

УДК 532.546

ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДИНАМИКИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Б.К. Турсунова., А.Ш.Токтогулова, Орозобекова А.К.

КГУСТА им. Н. Исанова, КГТУ им. И.Раззакова

Одной из самых серьёзных угроз из числа современных геологических процессов являются оползни. Эта проблема ещё будет усугубляться в будущем, в связи с быстро растущей численностью населения в горных странах, в том числе и Кыргызстане. С освоением новых территорий, большинство, которых требуют инженерной защиты от различных геологических процессов и, особенно от оползней.

Горная часть Кыргызстана характеризуется широким развитием оползней. Так, на склонах Чаткальского, Ферганского, Алайского хребтов площадь 9.2 км поражена современными оползнями, а на площади 11.5 км² возможно их развитие. Во многих бассейнах рек развитие оползней происходит в лёссовых породах. Наиболее оползнеопасные районы Кыргызстана включают бассейны рек Яссы, Кугарт, Чангет, Чаткал, Падыша-ата, Итагар, Западная Кара-суу, Майлу-суу, Кара-Ункур, Кара-Дарья, Ак-Буура, Гульча, Сюлюкта, Чаувай, Куршаб и Талдык. Только в районе Майлу-Суу на каждый квадратный километр площади приходится по 30 - 40 оползней. В результате оползней пострадали районы городов Майлу-суу, Сюлюкта, Кок-Жангак, Ташкумайир, помимо многочисленных

кишлаков в Узгенском, Алайском, Кара-Кулжикском, Сузакском и многих других районах. Оползневая угроза усугубляется наличием радиоактивных отходов в зоне оползней, что может обернуться экологической катастрофой, особенно учитывая их близость к густонаселенным районам Ферганской долины.

Оползни - скользящее смещение масс горных пород вниз по склону под влиянием силы тяжести. Оползни возникают в каком-либо участке склона или откоса вследствие нарушения равновесия пород, вызванного: увеличением крутизны склона в результате подмыва водой; ослаблением прочности пород при выветривании или переувлажнении осадками и подземными водами; воздействием сейсмических толчков; строительной и хозяйственной деятельностью, проводимой без учета геологических условий местности [1].

Под механизмом оползневого процесса следует понимать последовательную смену деформаций и перемещений во всех точках склона, в которых осуществляется возникновение оползня и его смещение.

В оползневом процессе можно выделить следующие элементарные процессы (типы или виды механизма): 1 - перекосящие составляющие элементов или связей между ними (сдвиг, изгиб, наклон, кручение, смятие); 2 - вязкое или пластичное течение, т.е. перемещение частиц горных пород относительно друг друга без нарушения их сплошности; 3 - хрупкое разрушение пород из-за несоответствия их прочности, действующих на них напряжений, заканчивающееся нарушением их сплошности; 4 - механическое перемещение - скольжение отделившихся в результате разрушения или свободно лежащих на склоне пород по подстилающим породам.

Основные методы получения информации о механизме оползневых процессов следующие: 1 - наблюдения по поверхностным и глубинным реперам, путём фиксации трещин, деформаций

сооружений и растительности; 2 - изучение следов деформаций, отражающихся на поверхности земли (съёмка) и в строении тела оползня (различные виды разведки); 3 - моделирование в лаборатории.

Существует большое разнообразие типов оползней в зависимости от комплекса природных факторов. Самыми распространенными среди них являются оползни-потоки (оползни-течения), которые встречаются практически на всем земном шаре. Оползневые процессы или оползни -потоки, которые произошли под действием гидрометеорологических условий будем называть "оползнями гидродинамического происхождения". По характеру движения они близки к движению некоторых типов селей и лавин и аналогичны течению жидкости в открытых каналах. Описание течения однородной жидкости в открытых наклонных руслах является одной из основных проблем гидравлики. Это нелинейный длинноволновой процесс, описываемый гиперболическими дифференциальными уравнениями. Как правило, длинноволновое приближение позволяет уменьшить размерность рассматриваемой задачи, а гиперболичность системы отражает основные свойства процессов передачи возмущений в потоке жидкости и конечность скорости их распространения.

