

УДК 621.22.01

А. И. Тищенко, О. А. Баев

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ГИДРАВЛИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЛОМКА ТВЕРДОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ В СОСТАВЕ СЕЛЕВОГО ПОТОКА В УСЛОВИЯХ ГОРНО-ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЫ

Целью исследований являлось получение теоретических зависимостей для определения времени и дальности перемещения обломка твердой породы в составе селевого потока в условиях горно-предгорной зоны. Ливневые потоки, способные легко передвигать крупные обломки различных форм и размеров, часто образуют сели, которые нарушают экологическое равновесие. Для выработки стратегии борьбы с этим явлением важно решить проблему прогнозирования образования селевых потоков. Для достижения поставленной цели авторами выполнено расчетное обоснование путем применения теоретических зависимостей классической механики на базе известных уравнений Лагранжа, Эйлера, Бернулли. Для сравнения результатов расчета в работе рассмотрены два случая геометрической формы твердого тела: шарообразной и в виде обломка скалы произвольной формы. Установлено, что скорость движения центра тела шарообразной формы за время 2,83 с составит 2,56 м/с, и тело пройдет по наклонной поверхности расстояние, равное 4,90 м. За время равномерного движения тела в течение 30 с его центр переместится на расстояние 76,8 м; 60 с – на 153,6 м; а 1 ч – на 9216,0 м. Скорость тела произвольной формы (более близкой к естественным, природным формам), приобретенная им на начальном участке пути после срыва с места, достигнет 2,47 м/с за время 0,14 с, а путь составит 0,34 м. За время движения 60 с тело (камень) пройдет расстояние 158,2 м, а за 1 ч (при благоприятных условиях движения) выделенный отсек селевого потока переместится на 9492,0 м. Приведенные расчеты показали, что полученные теоретические зависимости (2'), (5), (7) и (12) вполне применимы к определению времени, дальности и скорости перемещения селевого потока, что позволяет за расчетное время максимально избежать значительного ущерба и возможных человеческих жертв.

Ключевые слова: горно-предгорная зона, скорость движения, ливневые и селевые потоки, наносы, обломок.

A. I. Tischenko, O. A. Baev

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

HYDRAULICS OF SOLID ROCK DEBRIS DISPLACEMENT AS A PART OF MUDFLOW IN MOUNTAIN- PIEDMONT ZONE

The aim of this study was to obtain the theoretical dependences to determine the time and distance of displacement of solid rock debris as a part of mudflow in mountain and piedmont areas. Stormflows that can easily move coarse waste of various shapes and sizes, often form mudflow that violates the ecological balance. For developing the strategies to control this phenomenon it is important to solve the problem of predicting the formation of mudflows. To achieve this goal the authors performed analysis of justifying calculations by applying the theoretical dependences of classic mechanics on the basis of known Lagrange, Euler,

Bernoulli equations. To compare the results of calculation two cases of geometrical shape of a solid body: a spherical one and as an arbitrary form scrag are considered here. It is found out that the velocity of the center of a spherical shape body (for time = 2.83 sec) will be 2.56 m/s, and the body will move 4.9 m along the inclined slope; in 60sec it will move 153.6 m; and in 1 hour – 9216.0 m. Any arbitrary shape body velocity (closer to natural, original forms), acquired by them on the initial section of the route after start from place will reach 2.47 m/s (in 0.14 s) and the way will be 0,34 m. In running time of 60sec the body (stone) will go 158.2 m, and in 1 hour (under favorable moving conditions) the highlighted part of mudflow moves 9492.0 m. The calculations showed that the theoretical dependence obtained (2'), (5), (7) and (12) are fully applicable to the time, distance and speed determination of the mudflow that allows avoiding significant damage and possible casualties for the estimated time.

Keywords: mountain-piedmont zone, velocity, storm and mudflows, sediment, scrag.

Введение. В условиях горно-предгорной зоны с учетом природных катаклизмов (ливневых, селевых потоков и других негативных явлений) происходит смыв отдельностей горных пород, которые не только перекрывают артерии автомобильных дорог, но и разрушают инфраструктуру в горных районах. Кроме этого, ливневые потоки, способные легко перемещать крупные обломки различных форм и размеров, часто образуют сели, которые нарушают экологическое равновесие в целом.

Селевые потоки проявляются во всех горных районах России, занимающих около 3 % территории страны. Более половины селевых русел приходится на Среднюю Азию и Северный Кавказ. По составу переносимого твердого материала селевые потоки подразделяют на следующие виды:

- грязевые потоки;
- грязекаменные потоки;
- водокаменные потоки, представляющие смесь воды с преимущественно крупными камнями, в том числе валунами и скальными обломками объемом весом 1,1–1,5 т/м³.

Для выработки стратегии борьбы с этим явлением важно решить проблему прогнозирования образования селевых потоков.

Данным вопросом занимались многие ученые с начала XX столетия [1–7], и по настоящее время проблема является весьма актуальной, так как последствия селей часто бывают катастрофическими. Например, только за последние 160 лет г. Алма-Аты пережил более шести катастрофиче-

ских селей, которые причинили громадный материальный ущерб и нередко сопровождались жертвами.

