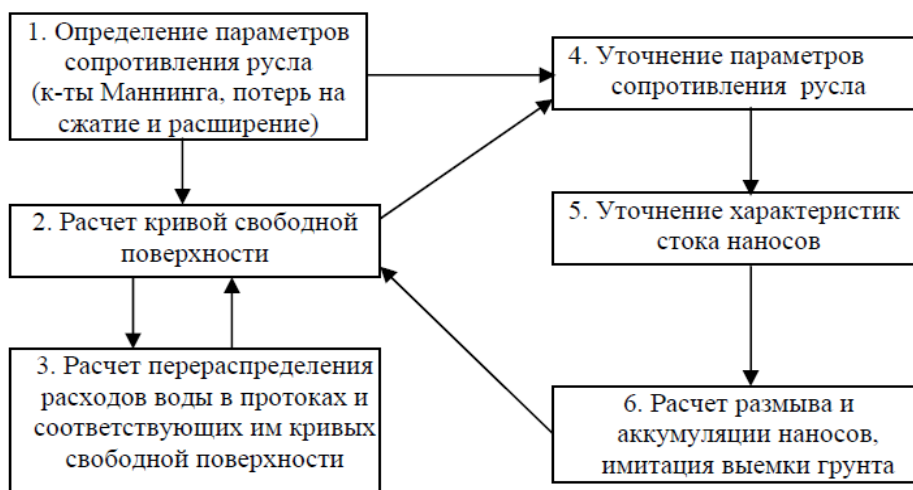


Рисунок 1.4 Схема вычисления транспорта наносов в программе HEC-RAS

Расчёт кривой свободной поверхности производится путем решения одномерного уравнения энергии (уравнения Бернулли). Как было описано выше, непрерывный гидрограф расходов воды имеет вид ступенчатого графика, представляющего последовательность расходов воды с различной продолжительностью стояния. Для каждого расхода воды рассчитывается продольный профиль водной поверхности и такие гидравлические характеристики, как гидравлический уклон, скорость, глубина потока в каждом поперечном сечении.

Транспортирующая способность потока рассчитывается в каждом поперечном сечении на основе гидравлической информации, полученной в результате расчетов кривой свободной поверхности и гранулометрического состава слагающего русло материала. Содержание наносов рассчитывается вниз по течению после расчетов профиля водной поверхности снизу вверх по течению для каждого временного шага, соответствующего каждому из заданных ступенчатым гидрографом расходов воды. Путем решения уравнения неразрывности Экснера оцениваются вертикальные деформации (положительные - в случае аккумуляции наносов или отрицательные - при размыве русла) на каждом участке между поперечными сечениями.

Далее рассчитывается размыв или отложение наносов и соответственно корректируется форма каждого поперечного сечения. Расчеты продолжаются с другим расходом воды согласно заданному ступенчатому гидрографу стока, и цикл повторяется, с обновленной морфологией русла. Расчеты деформаций выполняются по фракциям с разным диаметром, тем самым имитируя гидравлическую сортировку наносов.