Поэтому для описания движения оползней-потоков (и близких по характеру движения водных, снежных и селевых потоков) используются математические модели теории мелкой воды (или теории длинных волн) [2, 3, 4]. Теория длинных волн обычно применяется в достаточно важном для приложений случае, когда характерные горизонтальные масштабы волнового движения намного превосходят глубину слоя жидкости. Начало развития этой теории связано с нестационарными задачами гидравлики открытых русел. Оползневые процессы или оползни -потоки, которые произошли под

действием гидрометеорологических условий будем называть "оползнями гидродинамического происхождения".

Большое значение в создании математических методов анализа эволюции нелинейных длинных волн имела аналогия между уравнениями мелкой воды и уравнениями газовой динамики [4, 5, 6, 7]. В частности, это позволило применить понятие разрывного решения для описания таких явлений, как гидравлический прыжок и бор. Отметим, что данная аналогия также позволила для решения уравнений теории мелкой воды применить численные методики первоначально созданные для решения уравнений газовой динамики (схемы Лакса-Фридрихса, Мак-Кормака, Куранта-Изаксона-Риса, Роу, Ошера-Соломона, метод Годунова и многие другие) [5].

В работе рассматривается плоскопараллельное течение жидкости, позволяющее ограничиться изучением одномерной нестационарной задачи. Для моделирования движения оползня гидродинамического происхождения в качестве исходной взята модель уравнений однослойной мелкой воды, учитывающей турбулентное трение о дно, которая также использует осредненное по слою значение скорости. Соответствующие математические модели представляют собой начальные (начально-краевые) задачи для систем нелинейных дифференциальных уравнений гиперболического типа. Очевидно, что общий метод исследования такого класса задач может быть только численным. В большинстве работ по численному моделированию рассматриваемых явлений применяются различные схемы конечно-разностных методов (схема Лакса-Вендроффа, схема Мак-Кормака) [4].

Сравнительно недавно появился ряд вычислительных схем, названных методом частиц (их называют также «безееточными» методами, методами подвижных конечных элементов, полностью лагранжевы методы, методы на неструктурированных сетках, методы

маркеров и так далее), которые применяются при численном моделировании процессов газовой динамики и гидродинамики [3-4]. Существуют также примеры применения метода частиц (наряду с конечно-разностными методами) в теории мелкой воды. Для получения числовых значений применяется метод приближенных решений.

Существуют различные методы численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Широко известны три группы численных методов, изложение которых можно найти в современной технической литературе: метод конечных элементов, метод характеристик и метод конечных разностей. Метод конечных элементов не нашел широкого применения для решения нестационарных гидродинамических задач. Из выше перечисленных существующих методов метод конечных разностей в настоящее время используется наиболее чаще, чем другие методы. В методе конечных разностей производные функции заменяются конечными разностями. Таким образом, дифференциальные уравнения, описывающие изменение непрерывной среды, заменяют алгебраическими зависимостями в форме конечных разностей.

Грунтовая масса, с физической точки зрения, представляет собой дисперсную среду. Однако, при математическом рассмотрении механических явлений, возникающих в ней, может трактовать ее как соединение двух сплошных сред: твердой- со свойствами грунтового скелета и жидкой- со свойствами грунтовой воды. При таком рассмотрении динамика грунтовой массы является особой ветвью механики сплошной среды, а именно, грунтовый скелет в виде слабо уплотненной массы, впитанной атмосферными осадками еще больше смачиваются подземной водой и в результате образуется двухфазная сплошная среда специальной формы, так как обе фазы как и жидкая

так и твердая имеют одинаковые скорости, и перемещаются вниз как турбулентный поток грязеводного массива с большой скоростью.