Пути решения этой проблемы постоянно совершенствуются, и каждый новый вариант все больше раскрывает сущность этого явления, способствуя разработке эффективной стратегии его предотвращения.

В многоводье руслоформирующие паводки часто приближаются к водокаменным селевым потокам, образующим водотоки из сравнительно крупных фракций (булыжника, валунов). В связи с этим расход и геометрические параметры перемещаемых селевым потоком горных отделистей зависят от ряда факторов, а именно:

- скорости водокаменного потока v , м/с;
- сопротивления дна создаваемого водотока $M_{sopr} = M_{ydr}$, кН·м;
- массы и геометрических характеристик (радиуса R , м, или ширины b , м, длины l , м и высоты h , м, или объема V , м³) срываемого камня.

Образованию водокаменных потоков благоприятствует предшествующая дождливая погода. Процесс формирования водокаменного селевого потока в общих чертах можно охарактеризовать следующим образом.

За первым камнем следует срыв все большего и большего количества камней или образование и увеличение твердой фазы горного потока. Движение селевого потока существенно отличается от водного потока тем, что водный поток движется непрерывно, а селевой поток – отдельными валами, то почти останавливаясь, то опять ускоряя движение. Это происходит вследствие задержки селевой массы в сужении русла, на крутых поворотах, в местах резкого уменьшения уклона. Если обычно скорость течения селевого потока составляет 2,5–4,0 м/с, то при прорывах заторов она иногда достигает 8,0–10,0 м/с, расход воды увеличивается в 3–5 раз. В. Ф. Талмаза отмечает: «Отношение расхода влекомых наносов к общему расходу наносов в горных условиях очень нестабильно и в момент прохождения паводков малой повторяемости достигает 200–300 %» [2].

О. Г. Натишвили и В. И. Тевзадзе [6] рассмотрели задачу с прямолинейным движением камня в русле с положительным уклоном дна под действием водного потока и силы тяжести. Задача упрощена тем, что камень имеет форму шара, полностью погруженного в водный поток и по диаметру соизмеримого с глубиной потока. По принятому допущению выходит, что камень не начнет движение до тех пор, пока не будет полностью покрыт водным потоком.

Однако в курсах гидравлики [8, 9] отмечается, что при неизменном расходе с увеличением глубины водного потока уменьшается средняя скорость живого сечения, а камень может быть сдвинут потоком раньше достижения им глубины, равной его диаметру или большей.

К этому следует добавить, что камень может тронуться с места раньше в результате вымывания из-под него более мелких фракций. При этом время действия селевого потока может измеряться десятками или единицами секунд, потому что между массой селевого потока и массой неподвижного камня происходит явление, подчиняющееся законам и теоремам классической механики, на основании которых получены известные в гидравлике уравнения Лагранжа, Эйлера, Д. Бернулли.

К одной из основных особенностей движения наносов крупных фракций в условиях горно-предгорной зоны можно отнести следующее. При прохождении мощных, редко повторяющихся паводковых расходов, как правило, наблюдаются размыв и перемещение большого количества ранее аккумуляировавшегося каменного материала, в результате чего значительно увеличивается твердая фаза горных селевых потоков. Особенно опасными для гидротехнического строительства являются паводковые расходы редкой повторяемости в весенний период, когда выступы шероховатости (дна формирующегося водотока) еще покрыты сравнительно мелким материалом, в связи с чем расходы селевых потоков могут достигать значительных величин [2]. В этом же литературном источнике отмечается, что непостоянство отношения стока влекомых наносов к общему твер-

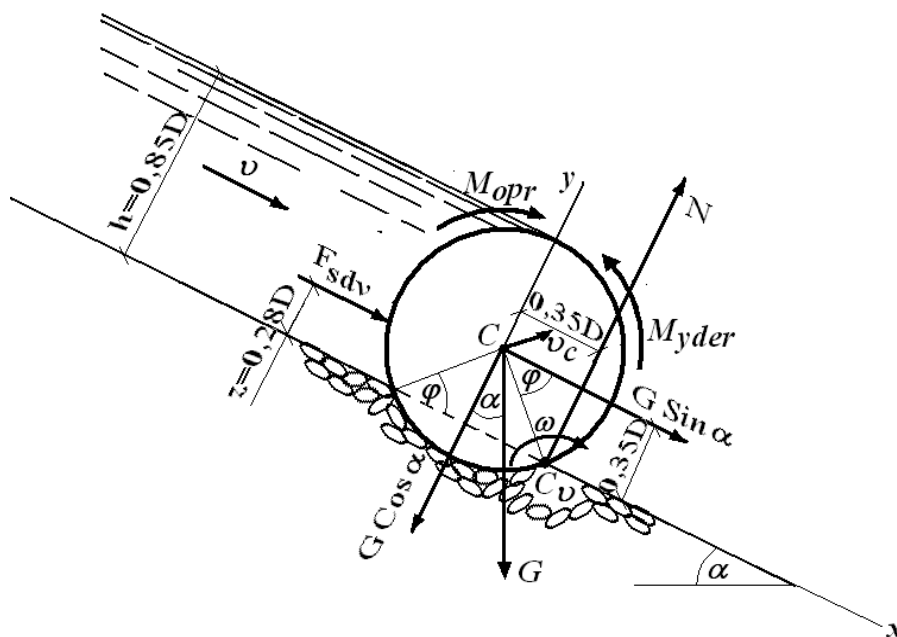
дому стоку изменяется в значительных пределах (от 10 до 90 % и более).

