

УДК 001.891.54.532.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ПОТОКОВ НА НАКЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

\*ДУЙШЕНАЛИЕВ Т.Б., \*\*МЕКЕНБАЕВ Б.Т., \*\*\*БАРСАНАЕВ С.Б., \*САРБАЛИЕВ А.Ш.

\*КГТУ им. И.Раззакова

[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

\*\*Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры

\*\*\*Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Кыргызская Республика приступила к строительству плотины Камбаратинской ГЭС №2 на Уч-Тереском створе собственными силами. В настоящее время практически завершены переговоры с Россией о строительстве, а в дальнейшем и совместной эксплуатации Камбаратинских ГЭС №1 и №2. Обе плотины предусматривалось возводить с использованием энергии взрыва, так как при этом резко снижается стоимость строительства, и сокращаются сроки их возведения. Этому способствуют благоприятные природно – геологические условия: узкие и высокие каньоны, большие уклоны горных рек и наличие вблизи створов запасов необходимых строительных материалов.

С помощью взрыва были построены селезащитная плотины в Медео (Казахстан), водонапорная плотина и Байпазе (Таджикистан), опытные плотины Бурлыкя и Уч-Терек по моделированию условий Камбаратинских плотин в Кыргызстане. Опыт эксплуатации этих плотин показывает их преимущества по сравнению с бетонными и насыпными плотинами. Плотины получились устойчивыми, как в сейсмическом и фильтрационном отношении, так и по напору воды. Надо отметить, что при взрывонабросных плотинных вся работа по отрыву, дроблению, перемещению и упаковке горных пород в тело плотины осуществляется с помощью энергии направленного взрыва [8, 9].

Есть более эффективный способ возведения плотин. Он назван взрывообвальным. Здесь главная задача взрыва заключается в том, чтобы с минимальной затратой энергии вывести требуемый объем горных пород на склоне только их состояний равновесия. Вся остальная работы по дроблению, перемещению и упаковке горной массы в тело плотины выполняется освобожденной потенциальной энергией силы тяжести горных пород склона. Взрывом создается только искусственный обвал. Предварительные расчеты показывают, что плотина, созданная взрывообвальным способом в 1,5-2 раза дешевле, чем взрывонабросная, и может быть возведена 1,5 раза быстрее [8, 9]. Такой способ мог бы быть использован и при строительстве плотин Камбаратинских ГЭС.

Стоит задача моделирования движения грунтового потока, возникшего после обвала части склона. Модель движения грунтового потока основана на гидравлическом подходе. Это означает, что продольный масштаб изучаемого явления должен быть много больше глубины потока и что рассматриваются средние по поперечному сечению параметры потока. Он рассматривается как тонкий, однородный (плотность, коэффициенты гидравлического и «сухого» трения постоянны) слой несжимаемой жидкости [1, 2, 4]. Считается, что в начальный момент смещающаяся часть массива мгновенно дробится и превращается в «жидкость», которая затем «стекает» по склону. Склон – переменной крутизны, длинный и широкий, т.е. эффектами, связанными с взаимодействием с воздухом на боковых границах потока можно пренебречь. Движение потока подвержено действию силы тяжести и силы трения.

Среда, из которой состоит поток, предполагается однородной и несжимаемой. Движение турбулентно. Трение входит в уравнения интегрально, в виде трения о дно. Поток взаимодействует с внешней средой только на дне (захват массы, трение). Взаимодействием потока на свободной поверхности с внешней средой пренебрегается (так как перемешивание практически отсутствует из-за большой разницы в плотностях воздуха и оползневой материала и трение о воздух мало). Дополнительный захват пород по пути движения мал по сравнению с начальной массой оползня.

Для описания движения потока по склону принимается система уравнений однослойной мелкой воды, которая в одномерном приближении имеет следующий вид [2, 4, 5]:



$$\begin{cases} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial \left( hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x} = gh \sin \alpha - \tau_x & x \geq x_o \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $t$  – время,  $x$  – координата вдоль склона,  $u(x, t)$  – средняя по поперечному сечению потока скорость вдоль склона,  $h(x, t)$  – высота (мощность) потока, отсчитываемая перпендикулярно поверхности склона,  $\alpha(x)$  – угол наклона склона к горизонту,  $\tau_x$  – проекция силы трения на ось  $x$ .

Выражение для  $\tau_x$  принимает следующий вид [6]:

$$\tau_x = k_c u |u| + gh k_c \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент кулоновского трения.

Начальным условием для поставленной задачи будет:

$$\begin{cases} u(x, t)|_{t=0} = u_o(x) \\ h(x, t)|_{t=0} = h_o(x) \end{cases} \quad x \geq x_o \quad (3)$$

Для расчета конкретных вариантов движения потоков различной природы по склону необходимо задать числовые значения коэффициентов трения  $k_c$ ,  $k_s$  и геометрические характеристики склона и оползневого потока, определяемые функциями  $\alpha(x)$ ,  $h_o(x)$ ,  $u_o(x)$ .