Как отмечено Н.М. Гельсевичем, грунтовой массой мы называли грунт, в порах которого имеется свободная вода, последняя подчиняется всем механическим законам, свойственным жидкостям, а именно: в ней под действием давления и силы тяжести возникают напоры, происходит движение воды из области больших напоров в сторону меньших.

Грунтовая вода в различных местах грунтовой массы подвержена различным давлениям, причем эти давления могут быть больше атмосферного, тогда вода называется гравитационной водой, а если давление меньше атмосферного, то вода -будет называться капиллярной водой. Таким образом, внутри грунтовой массы происходят фильтрационные и инфильтрационные процессы, подчиняющихся законам подземной гидродинамики. Предположим, что отсек склона горы под действием атмосферных осадков и подземных вод увлажняется и происходит нарушение равновесия горного склона, и в результате увлажненный горный массив происходит в движение, т.е. происходит внезапное оползание данного отсека. Таков принцип возникновения оползневых явлений в ряде территорий земного шара.

Для оползней гидродинамического происхождения под гидрометеорологическим условием следует понимать фильтрационные и инфильтрационные процессы. Таким образом, оползни гидродинамического происхождения формируются на основании геологических условий и рельефа местности. А смещаются под действием фильтрационных и инфильтрационных процессов. Здесь согласно фильтрационным процессам подземные воды поднимаются вплоть до плоскости скольжения, а в результате инфильтрационного процесса поверхностные влаги спускаясь до плоскости скольжения,

встречаются с частицами подземных вод и образуется линия скольжения, где происходит максимальное увлажнение слабоуплотненных пород вдоль основного деформируемого массива, т. е. На плоскости скольжения слабоуплотненные горные породы, как правило, песчано-глинистые массы разжижаются и под действием силы тяжести вдоль критической линии скольжения происходит оползание определенной части основного деформируемого массива. Из-за большой крутизны горного склона скорость движения оползающего массива быстро растет и слабоуплотненные породы в виде водно-глинистой массы очень быстро смещаются вниз по рельефу на большие расстояния. Здесь расстояние оползания достигает до несколько сот метров, ширина изменяется десятками метров, глубина иной раз достигает до 4-5 метров. Поэтому такие формы перемещение оползней гидродинамического происхождения можно мысленно моделировать как движение грязевого потока в поле силы тяжести со свободной поверхностью, где глубина слоя потока достаточно мала по сравнению с размерами ширины и длины, причем, перемещения происходят в каналах бесконечной ширины. При этом глубина потока предполагается постоянной вдоль ширины канала. Сечение канала имеет произвольную форму и может меняться вдоль его длины. Поэтому такие формы перемещения оползней гидродинамического происхождения можно мысленно моделировать . как одномерное течение гипотетической жидкости в канале с неограниченной длиной. Чтобы оползневой поток рассматривать, как течение эффективной жидкости будем считать выполненными еще следующие допущения:

1. Грязеводный поток гипотетической жидкости считается как односкоростная сплошная среда;
2. Поперечная компонента скорости жидкости очень мала по сравнению с продольной и его можно пренебречь, а продольная

скорость, следует считать постоянной, вдоль толщины слоя и уровень жидкости в поперечном сечении - горизонтален.

На основании таких допущений, одномерные перемещения гипотетической жидкости описываются гидродинамическими уравнениями теории "мелкой воды", которые решаются современными численными методами. На основании полученных данных нетрудно определить ряд физико-механических параметров природных оползневых процессов гидродинамического происхождения, а также селевых потоков оползневых типов, связанных с выпадением большого количества атмосферных осадков и интенсивным снеготаянием.

Если рассматриваемый процесс происходит на плоскости или на осесимметрическом пространстве, тогда уравнение неразрывности, или иногда его называем уравнением сохранения массы имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \delta \frac{\partial(\rho v)}{y} = 0 \quad (1)$$

где $\delta = 0$ - для двумерного случая и для осесимметричного $\delta = 1$.

Для одномерного движения, уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

здесь ρ - плотность гипотетической жидкости, представляющий собой смесь грязевого массива, U – продольная скорость одномерного двухфазного грязевого потока.