Цель настоящей работы заключается в теоретическом определении времени и дальности перемещения обломка твердой породы в составе селевого потока в условиях горно-предгорной зоны.

Материалы и методы. Для применения теорий движения механической системы или твердого тела к решению данной проблемы нами предлагается рассмотреть две схемы условий предельного состояния крупной фракции, лежащей на упругом основании с прямым уклоном.

По первой схеме камень имеет форму, близкую к шару, по второй схеме – произвольную форму со среднегеометрическими размерами (длиной l , м, шириной b , м и высотой h , м).

По первой схеме (рисунок 1) камень (твердое тело) будет перекатываться по упругому основанию, то есть совершать поступательно-вращательное движение вокруг мгновенного центра скоростей C_v .



$M_{yдер}$ – удерживающий момент, кН·м; M_{opr} – опрокидывающий момент, кН·м;
 F_{sdv} – сдвигающая или опрокидывающая сила потока, кН; z – плечо сдвигающей силы, м;
 G – вес грунта, кН; C_v – мгновенный центр скоростей; N – нормальная реакция, кН;
 h – глубина воды, м; v – средняя скорость в живом сечении селевого потока, м/с;
 C – центр массы тела; ω – мгновенная угловая скорость, c^{-1} ; D – диаметр тела, м

Рисунок 1 – Схема сил, которые действуют на камень в форме шара, лежащий на упругом основании с прямым уклоном

В этом случае логично применить теорему о движении центра масс механической системы в дифференциальной форме [10, 11].

На рисунке 1 приведен удерживающий момент $M_{y\text{der}}$, кН·м, определяемый по формуле:

$$M_{y\text{der}} = N \cdot 0,35D = G \cos \alpha \cdot 0,35D,$$

где $0,35D$ – плечо пары сил ($G \cos \alpha$; N), полученное из условия, что камень вдавливается в упругое основание с углом охвата при вершине (точка C) 90° [12].

Опрокидывающий момент M_{opr} , кН·м, относительно точки C_0 будет равен:

$$M_{opr} = F_{sdv} \cdot z + G \sin \alpha \cdot 0,35D, \quad (1)$$

где F_{sdv} – сдвигающая или опрокидывающая сила потока, кН, при глубине воды $h=0,85D$, м, по рекомендациям П. Г. Киселева [13] определяется по формуле:

$$F_{sdv} = \gamma_{sel} \omega_{gr} v^2 / g = 0,25 \gamma_{sel} \pi D^2 v^2 / g;$$

γ_{sel} – удельный вес селя, кН/м³;

ω_{gr} – площадь поперечного сечения грунта, м²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

z – плечо сдвигающей (опрокидывающей) силы относительно мгновенного центра скоростей C_v , $z \approx 0,28D$.

Подставив F_{sdv} и z в формулу (1), получим:

$$M_{opr} = 0,25 \gamma_{sel} \pi D^2 v^2 \cdot 0,28D / g + G \sin \alpha \cdot 0,35D. \quad (1')$$

Для определения скорости движения камня вместе с селевым потоком воспользуемся теоремой об изменении количества движения механической системы в приложении к сплошным средам (теоремой Эйлера) [5, 10] в следующем виде (в проекции на ось x):

$$M_c v_{0,x} - M_c v_x + R_{об,x} + R_{пов,x} = 0, \quad (2)$$

где M_c – секундная масса выделенного (1 м^3) объема потока с каменными фракциями (обломком камня), $M_c = \gamma_{sel} \pi D^2 v / 4g$;

v_{0x} – проекция начальной скорости камня на ось x ;

$R_{об,x}$ – проекция на ось x главного вектора объемных сил, $R_{об,x} = 0$;

$R_{пов,x} = \pi D^3 \gamma_{sel} \sin \alpha / 6$ – проекция на ось x главного вектора поверхностных сил;

α – угол наклона опорной поверхности к горизонту.

Так как в начальный момент камень находился в покое, то $v_{0x} = 0$.