Выражение для силы трения имеет различный вид для остановившихся и находящихся в движении частей потока. Поэтому выражение для силы трения принимает следующий вид ( $\tau_c = k_c gh \cos \alpha$ ) [6]:

1) при  $u \neq 0$ :

$$\tau_c = \tau_c \text{sign}(u) \quad (4)$$

2) при  $u = 0$ :

$$\tau_c = \begin{cases} gh \sin \alpha - \frac{\partial \left( \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x}, & \left| gh \sin \alpha - \frac{\partial \left( \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x} \right| < \tau_c \\ \tau_c \text{sign} \left( gh \sin \alpha - \frac{\partial \left( \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x} \right), & \left| gh \sin \alpha - \frac{\partial \left( \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x} \right| \geq \tau_c \end{cases} \quad (5)$$

Решение уравнения (1) имеет ряд моментов, которые следует отметить. Вычисление силы трения осуществляется в соответствии с формулами (4)-(5). Градиент давления вычисляется с помощью центральной разностной производной функции [5]. Для граничных частиц считается, что нет давления на поток извне. Основными входными параметрами построенной вычислительной системы являются коэффициенты трения  $k_c$ ,  $k_s$ , профиль склона, определяемый функцией  $\alpha(x)$ , и характеристики исследуемого потока, определяемые функциями  $h_o(x)$ ,  $u_o(x)$ . Основными выходными параметрами являются распределение мощности, и скорости потока во времени, как наиболее важные характеристики любого склонового процесса.

Уравнения Сен-Венана (1) в консервативной векторной форме имеют следующий вид [5]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial G(F)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Уравнение неразрывности ( $F=h$ ,  $G=hu$ ) и уравнение движения ( $F=hu$ ,  $G=hu^2+P$ ) имеют такой вид, за исключением того, что в правой части имеются ненулевые недифференциальные члены.

Для решения системы дифференциальных уравнений использовали двухшаговый метод Лакса-Вендроффа.

Граничные условия – на границах области, где изучается движение, можно задать как:



1) Левая и правая границы – непроницаемые стенки:

$$u[*]=0, \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_* = 0$$

2) Левая и правая границы – «формальные», среда свободно вытекает за пределы рассматриваемой области:

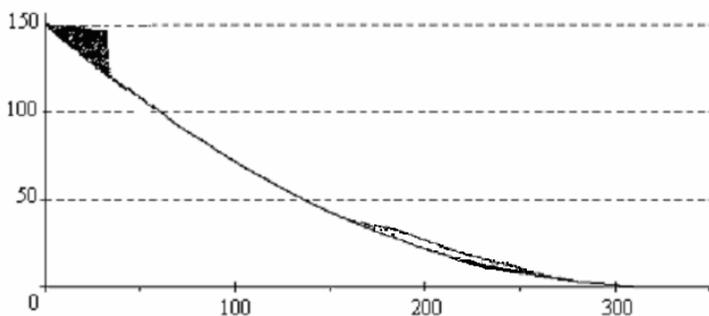
3)

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_* = 0, \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_* = 0$$

где \*- координата левой (обычно это 0) и правой границы.

Программа обчисляет уравнения во всех точках, где  $(h(x) \neq 0)$ . Поэтому для работы необходимо задавать слой малой толщины потока на всем рассматриваемом промежутке по X.

Приведем результаты расчета движения грунтового потока по склону с переменным углом наклона (рис. 1). Максимальное значение угла наклона склона к горизонту  $\alpha_{max} = 40^{\circ}$ , минимальное значение  $\alpha_{min} = 5^{\circ}$ .



**Рис.1. Движение оползня-потока по склону с переменным углом наклона**



Коэффициенты трения принимали значения  $k_C = 0.42$ ,  $k_T = 0.13$ , шаг по времени бра... равным  $\tau = 0.01$ . Первоначально вся масса оползня была расположена в области  $0 \leq x \leq 35$  м [5]. Момент времени 31 (в [5]-29,9) минут соответствует остановке потока, когда в основной массе оползня скорость равна нулю. За 31 минут поток прошел расстояние в 246 (в в [5]-241) м, высота вала уменьшилась с 17 м (в начальный момент) до 3,9 (в [5]-4) м, средняя скорость фронта составила 0.278 м/сек.

Результаты тестовых примеров показали, что данную модель движения потока можно использовать для дальнейших исследований отдельных параметров завальных плотин, которые обеспечивают высокую безопасность и эффективность нового метода строительства.

### Литература

1. Стокер Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. –М.: Изд-во иностр. литературы, 1959. – 617 с.
2. Эглит М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 96 с.
3. Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В. Математическое моделирование движения оползня-потока методом частиц // Труды X Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики (МДОЗМФ-2001)». – Херсон, 2001. –С. 69-71
4. Григорян С.С., Нилов Н.Н., Остроумов А.В., Федоренко В.С. Математическое моделирование горных обвалов и оползней больших объемов // Инженерная геология. – 1983. – № 6. – С. 61-73/
5. С. В. Зеркаль, Е. В. Захаров, С. В. Богомолов. Моделирование движения потоков различной природы по наклонной поверхности методом частиц. Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», № , 2003.
6. Эглит М.Э. Расчет параметров лавин в зоне торможения и остановки // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждений. – 1982. – Вып. 43. – С. 35-39
7. Ромашев А.Н., Барсанаев С.Б. О структуре и механизме образования завальной плотины на реке Кара-Суу. Взрывное дело, №76/33, Недра 1976 г., с 114-117
8. Барсанаев С.Б. Состояние и перспективы возведения каменно-набросных плотин взрывом. В сб «Применение взрыва в горном и строительном деле» Фрунзе, Илим, 1976
9. Барсанаев С.Б., Мамбетов Ш.А. Особенности действия взрыва зарядов на горных склонах. В сб. «Применение взрыва в горном и строительном деле», Фрунзе, Илим, 1976