Уравнение движения вязкой сжимаемой грязевой

гипотетической жидкости:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) = F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4}{3} \mu \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (3)$$

Здесь два уравнения (2) и (3), а неизвестных три: давление жидкости - P , плотность и скорость грязевого массива ρ и U . Поэтому третьим уравнением будет характеристическое уравнение состояния:

$$P=F(\rho;T) \quad (4)$$

Давление P (отсчитываемое от атмосферного давления на свободной поверхности) меняется по глубине жидкости согласно гидростатическому закону: $P = \rho \cdot g \cdot (h - z)$, где Z – высота точки над дном.

Явный вид уравнения состояния пока неизвестно. С другой стороны, если исходим из принципа, так называемой «теории мелкой воды» и считаем, искомыми величинами считаются глубина грязевого потока – « h » и продольная скорость потока – « U », тогда для одномерного течения жидкости в канале, зависящего только от одной координаты « x » и времени « t » имеют место следующие дифференциальные уравнения в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = A_1((G_1 + G_2) \sin \alpha - \\ A_2(G_1 + G_2) \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + A_3 H_0 \frac{\partial H}{\partial x} \sin \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

$F_1 = (G_1 + G_2) \cdot \sin \alpha$ – сила сдвига, возникающая за счет силы тяжести, где G_1 – вес верхней сухой части слоя, толщиной D_1 и выражается формулой $G_1 = \gamma_e \cdot W_e \cdot D_1 \cdot \ell$, G_2 – вес нижней, насыщенной части слоя толщиной равной D_2 и выражается соотношением $G_2 = \gamma_n \cdot W_n \cdot D_2 \cdot \ell$, где D_1 и D_2 – толщины слоев, W_e – влажность грунта естественной насыщенности; W_n – влажность грунта при полном насыщении водой, γ_e – объемный вес рыхлообломочного слоя при естественном насыщении, γ_n – объемный вес грунта при полном насыщении.

$F_2 = -N \operatorname{tg} \varphi$ – сила внутреннего трения; здесь $N = (G_1 + G_2) \cos \alpha$ – нормальные составляющие силы тяжести.

$F_3 = H_0 \frac{\partial H}{\partial x} \sin \alpha$ - сила, связанная с фильтрационным давлением.

Для численного решения уравнений используется разностная схема. Введем конечно-разностную сетку для одномерного течения жидкости в канале зависящего только от одной координаты "x" и времени "t", где для решения системы (5) нелинейных уравнений выдвигаются следующие начальные и граничные условия.

а) начальные условия:

$$U(x, t_0) = U_0(x)$$

$$h(x, t_0) = h(x) \quad \text{при } t = t_0 \quad (6)$$

б) граничные условия:

$$U(x_0, t) = U_0(t) \text{ при } x = x_0, \quad h(x_k, t) = 0; \quad U(x_{1k}, t) = 0.$$

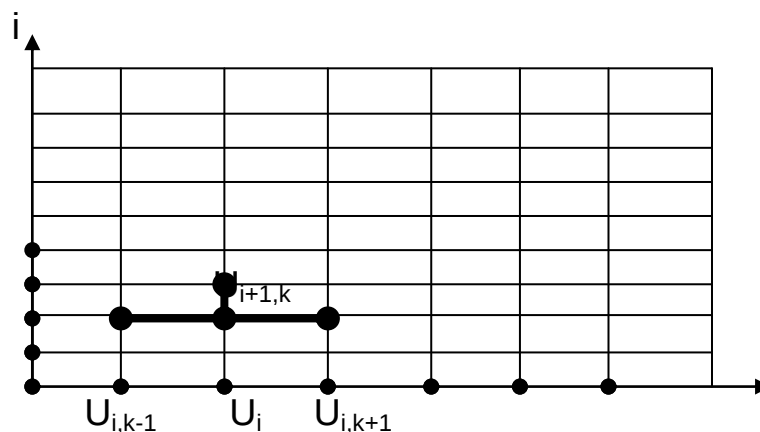
Решение ищется в области G, $[0 \leq x \leq 1] \times [0 \leq t \leq T]$