Подставляя значения составляющих в уравнение (2), получим:

$$\gamma_{sel} \pi D^2 v^2 / 4g = \pi D^3 \gamma_{sel} \sin \alpha / 6.$$

Отсюда срывающая (средняя) скорость селевого потока v , м/с, будет:

$$v = \sqrt{\frac{2gD}{3}}. \quad (2')$$

В качестве примера воспользуемся следующими натурными исходными данными: $D = 1 \text{ м}$, $\gamma_{sel} = 15 \text{ кН/м}^3$, $\alpha = 45^\circ$ и найдем скорость селевого потока, м/с:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1}{3}} = 2,56.$$

Записываем теорему о движении центра масс механической системы (камня) в плоском движении:

$$M_c dv_c / dt + J_{cv} d\omega / dt = M_{opr} - M_{ydr}, \quad (3)$$

где v_c – скорость центра масс селевого потока, м/с;

J_{cv} – момент инерции камня относительно мгновенного центра скоростей, м^4 , определяется по теореме Штейнера – Гюйгенса [11]:

$$J_{cv} = 0,4MR^2 + MR^2 = 1,4MR^2 = 0,35MD^2 = 0,35GD^2 / g,$$

где M – масса тела, кг;

R – радиус тела, м.

Проинтегрируем обе части выражения (3) в соответствующих пределах:

$$M_c \int_0^v dv_c + J_{cv} \int_0^\omega d\omega = (M_{opr} - M_{yder}) \int_0^t dt.$$

В результате получим:

$$M_c v + J_{cv} \omega = (M_{opr} - M_{yder}) \cdot t. \quad (4)$$

Из выражения (3) можем определить время t , с, за которое камень пройдет путь со скоростью 2,56 м/с. Составляющие уравнения (3) выразим через следующие значения:

$$M_c = G/g = \pi D^3 \gamma_{sel} / 6g, \quad \omega = v / 0,7R = 1,4v / D,$$

где R – радиус тела, м.

$$J_{cv} = 0,35\pi D^3 \gamma_{sel} D^2 / 6g = 0,058\pi D^5 \gamma_{sel} / g,$$

$$M_{opr} = 0,25\gamma_{sel} \pi D^2 v^2 0,28D / g + \pi D^3 \gamma_{sel} \sin \alpha 0,35D / 6,$$

$$M_{yder} = \pi D^3 \gamma_{sel} \cos \alpha 0,35D / 6.$$

Подставив найденные значения в формулу (4), определяем время в функции от скорости движения селевого потока t , с:

$$t = \frac{M_c v_c + J_{cv} \omega}{M_{opr} - M_{yder}}. \quad (5)$$

Применив предыдущие исходные данные, находим:

$$M_c = \pi D^3 \gamma_{sel} / 6g = 3,14 \cdot 1^3 \cdot 15 / 6 \cdot 9,81 = 0,8 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м},$$

$$J_{cv} = 0,058 \cdot 3,14 \cdot 1^5 \cdot 15 / 9,81 = 0,28 \text{ м}^4,$$

$$\omega = v / 0,28D = 2,56 / 0,28 \cdot 1 = 9,14 \text{ с}^{-1},$$

$$v_c = v \cdot 0,5D / 0,28D = 1,786v = 4,57 \text{ м/с},$$

$$M_{yder} = \pi D^3 \gamma_{sel} \cos \alpha 0,35D / 6,$$

$$M_{yder} = 3,14 \cdot 1^3 \cdot 15 \cdot 0,707 \cdot 0,35 \cdot 1 / 6 = 1,94 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$M_{opr} = 0,25\gamma_{sel} \pi D^2 v^2 0,28D / g + \pi D^3 \gamma_{sel} \sin \alpha 0,35D / 6 = \\ = 0,25 \cdot 15 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 2,56^2 \cdot 0,28 \cdot 1 / 9,81 + 3,14 \cdot 1^3 \cdot 15 \cdot 0,707 \cdot 0,35 \cdot 1 / 6 = 4,14 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Подставив данные в формулу (5), определяем время t , с, прохождения селевого потока со скоростью центра масс селевого потока 4,57 м/с:

$$t = \frac{0,8 \cdot 4,57 + 0,28 \cdot 9,14}{4,14 - 1,94} = \frac{6,22}{2,2} = 2,83 \text{ с.}$$

Выразив угловую скорость через скорость движения селевого потока $\omega = v/0,28D$, с^{-1} , и подставив в выражение (4), получим:

$$M_c v + J_{cv} \frac{v}{0,28D} = (M_{opr} - M_{yder}) \cdot t.$$

Преобразуем это уравнение через скорость v , м/с, и выразим через дифференциал пути по времени:

$$v = \frac{0,28D(M_{opr} - M_{yder})}{0,28M_c D + J_{cv}} \cdot t \quad \text{или} \quad \frac{dx}{dt} = \frac{0,28D(M_{opr} - M_{yder})}{0,28 \cdot M_c D + J_{cv}} \cdot t.$$

Проинтегрируем последнее выражение, разделив в нем переменные:

$$\int_0^x dx = \frac{0,28D(M_{opr} - M_{yder})}{0,28 \cdot M_c D + J_{cv}} \int_0^t t dt.$$

После интегрирования получим величину перемещения камня в составе селевого потока x , м, в функции от времени при постоянном коэффициенте при нем:

$$x = \frac{0,28D(M_{opr} - M_{yder})}{2(0,28 \cdot M_c D + J_{cv})} \cdot t^2 = At^2,$$

где $A = \frac{0,28D(M_{opr} - M_{yder})}{2(0,28 \cdot M_c D + J_{cv})}$ м/с².