Для системы уравнений (5) введем разностную сетку

$X_i = i\Delta X$, $Y_j = j\Delta y$, где ΔX , Δy , Δt

Пространственные и временные шаги $i=1, 2, \dots, M$, $j=1, 2, \dots, N$, $n=0.1$

Уравнение системы (5) представляет собой уравнение параболического типа, для решения которого используется явная конечно-разностная схема. Преимуществом данной схемы является ее абсолютная устойчивость, что дает возможность вести расчеты, с большим шагом по времени и второй порядок точности по времени и по пространственной переменной.



Значение функции в узлах сетки будем обозначать $U_{i,k}=U(X_k,t_i)$. Тогда дифференциальные уравнения (1) приближенно заменится разностной схемой

$$\begin{aligned} \frac{h_{i+1,k} - h_{i,k}}{\Delta t} + U_{i,k} \frac{h_{i,k+1} - h_{i,k}}{\Delta x} + h_{i,k} \frac{U_{i,k+1} - U_{i,k}}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{U_{i+1,k} - U_{i,k}}{\Delta t} + U_{i,k} \frac{U_{i,k+1}}{\Delta x} + g \frac{h_{i,k+1} - h_{i,k}}{\Delta x} &= f_{i,k} \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты берутся с n- го слоя. Распределения «U», «h» рассчитываются в следующей последовательности: с учетом граничных и начальных условий (6) используются $U_{i,k}$, $h_{i,k}$ рассчитываются $U_{i+1,k}$, $h_{i+1,k}$ на одном слое, делаем переход последующего слоя. Затем процедура повторяется по итерационному циклу до выполнения условия.

Независимые переменные приводятся в безразмерную форму, тогда их можно назвать приведенным расстоянием, считая, что самое максимальное расстояние вдоль которого движется оползень или селевой поток. Тогда приведенное расстояние или безразмерная независимая переменная есть

1. $\tilde{X} = \frac{X}{L}$ данная величина измеряется от 0 до 1
2. $\tilde{t} = \frac{t}{T}$ где T- максимальное время

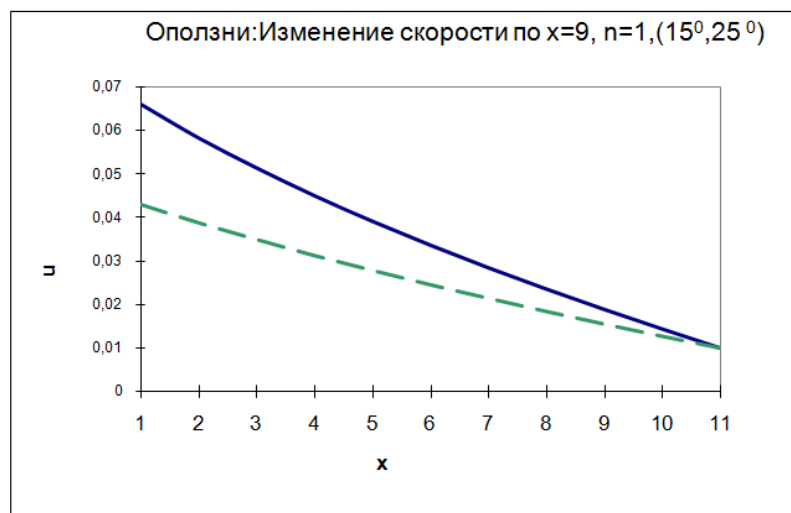
Чтобы обеспечить практическую сходимость $\tilde{X}$, $\tilde{t}$ берутся намного меньше единицы. Искомые переменные: скорость (продольная составляющая) U, и глубина h. В безразмерной форме

будет $\tilde{U} = \frac{U}{U_{\max}}$, $\tilde{h} = \frac{h}{h_{\max}}$. Для обезразмеривания введем выше указанную замену и в последующем для удобства оставим за безразмерными величинами старые обозначения.