При $M_{opr} = 4,14$ кН·м; $M_{yder} = 1,94$ кН·м; $J_{cv} = 0,28$ м⁴; $M_c = 0,8$ кН·с²/м имеем:

$$A = \frac{0,28 \cdot 1(4,14 - 1,94)}{2(0,28 \cdot 0,8 \cdot 1 + 0,28)} = \frac{0,616}{1,008} = 0,61 \text{ м/с}^2.$$

Определим расстояние, которое пройдет камень за время $t = 2,83$ с:

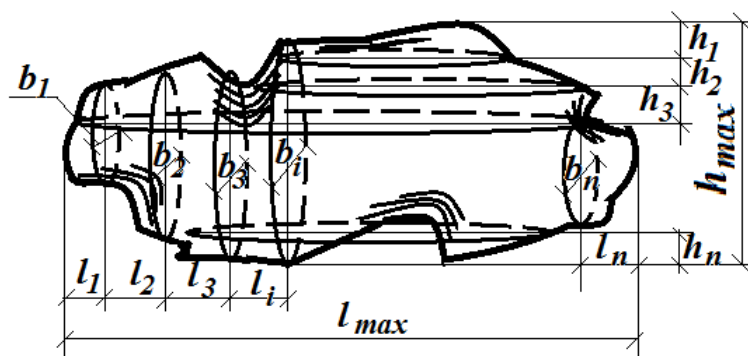
$$x = 0,61 \cdot 2,83^2 = 4,9 \text{ м.}$$

Приняв движение селевого потока равномерным, находим путь S , м,

пройденный выделенным отсеком за 1 ч:

$$S = 2,56 \cdot 3600 = 9216 \text{ м.}$$

Учитывая тот факт, что в натуральных условиях отдельности скальных пород далеки от формы шара и зачастую имеют неправильные геометрические формы с неровными поверхностями, с некоторым приближением можно назначать три измеряемых величины с осредненными значениями (l_{cp} , м, b_{cp} , м и h_{cp} , м) путем средневзвешенных вычислений, разбив тело на отдельные элементы (рисунок 2) [10–13].



$b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n$ – ширина i -го элемента тела, м; $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n$ – высота i -го элемента, м; h_{max} – максимальная высота элемента, м; $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ – длина отдельного элемента твердого тела, м; l_{max} – максимальная длина элемента, м

Рисунок 2 – Определение средних размеров обломка скалы

Среднюю длину отдельного элемента твердого тела, м, определим по зависимости:

$$l_{\text{cp}} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n},$$

где $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ – длина отдельного элемента твердого тела, м;

n – количество элементов.

Опытами Кулона [11] установлено, что сила трения скольжения $F_{\text{тр}}$, кН, прямо пропорциональна нормальной реакции, а именно:

$$F_{\text{тр}} = f \cdot N,$$

где f – коэффициент трения скольжения, который (по выводам Кулона) не зависит от площади соприкосновения тела с поверхностью скольжения и

равен тангенсу угла естественного откоса грунта (для каменной наброски $f=0,58$);

N – нормальная реакция, $N=G \cdot \cos \alpha$, кН.

В этом случае расчетная схема имеет другой вид (рисунок 3).

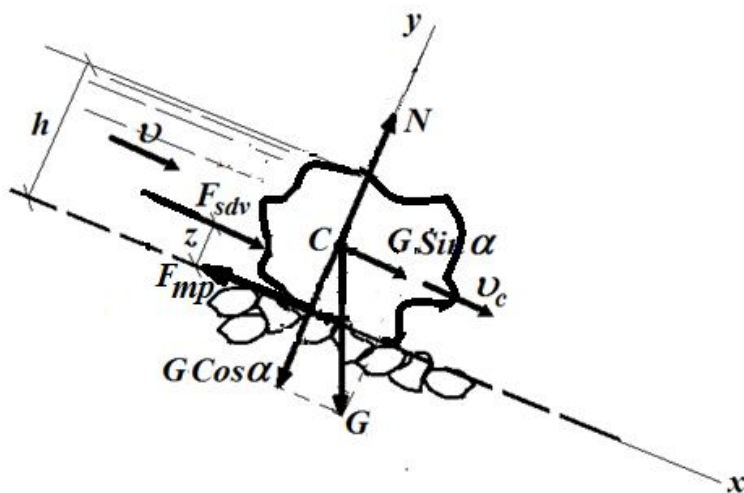


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на камень произвольной формы

Воспользуемся уравнением Эйлера применительно к сплошным средам (2). Так как вначале камень находился в покое, то $v_{0,x}=0$, следовательно:

$$M_c v_x = R_{об,x} + R_{пов,x}, \quad (6)$$

где M_c – секундная масса выделенного (1 м^3) объема потока с каменными фракциями, $M_c = \gamma_{sel} b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot 1 \cdot v / g$;

$R_{об,x}$ – проекция на ось x главного вектора объемных сил, $R_{об,x} = 0$;

$$R_{пов,x} = F_{sdv} + G \cdot \sin \alpha - F_{тр} = \frac{\gamma_{sel} h_{cp} b_{cp} v^2}{g} + G \cdot \sin \alpha - f \cdot \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cos \alpha.$$

Подставив эти составляющие в уравнение (6), получим:

$$\gamma_{sel} b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cdot v^2 / g = \frac{k \gamma_{sel} h_{cp} b_{cp} v^2}{g} + \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cdot \sin \alpha - f \cdot \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cos \alpha,$$

или

$$v^2 l_{cp} = k v^2 + g l_{cp} (\sin \alpha - f \cos \alpha),$$

где $k=0,342$ – безразмерный коэффициент, зависящий от угла обтекания преграды, угол в пределах $50\text{--}80^\circ$ зависит от формы напорной грани обломка [13] (при форме грани близкой к квадрату или прямоугольнику угол обтекания $\approx 70^\circ$).

Из последнего уравнения находим v – скорость перемещения камня в составе селевого потока, м/с:

$$v = \sqrt{\frac{gl_{cp}(\sin\alpha - f\cos\alpha)}{l_{cp} - k}}. \quad (7)$$

Определим скорость движения камня на начальном участке после его срыва при $b_{cp}=1$ м, $h_{cp}=1$ м, $l_{cp}=1$ пог. м, $\gamma_{sel}=15$ кН/м³, $f=0,58$ и угле наклона дна водотока $\alpha=45^\circ$, $\text{tg}\alpha=1$:

$$v = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 1 \cdot (0,707 - 0,58 \cdot 0,707)}{1 - 0,342}} = 2,47 \text{ м/с.}$$

Применяем теорему об изменении кинетической энергии для системы материальных точек:

$$T - T_0 = \sum A^E, \quad (8)$$

где T , T_0 – соответственно конечная и начальная кинетические энергии механической системы, Дж;

$\sum A^E$ – сумма работ от всех внешних сил на некотором перемещении, Дж.

В начальный момент времени механическая система находилась в покое, поэтому $T_0=0$. В результате получим:

$$T = \sum A^E. \quad (9)$$

Так как обломок представляет собой твердое тело и движется поступательно, то его кинетическая энергия определяется по формуле:

$$T = \frac{Mv_C^2}{2} = \frac{Gv_C^2}{2g} = \frac{\gamma_{sel}h_{cp}b_{cp}l_{cp}v_C^2}{2g}, \quad (10)$$

где v_C – скорость центра масс твердого тела, м/с.

Находим сумму работ от всех внешних сил на некотором перемещении S , м:

$$\sum A^E = F_{sdv} S + G S \sin \alpha - F_{тр} S, \quad (11)$$

где $F_{sdv} = \gamma_{sel} \frac{b_{cp} h_{cp} v_C^2}{g}$ – сдвигающая сила потока, кН;

$F_{тр} = f \cdot \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cos \alpha$ – сила трения скольжения, кН;

$M_C = G/g$ – масса твердого тела, кг.

Подставив равенства (10), (11) и $G \cdot \sin \alpha = \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cdot \sin \alpha$ в уравнение (9), получим:

$$\frac{\gamma_{sel} h_{cp} b_{cp} l_{cp} v_C^2}{2g} = \gamma_{sel} \frac{b_{cp} h_{cp} v_C^2}{g} S + \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cdot \sin \alpha \cdot S - f \cdot \gamma_{sel} \cdot b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l_{cp} \cos \alpha \cdot S,$$

или

$$l_{cp} v_C^2 = 2v^2 S + l_{cp} \cdot 2g \cdot \sin \alpha \cdot S - f \cdot l_{cp} \cdot 2g \cdot \cos \alpha \cdot S.$$

Из этого уравнения определяем путь, пройденный камнем S , м, со скоростью центра масс 2,47 м/с:

$$S = \frac{l_{cp} v_C^2}{2v^2 + l_{cp} \cdot 2g \cdot \sin \alpha - f \cdot l_{cp} \cdot 2g \cdot \cos \alpha}. \quad (12)$$

Подставив в формулу (12) данные, найдем расстояние, которое пройдет тело в первые доли секунды S , м:

$$S = \frac{1 \cdot 2,47^2}{2 \cdot 2,47^2 + 1 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,707 - 0,58 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,707} = 0,34 \text{ м.}$$

Приняв расстояние движения селевого потока по наклонной плоскости равным 0,34 м, определяем время, за которое селевой поток пройдет это расстояние:

$$t = \frac{S}{v} = \frac{0,34}{2,47} = 0,14 \text{ с.}$$

За 60 с выделенный объем жидкости при скорости движения 2,47 м/с

пройдет расстояние $S=2,47 \cdot 60=158,2$ м, а за 1 час – 9492,0 м.

Результаты и обсуждение. В приведенных примерах приняты натурные исходные данные для получения количественной оценки применения расчетных зависимостей по определению скорости, времени срыва и длины перемещения сорванного тела за расчетный промежуток времени. При шаровидной форме тела скорость движения его центра за время 2,83 с приобретет значение 2,56 м/с, а тело пройдет по наклонной поверхности расстояние, равное 4,9 м. За время равномерного движения тела в течение 30 с его центр переместится на расстояние 76,8 м, 60 с – на 153,6 м, 1 ч – на 9216,0 м.