Исходными данными в численной реализации модели движения оползневого потока являются значения констант селевой массы q , G , r_0 , C , A H_0 , задаются α , n .

С целью оценки эффективности модели движения потока и определение констант модели была проведена серия численных расчетов по моделированию реальных оползней.

	Расчет оползневого потока			Вариант 1: $a=25$ ----1	
$R_0=0.01$	$G_1=0.2$	$C=0.01$	$A=0.3$	$U(t_0) \ k=0.01$	$H(t_0) \ k=0.01$
$n=1$	$G_2=0.004$	$H_0=0.2$	$B=0.7$	$U(x_0) \ k=0.02$	$H(x_0) \ k=0.03$



Изменение скорости

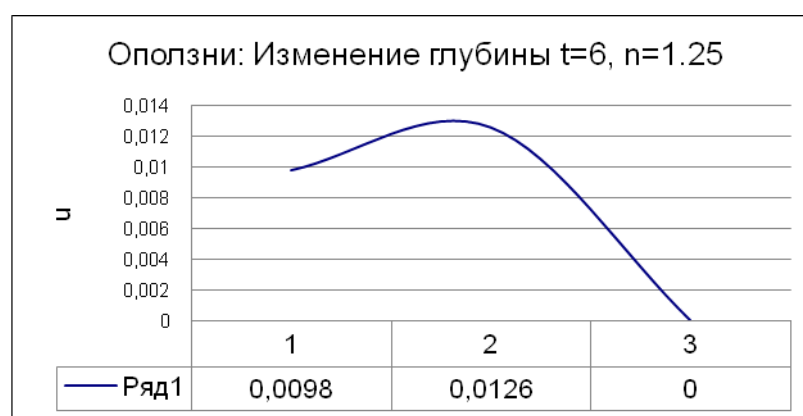


Рис 2. Изменение глубины по времени



Рис 3 Изменение скорости по x

Константы модели по признаку влияют на количественные характеристики расчетного потока, в основном максимальный расход и скорость. Несмотря на указанные ограничения, экспериментальные ограничения и наши расчетные данные качественно согласуются. На обоих рисунках видно действие силы тяжести. По результатам проведенных численных расчетов можно заключить, что показана адекватность модели на основании достаточной близости расчетных характеристик модели с имеющимися наблюдаемыми и измеренными характеристиками прошедших оползневых потоков, а также экспериментальных оползневых потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оползни//БСЭ. 3-е изд. - М., 1974. - Т. 18. - С. 429-430
2. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. - М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. Т. 1. - 575 с.
3. Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. -420 с.
4. Стокер Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. - М.: Изд-во иностр. литературы, 1959. 617 с.

5. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. - М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2001. — 608 с.
6. Андреев В.Б. Лекции по методу конечных элементов. М.: Изд-во МГУ, 1997. -178 с.
7. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972.-308 с.
8. Численные методы в динамике жидкостей/Джеймсон Э., Мюллер Т., Боллха-уз У., Краус В., Шмидт В., Белоцерковский О.; ред. Вирц Г., Смолдерен Ж. М.: Мир, 1981.-407 с.
9. Шадунц К.Ш. Механизм оползней потоков в глинистых породах//Известия вузов. Геология и разведка. 1976. - № 2. - С. 154-155
10. Шадунц К.Ш. Оползни-потоки. М.: Недра, 1983. - 120 с.
11. Шадунц К.Ш. Расчет скоростей движения оползней-потоков//Геологические факторы формирования оползней и селевых потоков и вопросы их оценки. — 1976. — С. 4-12.
12. Бийбосунов А.И., Орозобекова А.К., Ташиев А.А. «Аналитические методы решения коэффициента устойчивости горных склонов», Сборник «Современные проблемы механики сплошных сред/ Гидрогазодинамика и экзогенно-геологические процессы природы» вып.6, Бишкек, 2007 г.