При произвольной форме тела (более близкой к естественным, природным формам) скорость, приобретенная телом (камнем) на начальном участке пути после срыва с места, достигнет 2,47 м/с за время 0,14 с, а путь составит 0,34 м. За время движения камня 60 с он пройдет расстояние 158,2 м, за 1 час (при благоприятных условиях движения) выделенный отсек селевого потока переместится на 9492,0 м.

Сравнения полученные цифровые значения, можно отметить, что селевой поток с телами шарообразной формы проходит за 1 ч расстояние меньше, чем поток с камнями произвольной формы за счет вдавливания в упругое основание. Для срыва с места камня произвольной формы поток должен достигнуть средней скорости около 2,5 м/с, затратив на это 0,14 с.

Из приведенных количественных величин следует, что для срыва с места камня шарообразной формы требуется больше времени и большая скорость, чем для тела произвольной формы. Это объясняется тем, что шар вдавливается в опорную поверхность и, чтобы стронуть его с места, создав эффект перекачивания, к нему необходимо приложить большее усилие, чем для камня произвольной формы. К тому же шар имеет обтекаемую форму, а произвольное тело – значительно большую площадь для сдвигающей силы. В начальный момент движения форма шара имеет преиму-

щество перед произвольной формой.

Из этого следует, что расчеты по прогнозированию движения селевых потоков целесообразно проводить по формулам (2'), (5), (7) и (12).

Выводы

1 В результате проведенных исследований получены теоретические зависимости (5) и (12), которые вполне применимы к определению времени и дальности перемещения селевого потока, что позволяет за расчетное время максимально избежать значительного ущерба и возможных человеческих жертв.

Расчетами установлено, что для срыва с места камня шарообразной формы требуется больше времени ($t = 2,83$ с) и большая скорость ($v = 2,56$ м/с) потока, чем для тела произвольной формы ($t = 0,14$ с и $v = 2,47$ м/с). Это объясняется тем, что шар вдавливается в опорную поверхность и, чтобы стронуть его с места к нему необходимо приложить большее усилие, чем для камня произвольной формы. К тому же шар имеет обтекаемую форму, а произвольное тело – значительно большую площадь для сдвигающей силы.

2 Рассмотрев движение отдельного обломка скалы как плоскопараллельное, в приведенной работе авторы представили также полученные расчетные зависимости для определения срывающей (средней) скорости селевого потока (2') и скорости перемещения камня в составе селевого потока (7). При этом выполненные расчеты произведены для уклона с тангенсом угла наклона к горизонту, равным единице, то есть $\alpha = 45^\circ$.

Список использованных источников

1 Анциферов, С. М. О распределении концентрации и размеров твердых частиц в открытом потоке / С. М. Анциферов, В. К. Дебольский // Динамика и термика рек. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 310–317.

2 Талмаза, В. Ф. Некоторые особенности движения влекомых наносов на реках горно-предгорной зоны / В. Ф. Талмаза // Динамика и термика рек. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 317–325.

3 Исаченко, Н. Б. Устойчивость отдельных камней на поверхности низового откоса каменно-набросной плотины, находящегося под воздействием турбулентного

фильтрационного потока / Н. Б. Исаченко, В. Д. Любимова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – М. – Л.: Энергия, 1964. – Т. 74. – С. 25–31.

4 Великанов, М. А. Движение наносов / М. А. Великанов. – М.: Речиздат, 1948. – 210 с.

5 Волосухин, В. А. Применение теоремы Эйлера в приложении к сплошным средам к определению устойчивости плит крепления оросительных каналов / В. А. Волосухин, А. И. Тищенко // Современные проблемы механики и ее преподавания в вузах Российской Федерации: докл. Межрегион. конф. памяти А. Н. Кабелькова, г. Новочеркасск, 20–23 апреля 2011 г. / ЮРГТУ. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2011. – С. 44–51.

6 Натишвили, О. Г. Работа водного потока по перемещению камня и прогнозирование экологической ситуации в русле горного водотока / О. Г. Натишвили, В. И. Тевзадзе // Инженерная экология. – 2002. – № 5 – С. 34–38.

7 Тищенко, А. И. Оценка интенсивности истирания наносами бетонных облицовок каналов / А. И. Тищенко, А. А. Созаев // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 11. – С. 24–28.

8 Косиченко, Ю. М. Гидравлика мелиоративных каналов: учеб. пособие / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НИМИ, 1992. – 175 с.

9 Моделирование бурных двухмерных в плане водных потоков / В. Н. Коханенко, Я. В. Волосухин, М. А. Лемешко, Н. Г. Папченко. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.

10 Овчаренко, И. Х. Параметры воронки размыва в нижнем бьефе регулирующих сооружений / И. Х. Овчаренко, А. И. Тищенко // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 3. – С. 37–39.

11 Мерзон, В. И. Теоретическая механика (краткий курс): учеб. для техникумов / В. И. Мерзон. – 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1972. – 240 с.

12 Берген, Р. И. Проектирование лотковых и трубчатых конструкций мелиоративных сооружений: учеб. пособие для с.-х. вузов / Р. И. Берген. – М.: Колос, 1995. – 206 с.

13 Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

References

1 Antsiferov S.M., Debolskiy V.K. 1973. *O raspredelenii kontsentratsii i razmerov tverdykh chastits v otkrytom potoke* [On the distribution of concentration and sizes of solid particulate matter in the open flow]. *Dinamika i termika rek* [Rivers' Thermal Dynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., pp. 310-317. (In Russian).

2 Talmaz V.F. 1973. *Nekotorye osobennosti dvizheniya vlekomykh nanosov na rekakh gorno-predgornoy zony* [Some features of movement of tractional sediments in mountain-foothill zone rivers]. *Dinamika i termika rek* [Rivers' Thermal Dynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., pp. 317-325. (In Russian).

3 Isachenko N.B., Lyubimova V.D. 1964. *Ustoychivost ot delnykh kamney na poverkhnosti nizovogo otkosa kamenno-nabrosnoy plotiny, nakhodyashchegosya pod vozdeystviem turbulentnogo filtratsionnogo potoka* [The stability of separate stones on the down stream slope surface of the rockfill dam, under the influence of turbulent filtration flow]. *Izvestiya VNIIG imeni Vedeneev* [Bulletin of VNIIG named after Vedeneev]. Moscow–Leningrad, Energy Publ., v. 74, pp. 25-31. (In Russian).

4 Velikanov M.A. 1948. *Dvizhenie nanosov* [The Movement of Sediment]. Moscow, Rechizdat Publ., 210 p. (In Russian).

5 Volosukhin V.A., Tishchenko A.I. 2011. *Primeneniye teoremy Eulera v prilozhenii k sploshnym sredam k opredeleniyu ustoychivosti plit krepleniya orositelnykh kanalov* [Appli-

cation of Euler theorem to solid medium for determination of the irrigation canals attachment plates stability]. *Sovremennye problemy mekhaniki i eye prepodavaniya v vuzakh Rossiyskoy Federatsii: doklady mezhhregionalnoy konferentsii pamyati Kabelkova* [Modern problems of mechanics and its teaching in Russian universities: rep. interregional conference in memory of A.N. Kabelkov, Novocherkassk, 20–23 April 2011]. Novocherkassk, SRSTU (NPI) Publ., pp. 44-51. (In Russian).

6 Natishvili O.G., Tevzadze V.I. 2002. *Rabota vodnogo potoka po peremeshcheniyu kamnya i prognozirovaniye ekologicheskoy situatsii v rusle gornogo potoka* [Work of water flow by moving stones and the forecast of environmental situation in mainstream mountain watercourse]. *Inzhenernaya ekologiya* [Engineering Ecology]. no. 5, pp. 34-38. (In Russian).

7 Tishchenko A.I., Sozaev A.A. 2009. *Otsenka intensivnosti istiraniya nanosami betonnykh oblizovok kanala* [Assessment of abrasion intensity of canals concrete casing by sediments]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Hydraulic Engineering]. no. 11, pp. 24-28. (In Russian).

8 Kosichenko Yu.M. 1992. *Gidravlika meliorativnykh kanalov: uch. posobie* [Hydraulics of Drainage Canals: textbook]. Novocherkassk, NIMI Publ., 175 p. (In Russian).

9 Kokhanenko V.N., Volosukhin Ya.V., Lemeshko M.A., Papchenko N.G. 2013. *Modelirovanie burnykh dvukhmernykh v plane vodnykh potokov* [Modeling of turbulent two-dimensional in terms of water flow]. Rostov n/Don, SFU Publ., 180 p. (In Russian).

10 Ovcharenko I. Kh., Tishchenko A.I. 1979. *Parametry voronki razmyva v nizhnem byefe reguliruyushchikh sooruzheniy* [Parameters of plunge basin in downstream regulatory structures]. *Gidrotehnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Reclamation]. no. 3, pp. 37-39. (In Russian).

11 Merzon V.I. 1972. *Teoreticheskaya mekhanika (kratkiy kurs): uchebnik dlya tekhnikumov, 3rd izdanie, pererabotannoe* [Theoretical Mechanics (short course): textbook for technical schools, 3rd ed., rev.], Moscow, Higher School Publ., 240 p. (In Russian).

12 Bergen R.I. 1995. *Proektirovanie lotkovykh i trubchatykh konstruktсий meliorativnykh sooruzheniy: uchebnoe posobie dlya selkhoz. vuzov* [Designing of flume and tube structures of reclamation facilities: textbook for agricultural colleges]. Moscow, Kolos Publ., 206 p. (In Russian).

13 Kiselev P.G. 1972. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam, 4th izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe* [Manual on Hydraulic Calculations, 4th ed., rev. and ext.]. Moscow, Energia, Publ., 312 p. (In Russian).

Тищенко Александр Иванович

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru

Tishchenko Alexandr Ivanovich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru

Баев Олег Андреевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru

Baev Oleg Andreevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru