



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ГРУЗИИ
ИНСТИТУТ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
ГРУЗИНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

О.Г. Натишвили, Т.Ф. Урушадзе,
Г.В. Гавардашвили

ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ
СКЛОНОВОГО СТОКА
И ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРОЗИИ
ПОЧВОГРУНТОВ

МОСКВА
ООО Издательство «Научтехлитиздат»
2014

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ГРУЗИИ
ИНСТИТУТ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
ГРУЗИНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**О.Г. Натишвили, Т.Ф. Урушадзе,
Г.В. Гавардашвили**

**ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ
СКЛОНОВОГО СТОКА
И ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРОЗИИ
ПОЧВОГРУНТОВ**

**МОСКВА
ООО Издательство «Научтехлитиздат»
2014**

О.Г. НАТИШВИЛИ, Т.Ф. УРУШАДЗЕ, Г.В. ГАВАРДАШВИЛИ
**«Волновое движение склонового стока и
интенсивность эрозии почвогрунтов»**
М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат»

Работа посвящена никем ранее не рассматривавшемуся вопросу влияния волн в склоновых мелководных потоках на интенсивность эрозии почвогрунтов. Предлагаются: методы прогнозирования возникновения волн на свободной поверхности склонового стока как в водных, так и наносонесущих потоках; прикладные вопросы оценки эрозионных процессов горных ландшафтов на примере «коридора» нефтегазопроводов Грузии; новые конструкции противозерозионных сооружений; волнообразное формирование селевых потоков в эрозионных очагах; основы движения селевых потоков в водотоках и на конусах выносов.

Работа предназначена для специалистов, занимающихся проблемами природоохранных мероприятий.

Редактор: д.т.н., проф. И.Г. Круашвили

Рецензент: к.т.н. А.Т. Дзлеришвили

O.G. NATISHVILI, T.P. URUSHADZE, G.V. GAVARDASHVILI
Wavy motion of slope runoff and intensity of soil erosion
M.: JSC Publishing House "Naughtechlitizdat"

The work is dedicated to the problem of impact of waves in shallow slope currents on the intensity of soil erosion, never explored before. The methods to predict the origination of waves on a free surface of a slope runoff in both, water and silt-carrying flows are proposed; applied issues of assessing erosive processes of mountain landscapes on the example of the "corridor" of oil and gas pipelines of Georgia are considered; new designs of erosion control structures are proposed; wavy-like formation of mud torrents in erosive hearths is reviewed, and principles of motion of mud torrents in watercourses and over talus trains are considered. The work is for the specialists working on the problems of environmental protective measures.

Editor: I.G. Kruashvili, Professor, Doctor of Technical Sciences

Reviewer: A.T. Dzlierishvili, Candidate of Technical Sciences

ВВЕДЕНИЕ

Цель книги – кратко изложить результаты исследований авторов в области эрозии почвогрунтов с позиции одномерного волнового движения поверхностного склонового стока.

В рамках одномерного (гидравлического) подхода скорость, давление, плотность и другие параметры потока зависят от одной координаты, направление которой совпадает с направлением вектора скорости поверхностного склонового стока.

В действительности одномерного (одномерного) движения жидкого потока в природе не существует, но при течении склонового потока в любом поперечном сечении гидравлические параметры потока незначительно отличаются от средней по живому сечению скорости. В таких случаях движение можно трактовать как одномерное, как это принято в гидравлике. Часто гидравлику трактуют с позиции «квазиодномерной» сплошной среды, несмотря на то, что гидравлические задачи охватывают такие формы движения потока, как плавноизменяющиеся неравномерное, волновое и др. Встречаются также задачи, когда требуется через среднюю скорость определить донную скорость и др.

Гидравлика, как правило, пользуется средними показателями по живому сечению потока, этим снижая точность и упрощая действительное явление, заменяя фактический поток «фиктивным» (абстрактным) потоком, но одновременно расширяет оперативную возможность

применения полученных зависимостей для решения важных практических задач.

Общеизвестно, что полученные таким путем расчетные зависимости, вследствие простоты, при приложении к инженерным задачам, с практической точки зрения, дают удовлетворительные результаты.

Авторы решили изложить книгу в формате научной хроники, поэтому из рассмотрения исключены вопросы: кто, что, когда и как сделал. Монография задумана так, чтобы ею можно было пользоваться без частого обращения к другим опубликованным работам.

Первая глава посвящается гидравлической интерпретации, никем ранее не рассматривавшемуся вопросу о влиянии волн в склоновых мелководных потоках на интенсивность эрозии (прогноз и расчет), с помощью поправочного коэффициента. Вторая глава – элементам овражной и речной эрозии. Прикладные вопросы оценки процессов горных ландшафтов, в «коридорах» нефтегазопроводов Грузии, проводятся в третьей главе. Четвертая и пятая главы посвящаются вопросам проектирования противоэрозионных мероприятий, а также общим принципам волнообразного формирования селевых потоков в эрозионных очагах и их движениям в селеносных водотоках. В шестой главе затрагиваются конкретные проблемы почв в Грузии.

Так как книга не рассчитана только для инженеров, в начальной части приводится гидравлическая типизация эрозионных процессов. Сказанное диктуется тем, чтобы обратить внимание читателя на формирование, движение, размыв, отложение твердых частиц непосредственно в русле и на конусах выносов горных водотоков.

Следует отметить, что редактор настоящей книги, доктор технических наук, проф. И.Г. Круашвили при ознакомлении с ней сделал ряд полезных замечаний, учет которых положительно отразился на общий уровень монографии.

Авторы благодарны также канд. тех. наук А.Т. Дзлиершвили за тот труд, который он проделал в качестве редактора.

Нельзя обойти без внимания тех сотрудников ООО Издательство «Научтехлитиздат», которые способствовали изданию настоящей книги.

І ГЛАВА. ВОДНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВОГРУНТОВ

§ 1.1. ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Приводятся некоторые употребляемые разъяснения наносонесущих потоков, что даст возможность легко понять суть процесса формирования, движения, заиления наносов в руслах и на конусах выносов горных водотоков.

Плотность жидкости. Плотность ρ характеризует распределение массы M по объему W . Плотность однородной жидкости равна отношению массы к ее объему:

$$\rho = \frac{M}{W}. \quad (1.1)$$

Единица измерения плотности в системе «СИ» принята кг/м^3 .

Удельный (объемный) вес однородной жидкости γ определяется, «СИ» как отношение веса G жидкости к ее объему:

$$\gamma = \frac{G}{W}. \quad (1.2)$$

Учитывая, что $G = Mg$ (g – ускорение силы тяжести), получим:

$$\gamma = \rho g. \quad (1.3)$$

В системе «СИ» единица измерения удельного веса принята $\frac{\text{НЬЮТОН}}{\text{М}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{М}^3}$.

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу слоев. Вязкость проявляется при относительном перемещении слоев жидкости на поверхностях соприкосновения сдвигу, называемым силами внутреннего трения, или силами вязкости:

$$\frac{T}{E} = \tau = \pm \mu \frac{du}{dn}, \quad (1.4)$$

где T – сила трения;

E – площадь поверхности соприкасания слоев;

μ – коэффициент динамической вязкости, т.е. коэффициент, характеризующий свойство данной жидкости;

du – градиент скорости по нормали;

dn – расстояние между слоями двух смежных слоев;

τ – напряжение сил трения, возникающих на поверхности соприкасания слоев.

Знак плюс или минус в уравнении (1.4) принимают в зависимости от знака градиента скорости $\frac{du}{dn}$, с учетом требования, чтобы напряжение сил трения τ было положительным.

Размерность μ в системе «МКГСС» составляет кгс·сек/м²; в системе «СИ» – $\frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ или $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{сек}}$ и в системе

«СГС» – $\frac{\text{грамм}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Г}}{\text{см} \cdot \text{сек}}$ или пуаз (пз) т.е.:

$$1 \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} = 1 \text{ пз}; 1 \text{ пз} = 0,1 \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}.$$

Для расчетов часто употребляется коэффициент

кинематической вязкости ν , представляющий отношение коэффициента динамической вязкости и плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.5)$$

Размерность ν в системе «МКГСС» – м²/сек; в системе «СИ» – $\frac{\text{н} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}}{\text{кг}}$ или $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$; системе «СГС» – $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$.

Жидкости, для которых справедлив закон внутреннего трения (1.4), называют ньютоновскими. Существуют жидкости (коллоидные суспензии, гидросмеси из глины, строительные растворы, селевые потоки и др.), для которых зависимость (1.4) выражается другими соотношениями, их именуют неньютоновскими жидкостями. В таких случаях соотношение (1.4) имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{du}{dn}. \quad (1.6)$$

Их движение начинается после того, как внешней силой будет преодолено напряжение сдвига τ_0 . К таким жидкостям относятся связные (гиперконцентрированные наносами) селевые потоки, которые вызывают колоссальные деформации рельефа местности.

Безразмерные числа:

$$\text{Рейнольдса} \quad \text{Re} = \frac{V\ell}{d}, \quad (1.7)$$

где V – средняя по живому сечению скорость потока;
 ℓ – геометрическая характеристика живого сечения потока (H – глубина, d – диаметр трубы, частиц наносов и др.).

$$\text{Фруда} \quad Fr = \frac{V^2}{g\ell}. \quad (1.8)$$

(В некоторых странах применяют число Фруда в форме: $Fr = \frac{V}{\sqrt{g\ell}}$).

§ 1.2. СВОДКА НЕКОТОРЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В РАМКАХ ОДНОМЕРНОГО КВАЗИОДНОРОДНОГО ДВИЖЕНИЯ

Полезность трактовки явления с одномерной точки зрения для решения особенно инженерных задач трудно оценить.

Под одномерным движением подразумевается движение, при котором скорость, давление и другие параметры потока зависят только от одной координаты, направление которой совпадает с направлением вектора скорости. В результате сказанного теряет смысл представление скорости или силы в векторной форме. Отмеченное не исключает плавное изменение параметров потока вдоль движения. Поэтому многие одномерные движение трактуют, как квази-одномерную задачу (плавно изменяющееся неравномерное движение и др.).

Гидравлика, как правило, пользуется осредненными показателями по живому сечению только в одном направлении, что, снижая точность, упрощает фактическое явление, заменяя фактический поток фиктивным потоком, но одновременно расширяет оперативную возможность применения

полученных зависимостей для решения ряда важных практических задач.

В реальных условиях параметры потока (скорость, давление и др.) зависят от координат, т.е. среда является неоднородной.

Одномерная трактовка явления требует усреднения потока по живому сечению. В данном случае усреднение позволяет заменить неоднородный поток однородным фиктивным потоком, при условии сохранения наиболее существенных для рассматриваемой задачи свойств течения. Естественно, что при любом усреднении не могут быть сохранены все свойства среды, так как при этом часть информации о потоке теряется.

Одномерное движение в природе не существует, но в гидравлике эффективно используется указанный подход для решения практических задач.

Аналогично движение однофазного потока полифазных потоков нередко удобнее трактовать с одномерной точки зрения. А это требует, в отличие от однофазного потока, предварительно еще до стадии составления уравнений, в рассмотрение ввести некоторые характеристики для квазиоднородной модели движения. Ниже приводится сводка некоторых общеизвестных соотношений, используемых для решения практических задач.

Две фазы (компоненты) обычно различаются индексами 1 и 2. Фаза 2 часто считается дисперсной.

Рассмотрим одномерное стационарное движение двухфазного потока, в русле с наклоном дна к горизонту углом θ , тогда массовый (весовой) расход смеси:

$$G = G_1 + G_2, \quad (1.9)$$

а объемный расход:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (1.10)$$

Следовательно:

$$Q_1 = \frac{G_1}{\rho_1}; \quad (1.11)$$

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_2}, \quad (1.12)$$

где: ρ – плотность.

Если обозначить через S осредненную по живому сечению объемную концентрацию смеси, то:

$$S = \frac{Q_2}{Q}. \quad (1.13)$$

Тогда массовая (весовая), осредненная по живому сечению, концентрация будет:

$$K = \frac{G_2}{G}. \quad (1.14)$$

Приведенные осредненные по живому сечению скорости U отдельных фаз, выраженные через объемной концентрации, будут:

$$U_1 = SV_1, \quad (1.15)$$

$$U_2 = (1-S)V_2, \quad (1.16)$$

$$U = U_1 + U_2, \quad (1.17)$$

где: V_1 ; V_2 – соответственно истинные скорости фаз (компонентов).

Для характеристики осредненного движения квазиоднородной смеси:

$$U_1 = \frac{Q_1}{\omega}, \quad (1.18)$$

$$U_2 = \frac{Q_2}{\omega}, \quad (1.19)$$

$$U = \frac{Q_1 + Q_2}{\omega}, \quad (1.20)$$

где: ω – площадь живого сечения смеси.

Из приведенных соотношений следует:

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{1-K}{K}, \quad (1.21)$$

$$\frac{1-K}{K} = \frac{V_1 \rho_1 (1-S)}{V_2 \rho_2 S}, \quad (1.22)$$

$$V_{1,2} = (V_1 - V_2) = -V_{2,1}. \quad (1.23)$$

Средневзвешенную скорость смеси можно определить по зависимости:

$$V = \frac{\frac{\rho_1 V_1}{S} + \frac{\rho_2 V_2}{1-S}}{\frac{\rho_1}{S} + \frac{\rho_2}{1-S}}. \quad (1.24)$$

Уравнение неразрывности (при постоянном расходе вдоль пути) имеет вид:

$$G = \rho V \omega = const. \quad (1.25)$$

А уравнение динамики для общего случая:

$$G \frac{dV}{dx} + \omega \frac{dP}{dy} - \chi \tau - \omega \rho g \sin \theta = 0. \quad (1.26)$$

где: P – давление; χ – смоченный периметр русла; τ – осредненное касательное напряжение; g – ускорение силы тяжести.

Приведенные зависимости общеизвестны. Ими пользуются при решении многих инженерных задач.

Уместно привести определение терминов осесимметрического движения и транспортирующей способности.

Движение называется осесимметрическим, если все векторы скорости лежат в полуплоскостях, проходящих через некоторую прямую, называемую осью симметрии, причем во всех точках полуплоскостей картина поля одинакова.

Свойства потока, переносить вместе с водой твердые частицы грунта – наносы, называют транспортирующей способностью потока.

§ 1.3. ВЛИЯНИЕ ВОЛНООБРАЗНОГО ДВИЖЕНИЯ СКЛОНОВОГО СТОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Одним из ведущих факторов эрозии почв являются климатические условия, оказывающие на нее как непосредственное, так и косвенное влияние. К числу непосредственных климатических факторов эрозии относятся осадки. Однако, между количеством осадков и интенсивностью эрозии нет однозначной связи, так как эрозионный процесс совершается не столько осадками, сколько за счет живой силы поверхностного стока, величина которого определяется наряду с параметрами дождя и другими показателями (влияние растительного покрова на сопротивляемость почвогрунтов размыву, неоднородность показателя прочности почвогрунтов, инфильтрационная способность, сцепление и др.).

Установлено, что водная эрозия почвогрунтов представляет собой сложную совокупность физических, механических, биологических и других факторов. Если к сказанному добавить наличие взвесей в виде частиц грунта в водном потоке и рассмотреть вопрос с позиции потерь устойчивости первоначального равномерного движения в форме появления волн на поверхности склонового потока малой глубины, описание протекающего процесса еще более усложняется. Становится необходимым предварительно прогнозировать возможность появления катящихся волн на свободной поверхности, что со своей стороны увеличивает интенсивность эрозии почвогрунтов.

Вопрос устойчивости первоначального равномерного движения водного потока и возможности появления волн на свободной поверхности в водотоках одним из первых был рассмотрен В.В. Ведерниковым [1]. Механизм размыва дна прямого потока при воздействии стационарной волны был рассмотрен в [14]. В последние годы в журнале «Почвоведение» появился ряд работ, посвященных механизму эрозии при склоновых потоках. В работе Сухановского [15] предложена физически обоснованная модель эрозии почв для периода снеготаяния. В работах Ларионова и др. рассмотрены механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях [11], уравнение транспортирования наносов и разрушения почвенных агрегатов при воздействии стационарной волны [13]. Григорьевым [5] экспериментально разработаны и теоретически обоснованы полуэмпирические уравнения размывающей и транспортирующей способности потоков малой глубины с учетом ряда особенностей взаимодействия их с размываемой почвой. Особо хочется

указать на работы Эглита [18] и Кузнецова, Глазунова [10], которые позволяют решить ряд актуальных вопросов, связанных с эрозией почв, в том числе ручейковой и ирригационной эрозии почв малой глубины с применением одномерных уравнений потока с переменным расходом вдоль пути в рамках неустановившегося движения.

Эрозионные процессы особенно интенсивно происходят в горных и предгорных условиях, где они нередко достигают катастрофических размеров, смывая несколько десятков тонн почв с гектара в течении года. По данным Международного центра по интеграции и развитию горных регионов в отдельных случаях потери почв колеблются от 5 до 2000 тонн/га за год.

Во время перемещения жидкого стока малой глубины вдоль склона нередко возникает волновое движение, способствующее интенсификации эрозионных процессов.

Не останавливаясь на механизме воздействия склонового стока на процесс эрозии почв (предельное равновесие активных и пассивных сил, воздействие подъемной силы и др.), а также на определении критических скоростей (в свое время были предложены многочисленные формулы), лишь отметим, что при расчете критической скорости отрыва частиц почвогрунта, следует вводить не среднюю по живому сечению скорость равномерно движущегося потока, а скорость волны.

Волны как в водотоках, так и на склонах ландшафтов, переносят изменения основных гидравлических и гидрологических параметров стока (уменьшение или увеличение расхода, скорости, глубины) как непрерывно, так и ступенчато.

Первый тип волн именуют непрерывными волнами, второй – динамическими. Наличие непрерывных волн на наклонной поверхности имеет место во время проливного дождя, особенно с переменной интенсивностью осадков. Возникающие в таком случае волны нередко характеризуются значительной амплитудой, что увеличивает как размывающую, так и транспортирующую способность твердых частиц потоком, что часто не учитывается при оценке размывающей скорости. Обычно неразмывающая скорость устанавливается с позиции равномерного движения потока без учета волнообразного характера склонового стока.

Естественно, что размывающая способность стока при волновом режиме движения должна быть больше, чем равномерно движущегося потока.

Скорость непрерывной волны устанавливается из условия неразрывности воды, проходящей через контрольный объем, движущейся со скоростью волны и ограниченный створами 1÷1 и 2÷2. На рис. 1.1 показана волна, распространяющаяся со скоростью V_w из плоскости живого сечения ω в плоскость, где площадь живого сечения потока равна $\omega + \partial\omega$.

Относительно фронта волны приток и сток равны, следовательно:

$$Q - \omega V_w = Q + \partial Q - V_w (\omega + \partial\omega),$$

откуда

$$V_w = \frac{\partial Q}{\partial \omega}, \quad (1.27)$$

где Q – расход потока.

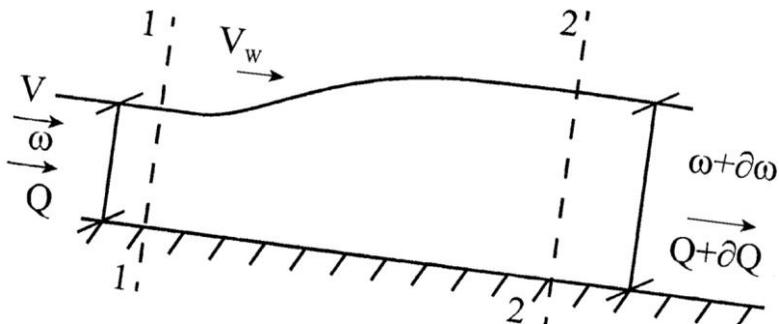


Рис. 1.1. Схема распространения непрерывной волны

Учитывая, что в створе 1-1 $Q = \omega V$, тогда взамен (1.27) получим:

$$V_w = V + \omega \frac{\partial V}{\partial \omega}, \quad (1.28)$$

Из (1.28) следует, что скорость распространения волны превосходит среднюю по живому сечению скорость V на величину $\omega \frac{\partial V}{\partial \omega}$.

Принимая во внимание, что ширина склона B обычно значительно превосходит глубину H потока т.е. $B \gg H$, возможно рассмотреть сток на плоской наклонной поверхности шириной 1 м. Это возможно потому, что распространение волн наблюдается только в сторону движения поступательного потока. Следовательно,

$$V_w = V + H \frac{dV}{dH}. \quad (1.29)$$

Обозначая расход стока в створе 1-1 через $q = \frac{dQ}{dH} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right)$, тогда зависимость (1.27) примет вид:

$$V_w = \frac{dq}{dH}. \quad (1.30)$$

Поток по склону передвигается равномерным турбулентным режимом движения (до появления волн) и описывается формулой Шези $Q = \omega C \sqrt{Ri}$, где: C – коэффициент Шези, $R = \frac{\omega}{\chi}$ – гидравлический радиус, χ – смоченный периметр, i – уклон плоской поверхности склона.

В силу того, что рассматривается плоская задача шириной 1 м, то формула Шези примет вид $q = HC\sqrt{Hi}$ или:

$$q = CH^{1.5}\sqrt{i}. \quad (1.31)$$

Обозначим через $K = C\sqrt{i} = const$. Тогда (1.31) примет вид:

$$q = KH^{1.5}. \quad (1.32)$$

Если принять во внимание, что для равномерного движения $V = \frac{q}{H}$, то тогда будем иметь:

$$V_w = 1,5KH^{0.5}. \quad (1.33)$$

Следует принять во внимание, что

$$V = \frac{q}{H} = \frac{KH^{1.5}}{H} = KH^{0.5}. \quad (1.34)$$

Сравнивая (1.31) и (1.32), получим:

$$V_w = 1,5V, \quad (1.35)$$

т.е. скорость непрерывной волны в полтора раза больше средней по живому сечению скорость потока при равномерном режиме движения.

Зависимость (1.35) указывает на необходимость учета

наличия волнообразного движения потока на склонах для количественной оценки интенсивной эрозии почв.

Скорость склонового стока определяет силовое воздействие на частицы, агрегаты, отдельности почвогрунтов при их отрыве, а также транспортирующую способность твердых частиц почвы самого потока. Для прогнозирования этой критической скорости, при которой начинается процесс эрозии в настоящее время распространен ряд методов из них наиболее известные [2-4, 6-9, 12, 14, 16, 19, 20].

Скорость динамической волны C_1 можно определить по формуле Лагранжа [17]:

$$C_1 = \sqrt{gH}, \quad (1.36)$$

где: g – ускорение силы тяжести.

Тогда принимая во внимание, что когда непрерывные волны обгоняют динамические волны, то первоначальное равномерное движение по склону будет неустойчивым, что реализуется появлением на свободной поверхности склонового стока волн со значительной амплитудой, т.е.

$$V_w = V + C_1. \quad (1.37)$$

Подобные волны можно наглядно обнаружить даже на наклонных участках улиц во время приливного дождя даже в местах улиц незначительными уклонами при малых глубинах стока.

Подставляя в (1.37) зависимости (1.33), (1.34) и (1.36), можно получить критериальное соотношение для прогнозирования волн на свободной поверхности склонового стока следующим неравенством:

$$C > 2\sqrt{\frac{g}{i}}. \quad (1.38)$$

Учитывая, что по зависимости академика Н.Н. Павловского [17] коэффициент Шези (в метрической системе)

$$C = \frac{1}{n} H^Y, \text{ где } n - \text{коэффициент шероховатости склона;}$$

$$Y = 1,5\sqrt{n} \text{ показатель степени при } H < 1 \text{ м.}$$

Когда минимальная глубина склонового стока, при которой возможно возникновение волн на свободной поверхности потока будет:

$$H > \sqrt[3]{2n\sqrt{\frac{g}{i}}}, \text{ м.} \quad (1.39)$$

Непрерывные волны будут переносить соответствующие значения глубин стока, причем каждая волна будет распространяться со своей скоростью в соответствии с (1.30). Если в начальный момент формирования стока время $t = 0$ при $X = 0$, то с этого момента начнут распространяться волны, соответствующие всем значениям H . Согласно зависимости (1.30), при дальнейшем движении большие значения H будут переноситься быстрее. Спустя время t волна пройдет расстояние:

$$X > V_w t, \quad (1.40)$$

и положение каждой волны в плоскости Ht примет вид (рис. 1.2).

Исходя из отмеченного, например, общеизвестная формула В.Н. Гончарова [3] критической скорости воды для несвязных почвогрунтов примет вид:

$$V_{\Delta} = \frac{1,25 \cdot 1,5V}{\lg\left(\frac{6,15H}{\Delta}\right)} = \frac{1,875V}{\lg\left(\frac{6,15H}{\Delta}\right)}, \quad (1.41)$$

где: V_{Δ} – донная скорость на высоте выступа частиц Δ [обычно $\Delta = 0,7d$; d – средний диаметр частиц несвязного или агрегатов (относительно) связного грунта, для неоднородных почвогрунтов $\Delta = 0,7d_{95}$, (d_{95} – диаметр частиц, меньше которых в данном грунте содержится по массе соответственно 95%)].

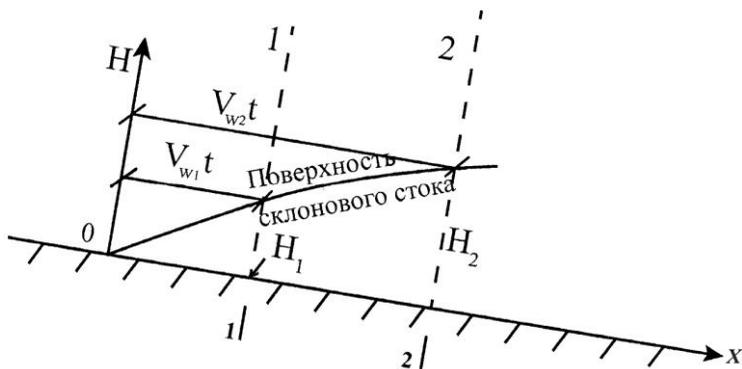


Рис. 1.2. Стеkanie склонового стока с переменной глубиной

Учет наличия волнообразного движения склонового стока в известных классических методах расчета [2-4, 6-9, 12, 14, 16, 19, 20] по изложенной в настоящей работе методике не представляет трудности, на что в данной работе не останавливаемся.

Таким образом:

1. прогноз возникновения волн на свободной поверхности склонового стока следует оценить по зависимостям (1.38) или (1.39);

2. оценивая размывающую способность склонового стока (водной эрозии почв) при наличии волнового движения, в существующей расчетной зависимости среднюю по

живому сечению скорость для равномерного движения следует заменить скоростью волнового движения потока по формуле (1.35), так как скорость волнового движения в полтора раза больше средней скорости потока при равномерном режиме движения.

§ 1.4. ПРОГНОЗ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В ПОТОКАХ МАЛОЙ ГЛУБИНЫ ПРИ ЛИНЕЙНОМ РАЗМЫВЕ ПОЧВ

Вопросам линейного (ручейкового) размыва почв посвящено ряд теоретических и экспериментальных исследований [21-25 и др.]. В большинстве указанных работ рассматриваются вопросы равномерного движения чистой воды малой глубины, т.е. потоки не содержащие взвеси наносов^{*)} и не допускающие возможность появления волн на свободной поверхности равномерно движущегося потока. Это накладывает свой отпечаток на интенсивность размыва почв, так как скорость волны больше средней по живому сечению скорости равномерно движущегося потока. В потоках малой глубины часто наблюдаются скатывающиеся волны во время проливных дождей на наклонных участках улиц даже с незначительной шероховатостью поверхности.

Поэтому анализ волнового движения потока, несущего во взвешенном состоянии частицы почвогрунтов тяжелее воды, в ручейках с повышенной шероховатостью представляет как теоретический, так и практический интерес.

Имеются общие уравнения гидродинамики турбулентного течения взвесенесущего потока [26-30].

^{*)} за исключением [25].

В работе [30] одномерные уравнения взвесенесущих потоков получены из гидродинамических зависимостей [27], а в работе [32] – из [29].

Так как более общую форму одномерного уравнения взвесенесущих потоков несут [31-32], остановимся на них для решения задачи.

А) ВЫВОД ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕСЕНЕСУЩЕГО ПОТОКА

Уравнения динамики взвесенесущего потока для неустановившегося движения [31, 32] имеет вид:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} + \frac{\tilde{\alpha} \tilde{V}}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x} - \frac{(\tilde{\alpha} - 1) \cdot \tilde{V}}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial t} + T \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} - i_0 + \tilde{J}_{mp} = 0. \quad (1.42)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial t} = 0, \quad (1.43)$$

где: \tilde{V} – средняя по живому сечению скорость смеси;

$\tilde{\omega}$ – площадь живого сечения смеси;

g – ускорение силы тяжести;

\tilde{H} – максимальная глубина смеси;

$\tilde{\alpha}$ – полный корректив количества движения, учитывающий неравномерность распределения осредненных скоростей и пульсационный напор по сечению потока;

i_0 – уклон дна ручейки; \tilde{Q} – расход смеси;

\tilde{J}_{mp} – сумма всех диссипативных членов, представляющая собой уклон гидравлических сопротивлений смеси;

$$T = \frac{W\tilde{\omega} + \sigma K_2 B \nu (S_{cp} - S_0)}{W\tilde{\omega}(1 + \sigma S_{cp})}, \quad (1.44)$$

т.н. безразмерный параметр гидравлики взвесенесущих потоков.

$$\sigma = \frac{\rho^* - \rho}{\rho} \text{ – относительная плотность;}$$

ρ^* , ρ – соответственно плотности взвеси (частиц почвы) и воды;

S_{cp} – средняя по сечению объемная концентрация взвеси;

S_0 – концентрация взвеси на поверхности потока;

B – ширина потока смеси;

W – средняя гидравлическая крупность взвеси в смеси;

ν – кинематический коэффициент вязкости смеси;

$K_2 = 0,6$ – экспериментальный коэффициент, учитывающий различие между коэффициентами турбулентного обмена несущей и несомой фазами.

Не трудно заметить, что если рассмотреть установившийся режим движения при $S_{cp} = S_0 = 0$ и пренебречь пульсационной составляющей полного корректива, т.е. $\tilde{\alpha} = \alpha$ зависимость (1.42) совпадает с уравнением проф. Г.А. Петрова [33] для водного потока, а при $\alpha = 1$ зависимость (1.42) принимает вид уравнений И.И. Коновалова [33].

Постараемся решить задачу с привлечением метода „малых“ возмущений.

Если устойчивому невозмущенному состоянию равномерного турбулентного взвесенесущего потока соответствует формула Шези:

$$i = \tilde{J}_{mp} = \frac{\tilde{V}_0^2}{C_0^2 \tilde{R}}, \quad (1.45)$$

то возмущенное состояние такого потока будет описываться условиями (1) и (2), при этом полагая, что

$$\tilde{V} = \tilde{V}_0 + \tilde{U}; \quad \tilde{H} = \tilde{H}_0 + \tilde{h}; \quad \tilde{\omega} = \tilde{\omega}_0 + B_0 \tilde{h}, \quad (1.46)$$

где: индекс „0“ означает отнесение помеченных величин равномерному движению, а \tilde{U} и \tilde{h} – скорость и высота волн возмущения, который являются настолько малыми, что их произведениями и квадратами можно пренебречь, то тогда будем иметь приведенные ниже выражения (1.47):

1. $\tilde{V}^2 = (\tilde{V}_0 + \tilde{U})^2 = \tilde{V}_0^2 + 2\tilde{V}_0\tilde{U} + \tilde{U}^2 = \tilde{V}_0^2 + 2\tilde{V}_0\tilde{U};$
2. $\frac{\tilde{V}}{\tilde{\omega}} = \frac{(\tilde{V}_0 + \tilde{U})(\tilde{\omega}_0 - B_0\tilde{h})}{(\tilde{\omega}_0 + B_0\tilde{h})(\tilde{\omega}_0 - B_0\tilde{h})} = \frac{\tilde{V}_0 + \tilde{U}}{\tilde{\omega}_0} \left(1 - \frac{B_0\tilde{h}}{\tilde{\omega}} \right);$
3. $\frac{\tilde{V}}{\tilde{\omega}} \cdot \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial t} = \frac{\tilde{V}_0 B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t};$
4. $\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{V}\tilde{\omega}) = \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{\omega}_0\tilde{V}_0 + \tilde{\omega}_0\tilde{U} + B_0\tilde{V}_0\tilde{h} + B\tilde{h}\tilde{U}) =$
 $= \tilde{\omega} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + B_0\tilde{V}_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x};$
5. $\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} = \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t};$
6. $\frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial t} = B_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t};$
7. $\frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x};$

$$\begin{aligned}
8. \quad & \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{V}^2}{\partial x} = \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{V}_0 + 2\tilde{V}\tilde{U}) = \frac{\tilde{V}_0}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x}; \\
9. \quad & \tilde{V} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x} = (\tilde{V}_0 + \tilde{U}) \frac{\partial (\tilde{V}_0 + \tilde{U})}{\partial x} = \tilde{V}_0 \frac{\partial (\tilde{V}_0 + \tilde{U})}{\partial x} + \\
& + \tilde{U} \frac{\partial (\tilde{V}_0 + \tilde{U})}{\partial x} = \tilde{V}_0 \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x}; \\
10. \quad & T \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} = T_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x}. \tag{1.47}
\end{aligned}$$

Если воспользоваться показательной зависимостью Б.А. Бахметева для модуля расхода [17]

$$\frac{\tilde{K}}{\tilde{K}_0} = \left(\frac{\tilde{H}}{\tilde{H}_0} \right)^{\frac{\chi}{2}}, \tag{1.48}$$

то тогда, согласно Н.Т. Мелешенко [34], уклон гидравлических сопротивлений с точностью лишь малых первого порядка выразится соотношением:

$$\frac{\tilde{V}^2}{\tilde{C}^2 \tilde{R}} = j_0 \left[1 + \frac{2\tilde{U}}{\tilde{V}_0} + \left(\frac{2\tilde{B}_0}{\tilde{\omega}} - \frac{\chi}{\tilde{H}_0} \right) \tilde{h} \right], \tag{1.49}$$

где: χ – гидравлический показатель русла;

$$i_0 = \tilde{J} = \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{K}_0^2} \quad \text{– уклон гидравлических сопротивлений}$$

при равномерном движении, т.е. уклон дна ручейки.

Используя и (1.47) и (1.49) уравнения (1.42) и (1.43) примут вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\tilde{\alpha}}{g} \tilde{V} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} - \frac{(\tilde{\alpha}-1) \cdot \tilde{V} B_0}{g \tilde{\omega}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \\ & + T_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} + \frac{2\tilde{U}i_0}{\tilde{V}_0} + \left(\frac{2B_0}{\tilde{\omega}_0} - \frac{\chi}{\tilde{H}_0} \right) \tilde{h}i_0 = 0 \end{aligned} \quad (1.50)$$

$$B_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \tilde{\omega}_0 \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \tilde{V}_0 B_0 \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = 0. \quad (1.51)$$

Из зависимости (1.51)

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} = \frac{B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} - \frac{\tilde{V}_0 B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x}. \quad (1.52)$$

Откуда
$$\frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x^2} = -\frac{B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t} - \frac{\tilde{V} B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}^2}{\partial x^2}. \quad (1.53)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x \partial t} = -\frac{B}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} - \frac{\tilde{V}_0 B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t}. \quad (1.54)$$

Дифференцируя (1.50) по x получим:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x \partial t} + \frac{\tilde{\alpha}}{g} \tilde{V} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x^2} - \frac{\tilde{\alpha} \tilde{V} B_0}{g \tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t} + \frac{\tilde{V}_0 B_0}{g \tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t} + \\ & + T_0 \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x^2} + \frac{2i_0}{\tilde{V}} \cdot \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \frac{2B_0 i_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} - \frac{i_0 \chi}{\tilde{H}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (1.55)$$

Подставляя (1.52), (1.53) и (1.54) в (1.55), после простейших операции будем иметь:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g} \cdot \frac{B_0}{\tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} + 2 \frac{\tilde{\alpha} \tilde{V}_0}{g \tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t} + \left[\frac{\tilde{\alpha} B_0 \tilde{V}^2}{g \tilde{\omega}_0} - T_0 \right] \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x^2} + \\ & + \frac{2i_0 B_0}{\tilde{V} \tilde{\omega}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \frac{i_0 \chi}{\tilde{H}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

Умножая полученное уравнение на $\frac{g\tilde{\omega}_0}{B_0}$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} + 2\tilde{\alpha}\tilde{V} \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x \partial t} \left[\tilde{\alpha}V^2 - T_0 \frac{g\tilde{\omega}_0}{B_0} \right] \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x^2} + \\ + \frac{2i_0 g}{\tilde{V}_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + \frac{i_0 \chi g \tilde{\omega}_0}{\tilde{H}_0 B_0} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (1.56)$$

Линейное уравнение (1.56) является основным дифференциальным уравнением возмущенного состояния взвесенесущего турбулентного потока. Если принять что $\tilde{\alpha} = 1$; $\bar{S}_{cp} = \bar{S}_0 = 0$ уравнение (1.56) переходит в уравнение теории волны малой амплитуды для чистой воды.

Б) ЧАСТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕСЕНЕСУЩЕГО ПОТОКА И ЕГО АНАЛИЗ

Для установления критериального условия потери устойчивости первоначального равномерного режима движения и появления волн на свободной поверхности, при движении взвесенесущего потока в ручейках, ищем частное решение линейного дифференциального уравнения возмущенного состояния взвесенесущего потока (1.55) в виде простого гармонического колебания с частотой K_1 , отвечающее распределению возмущения (волн) вдоль положительных значений X (т.е. по направлению поступательного потока):

$$\tilde{h} = f(x) \cos K_1 t, \quad (1.57)$$

где: $f(x)$ – некоторая функция, зависящая от x .

Пользуясь формулой Эйлера, это уравнение можно представить в комплексной форме, удобной для дальнейших преобразований:

$$\tilde{h} = f_1(x)e^{ik_1t}, \quad (1.58)$$

где: $f_1(x)$ – некоторая функция с вещественной и мнимой частью, зависящая только от x .

Дифференцируя (1.58), получим:

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = f_1'(x)e^{ik_1t}; \quad (1.59)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x^2} = f_1''(x)e^{ik_1t}; \quad (1.60)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} = f_1(x)ik_1e^{ik_1t}; \quad (1.61)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t \partial x} = f_1'(x)ik_1e^{ik_1t}; \quad (1.62)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} = f_1(x)i^2k_1^2e^{ik_1t}; \quad (1.63)$$

Так как $i = \sqrt{-1}$; $i^2 = -1$, поэтому:

$$\frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} = -f_1(x)i^2k_1^2e^{ik_1t}; \quad (1.64)$$

Подставляя (1.57÷1.64) в (1.56), т.е. в дифференциальное уравнение возмущенного состояния взвесенесущего потока, после сокращения на e^{ik_1t} и группировки членов, получим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\left[\alpha \tilde{V}_0^2 + T_0 \frac{g \tilde{\omega}_0}{B_0} \right] f_1''(x) + \left[2\tilde{\alpha} V_0^2 i K_1 + \frac{i_0 \chi g \tilde{\omega}_0}{\tilde{H}_0 B_0} \right] f_1'(x) + \left[\frac{2i_0 g}{\tilde{V}_0} i K_1 - K_1^2 \right] f_1(x) = 0 \quad (1.65)$$

Если обозначить:

$$T_1^2 = \left[\tilde{\alpha} \tilde{V}_0^2 - T_0 \frac{g \tilde{\omega}_0}{B_0} \right] \quad (1.66)$$

$$T_2 = \frac{i_0 \chi g \tilde{\omega}_0}{\tilde{H}_0 B_0} \quad (1.67)$$

$$T_3 = \frac{2i_0 g}{\tilde{V}_0} \quad (1.68)$$

С учетом (1.66), (1.67), (1.68) характеристического уравнения дифференциального уравнения (1.65) второго порядка с постоянными коэффициентами, примет вид:

$$T_1^2 Y^2 + [2\tilde{\alpha} V_0 i K_1 + T_2] Y + [T_3 i K_1 - K_1^2] = 0. \quad (1.69)$$

Решение (1.69) дает:

$$Y = \frac{-(2\tilde{\alpha} \tilde{V}_0 i K_1 + T_2) \pm \sqrt{(2\tilde{\alpha} \tilde{V}_0 i K_1 + T_2)^2 - 4T_1^2 (T_3 i K_1 - K_1^2)}}{2T_1^2} \quad (1.70)$$

Для того, чтобы разделить вещественные и мнимые части в зависимости (29) примем обозначения:

$$(a + ib)^2 = (2\tilde{\alpha} \tilde{V}_0 i K_1 + T_2)^2 - 4T_1^2 (T_3 i K_1 - K_1^2) \quad (1.71)$$

или

$$a^2 + 2aib + b^2 = T_2^2 + 4\tilde{\alpha} \tilde{V}_0 i K_1 T_2 - 4\tilde{\alpha} \tilde{V}_0^2 i K_1^2 - 4T_1^2 T_3 i K_1 + 4T_1^2 K_1^2$$

т.е.

$$a^2 - b^2 = T_1^2 - 4\tilde{\alpha}^2 \tilde{V}_0 K_1^2 + 4T_1^2 K_1^2 \quad (1.72)$$

$$2aib = 2i(2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2K_1 - 2T_1^2T_3K_1)$$

или

$$ab = 2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2K_1 - 2T_1^2T_3K_1$$

Откуда

$$b = \frac{K_1}{a}(2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2 - 2T_1^2T_3). \quad (1.73)$$

Обозначим правую часть зависимости (1.72) через: „ Π_0 “, т.е.

$$\Pi_0 = T_1^2 - 4\tilde{\alpha}^2V_0K_1^2. \quad (1.74)$$

Подставляя (1.73) и (1.74) в (1.72), после несложных преобразований получим:

$$a = \left[\frac{\Pi_0}{2} \mp \sqrt{\frac{\Pi_0^2}{4} + K_1^2[2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2 - 2T_1^2T_3]^2} \right]^{1/2}. \quad (1.75)$$

Зная „ a “ и „ b “ в виде (1.75) и (1.73), решение (1.70), с учетом (1.71), может быть записано так:

$$Y_{1,2} = \frac{1}{2T_1^2} \left\{ -(2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0iK_1 + T_2) \pm (a + ib) \right\} \quad (1.76)$$

или вводя обозначения:

$$B_1' = \frac{a - T_2}{2T_1^2} \quad (1.77)$$

$$B_2' = \frac{b - 2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0K_1}{2T_1^2} \quad (1.78)$$

$$B_1'' = -\frac{a + T_2}{2T_1^2} \quad (1.79)$$

$$B_2'' = -\frac{b + 2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0K_1}{2T_1^2} \quad (1.80)$$

Тогда получим:

$$Y_1 = B_1^1 + iB_2^2, \quad Y_2 = B_1^{11} + iB_2^{11} \quad (1.81)$$

Таким образом, частное решение (1.56), отвечающее распространению воли возмущения вдоль движения, будет:

$$\tilde{h} = \Pi[f_1(x)e^{ik_1t}] = \Pi[M e^{yx+ik_1t}], \quad (1.82)$$

где: Π – символ вещественной части;

M – произвольная постоянная;

Y – одно из значений характеристического уравнения (1.68), определяемое зависимостями (1.81).

Вводим обозначения:

$$M = A_0 e^{i\psi}, \quad (1.83)$$

где: A_0 – новая постоянная.

После отделения вещественной части, выражение (1.82) примет вид:

$$\tilde{h} = A_0 e^{B_1 x} \cos(B_2 x + K_1 t + \psi), \quad (1.84)$$

причем B_1 и B_2 в этом выражении, в зависимости от того, какой из корней уравнения (1.69) принимается в выражении (1.82), в соответствии с формулами (1.81), определяется по зависимостям (1.77)÷(1.79).

Легко заметить, что принятые в выражении (1.81) $Y = Y_2$ и, следовательно, $B_1 = B_1''$ и $B_2 = B_2''$ в выражении (1.82), приводит к условию затухания возмущения вдоль движения, но в то же время трудно определить, при каких условиях равномерного потока возмущение будет затухать, т.е. движение будет устойчивым.

Наоборот, при $Y = Y_1$, т.е. при $B_1 = B_1^1$ и $B_2 = B_2^1$ в уравнении (1.84) для того, чтобы $B_1 < 0$ (см. 1.76) может

иметь место при условии:

$$T_2 > a \quad (1.85)$$

т.к. $a > 0$ и $T_1^2 = \tilde{\alpha}\tilde{V}_0 - T \frac{g\tilde{\omega}_0}{B} > 0$ следовательно, первоначальное равномерное течение потока будет устойчивым при условии (1.85).

В) КРИТЕРИЙ ПЕРЕХОДА РАВНОМЕРНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ВЗВЕСЕНЕСУЩЕГО ПОТОКА В ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ

Подставляя в неравенство (1.85) значение „ a “ из (1.75), получим:

$$T_2^2 > \frac{\Pi_0}{2} \pm \sqrt{\frac{\Pi_0^2}{4} + K_1^2(2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2 - 2T_1^2T_3)^2},$$

откуда:

$$\left(T_2^2 - \frac{\Pi_0}{2}\right)^2 > \frac{\Pi_0^2}{4} + K_1^2(2\tilde{\alpha}\tilde{V}_0T_2 - 2T_1^2T_3)^2$$

или

$$T_2^4 - \Pi_0 T_2^2 > 4K_1^2 \tilde{\alpha}^2 \tilde{V}_0^2 T_2^2 - 8K_1^2 \tilde{\alpha} \tilde{V}_0 T_1^2 T_3 T_2 + 4K_1^2 T_1^4 T_3^2$$

Учитывая (1.74) и после сокращения на $4K_1^2 T_1^2$, получим:

$$-T_2^2 > T_1^2 T_3^2 - 2\tilde{\alpha} T_2 T_3 \tilde{V}_0$$

Учитывая (1.66), (1.67) и (1.68), будем иметь:

$$T_0 \frac{g\tilde{\omega}_0}{B_0\tilde{V}_0^2} > \tilde{\alpha} + \frac{\chi^2 \tilde{\omega}_0^2}{4\tilde{H}_0^2 B_0^2} + 2\tilde{\alpha} \left(\frac{\chi \tilde{\omega}}{2B_0 \tilde{H}_0} \right)$$

откуда

$$\frac{1}{Fr_0} > \frac{1}{T_0} [\mu^2 - 2\tilde{a}\mu + \tilde{a}], \quad (1.86)$$

где

$$Fr_0 = \frac{\tilde{V}_0^2 B_0}{g \tilde{\omega}_0}, \quad (1.87)$$

$$\mu = \frac{\tilde{\omega}_0 \chi}{2B_0 \tilde{H}_0}. \quad (1.88)$$

Условие (1.86) выражает критериальное соотношение устойчивости первоначального равномерного движения турбулентного взвесенесущего потока т.е. при (1.86) волны на свободной поверхности потока в ручейках не образуются.

В приведенных зависимостях гидравлический показатель ручейка χ зависит от формы поперечного сечения и шероховатости. Конкретное значение можно установить по рекомендациям Б.А. Бахметева [17] или по зависимости Р.Р. Чугаева.

Значения \tilde{a} можно определить по формуле А.С. Образовского [35]:

$$\tilde{a} = \frac{(1 + K'_3)^2 (1 + K'_4)^2}{(1 + 2K'_3)(1 + 2K'_4)}. \quad (1.89)$$

Параметры в зависимости (1.89) выражаются с помощью коэффициента Шези „ C^* “ и постоянной Кармана χ^* :

$$K'_3 = \frac{\sqrt{g}}{\chi^*}; \quad K'_4 = 2K'_3 \left(1 - \frac{B}{\chi} \right);$$

χ – сточенный периметр.

Из (1.86) непосредственно вытекает, что при отсутствии взвеси т.е. $\tilde{S}_{cp} = S = 0$, получаем:

$$\frac{1}{Fr_0} > (\mu^2 - 2a_0\mu + a_0),$$

т.е. соотношение Т.Г. Войнич-Сяноженцкого [36].

Если принять в зависимости (1.86) $a \approx \tilde{a} \approx 1$, получается условие устойчивости Ведерникова-Картвелишвили [37,38] и имеет вид:

$$\frac{1}{Fr_0} > \frac{\omega_0}{B_0 K_0} \left(\frac{dK}{dH} \right)_0 - 1, \quad (1.90)$$

где $Fr_0 = \frac{V_0^2 B_0}{g \omega_0}$.

Для доказательства вышесказанного, воспользуемся показательской зависимостью Б.А. Бахметева (1.48) для

производной $\left(\frac{dK}{dH} \right)_0$, входящей в (1.90), получим выраже-

ние $\left(\frac{dK}{dH} \right)_0 = \frac{\chi K_0}{2H_0}$. Подставляя в (1.90), получим:

$$\frac{1}{\sqrt{Fr_0}} > \frac{\chi \omega_0}{2B_0 H_0} - 1, \quad (1.91)$$

или возводя в квадрат, получаем критерий устойчивости Ведерникова-Картвелишвили [37,38].

Если принять $\bar{a}_0 = \bar{a}$, т.е. пренебречь величиной „пульсационного давления“, то при $\bar{S}_{cp} = \bar{S}$ критерий (1.86) практически оказывается совпадающим с критерием Иваса-Картвелишвили.

Анализ (1.86) показывает, что в зависимости от концентрации взвеси, гидравлической крупности наносов, плотности взвеси и др., взвесенесущий поток может быть

более, менее или равным по степени устойчивости по скорости с эквивалентным водным потоком.

Таким образом, получается, что критериальное соотношение (1.86) позволяет прогнозировать появление на свободной поверхности волн в ручейке малой глубины, когда вода транспортирует взвешенные частицы почвогрунтов.

Поскольку рассчитать транспортирующую способность ручейкового потока трудно, можно просто допустить минимальное значение концентрации взвеси в потоке и осуществить расчет по критерию (1.86), что будет соответствовать самым худшим условиям, когда на поверхности потока будут появляться волны, т.е. прогноз будет осуществлен для наихудшего варианта.

В случае обнаружения возможности появления волн на поверхности потока прогноз эрозии в ручейке следует рассчитывать не по средней по сечению скорости равномерно движущегося потока, а с учетом наличия волн, так как скорость волны в 1,5 раза больше скорости равномерно движущегося потока. В таком случае скорость потока на высоте выступа шероховатости следует назначать по $V_в$, где $V_в = 1,5V$, что было доказано в нашей предыдущей работе.

В таком случае локальная скорость на высоте выступа шероховатости Δ , т.е. донная скорость по интерпретации М.С. Кузнецова и Г.П. Глазунова [22] формула В.Г. Гончарова примет вид:

$$U_{\Delta} = \frac{1,25 \cdot 1,5V}{\lg\left(6,15 \frac{H}{\Delta}\right)} = \frac{1,875V}{\lg\left(6,15 \frac{H}{\Delta}\right)}. \quad (1.92)$$

Нередко при орошении по бороздам и ручейковых потоках в правой части числителя зависимости (1.44), т.к. $W\tilde{\omega}_0 \gg \sigma K_2 B_0 \nu (S_{cp} - S_0)$, то можно пренебречь членом $\sigma K_2 B_0 \nu (S_{cp} - S_0)$; тогда безразмерный параметр гидравлики взвесенесущих потоков принимает вид:

$$T_0 = \frac{1}{1 + \sigma S_{cp}}, \quad (1.93)$$

что значительно упрощает расчеты без значительного понижения точности.

Таким образом:

1. При движении потока с малой глубиной в ручейках на поверхности равномерно движущегося потока часто возникают катящиеся волны, что стимулирует интенсивность смыва почвогрунтов.

2. Влияние волнообразования на процесс интенсивности эрозии можно учитывать в существующих расчетных зависимостях с помощью поправочного коэффициента $V_e = 1,5V$ для средней по живому сечению скорости потока.

Пример

В ручейке треугольным с поперечным сечением с коэффициентами заложения откосов $m = 1$, течет равномерно движущий взвесенесущий поток с максимальной глубиной $H_0 = 0,1$ м и со средней по живому сечению скоростью $V_0 = 1,2$ м/с. Средний диаметр взвешенных частиц почвогрунтов $d = 1,5$ мм (гидравлическая крупность частиц $W = 0,1256$ м/с). Плотности частиц почвогрунтов и воды соответственно $\rho^* = 2,65$ т/м³ и $\rho = 1$ т/м³. Средняя объемная

концентрация взвешенных частиц в воде $S_{cp} = 0,02$.

Требуется прогнозировать возможность появления на свободной поверхности потока (шириной $B_0 = 0,2$ м) волн (т.е. установить потери устойчивости первоначального равномерного движения и его переход в волновой режим движения).

Решение

Площадь живого сечения ручейка $\tilde{\omega}_0 = \frac{B_0 H_0}{2} = \frac{0,2 \cdot 0,1}{2} = 0,01 \text{ м}^2$. Число Фруда при равномерном режиме движения:

$$Fr_0 = \frac{V_0^2 B_0}{g \omega_0} = \frac{1,2^2 \cdot 0,2}{9,81 \cdot 0,02} = 1,468.$$

Определим соотношение: $\mu = \frac{\omega_0 \chi}{2 B_0 H_0}$.

По данным Б.А. Бахметева гидравлический показатель русла для ручейки с треугольным поперечным сечением $\chi = 5$, тогда $\mu = \frac{0,02 \cdot 5}{2 \cdot 0,2 \cdot 0,1} = 2,5$.

Безразмерный параметр гидравлики взвесенесущих потоков определим по зависимости (1.93)

$$T_0 = \frac{1}{1 + \sigma S_{cp}} = \frac{1}{1 + 1,65 \cdot 0,02} = 0,968.$$

Воспользуемся зависимостью (1.86)

$$\frac{1}{Fr_0} > \frac{1}{T_0} [\mu^2 - 2\tilde{a}\mu + \tilde{a}].$$

Для упрощения расчетов, допустим $\tilde{a} \cong 1,2$. Тогда

$$\frac{1}{1,468} > \frac{1}{0,968} [2,5^2 - 2 \cdot 1,2 \cdot 2,5 + 1,2].$$

$0,68 < 1,499$ т.е. поток теряет первоначальный „устойчивый“ равномерный вид движения и переходит в волновой режим, что требует принять во внимание при прогнозе эрозии почв в ручейковом потоке.

В таких случаях следует воспользоваться соотношением, например (1.92), что позволяет установить скорость на высоте выступа шероховатости и оценить интенсивность протекания процесса эрозии почв в ручейковых потоках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ведерников В.В.** Особенности движения жидкости в открытом русле. // Доклады АН СССР, 1946. т. L11. №3, стр. 207-210.
2. **Великанов М.Л.** Динамика русловых потоков. М.: Физматиздат, 1958, 424 стр.
3. **Гончаров В.Н.** Нормы допускаемых неразмывающих скоростей. // Гидротехническое строительство, 1936, №5, стр. 35-40.
4. **Гончаров В.Н.** Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1954, 454 стр.
5. **Григорьев В.Я.** Полуэмпирическая модель ручейковой эрозии почв. // Почвоведение. 2007, №11, стр. 1362-1372.
6. **Егязаров И.В.** Общее уравнение предельной транспортирующей способности потока для несвязных наносов. // Доклады АН СССР, 1956, т. 107, №4, стр. 62-67.
7. **Замарин Е.А.** Допускаемые и неразмывающие скорости водного потока. // Доклады ВАСХНИЛ, 1948, вып. 12, стр. 70-77.
8. **Караушев А.В.** Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1955, 392 стр.
9. **Кнороз В.С.** Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и

- факторы ее определяющие. //Известия ВНИИГ, 1959, т.59, стр. 72-80.
10. **Кузнецов М. С., Глазунов Г.П.** Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 1996, 334 стр.
 11. **Ларионов Г.А.** Механизм боковой эрозии в склоновых руслах. //Почвоведение, 2008, №3, стр. 330-337.
 12. **Леви И.И.** Динамика русловых потоков. М-Л.: Госэнергоиздат, 1957, 252 стр.
 13. **Мельников О.Н., Осипов Д.Н., Петров В.П.** Механизм размыва дна прямого потока при воздействии стационарной волны. //Известия АН РАН, Физика атмосферы и океана, 1993, том 29, №4, стр. 565-569.
 14. **Мирицхулава Ц.Е.** Водная эрозия почв. Тбилиси, изд-во „Мецниереба“, 2000, 421 стр.
 15. **Сухановский Ю.П.** Физически обоснованная модель эрозии почв при снеготаянии. //Почвоведение. 2008, № 8, стр. 1006-1018.
 16. **Шамов Г.И.** Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1955, 360 стр.
 17. **Штеренлихт Д.В.** Гидравлика (в 4-х книгах). М.: Энергоатом, 1991, 711 стр.
 18. **Эглит М.Э.** Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. М.: изд-во МГУ, 1986, 95 стр.
 19. **Knisel W.G.** (editor). CREAMS: A Field scale model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. USDA //Conservation Research Report. 1980, № 6, 640 p.
 20. **Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D. Anderson W.P.** AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. U.S. Dept, of Agr. Conservation Research Report 35. 1987, 80 p.
 21. **Григорьев В.Я.** Полуэмпирическая модель ручейковой эрозии почв. //Почвоведение, 2007, №11, стр. 1362-1372.
 22. **Кузнецов М.С., Глазунов Г.П.** Эрозия и охрана почв. М.: изд. МГУ, изд. „Колос“, 2004, 351 стр.
 23. **Ларионов Г.А. и др.** Уравнение транспорта наносов для склоновых потоков. //Почвоведение, 2006, №8, стр. 965-976.

24. **Ларионов Г.А. и др.** Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках. //Почвоведение, 2007, №10, стр. 1263-1269.
25. **Ларионов Г.А. и др.** Влияние взвешенных наносов на эродируемость почв // Почвоведение, 2008, №7, стр. 871-876.
26. **Слезкин Н.А.** Дифференциальные уравнения движения пульпы. //ДАН СССР, т. LXXXVI, №2, 1952.
27. **Баренблатт Г.И.** О движении взвешенных частиц в потоке. //П.М. и М. т. XVII, Вып. 3, М., 1953.
28. **Маккавеев В.М., Коновалов И.М.** Гидравлика. Л.-М., Речиздат, 1940, 643 стр.
29. **Франкль Ф.И.** К теории движения взвешенных наносов //Труды физ.-мат. ф-та Киргизского госуниверситета, вып. 3, Фрунзе, 1956.
30. **Натишвили О.Г.** Об устойчивости движения наносонесущего потока при течении с большими скоростями в руслах с крутыми уклонами //Труды ГрузНИИГиМ, Вып. 22, 1963, стр. 67-76.
31. **Натишвили О.Г.** О переносе твердых взвешенных частиц турбулентным русловым потоком. //Труды ГрузНИИГиМ, Вып. 23, 1965, стр. 159-174.
32. **Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.** Одномерные наносонесущие русловые потоки. М.: ООО Научтехлитиздат, 2012, 192 стр.
33. **Петров Г.А.** Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути. М.-Л.: Стройиздат, 1951, 192 стр.
34. **Мелещенко Н.Т.** Применение теории длинных волн малой амплитуды к вопросам суточного регулирования. //Известия ВНИИГ, т. XXVIII, вып. 28, Л., 1940, стр. 31-63.
35. **Образовский А.С.** Применение степенной зависимости к построению структурного механизма турбулентного потока. //Труды гидравлической лаборатории (ВОДГЕО), вып. 4, 1955, стр. 65-71.
36. **Войнич-Сяноженецкий Т.Г.** К вопросу устойчивости равномерного турбулентного потока и его свободной поверхности в условиях течения со сверхкритическими скоростями. //Труды Всесоюзного научно-технического совещания по водозаборным сооружениям и русловым процессам. Т. Г., Тбилиси, 1960, стр. 121-139.

37. **Ведерников В.В.** Условия на фронте волны пропуска, нарушающие установившееся движение реальной жидкости. //ДАН СССР, т. XIII, №4-6, 1945.
38. **Картвелишвили Н.А.** Об устойчивости критерия устойчивого установившегося течения в быстотоках. //Известия АН СССР, ОТН, №3, М., 1958.

II ГЛАВА. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАЖНОЙ И РЕЧНОЙ ЭРОЗИИ

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионные процессы в верховьях водотоков все чаще заставляют обращаться к исследованию вопросов транспортировки наносов водным потоком. Значительные площади сельскохозяйственных угодий Кавказа расположены в предгорных регионах и на площадях холмистого горного рельефа. На склонах строятся населенные пункты, транспортные магистрали, гидроэлектростанции, оросительные системы, оздоровительные и другие объекты.

Основным препятствием для освоения этих земель является – эрозия почвогрунтов, вызываемая ливневыми и тальми водами.

В [1, 2, 3] рассматривается водная эрозия, что включает отрыв частиц почвогрунтов, транспортировку твердых частиц и отложение в водохранилищах, оврагах, отстойниках и других участках водохозяйственного назначения.

Транспортировка твердых частиц осуществляется часто водным потоком, как во взвешенном, так и в донном режиме руслового водотока.

К эрозионным проявлениям относятся также селевые потоки, которые приносят значительный ущерб населенным пунктам, хозяйственным объектам.

Эрозионные процессы в любой форме вызывают

цепочку явлений, что необходимо прогнозировать, чтобы предотвратить возможные отрицательные явления и, по возможности, довести их последствия до минимума.

Несмотря на важность для практических задач по водной эрозии почвогрунтов, мало работ, касающихся решения вопроса с количественной стороны, особенно при волновом режиме движения водных потоков. К сожалению, долгие годы специалисты в области эрозии почв, с учетом волнового режима стока, удовлетворялись словесной оценкой процессов.

Количественный прогноз эрозионных процессов, при волновом режиме движение стока, является очень сложным.

В данной главе основное внимание уделяется частным вопросам овражной и речной эрозии, что со своей стороны, охватывает движения наносонесущих потоков, как с позиции ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей (в форме селевых потоков).

Среди многочисленных причин нарушения экологической стабильности в горных регионах нашли свое место и недавние природные катаклизмы на Кавказе. Это широко-масштабные обрушения береговых откосов русел, оползни, сели и особый ущерб, нанесенный населенным пунктам и хозяйственным объектам (разрушения инженерных сооружений), сотни человеческих жертв, которые не единичны.

Селевые потоки утяжеляют экологическую ситуацию горных регионов там, где они формируются. Большой ущерб наносят селевые потоки транспортным путям. Часто движение по путям прекращается на несколько месяцев. Отмечено несколько тысяч случаев повреждения мостовых переходов и дорог, проходящих на концах выносов и в

низовья вдоль реки, транспортирующей сотни тысяч, а в некоторых случаях, миллионы кубических метров твердого материала.

В вышеуказанных работах [1, 2, 3] основное внимание уделяется выводам уравнений (в двух вариантах) одномерного течения взвесенесущего потока для случая неустановившегося движения с переменным расходом фаз вдоль пути. Обращается внимание на специфические движения взвесенесущего потока. Рассматриваются отдельные случаи интегрирования уравнений одномерного движения взвесенесущего потока, с переменным расходом фаз вдоль пути, имеющие практическое применение.

В данной главе приводятся детально рассмотренные в работах [1, 2, 3, 4] проблемы, которые очень важны для решения практических задач.

§ 2.1. УСТАНОВЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ВОЛНЫ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ НЕВЫСОКИХ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

Предлагается методика гидравлического расчета высоты взвесенесущих волн одного направления, воздействующих на невысокие земляные плотины, вызывающих их разрушения.

С ростом возраста плотин интенсифицируются негативные явления; при строении земляных плотин происходит понижение прочности сооружения, появляются трещины, что нередко является причиной аварии. Сказанное, в основном, наблюдается в небольших (не высоких) плотинах, так как они, в основном, разбросаны в сельских местностях, что необоснованно не рассматриваются в качестве

серьезного фактора риска и поэтому неправильно эксплуатируются. Они часто представляют реальную опасность, так как из-за старения ухудшаются состояние и снижаются показатели эксплуатации надежности. Недосмотр нередко приводит к тому, что из-за аварии погибают люди [5].

Иногда причиной аварии считается перелив воды через гребень земляной плотины.

Разрушения плотин происходят часто длинными волнами одного направления. Нередко, при расчете длинных волн, наличие земли в потоке от разрушения плотин не учитывается. Волна транспортирует внушительную часть материала земляной плотины, что, естественно, накладывает свой отпечаток на конечные результаты.

Ниже делается попытка приближенно (качественно, частично и количественно) решать вопросы расчета длинных волн одного направления, с учетом наличия наносов в волнообразном потоке. Заранее оговорим, что в некоторых случаях предложенные решения будут носить приближенный характер, но представит определенный интерес с позиции установления продолжительности течения процесса аварии, по сравнению с результатами аварии при волновом движении чистой воды без наносов.

Тут не обойдемся без установления критической глубины взвесенесущего потока, что очень важно для решения поставленной задачи.

Производная $\frac{dh}{dx}$ в дифференциальном уравнении динамики одномерного движения взвесенесущего потока [1, 2, 3] испытывает разрыв при значении знаменателя, равного

нулю. Очевидное условие прерывности производной $\frac{dh}{dx}$ будет:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{кр}^3}{B_{кр}} T_{кр}. \quad (2.1)$$

По аналогии с гидравликой однофазного потока следует рассматривать в качестве условия определяющего т.н. «критическую глубину», что, со своей стороны, характеризует критическое состояние потока.

В зависимости (2.1):

Q – расход потока;

g – ускорение силы тяжести;

$\omega_{кр}$ – площадь живого сечения потока при критическом режиме течения;

$B_{кр}$ – ширина свободной поверхности потока при критической глубине потока;

α – корректив количества движения потока;

$T_{кр} \cong 1 + \frac{B_{кр} \nu_{кр} S}{W \omega_{кр}}$ – безразмерный параметр гидравлики

взвесенесущего потока;

W – средняя гидравлическая крупность транспортируемых наносов;

S – средняя (по сечению) объемная концентрация взвеси в смеси;

$\nu_{кр}$ – коэффициент турбулентного обмена взвесенесущего потока при критической глубине.

Учитывая значение $T_{кр}$ в (2.1), получим:

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega_{кр}^3}{B_{кр}} + \frac{\omega_{кр}^3 \nu_{кр} S}{W}. \quad (2.2)$$

Зависимость (2.2) позволяет для русел «правильной» формы определить критическую глубину взвесенесущего потока.

Нетрудно заметить, что критическая глубина взвесенесущего потока (при эквивалентных расходах воды и взвесенесущего потока) получается меньше критической глубины водного потока без взвеси. Разница в критических глубинах увеличивается с увеличением концентраций взвеси, так как при высоких концентрациях водный поток израсходует часть своей кинетической энергии на транспорт взвеси.

Из практических соображений зависимость (2.2) можно представить в удобной форме, снизив до некоторой степени ее точность.

С этой целью частично изменим форму (2.2) из следующих соображений.

Из уравнении баланса наносов в сечении следует:

$$\lambda \frac{d\bar{S}}{dy} = \bar{S}W. \quad (2.3)$$

где λ – приведенный коэффициент турбулентного обмена взвеси.

Выразим закон распространения концентраций взвеси по вертикали с помощью показательной зависимости:

$$\bar{S} = \bar{S}_H \left(\frac{y}{h} \right)^n. \quad (2.4)$$

где: \bar{S}_H – исходная (известная в точке) объемная концентрация взвеси (в данном случае данная концентрация);

$n \cong const$ – показатель степени параболической кривой, аппроксимирующей истинное поле концентраций взвеси во взвесенесущем потоке;

\bar{S} – в точке объемная осредненная концентрация взвеси;

h – глубина потока;

y – текущая координата.

Дифференцируя (2.4), получим:

$$\frac{d\bar{S}}{dy} = \frac{\bar{S}_H n y^{n-1}}{h^n}. \quad (2.5)$$

Принимая во внимание (2.4) и (2.5), взамен (2.3) получим:

$$\lambda = \frac{yW}{n}. \quad (2.6)$$

Таким образом получается, что при $y = 0$, $\lambda = \lambda_{\min} = 0$, а при $y = h$, $\lambda = \lambda_{\max} = \frac{hW}{n}$. Тогда среднее значение приведенного коэффициента турбулентного обмена взвеси по вертикали будет $\lambda_{cp} = \frac{hW}{2n}$.

Выразив коэффициент турбулентного обмена смеси через коэффициент турбулентного обмена взвеси, получим [6]:

$$\nu = \frac{hW}{2nk_2}. \quad (2.7)$$

Зависимость (2.7) дает возможность в дальнейшем оценить (качественно и в первом приближении, количественно) некоторые характеристики взвесенесущих потоков.

Подставляя (2.7) в (2.2), при этом подразумевая $\nu_{кр}$

коэффициент турбулентного обмена взвесенесущего потока, соответствующий критической глубине, получим:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{кр}^3}{B_{кр}} + \frac{\omega_{кр}^2 h_{кр} S}{2nk_2}. \quad (2.8)$$

В зависимостях (2.7) и (2.2), k_2 – коэффициент, учитывающий различие между коэффициентами турбулентного обмена несущей и несомой фазы, зависящей от относительной плотности $\left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)$, крупности и формы частиц, средней

по живому сечению концентрации взвеси в смеси и др. Исследования [3] показали, что $k_2 = 0,6$ для наносенесущего потока, когда удельный вес взвеси $\gamma = 2,65 \frac{\text{тс}}{\text{м}^3}$;

$$W = 0,034 \div 0,605 \frac{\text{см}}{\text{с}}; \quad \text{Re} = 19 \cdot 10^3 \div 216 \cdot 10^5; \quad Fr = 0,1 \div 1,4,$$

весовая концентрация $G_{cp} = 1,25 \div 4 \frac{\text{гр}}{\text{л}}$, а показатель аппроксимирующей кривой $n \cong 0,17 \div 0,125$ (что так же совпадает с данными А.С. Образовского [6]).

Допустим, переливание потока или разрыв тела плотины имеет прямоугольную форму. Допуская $\alpha \cong 1$, взамен (2.8) (когда $\omega_{кр} = h_{кр} \cdot B_{кр}$) будем иметь:

$$h = h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g \left(1 + \frac{S}{2nk_2}\right)}}, \quad (2.9)$$

причем неизвестная величина расхода на единицу ширины q – должна отвечать той волне понижения уровня, которая,

распространяясь вверх по течению, отвечает постоянной работе верхнего бьефа. «Уменьшение глубины в сечении плотины от первоначального значения h_0 до конечного $h = h_{кр}$ будет связано с законом изменения скорости» [6].

Тогда из [6, 7, 8] следует:

$$V = \pm 2\sqrt{gh} \mp \sqrt{2gh_0} + V_0. \quad (2.10)$$

В зависимости (2.10) следует брать нижние знаки, т.е. распространение волны совершается в сторону, «обратную положительному направлению для V ».

Умножая выражение (2.10) на h дает величину расхода, которую следует приравнять значению, полученному из формулы (2.9). Тогда при $V_0 = 0$, получим:

$$Vh = h\left(-2\sqrt{gh} + \sqrt{2gh_0}\right). \quad (2.11)$$

Из (2.10) получим:

$$q = \sqrt{h^3 g \left(1 + \frac{S}{2nk_2}\right)}. \quad (2.12)$$

Приравнивая (2.11) и (2.12), получим:

$$\sqrt{h} \left(\sqrt{1 + \frac{S}{2nk_2}} + 2 \right) = 2\sqrt{h_0}$$

или

$$h \left(\sqrt{1 + \frac{S}{2nk_2}} + 2 \right)^2 = 4h_0.$$

Откуда:

$$h = \frac{4h_0}{\left(\sqrt{1 + \frac{S}{2nk_2}} + 2 \right)^2}. \quad (2.13)$$

Получается, что после разрушения плотины следует понижение глубины на величину h , равной
$$\frac{4}{\left(\sqrt{1 + \frac{S}{2nk_2}} + 2\right)^2}$$

от первоначальной глубины h_0 .

Нетрудно заметить, что не учет концентрации взвеси $S = 0$ дает $h = \frac{4}{9} h_0$ [6].

Зависимость (2.13) позволяет определить глубину взвесенесущего потока при разрушении плотины.

В зависимости от формы «трещины» в земляной плотине аналогичным образом можно определить глубину взвесенесущего потока, используя зависимости критических глубин для параболического, трапецеидального, треугольного и других форм [7].

Отражение волны понижения от тупого конца приведет к уменьшению глубины до определенной величины, что можно рассчитать по методике, изложенной в работе [10].

§ 2.2. СИЛЫ ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КРУПНЫЙ КАМЕНЬ РАСПОЛОЖЕННЫЙ НА ДНЕ РУСЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОДНОГО ПОТОКА

Водные потоки часто транспортируют отдельные крупные камни. В исследованиях по русловым процессам нередко рассматривается движение донных наносов, однако подробный анализ механизма перемещения крупного камня не имеется. В настоящем параграфе рассматривается вопрос воздействия водного потока на отдельный крупный камень,

расположенный на дне русла.

Для определения минимальной скорости транспортирования крупного камня водным потокам как в руслах с положительным, так и отрицательным уклоном, составим уравнение равновесия сил, действующих на камень. При этом особое внимание следует обратить на трение, которое возникает между камнем и руслом водотока.

Как известно, трение между взаимно неподвижными телами называют «трением покоя», между движущимися – «кинематическим трением».

В зависимости от вида движения одного тела на поверхность другого различают кинематическое «трение скольжения» и «трение качения». Различают также сухое трение от жидкостного трения (т.е. внутреннего трения). Сила сухого трения по закону *Амонтона* равна $F_{ск} = f N$ (N – сила нормального давления тел друг на друга, f – коэффициент трения).

Сила сухого трения качения шара или кругового цилиндра радиусом r по плоской поверхности определяют по зависимости *Кулона* $F_{кач} = f_{кач} \frac{N}{r}$, где $f_{кач}$ – коэффициент трения качения. Обычно сила трения качения меньше силы трения скольжения.

Коэффициент трения при рассмотрении вопроса транспортирования водным потоком крупных и в том числе мелких размеров камней имеет существенное значение.

Данный вопрос наиболее подробно рассмотрен в известной монографии Ц.Е. Мирцхулава [5], который нашел весьма полезное отражение и в настоящей монографии.

Для определения минимальной скорости транспортировки камня водным потоком в русле с обратным уклоном и углом наклона θ_1 по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 2.1), составим уравнение равновесия сил, действующих на камень.

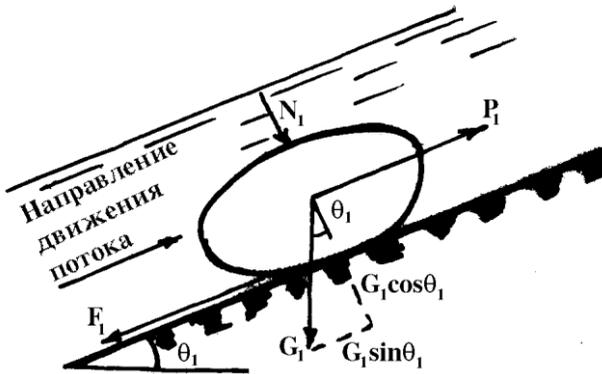


Рис. 2.1. Схема сил, действующих на крупный камень, расположенный на дне русла с обратным уклоном

На камень, погруженный в воде и расположенный на дне русла, действуют: P_1 – сила давления воды, направленная перпендикулярно элементарной площадке камня; N_1 – сила, касательная к этой площадке, обусловленная водным потоком, обтекающим боковую поверхность камня; G_1 – вес камня; F_1 – сила трения камня по дну русла, направленная против течения водного потока.

Тогда будем иметь, что сила скоростного давления водного потока:

$$P_1 = K_c \omega_m V_{mp(i<0)}'^2 \frac{\gamma_s}{2g}, \quad (2.14)$$

где: K_c – коэффициент гидродинамического сопротивления;

ω_m – «миделево» сечение камня;

γ_e – удельный вес воды;

$V'_{mp(i<0)}$ – начальная скорость трогания камня потоком воды (при $i < 0$), принятая за минимальную скорость воды, при которой камень начинает скользить (или перекатываться) по контактной с руслом поверхности.

Сила трения камня по дну русла, вызванная силами N_1 и G_1

$$F_1 = f(N_1 + G_1 \cos \theta_1) = f\omega_{об} V'^2_{mp(i<0)} \frac{\gamma_e}{2g} + fG_1 \cos \theta_1, \quad (2.15)$$

где: f – коэффициент трения скольжения или качения камня о дне русла^{*)};

$\omega_{об}$ – площадь обтекаемой поверхности камня.

Вес камня:

$$G_k = \gamma_k w = \gamma_k K_\phi \frac{\pi D^3}{6}, \quad (2.16)$$

где: γ_k – удельный вес камня;

w – объем камня;

K_ϕ – коэффициент формы камня;

D – диаметр шарообразного камня.

Тогда вес камня в воде будет:

$$G_1 = G_k - G_e = (\gamma_k - \gamma_e)w = K_\phi (\gamma_k - \gamma_e) \frac{\pi D^3}{6}. \quad (2.17)$$

^{*)} Рассматривается трение скольжения; аналогично можно рассмотреть и вопрос трения качения камня.

Уравнение равновесия сил, действующих на камень, расположенный на дне русла с обратным уклоном, будет:

$$G_1 \sin \theta_1 = P_1 - F_1. \quad (2.18)$$

С учетом (2.14), (2.15) и (2.16), взамен (2.18) будем иметь:

$$K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_\epsilon) \frac{\pi D^3}{6} \sin \theta_1 = K_c \omega_M V_{mp(i<0)}'^2 \frac{\gamma_\epsilon}{2g} - \\ - f \omega_{o\delta} V_{mp(i<0)}'^2 \frac{\gamma_\epsilon}{2g} - f K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_\epsilon) \frac{\pi D^3}{6} \cos \theta_1$$

Откуда:

$$V_{mp(i<0)}' = \sqrt{\frac{g K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_\epsilon) \pi D^3 (\sin \theta_1 + f \cos \theta_1)}{3 \gamma_\epsilon (K_c \omega_M - f \omega_{o\delta})}}. \quad (2.19)$$

Когда $\theta_1 = 90^\circ$, $\sin \theta_1 = 1$ и $\cos \theta_1 = 0$, т.е. стена вертикальная и (2.19) принимает вид:

$$V_{mp}' = \sqrt{\frac{g K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_\epsilon) \pi D^3}{3 \gamma_\epsilon (K_c \omega_M - f \omega_{o\delta})}}. \quad (2.20)$$

Зависимости (2.19) и (2.20) дают возможность определить среднюю по сечению минимальную скорость воды, при которой камень начнет скользить в русле с обратным уклоном дна по направлению движения.

На камень, лежащий на дне русла с положительным уклоном и углом наклона θ_2 по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 2.2) будут действовать:

P_2 – сила давления

$$P_2 = K_c \omega_M V_{mp(i>0)}'^2 \frac{\gamma_\epsilon}{2g}; \quad (2.21)$$

N_2 – касательная сила

$$N_2 = f \omega_m V_{mp(i>0)}^{n2} \frac{\gamma_6}{2g}; \quad (2.22)$$

G_2 – вес камня в воде

$$G_2 = K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_6) \frac{\pi D^3}{6}; \quad (2.22)$$

F_2 – сила трения скольжения камня

$$F_2 = f(N_2 + G_2 \cos \theta_2)$$

$$F_2 = f \left[\omega_m V_{mp(i>0)}^{n2} \frac{\gamma_6}{2g} + K_\phi (\gamma_\kappa - \gamma_6) \frac{\pi D^3}{6} \cos \theta_2 \right]. \quad (2.23)$$

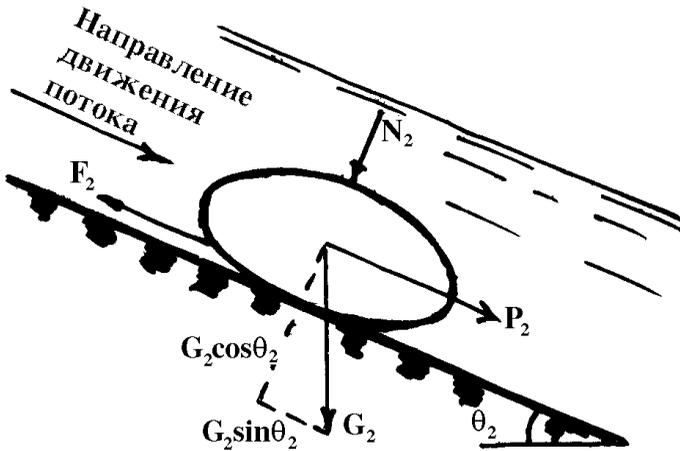


Рис. 2.2. Схема сил, действующих на крупный камень, расположенный на дне русла

Уравнение равновесия будет иметь вид:

$$P_2 + G_2 \sin \theta_2 = F_2$$

Учитывая значения (2.21), (2.22), (2.23) и (2.24), получим:

$$K_c \omega_m V_{mp(i>0)}''^2 \frac{\gamma_s}{2g} + K_\phi (\gamma_k - \gamma_s) \frac{\pi D^3}{6} \sin \theta_2 =$$

$$= f \left[\omega_{o\delta} V_{mp(i>0)}''^2 \frac{\gamma_s}{2g} + K_\phi (\gamma_k - \gamma_s) \frac{\pi D^3}{6} \cos \theta_2 \right]$$

Откуда:

$$V_{mp}'' = \sqrt{\frac{g K_\phi (\gamma_k - \gamma_s) \pi D^3 (f \cos \theta_2 - \sin \theta_2)}{3 \gamma_s (K_c \omega_m - f \omega_{o\delta})}} \quad (2.25)$$

Когда $i=0$, $\theta_2=0$, $\sin \theta_2=0$, $\cos \theta_2=1$ и взамен (2.25) имеем (т.е. для русла с нулевым уклоном):

$$V_{mp}'' = \sqrt{\frac{f g K_\phi (\gamma_k - \gamma_s) \pi D^3}{3 \gamma_s (K_c \omega_m - f \omega_{o\delta})}} \quad (2.26)$$

Зависимости (2.25), (2.26) дают возможность определить минимальную среднюю по сечению скорость водного потока, при которой камень начинает скользить в руслах с положительными и нулевыми уклонами.

Сравнивая (2.20) и (2.26) видно, что минимальная скорость движения воды, при которой камень начинает двигаться на вертикальной стенке, отличается от той же скорости воды в русле с нулевым уклоном величиной:

$$\frac{V_{mp}''}{V_{mp}'} = \sqrt{f} . \quad (2.27)$$

Следуя приведенной методике расчета можно также определить скорость водного потока при трении качения камня. В расчетах также можно учитывать частичное погружение камня в воду.

§ 2.3. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ КРУПНОГО КАМНЯ В РУСЛЕ ВОДОТОКА

Скорость перемещения крупного камня в русле водотока обычно происходит меньшей скоростью, чем скорость транспортирующего потока. В настоящее время четкой методики определения отставания камня от водного потока не имеется. При решении задачи взаимодействия несвязных селевых потоков с сооружениями, упомянутое отставание имеет существенное значение, т.к. сила удара камня на сооружение наряду с размерами камня зависит и от скорости ее перемещения. Затрудняется также прогнозирование длины пути перемещения крупного камня в русле водотока.

Рассмотрим задачу о прямолинейном движении камня в русле водотока с положительным уклоном дна под действием водного потока и силы тяжести камня.

С целью упрощения задачи допустим, что камень имеет форму шара, погруженного в водном потоке (рис. 2.3).

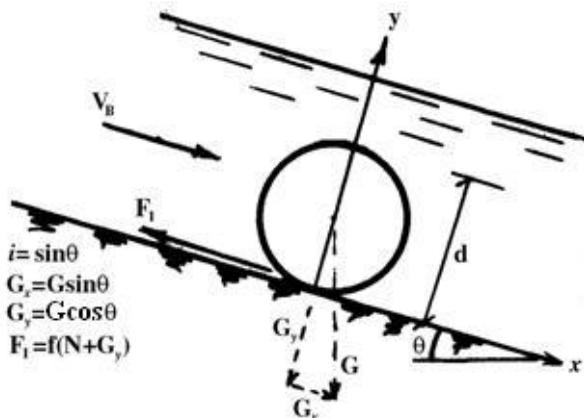


Рис. 2.3. Расчетная схема перемещения крупного камня шарообразной формы в русле водотока

Передвижение камня обеспечивается лобовым воздействием сил водного потока и тяжестью камня. Сила же трения камня о дне русла оказывает сопротивление движению. Если обозначить $G_y/N = k$, тогда сила, направленная против течения потока, будет:

$$F_1 = f(G_y + N) = fN(1 + k), \quad (2.28)$$

где: $N = \omega_m \rho_g \frac{V^2}{2}$ – проекция силы (прижимания), вызван-

ная обтекающим поверхность камня потоком;

ω_m – миделевая поверхность обтекаемой площади поверхности камня;

ρ_g – плотность воды^{*)};

$G_y = G \cos \theta$ – проекция силы тяжести на ось "0у";

θ – угол наклона дна водотока по отношению к горизонтальной плоскости;

f – коэффициент трения скольжения^{**)} камня о поверхности русла.

Сумма проекции сил (на ось абсцисс), действующая на камень, будет:

$$F_x = \frac{\pi d^2}{8} [K_c - f(1 + k)] \rho_g V^2 + \frac{\pi d^3}{6} (\rho_k - \rho_g) g i, \quad (2.29)$$

где: d – диаметр камня;

ρ_k – плотность камня;

V – относительная скорость потока.

^{*)} В случае наноснесущего потока (несвязного селя) в качестве плотности будет фигурировать плотность смеси $\rho_{см}$

^{**)} В расчетах при необходимости вместо коэффициента трения скольжения можно учесть коэффициент трения качения.

Допустим, что поток воды движется равномерным режимом. Используя зависимость *Шезу*, будем иметь:

$$I = i = \frac{V^2}{C^2 R}, \quad (2.30)$$

где: I – гидравлический уклон;

R – гидравлический радиус потока;

C – коэффициент скорости (*Шезу*).

С учетом (2.30) зависимость (2.29) примет вид:

$$F_x = \frac{\pi d^2}{8} [K_c - f(1+k)] \rho_\theta V^2 + \frac{\pi d^3}{6} (\rho_\kappa - \rho_\theta) \frac{V^2}{C^2 R} g. \quad (2.31)$$

С другой стороны проекция силы F на ось абсцисс будет:

$$F_x = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (2.32)$$

где: $m = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_\kappa - \rho_\theta)$ – масса шарообразного камня в воде.

С учетом (2.32) взамен (2.31) будем иметь:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dV_x}{dt} = \left\{ \frac{3}{4} \cdot \frac{[K_c - f(1+k)] \rho_\theta}{d(\rho_\kappa - \rho_\theta)} + \frac{g}{C^2 R} \right\} V^2. \quad (2.33)$$

Если выразить относительную скорость воды через зависимость $V = V_\theta - V_\kappa$, где V_κ и V_θ – соответственно скорости движения камня и воды, то после несложных преобразований взамен (2.2.6) с учетом $V_\theta = \text{const}$ получим, что:

$$-\frac{dV_x}{(V_\kappa - V_\theta)^2} = E dt, \quad (2.34)$$

где:

$$E = \frac{3}{4} \cdot \frac{[K_c - f(1+k)] \rho_\theta}{d(\rho_\kappa - \rho_\theta)} + \frac{g}{C^2 R} = \text{const}. \quad (2.35)$$

После интегрирования с учетом граничных условий (при $t=0$ и $V_k=0$, а постоянная интегрирования $C_1 = \frac{1}{V_6}$)

будем иметь:

$$V_k = \frac{dx}{dt} = \frac{EV_6^2 t}{EV_6 t + 1} \quad (2.36)$$

или

$$dx = \frac{\Omega V_6 t}{\Omega t + 1} dt, \quad (2.37)$$

где:

$$\Omega = EV_6 t = \text{const.} \quad (2.38)$$

Интегрирование (2.37) с учетом граничных условий (при $t=0$ и $x=0$ постоянная интегрирования $C_2 = -\frac{1}{E}$) дает:

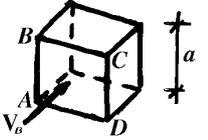
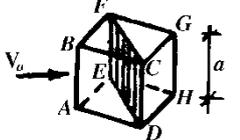
$$x = V_6 t - \frac{\ln(EV_6 t + 1)}{E}. \quad (2.39)$$

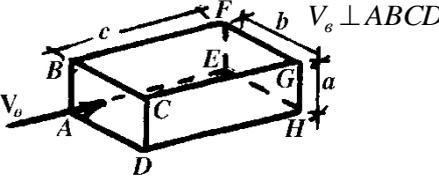
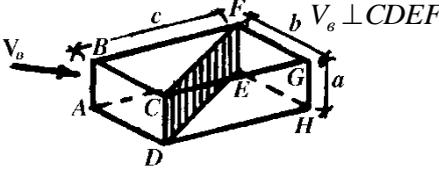
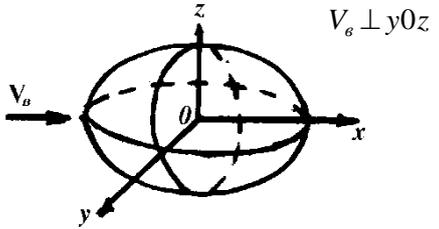
Зависимость (2.39) позволяет установить длину пути прямолинейного перемещения фиксированного камня в русле за определенный промежуток времени, что со своей стороны дает возможность оценить среднюю скорость передвижения камня в водотоке $V_k = \frac{x}{t}$.

Следует отметить, что значения величины E отличаются друг от друга не только в зависимости от формы камня (шарообразная, кубическая, прямоугольный параллелепипед или эллипсоид) но и от ориентации вектора скорости V_6 поступательного потока по отношению камня. Ради наглядности эти значения приводятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Значения E при различных формах камня
и различных случаях его ориентации в водном потоке**

№	Форма камня и его объем (W)	Геометрические характеристики камней и схемы их ориентации в водном потоке (V_0 – направление скорости водного потока; W – объем камня)	Значения E (размерность M^{-1})
1	2	3	4
1	Шар диаметром d $W = \frac{\pi d^3}{6}$	 $V_0 \perp ABCD$ $V \perp ABCD$	$E = \frac{3}{4} \cdot \frac{[K_c - f(1+k)]\rho_0}{d(\rho_\kappa - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$
2	Куб стороной a $W = a^3$	 $V_0 \perp ABCD$	$E = \frac{[K_c - f(1+k)]\rho_0}{2a(\rho_\kappa - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$
3	$W = a^3$	 $V_0 \perp EFCD$	$E = \frac{[K_c \sqrt{2} - f(1+k)]\rho_0}{2a(\rho_\kappa - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$

1	2	3	4
4	Прямоугольный параллелепипед сторонами a, b, c	 <p style="text-align: right;">$V_0 \perp ABCD$</p>	$E = \frac{[K_c a - f(1+k)c] \rho_0}{ac(\rho_k - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$
5	$W = a \cdot b \cdot c$	 <p style="text-align: right;">$V_0 \perp CDEF$</p>	$E = \frac{[K_c a \sqrt{b^2 + c^2} - f(1+k)bc] \rho_0}{2abc(\rho_k - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$
6	Эллипсоид (осями $2a, 2b, 2c$) $W = \frac{4}{3} \pi abc$	 <p style="text-align: right;">$V_0 \perp y0z$</p>	$E = \frac{3}{8} \cdot \frac{[K_c c - f(1+k)a] \rho_0}{ac(\rho_k - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$

1	2	3	4
7	То же		$E = \frac{3}{8} \frac{[K_c c - f(1+k)]\rho_0}{bc(\rho_k - \rho_0)} + \frac{g}{C^2 R}$

65

*) Формы и размеры транспортируемых камней могут быть различными. Камни у которых форма отличается от шарообразной, в первом приближении, можно также охарактеризовать эквивалентным диаметром, который определяется по зависимости: $d_{\text{эк}} = \sqrt{6w/\pi}$, где w – объем камня, отличающийся от шарообразной формы.

Для приведения несферических камней к эквивалентным шарообразным камням следует вводить коэффициент формы:

$$K_{\phi_1} = S_1/S_{\text{эк}} = 0.202S_1/w^{2/3},$$

где $S_1 = \pi d^2$; $S_{\text{эк}} = \pi d_{\text{эк}}^2 = \pi(6w/\pi)^{2/3}$.

§ 2.4. РАБОТА, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ КРУПНОГО КАМНЯ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ НА ПРЯМОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ВОДОТОКА

Дифференциал работы, затрачиваемой на перемещение отдельного крупного камня в русле по прямой линии, будет [9]:

$$dA_x = m \frac{d^2 x}{dt^2} dx. \quad (2.40)$$

Путь перемещения крупного камня в русле за определенный промежуток времени:

$$x = V_6 t - \frac{\ln(EV_6 t + 1)}{E}, \quad (2.41)$$

где:

$$E = \frac{3[K_c - f(1+k)]\rho_6}{4(\rho_k - \rho_6)d} + \frac{g}{C^2 R} = \text{const}. \quad (2.42)$$

Для определения первой и второй производных от x по t проводим дифференцирование выражения (2.41).

Первая производная будет:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{EV_6^2 t}{EV_6 t + 1},$$

откуда:

$$dx = \frac{EV_6^2 t}{EV_6 t + 1} dt. \quad (2.43)$$

Вторая производная:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{EV_6^2}{(EV_6 t + 1)^2}. \quad (2.44)$$

Подставляя (2.43) и (2.44) в (2.40), получим:

$$dA_x = m \frac{EV_g^2}{(EV_g t + 1)^2} \cdot \frac{EV_g^2 t}{(EV_g t + 1)} dt. \quad (2.45)$$

Работа, затрачиваемая на перемещение камня будет:

$$A_x = \int m \frac{E^2 V_g^4 t}{(EV_g t + 1)^3} dt. \quad (2.46)$$

Обозначим:

$$Z = EV_g t + 1, \quad (2.47)$$

и

$$dZ = EV_g dt, \quad (2.48)$$

$$t = \frac{Z - 1}{EV_g}, \quad (2.49)$$

$$dt = \frac{dZ}{EV_g}. \quad (2.50)$$

Тогда взамен (2.46) имеем:

$$A_x = \frac{mV_g^2}{2Z^2} - \frac{mV_g^2}{Z} + C_3. \quad (2.51)$$

С учетом (2.47) взамен (2.51) получим:

$$A_x = \frac{mV_g^2}{2(EV_g t + 1)^2} - \frac{mV_g^2}{(EV_g t + 1)} + C_3. \quad (2.52)$$

или

$$A_x = \frac{mV_g^2}{(EV_g t + 1)} \left[1 - \frac{1}{2(EV_g t + 1)} \right] + C_3. \quad (2.53)$$

Определим C_3 из граничных условий. При $t = 0$, $A_x = 0$.

Тогда:

$$0 = -mV_g^2 \left[1 - \frac{1}{2} \right] + C_3,$$

т.е.

$$C_3 = \frac{mV_6^2}{2}. \quad (2.54)$$

С учетом (2.54) взамен (2.53) будем иметь:

$$A_x = \frac{mV_6^2}{2} \left[\frac{EV_6 t}{EV_6 t + 1} \right]^2. \quad (2.55)$$

Зависимость (2.55) дает возможность определить работу, затрачиваемую на перемещение крупного камня вдоль движения в русле с положительным уклоном дна за время t .

Для камня шарообразной формы диаметром d зависимость (2.55) принимает вид:

$$A_x = \frac{\pi d^2 V_6^2}{12} \left(\frac{EV_6 t}{EV_6 t + 1} \right)^2 (\rho_\kappa - \rho_6). \quad (2.56)$$

Мощность, которая требуется для перемещения одного камня, будет:

$$N_x = \frac{mV_6^2}{2t} \left[\frac{EV_6 t}{EV_6 t + 1} \right]^2, \quad (2.57)$$

та же мощность для перемещения одного камня шарообразной формы будет соответствовать величине:

$$N_x = \frac{\pi d^2 V_6^2}{12t} \left(\frac{EV_6 t}{EV_6 t + 1} \right)^2 (\rho_\kappa - \rho_6). \quad (2.58)$$

За время t эта мощность будет равняться:

$$N_t = N_x t. \quad (2.59)$$

Учитывая, что мощность водного потока

$$N = \gamma_6 QH, \quad (2.60)$$

то нетрудно установить количество камней n заданного диаметра, которое может транспортировать данный поток, что

будет выражаться соотношением

$$\frac{N}{N_t} = n. \quad (2.61)$$

С целью повышения точности полученных результатов целесообразно воспользоваться соответствующими данными полевых наблюдений и сопоставить их с приведенными расчетами. Эти данные дадут также возможность уточнить поправочные коэффициенты, фигурирующие в предлагаемых расчетных зависимостях.

Настоящая методика расчета позволяет установить то оптимальное количество крупных камней заданного диаметра, которое может обеспечить надежное перекрытие русла каменно-набросной плотиной; она, по существу, способствует реализации части поставленных задач с целью возможности применения математической теории катастроф в области гидротехники и мелиорации, предложенных в работе [5], а именно, при необходимости поднятия уровня воды или строительства руслоперегораживающего противоселевого сооружения, изменения направления реки и т.д.

В приведенных выше выкладках основное внимание сосредоточено на принципиальные вопросы решения задачи, поэтому некоторые тонкости процесса были опущены. Так, например, не исключено, что более близкие к натурным данным результаты могут быть получены при замене средней по живому сечению скорости водного потока V_g скоростью потока на высоте $d/2$, что не представляет особого труда; можно также реализовать расчеты в отношении камней других форм, отличных от сферических.

Ради наглядности ниже приводится пример расчета для конкретного случая.

Пример 2.1

На прямолинейном участке русла с фиксированным створом крупный камень шарообразной формы под воздействием водного потока и собственного веса скользит (катится) по поверхности русла.

Гидравлические характеристики потока прямоугольного русла и камня следующие: глубина потока $H = 1,2$ м, ширина русла $B = 3,0$ м, уклон дна водотока $i = 0,04$, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³, коэффициент гидравлического сопротивления русла $K_c = 0,5$, коэффициент шероховатости $n = 0,025$, диаметр камня $d = 0,2$ м, плотность камня $\rho_k = 2650$ кг/м³, коэффициент трения скольжения $f = 0,43$, время перемещения камня $t = 100$ сек.

Требуется определить, на какое расстояние x от первоначального положения будет перемещаться камень за время t , а также работу, которую затрачивает поток на транспортировку этого камня.

Решение

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{B \cdot H}{B + 2H} = \frac{1,2 \cdot 3,0}{3,0 + 2 \cdot 1,2} = 0,66 \text{ м.}$$

При $n = 0,025$ по формуле Н.Н. Павловского коэффициент Шези $C = 35,9 \frac{\text{м}^{0,5}}{\text{с}}$.

Тогда средняя по живому сечению скорость потока воды:

$$V_6 = C\sqrt{Ri} = 35,9\sqrt{0,66 \cdot 0,04} = 5,8 \text{ м/с.}$$

Расход водного потока:

$$Q = \omega \cdot V_6 = 1,2 \cdot 3 \cdot 5,8 = 20,88 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расход на 1 п.м. ширины русла:

$$q = Q_1 = \frac{Q}{B} = \frac{20,88}{3} = 6,96 \text{ м}^2/\text{с.}$$

Так как $i = 0,04$, т.е. $\sin \theta = 0,04$, тогда $\theta \cong 3,3^\circ$,
 $\cos \theta = \cos 3,3^\circ = 0,9983$.

$$\begin{aligned} G_y &= \frac{\pi d^3}{6} (\rho_\kappa - \rho_6) g \cos \theta = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,2^3}{8} (2650 - 1000) \cdot 9,81 \cdot 0,9983 = 67,65 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \end{aligned}$$

$$N = \frac{1}{2} \omega_m \rho_6 V_6^2 = \frac{\pi d^2}{8} \rho_6 V_6^2 = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{8} 1000 \cdot 5,8^2 = 528,15 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$$

$$k = \frac{G_y}{N} = \frac{67,65}{528,147} = 0,128 \approx 0,13$$

$$f(1+k) = 0,43(1+0,13) = 0,4859 \approx 0,49.$$

Так как $K_c > f(1+k)$, т.е. $0,5 > 0,49$, поток в состоянии транспортировать камень диаметром $d = 0,2$ м.

Определим параметр E по зависимости (2.42)

$$\begin{aligned} E &= \frac{3}{4} \cdot \frac{[K_c - f(1+k)] \rho_6}{d(\rho_\kappa - \rho_6)} + \frac{g}{C^2 R} = \\ &= \frac{3}{4} \cdot \frac{[0,5 - 0,43(1+0,13)] 1000}{0,2(2650 - 1000)} + \frac{9,81}{35,9^2 \cdot 0,66} = 0,0345 \frac{1}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Определим x по зависимости (2.41)

$$x = V_6 t - \frac{\ln(EV_6 t + 1)}{E} = 5,8 \cdot 100 - \frac{\ln(0,0345 \cdot 5,8 \cdot 100 + 1)}{0,0345} = 510 \text{ м.}$$

Таким образом, через 100 сек. камень будет находиться на расстоянии 510 м от фиксированного начального створа.

Скорость продвижения камня:

$$V_x = \frac{510}{100} = 5,1 \text{ м/с.}$$

Разница в скоростях воды и камня:

$$V = V_e - V_x = 5,8 - 5,1 = 0,7 \text{ м/с.}$$

Определим по формуле (2.56) работу, которую затрачивает поток на транспортировку камня:

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{\pi d^3 V_e^2}{12} \left(\frac{E V_e t}{E V_e t + 1} \right)^2 (\rho_k - \rho_e) = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,2^3 \cdot 5,8^2}{12} \left(\frac{0,0345 \cdot 5,8 \cdot 100}{0,0345 \cdot 5,8 \cdot 100 + 1} \right)^2 (2650 - 1000) = \\ &= 104,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} \end{aligned}$$

Далее, допустим, что требуется перекрыть русло водотока прямоугольной формы, шириной 360 м, расходом $Q = 20,88 \text{ м}^3/\text{с}$, при глубине потока $H = 1,2 \text{ м}$. Диаметр камней, используемых для перекрытия русла равен $d = 0,2 \text{ м}$. Следует предусмотреть, что $\gamma = \rho g$ и соответственно

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \rho_k \cdot 9,81 = 2650 \cdot 9,81 = 25996,5 \text{ н/м}^3, \text{ и} \\ \gamma_e &= \rho_e \cdot 9,81 = 1000 \cdot 9,81 = 9810 \text{ н/м}^3. \end{aligned}$$

Мощность данного потока по формуле (2.60)

$$N = \gamma_e Q H = 9810 \cdot 20,88 \cdot 1,2 = 245799,36 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Работа, затрачиваемая на перемещение одного камня (формула 2.56) равняется:

$$A_x = 104,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Затрачиваемая на перемещение одного камня работа за единицу времени, т.е. мощность потока

$$N_x = \frac{A_x}{t} = 1,047 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3},$$

а за время $t = 100$ сек. эта мощность будет соответствовать величине

$$N_t = 1,047 \cdot 100 = 104,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$$

Таким образом, мощность потока в состоянии за 100 сек. обеспечить перемещение следующего количества камней диаметром 0,2 м:

$$\frac{N}{N_t} = \frac{245799,36}{104,7} = 2347,65 \approx 2348 \text{ шт.}$$

По ширине водотока, т.е. по длине «сооружения» $B = 3,0$ м, размещаются камни диаметром $d = 0,2$ м, $n_B = 3,0 : 0,2 = 15$ шт, а по высоте $n_H = 1,2 : 0,2 = 6$ шт.

Всего во всем поперечном сечении потока при кубической форме упаковки может разместиться $15 \times 6 = 90$ камней.

Количество камней в каменно-набросном «сооружении» вдоль русла (т.е. по ширине «сооружения») будет:

$$n_l = \frac{2348}{90} = 26,09 \approx 26 \text{ шт.},$$

что соответствует $l = 26 \times 0,2 = 5,2$ м ширине.

Таким образом, общий объем «сооружения» составляет $W = B \cdot H \cdot l = 3 \cdot 1,2 \cdot 5,2 = 18,72 \text{ м}^3$, а количество камней в его теле приближается к расчетному:

$$n_{\text{общ}} = n_B \cdot n_H \cdot n_l = 15 \cdot 6 \cdot 26 = 2340 \approx 2348 \text{ шт.}$$

Следовательно, при сооружении каменно-набросной плотины (барража), чтобы не происходило увлечение камней водным потоком, следует в течение 100 секунд сбросить в воду 2348 шт. камней диаметром 0,2 м в форме призмы с габаритами: длиной 3,0 м, высотой 1,2 м и шириной 5,2 м.

При этих условиях будет сохраняться предельно устойчивое состояние «сооружения». Для обеспечения его гарантированной устойчивости следует отсыпать в водный поток хотя бы на 2% больше камней, т.е.

$$2348 + 2348 \cdot 0,02 = 2394,96 \approx 2395 \text{ шт.}$$

что исключает увлечение камней водным потоком.

Естественно, что после отсыпки камней в водный поток «сооружение» не примет форму прямоугольной призмы с вертикальным положением ребер со стороны верхнего и нижнего бьефов. Поэтому необходимо, чтобы во время отсыпки камней были бы соблюдены условия, диктуемые результатами расчетов: высота «сооружения» $H = 1,2$ м, и длиной 3,0 м, что может обеспечить его устойчивое функционирование.

Естественно, фактическая «упаковка» и высота наброски камней будут отличаться от предложенного, что легко учесть в расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Натишвили О.Г.* О переносе твердых взвешенных частиц турбулентным русловым потоком. //Труды ГрузНИИГиМ, вып. 23, Тбилиси, 1965.

2. **Натишвили О.Г.** Об устойчивости движения наносонесущего турбулентного потока при течении с большими скоростями в руслах с крутыми уклонами. //Труды ГрузНИИГиМ, вып. 22, Тбилиси, 1963.
3. **Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.** Одномерные наносонесущие русловые потоки. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2012, 187 стр.
4. **Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.** Волны в селях. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2011, 160 стр.
5. **Мирихулава Ц.Е.** Опасности и риски на некоторых водных и других системах (в двух книгах). Тбилиси, изд-во «Мецниереба», 2003, 537 стр.
6. **Маккавеев В.М., Коновалов К.А.** Гидравлика. М.-Л., Речиздат, 1940, 643 с.
7. **Богомолов А.И., Михайлов К.А.** Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972, 648 с.
8. **Христианович С.А.** Неустановившееся движение в реках и каналах. / Сб. «Некоторые новые вопросы механики сплошной среды», Издательство АН, 1938.
9. **Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.** Работа водного потока по перемещению камня и прогнозирование экологической ситуации в русле горного водотока. //Москва, ж. «Инженерная экология», №5, 2002, стр. 34-38.

III ГЛАВА. ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ В «КОРИДОРЕ» НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ ГРУЗИИ

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы особо острым становится вопрос обеспечения безопасного функционирования нефтегазопроводов не только в местах пересечения оврагов и рек, но и на склонах гор, где активно происходит водная эрозия горных откосов.

Особенно сложная ситуация складывается в горных и предгорных регионах Грузии, где за последнее время возросло число предаварийных ситуаций из-за оголения труб вследствие общей и боковой водной эрозии [1]. Исключения не представляет и трассы нефтегазопроводов.

Для комплексной оценки «энергокоридора» (трасс нефтегазопроводов) необходимо обращать внимание на геологические, климатические, ландшафтные характеристики, а также – на состояние почвы и эрозионные процессы. Подобные данные приведены в табл. 3.1, 3.2 [2].

С целью оценки эрозионных ситуаций горных склонов учитывается термическая нагрузка: количество теплых дней и дней с заморозками [3], [4].

К примеру, в Грузии количество суток без заморозков (в году) разнится от региона к региону:

- * в *Марнеульском* - 161;
- * в *Цалка-Тетри Цкаройском* - 150;
- * в с. *Табацикури (Боржоми)* - 100... 125.

Долгота солнечного сияния в тех же регионах не превышает (час/год) соответственно:

- * в *Марнеульском* и в *Бакуриани* - 300;
- * в *Цалкийском* - 2000;
- * в с. *Табацикури* - 2300;
- * в *Ахалцихском* - 1900.

§ 3.1. ОЦЕНКА ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЛАНДШАФТОВ В «КОРИДОРЕ» НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Существующие до настоящего времени предельно допустимые нормы потери почв при эрозии представляются усредненными значениями данных наблюдений (без соответствующего научного обоснования).

Реальное состояние проблемы более сложно и учесть все показатели, обусловленные факторами различной природы (почвенными, гидрологическими, экономическими, экологическими и социальными) вряд ли возможно.

В частности, до настоящего времени еще не разработан достаточно надежный метод, позволяющий однозначно установить предельно допустимые нормы потери почв либо допустимую норму интенсивности эрозии почв.

Принимая во внимание важность проблемы, были организованы и проведены (в сентябре-декабре 2001 г.) полевые экспедиционные работы Институтом гидроэкологии Грузии.

В ходе экспедиции исследовались характеристики «коридора» с учетом его геологической, климатической,

ландшафтной и противоэрозионной особенностей.

Целью экспедиции была оценка эрозионных ситуаций горных склонов Грузии, вызванных поверхностными водными стоками в «коридоре» газопровода.

Таблица 3.1

**Геологическая и климатическая оценка
«коридора» газопровода**

№	Регион исследования	Геологические характеристики	Климатическая оценка
1	2	3	4
1	Марнеули	Верхний палеозой – триас. Глинистые сланцы, кварцит.	Климат умеренно теплых степей с жарким летом, 2-мя минимумами осадков в году.
2	Гардабани	Верхний палеозой. Кислые вулканогенные образования. Оligоцен – нижний миоцен. Глины, песчаники (майкопская свита).	Переходный: от климата умеренно теплых степей к умеренно влажному; с жарким летом и 2-мя минимумами осадков в году.
3	Тетри Цкаро	Верхний палеозой. Кислые вулканогенные образования. Оligоцен – нижний миоцен. Глины, песчаники.	Умеренно влажный климат с умеренно холодной зимой и продолжительным летом, с 2-мя минимумами осадков в году.
4	Ахалцихе	Верхний эоцен. Глины, мергели, песчаники, реже вулканогенные образования.	Климат нагорных степей с холодной малоснежной зимой и продолжительным теплым летом.

Таблица 3.1 (продолжение)

1	2	3	4
5	Боржоми	Олигоцен нижний миоцен Глины, песчаники, майкопская свита.	Умеренно влажный климат с холодной зимой и продолжительным летом.
6	Цалка	Верхний отдел. Известняки, мергели, песчаники, вулканогенные образования. Гранитоиды палеозойские.	Переходный климат: от умеренно влажного с холодной зимой и продолжительным летом к климату нагорных степей.

Таблица 3.2

**Ландшафтная и противоэрозионная характеристика
«коридора» газопровода**

№	Регион исследования	Ландшафтная характеристика	Эрозия почв (противоэрозионные мероприятия)
1	2	3	4
1	Марнеули	Полупустынно степной	Каштановые, перегнойно-сульфатные и серобурые почвы. Наблюдается ветровая и водная эрозия. (<i>Закрепление балок и оврагов</i>).
2	Гардабани	Мелкогорно-степной с преобладанием черноземов	Комплекс солонцовых и засоленных местных почв. (<i>Борьба с овражными и суффозионными явлениями</i>)

Таблица 3.2 (продолжение)

1	2	3	4
3	Тетри Цкаро	Низкогорный дубово-грабовый	Почвы предгорной зоны Восточной Грузии. В разной степени смытые, поврежденные водной и ветровой эрозией. <i>(Борьба с селевыми потоками).</i>
4	Ахалцихе	Террасированные котлованы с фриганоидной растительностью	Почвы предгорной зоны Восточной Грузии: серо-коричневые, коричневые лесные, в разной степени смытые, поврежденные водной и ветровой эрозии. <i>(Местами борьба с ирригационной эрозией и дождевание, закрепление балок и оврагов).</i>
5	Боржоми	Горно-долинный, дубово-грабовый	Горно-лесные почвы бурые лесные, перегнойно-карбонатные. <i>(До 15° уклона выборочная рубка. Борьба с селевыми потоками).</i>
6	Цалка	Горно-степной с черноземами	Горные черноземы, в разной степени смытые, местами с обнажениями пород. <i>(Поперечная обработка, бороздование, снегозадержание, закрепление оврагов).</i>

На рис. 3.1 представлен участок трассы газопровода в Гардабанском районе.

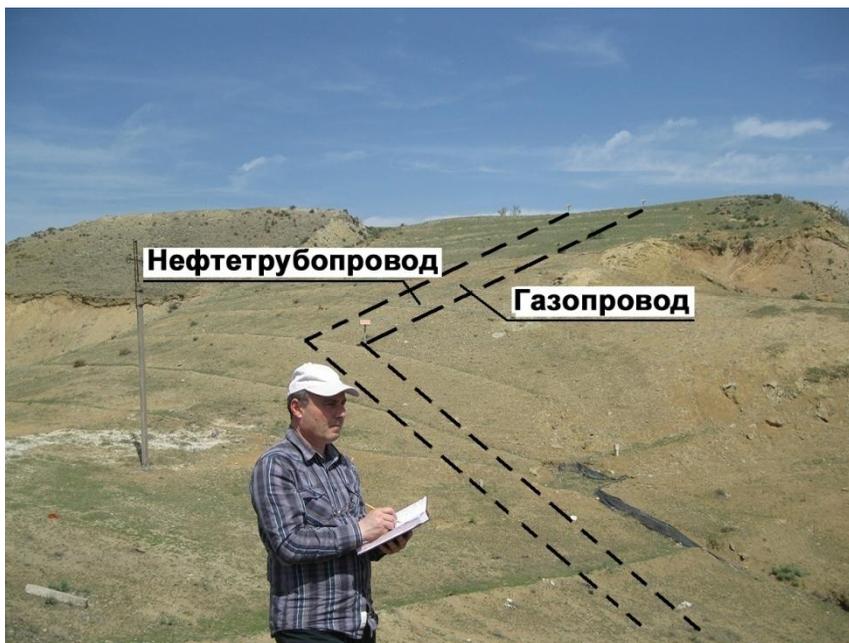


Рис. 3.1. Участок трассы газопровода и нефтетрубопровода в Гардабанском регионе, в пикете КР-27

Интенсивность эрозионных процессов и класс (уровень) повреждения (E) откоса были оценены по известной шкале [5], численные значения которых приведены в табл. 3.3.

Для оценки общей ситуации трассы газопровода на рис. 3.2 показан поперечный профиль коридора, при пересечении газопроводом оврага.

Таблица 3.3

Показатель эрозии по шкале Р.П. Моргана

Класс эрозии	2	3	4	5	6	7
Оценка	Незначительный	Средний	Высокий	Сильный	Очень сильный	Катастрофический
Интенсивность эрозии (м/га)	2-5	5-10	10-50	50-100	100-500	>500

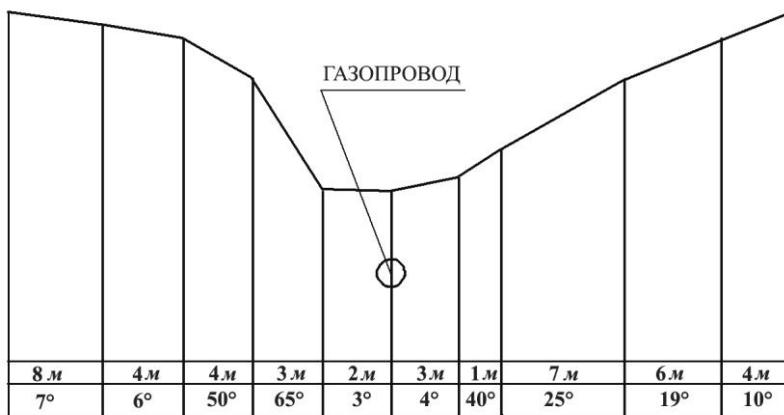


Рис.3.2. Поперечный профиль коридора газопровода в пикете КР 177 + 944 (пересечение газопровода с оврагами)

Результаты полевых экспедиционных работ на трассе газопровода позволили сделать большую выборку (число статистических данных – 252 точек, с соответствующими интервалами и частотами (m_i)) и объективно оценить эрозионный уровень (см. табл. 3.4).

Таблица 3.4

Значения уровня эрозии, отнесенных к соответствующим интервалам (E) и частотам (m_i)

Интервалы уровня эрозии (E)	2-3	3-4	4-5	5-6
Частоты (m_i)	26	131	73	22
$f(E)$	0,103	0,519	0,289	0,087

Математическое ожидание (m_*) вычислялось по зависимости [6]:

$$m_* = \sum_{i=1}^n f(E) \cdot (E_{cp}) = 2,5 \cdot 0,103 + 3,5 \cdot 0,519 + 4,5 \cdot 0,289 + 5,5 \cdot 0,087 = 3,853 \quad (3.1)$$

Среднее значение эрозионного класса (\bar{E}) в исследуемом «коридоре» было равно:

$$(\bar{E}) = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{N} = \frac{1021}{252} = 4,05 \quad (3.2)$$

Значение отклонения эрозионного класса от среднего значения эрозии составило:

$$\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 = 187,053 \quad (3.3)$$

Значение $f(E) = m_i / N$

Среднеквадратическое отклонение эрозии вычислялось из известного соотношения [6]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{N}} = \sqrt{\frac{187,053}{252}} = 0,862 \quad (3.4)$$

На рис. 2.3 представлена гистограмма (1) и теоретическая кривая (2) уровня эрозионного повреждения горных откосов в «коридоре» газопровода.

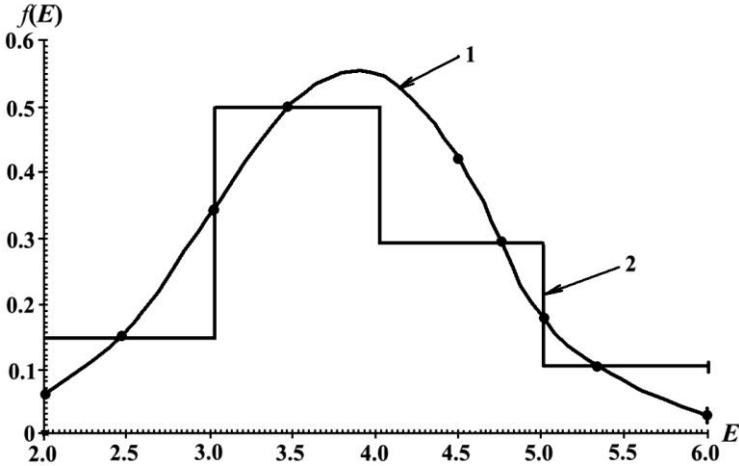


Рис. 3.3. Гистограмма (1) и теоретическая кривая (2) уровня эрозии

Представленной на рисунке теоретической кривой соответствует следующий вид распределения [7]:

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-h^2(E - m_*)^2\right], \quad (3.5)$$

где m_* – математическое ожидание;

h – мера точности, которая равна:

$$h^2 = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2 = \left(\frac{1}{0,862 \cdot \sqrt{2}}\right)^2 = 0,673, \quad (3.6)$$

В нашем случае зависимость (3.5) примет следующий вид:

$$f(E) = 0,564 \cdot \exp\left[-0,673(E - 3,853)^2\right]. \quad (3.7)$$

Уравнение (3.7) соответствует нормальному закону распределения с учетом так называемой меры точности (h).

Вероятность состояния эрозионной ситуации горного ландшафта в «коридоре» газопровода равна:

$$P(E) = \int_0^6 0,564 \cdot \exp[-0,673(E - 3,853)^2] dE \quad (3.8)$$

Интеграл, который дан в зависимости (3.8); был решен методом, предложенным французским математиком Ж.В. Понселе [7] и равен:

$$P(E) = 0,523 \quad (3.9)$$

Эрозионный риск $R(E)$ горных ландшафтов Грузии в коридоре газопровода составляет:

$$\begin{aligned} R(E) &= 1 - \int_0^6 0,564 \cdot \exp[-0,673(E - 3,853)^2] dE = \\ &= 1 - 0,523 = 0,477 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Полученный результат $R(E) = 0,477$, указывает на довольно большой риск эрозии горных ландшафтов Грузии в коридоре исследуемого «коридора» газопровода, поэтому для надежной работы подобного типа газонефтепроводов, необходимо проведение инженерно-экологических мероприятий, в том числе с использованием средств, новизна конструкций которых защищена авторскими свидетельствами и патентами [8, 9, 10].

Таким образом:

– анализ проведенных полевых работ (252 точки в числе статистических рядов) позволил установить среднеквадратическое отклонение уровня эрозии, составляющее $\sigma = 0,862$, и математическое ожидание $-m_* = 3,853$.

– на основе теорий надежности и риска была выявлена функция распределения эрозионного класса горных откосов, подчиняющаяся закону нормального распределения, с так называемой мерой точности.

– определена надежность горных склонов в «энергокоридорах» Грузии, численно равная $P(E) = 0,523$, и соответственно – эрозионный риск горных склонов $R(E) = 0,477$.

§ 3.2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГОРНЫХ СКЛОНОВ ГРУЗИИ В КОРИДОРЕ НЕФТЕТРУБОПРОВОДА БАКУ-СУПСА

Для надежной работы нефтегазопроводов, проходящих по горным откосам, необходимо оценить состояние экологической ситуации склонов на основе теории надежности и теории риска.

В работе [12] отмечается, что основными причинами разрушений склонов от эрозионных процессов является неточная расчетная схема проектирования противоэрозионных сооружений и несовершенство математической модели, которая должна адекватно описывать природные явления.

Целью исследования была оценка экологической устойчивости горных склонов с учетом изучения эрозионного процесса на трассе ныне действующего нефтепровода с характеристиками:

- * диаметр – 530 мм;
- * толщина стальных труб – 7,5...9,0 мм;
- * пропускная способность – 115000 баррелей в сутки ($9762 \text{ м}^3/\text{с}$).

Трасса трубопровода Баку-Супса, входит на территорию Грузии в Гардабанском регионе на высоте 250 метров над уровнем моря (H_0).

Трасса проходит через Картлийский, Внутри-Картлийский, Лихийский и Месхетский хребты, высота которых изменяется от 250 до 1500 м. (над H_0), нефть попадает в терминал Супса в акватории Черного моря на высоте 3 м (над H_0).

В табл. 3.5 даны характеристики геологических, ландшафтных, климатических, эрозионных черт различных районов Грузии [2]; выделена специфика противоэрозионных мероприятий в местах расположения нефтетрубопровода.

А) ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПРОМОИН НА ГОРНЫХ СКЛОНАХ

С целью изучения эрозионного процесса на трассе нефтетрубопровода Баку-Супса в первую очередь обращено внимание на растительный покров в коридоре (шириной 20...30 м) трубопровода. Состояние растительного покрова, по сравнению с ландшафтом примыкающих территорий, было оценено как неудовлетворительное.

Экспедиционно-полевые исследования проводились на трассе трубопровода, где угол откоса горного склона изменяется в пределах $\alpha = 5^\circ \dots 37^\circ$, а в некоторых случаях достигает и больших значений.

Отношение глубины (H) и ширины (B) промоин, возникающих на этих склонах при воздействии водного потока, $H/B = 0,14 \dots 1,95$.

На рис. 3.4 дан поперечный профиль горных склонов Месхетского хребта в селе Саджавахо, в месте расположения нефтетрубопровода.

Полевые исследования показали, что участки склонов, примыкающих к оврагам и балкам, обычно характеризуются

размывами и промоинами, а на некоторых склонах отмечается учащенная сеть промоин. Для выявления степени экологического равновесия на горных склонах, необходимо было изучить динамику промоин, принимая во внимание их геометрические размеры. Для установления глубины промоин требовалось определить сток, питающий эрозионные процессы (с целью их последующего устранения).

Одним из важных факторов развития этих процессов (наряду с растительностью) имеет интенсивность осадков, при которых формируются ливни и снежный покров.

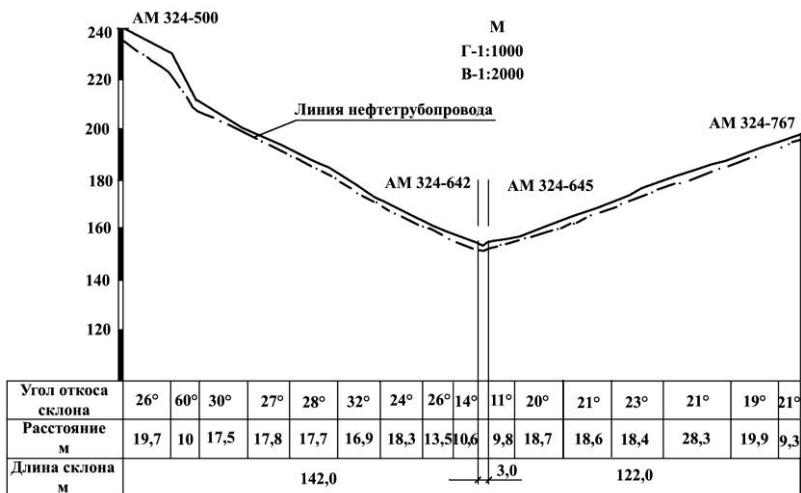


Рис. 3.4. Поперечный профиль ущелья Месхетского хребта (у села Саджавахо на трассе нефтегазопровода в пикете от АМ324-500 по АМ 324-767)

Таблица 3.5

Комплексная оценка регионов в местах расположения нефтегазопровода

Наименование региона	Геология	Ландшафт	Климат	Эрозия почв и противоэрозионные мероприятия
1	2	3	4	5
Гардабанский регион	Верхний палеозой триас. <i>Глинистые кварциты</i> . (Аллювиальные отложения).	Равнинно-пустынно-степной: с каштановыми и солонцеватыми почвами.	Климат умеренно теплых степей: с жарким летом и 2-мя минимумами осадков в году.	Каштановые, перегнойно-сульфатные и серо-бурые почвы, местами сильно смытые, подверженные ветровой и водной эрозии, расчлененные промоинами и оврагами.
Тбилиси и пригород	Верхний эоцен. <i>Глины, мергели, песчаники, реже вулканогенные образования</i> . (Аллювиально-пролювиальные).	Террасированные бородачевые степи.	Переходный: от климата умеренно теплых степей к умеренно влажному; с жарким летом и 2-мя минимумами осадков в году.	Почвы предгорной зоны Восточной Грузии: серо-коричневые, коричневые, лесные, в разной степени смытые, подверженные ветровой и водной эрозии. <i>Закрепление балок и оврагов. Борьба с селевыми потоками.</i>

Таблица 3.5 (продолжение)

1	2	3	4	5
Мцхетский регион	Верхний миоцен. <i>Глины, мергели, песчаники, конгломераты.</i> Континентальные отложения. <i>Конгломераты, глины и пески.</i> (Аллювиальные, делювиальные, пролювиальные).	1. Среднегорный: с грабово-буковыми лесами (с колхидскими элементами) и коричневыми, бурыми почвами 2. Субальпийский : лесолуговой.	Умерено влажный климат: с умерено холодной зимой и жарким летом и 2-мя минимумами осадков в году.	Горно-лесные почвы: бурые лесные, оподзоленные, в разной степени смытые, местами с обнаженной пород 15° уклона. <i>Выборочная рубка, на крутых склонах рубка не производится.</i> <i>Борьба с селевыми потоками.</i>
Каспский регион	Четвертичные отложения нерасчлененные. <i>Галечники пески, суглинки, глины.</i> [Аллювиальные и флювиогляциальные (без подразделения)].	1. Лесные рощи: с аллювиально-луговыми, карбонатными и коричневыми почвами 2. Пологосклонный: кустарниково-лесной.	Умерено влажный климат: с умерено холодной зимой и продолжительным теплым летом, с 2-мя минимумами осадков в году.	Почвы предгорной зоны Восточной Грузии: серокоричневые, коричневые лесные, в разной степени смытые, подверженные ветровой и водной эрозии. <i>Закрепление балок и оврагов.</i> <i>Борьба с селевыми потоками.</i>

Таблица 3.5 (продолжение)

1	2	3	4	5
Горийский регион	Четвертичные отложения нерасчлененные. <i>Галечники пески, суглинки, глины</i> . [Аллювиальные и флювиогляциальные (без подразделения)].	Пологосклонный кустарниково-лесной: с аллювиально-луговыми карбонатными и лугово-коричневыми почвами.	Переходный: от климата умеренно теплых степей к умеренно влажному; с жарким летом и 2-мя минимумами осадков в году.	Аллювиальные, аллювиально-луговые, лугово-коричневые почвы местами с овражной эрозией. <i>Закрепление балок, оврагов. Устройство селеотводных сооружений.</i>
Хашурский регион	1. Верхний миоцен. <i>Известняки, мергели, песчаники, вулканогенные образования</i> . 2. Гранитоиды палеозойские. (Элювиально-делювиальные отложения, суглинки, щебень)	1. Овражно-террасированный: с шиблияковыми степями. 2. Низкогорный дубово-грабовый: с колхидскими элементами и среднегорно-лесной буковый.	Умеренно влажный климат: с умеренно холодной зимой и продолжительным теплым летом, с 2-мя минимумами осадков в году.	Горные черноземы, в разной степени смытые, местами с обнажениями пород. <i>Поперечная обработка, бороздование, полосное освоение склонов, снегозадержание, закрепление балок и оврагов. Устройство местами лесных защитных полос.</i>

Таблица 3.5 (продолжение)

1	2	3	4	5
Сачхере-Чиатурский регион	1. Олигоцен-нижний миоцен. <i>Глины, песчаник (майкопская свита)</i> . 2. Верхний палеозой триас. <i>Глинистые сланцы, кварцы</i> . 3. Средний миоцен. <i>Песчанки, глины, известняки, конгломераты</i> . (Современные аллювиальные, флювиогляциальные. Аллювиальные и флювиогляциальные миндельской ледниковой эпохи).	1. Среднегорно-лесной: <i>буковый</i> . 2. Плато с дубовыми и буковыми лесами. 3. Низкогорный: с дубовыми и <i>буково-каштановыми</i> лесами.	Достаточно влажный климат: с умерено холодной зимой и сравнительно сухим жарким летом.	Желтоземные перегнойно-карбонатные и бурые лесные почвы предгорной зоны, средне и (местами) сильно смытые с обнажением пород. <i>На освоенных склонах поперечная обработка, бороздование, террасирование, посадка кустарников. В лесных массивах – фитомелиорация. Закрепление оползней, местами борьба с селевыми потоками.</i>
Зестафонский регион	Верхний миоцен. <i>Глины, мергели, песчаники, конгломераты</i> . Гранитоиды палеозойские (Аллювиальные и флювиогляциальные миндельской ледниковой эпохи).	1. Грядовый: с подзолистыми и <i>перегнойно-карбонатными</i> почвами; 2. Низкогорный: с дубовыми и <i>буково-каштановыми</i> лесами.	Влажный климат: с умеренно холодной зимой и продолжительным теплым летом.	Желтоземные перегнойно-карбонатные и аллювиальные, аллювиально-луговые и лугово-коричневые почвы, средне и (местами) сильно смытые с обнажением пород. <i>На сильно смытых почвах террасирование, а для более 15° склона – ограничение рубки, лесные защитные полосы.</i>

Таблица 3.5 (продолжение)

1	2	3	4	5
<p>Самредия-Ланчхутский регион</p>	<p>1. Четвертичные отложения нерасчлененные. <i>Галечники, пески, суглинки, глины.</i> 2. Олигоцен-нижний миоцен. <i>Глины, песчаники.</i> (Аллювиальные и флювиогляциальные, вюрмской ледниковой эпохи).</p>	<p>1. Лиановые леса. 2. Среднегорно-лесной: буковый. 3. Холмистый: с красноземами и желтоземами.</p>	<p>Влажная подзона: с хорошо выраженным муссонным характером ветров, с максимальным количеством осадков летом и осенью.</p>	<p>Не смытые и (местами) слабо смытые подзолистые почвы; красноземные и бурые лесные освоенные почвы, смытые в разной степени. <i>Устройство лесных защитных полос и отвод поверхностных вод.</i></p>

С целью достижения сформулированной выше цели были использованы данные метеостанций соответствующих регионов [3], в частности, интенсивность дождя (σ_0) при 10%-ной обеспеченности. Значения этих природных факторов на горных трассах нефтетрубопровода, где происходят особо активные эрозионные процессы, изменяются в пределах $\sigma_0 = 3,8...5,0$ мм/мин.

Функциональная связь между глубиной (H) промоин и уклоном горного склона (i) при разных значениях интенсивности (σ_0) 10%-ной обеспеченности дана на рис. 3.5.

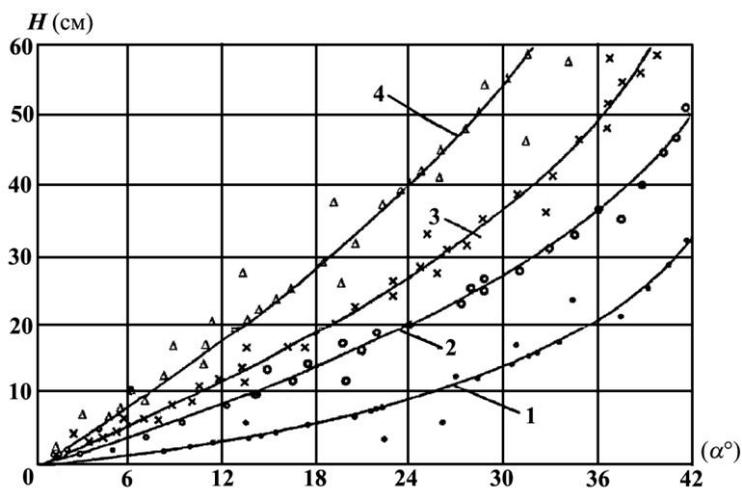


Рис. 3.5. Поперечный профиль ущелья Месхетского хребта (у села Саджавахо на трассе нефтетрубопровода в пикете от АМ 324-500 по АМ 324-767)

Опираясь на результаты проведенных полевых исследований, рассчитаны статистические данные и получена

зависимость:

$$H = \left(\frac{\sigma_0 - 3,8}{1,04} \right)^{0,35} \cdot \alpha, \quad (3.11)$$

где: $\sigma_0 > 3,8$ мм/мин; $\alpha = 5^\circ \dots 37^\circ$.

Определив глубину промоины (H), необходимо знать и ее ширину (B), используя эти параметры, на следующем этапе рассчитывается объем эродируемого материала, вынесенного на поверхностный сток.

Исследования дали возможность получить зависимость для B , имеющую вид:

$$B = \frac{9,31H^{0,94}}{\alpha^{0,6}}, \quad (3.12)$$

где: $2^\circ \leq \alpha \leq 42^\circ$, $H > 2$ см.

С учетом выражений (3.11) и (3.12) были рассчитаны H , B промоин и оврагов, формирующихся в виде балок на горных склонах над нефтетрубопроводом. Результаты расчетов отнесены: к глубине оврагов (сходимость между рассчитанными и фактическими величинами 0,95% вероятности достигает 90-95 %), и к ширине оврагов (сходимость при той же вероятности 80-85%).

Б) ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА НА ГОРНЫХ СКЛОНАХ

Статистические данные (390 точек) дают возможность оценить состояние экологической ситуации склонов с применением теории надежности и теории риска.

Значения отношения величин промоин (H/B) по интервалам и частоте даны в табл. 3.6, а график гистограммы с

соответствующими кривыми – на рис. 3.6.

Таблица 3.6

Интервалы и частота относительных величин (H/B) промоин

Интервалы (H/B)	0-0,4	0,4-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
Частота m_i	30	196	90	13	6
(H/B)	0,089	0,585	0,268	0,039	0,018

Примечание. Здесь $f(H/B) = m_i / n$, $n = 335$

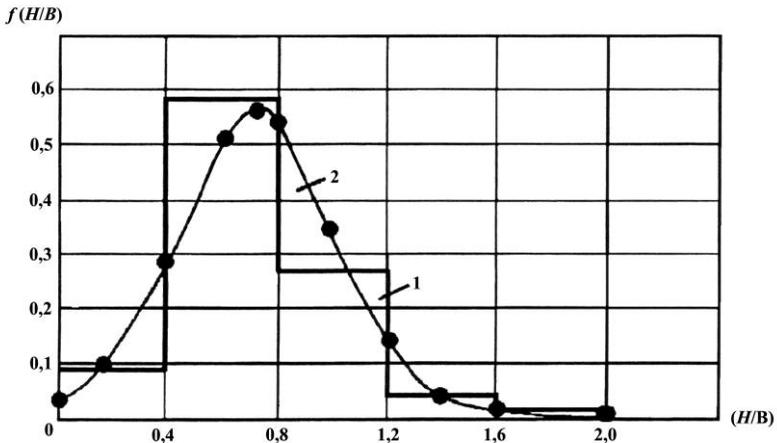


Рис.3.6. График гистограммы (1) и соответствующей кривой (2)

Математическое ожидание (m) относительных величин $f(H/B)$ равно:

$$\begin{aligned}
 m &= \sum_{i=1}^n f(H/B)_i = 0,2 \cdot 0,089 + 0,6 \cdot 0,585 + \\
 &+ 1,0 \cdot 0,268 + 1,4 \cdot 0,039 + 1,8 \cdot 0,018 = 0,724 \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Среднеквадратическое отклонение относительных величин (H/B) промоин будет:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^n (H/B) - \sum_{i=1}^n (\bar{H}/B) \right]^2}{n}} = \sqrt{\frac{27,1}{335}} = 0,284 \quad (3.14)$$

Относительные величины промоин (H/B) будут рассчитаны по нормальному закону распределения с учетом так называемой меры точности (h) которая равна:

$$h^2 = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2 = \left(\frac{1}{0,284\sqrt{2}} \right)^2 = 6,2 \quad (3.15)$$

Распределение случайных величин промоин (H/B) будет рассчитано по закону плотности распределения (рис. 3.6).

Сама плотность функции распределения имеет следующий вид:

$$f(H/B) = 0,564 \cdot \exp \left\{ -6,2[(H/B) - 0,724]^2 \right\} \quad (3.16)$$

Вероятность состояния экологической ситуации склонов, при возникновении промоин после водных эрозий, составляет:

$$P_1(H/B) = \int_0^{2,0} 0,564 \cdot \exp \left\{ -6,2[(H/B) - 0,724]^2 \right\} d(H/B) = 0,421 \quad (3.17)$$

Риск выхода из строя нефтетрубопровода Баку-Супса, расположенного под эрозионными участками горных склонов, при возникновении промоин, составляет:

$$R_1(H/B) = 1 - P_1(H/B) = 1 - 0,421 = 0,579 \quad (3.18)$$

Полевые исследования на трассе нефтетрубопровода Баку-Супса показали, что на конечных участках промоин в большинстве случаев, где увеличивается уклон склона, имеет место возникновение оврагов, которые повышают риск возникновения аварийных ситуаций.

С целью изучения этой проблемы было исследована закономерность возникновения оврагов расположенных над нефтетрубопроводом и вблизи трассы. Число статистических данных составило 55 точек. Если учесть, что общее число исследованных оврагов равнялось 11, то на каждом овраге было взято по 5 точек.

Отметим, что овраги образовались как вдоль трассы нефтетрубопровода, так и поперек, исходя из топографической ситуации горного склона.

В табл. 3.7 даются данные относительных величин оврага (H_1/B_1), использованных в дальнейшем для составления гистограмм.

Таблица 3.7

Интервалы и частота относительных величин (H_1/B_1) оврагов

Интервалы (H_1/B_1)	0-0,4	0,4-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
Частота (m_i)	2	26	20	5	2
(H_1/B_1)	0,036	0,473	0,364	0,091	0,036

Для оврагов математическое ожидание (m_i) и среднеквадратическое отклонение (σ_1) будет:

$$m_1 = \sum_{i=1}^n f(H_1/B_1) = 0,2 \cdot 0,036 + 0,6 \cdot 0,473 + 1,0 \cdot 0,364 + 1,4 \cdot 0,091 + 1,8 \cdot 0,036 = 0,847 \quad (3.19)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^n (H_1/B_1) - \sum_{i=1}^n (H_1/B_1) \right]^2}{n_1}} = \sqrt{\frac{6,4735}{55}} = 0,343 \quad (3.20)$$

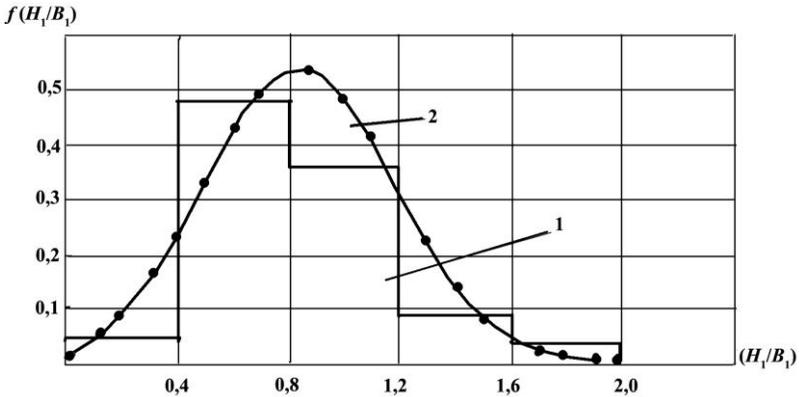


Рис. 3.7. Гистограмма (1) и плотность распределения случайных величин (H_1/B_1) оврага (2)

Как видно, случайная величина (H_1/B_1) подчиняется нормальному закону с плотностью распределения (рис. 3.7), зависимость которой имеет следующий вид:

$$f(H_1/B_1) = 0,544 \cdot \exp\left\{-4,249[(H_1/B_1) - 0,847]^2\right\}, \quad (3.21)$$

где, мера точности (h) равна:

$$h^2 = \left(\frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right)^2 = \left(\frac{1}{0,343\sqrt{2}}\right)^2 = 4,249 \quad (3.22)$$

Вероятность горного склона при возникновении оврага вычисляется:

$$P_2(H_1/B_1) = \int_0^2 0,544 \cdot \exp\left\{-4,249[(H_1/B_1) - 0,847]^2\right\} d(H_1/B_1) = 0,414 \quad (3.23)$$

Риск выхода из строя трубопровода при возникновении оврага равен:

$$R_2(H_1/B_1) = 1 - P_2(H_1/B_1) = 1 - 0,414 = 0,586. \quad (3.24)$$

Проводя анализ и сопоставляя риск выхода из строя трубопровода Баку-Супса при возникновении промоин и оврагов, получим, что $R_2(H_1/B_1) > R_1(H/B)$, то есть $0,586 > 0,579$, что соответствует действительному развитию событий.

В природе при возникновении водной эрозии на горных склонах происходит так называемая совместная отрицательная работа промоин и оврагов. В этом случае полная вероятность горного склона при совместном событии промоин и оврагов равна:

$$P_0 = P_1(H/B) \cdot P_2(H_1/B_1) = 0,421 \cdot 0,414 = 0,174. \quad (3.25)$$

Риск выхода из строя нефтетрубопровода Баку-Супса, находящегося на горном склоне, при совместном событии возникновения оврага и промоин вблизи трассы трубопровода равен:

$$R_0 = 1 - P_0 = 1 - 0,174 = 0,826. \quad (3.26)$$

Полученный результат указывает на значительную величину риска выхода из строя нефтетрубопровода.

Таким образом, на основании натурных исследований проведенных в апреле-августе 2000 г. на трассе нефтетрубопровода Баку-Супса были изучены эрозионные процессы горных склонов, в частности, особенности и статистика возникновения промоин и оврагов.

Для оценки экологической ситуации определены количественные показатели надежности склонов и риска выхода из строя трубопровода.

Таким образом, для сохранения и улучшения ныне существующей экологической ситуации горных склонов в

местах строительства нефтегазотрубопроводов необходимо проведение комплекса современных инженерно-экологических мероприятий, отличающихся не столько экономией строительных материалов, а трезвым эколого-экономическим подходом при реализации столь крупномасштабной хозяйственной задачи.

Результаты исследований указывают на необходимость пересмотра ранее разработанных противоэрозионных мероприятий на горных откосах, создания надежных и рентабельных гидротехнических противоэрозионных сооружений [9, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирицхулава Ц.Е.** Прогнозирование общего размыва в мостовых и в местах пересечения рек нефтегазопроводами с учетом времени, //Труды международной конференции «Эрозионно-селевые явления и некоторые смежные проблемы». Тбилиси, 2001, стр. 131-155.
2. Атлас Грузинской ССР. Тбилиси-Москва, 1964, 259 стр.
3. **Мирицхулава Ц.Е.** Водная эрозия почв. Тбилиси, изд-во «Мецниереба», 1999, 316 стр.
4. **Мирицхулава Ц.Е.** Количественная оценка предельно допустимых нагрузок на ландшафт //Природопользование и геоэкология. Известия АН России, серия географическая, М., 2001, №3, стр. 68-74.
5. **Morgan R.P.C., Hann M.J.** Shah Deniz Gas Export: erosion risk assessment //Interim Report to PB Kvaerner. Granfield University, UK, Silsoe. 2001, 25 p.
6. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. М.: «Наука», 1984, 831 стр.
7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: «Наука», 1962, 546 стр.
8. **Гавардашвили Г.В., Шарангия Р.Л.** Устройство для борьбы с эрозией. /Авт. св. СССР, №1780342, бюлл. №47, М., 1992, с. 156.

9. *Gavardashvili G.V., Nadaraia M.N.* Protection of Mountain Landscapes from the Erosion and Debris-Flow. //Bulletin of The Georgian Academy of Sciences, Tbilisi, 1968. v. 158, N2, pp. 297-299.
10. *Gavardachvili G.V.* Les Nouvelles Espèces des Construction de Protection de la Nature. Tbilisi, «Metsniereba», 1999, 42 p.
11. *Мирихулава Ц.Е.* Экологические нарушения. Тбилиси, 1993, 433 стр.
12. Климат и климатические ресурсы Грузии. //Тр. ЗакНИИГМИ, вып. 44(50), Л., 1971, 382 стр.

IV ГЛАВА. К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

§ 4.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТЕНИЙ ВЕТИВЕР

Эрозионные процессы на горных и предгорных участках склонов обычно протекают интенсивно со значительными потерями почвенного покрова, что крайне отрицательно отражается на экологическую обстановку окружающей среды. Эти потери в некоторых случаях достигают катастрофических масштабов, нередко смывая почву до самых коренных пород.

При подобных условиях, с учетом труднодоступности горных местностей, крайне сложно применять даже наиболее простые и малогабаритные виды гидротехнических сооружений [1], и преимущество следует отдавать легким видам противоэрозионных сооружений из местного плетневого и фашинного, а также бревенчатого материала [2]; могут найти также применение различные виды стеблевых растений, посаженные на крутых склонах на определенном расстоянии друг от друга в ряде и между рядами.

При этом следует учитывать самобытность горных почв, характеризующиеся, в отличие от равнинных, пестротой почвенного покрова, сложностью рельефа с учетом его сходимости (конвергентности) или расходимости (дивергентности)

склонов, повышенной гумусностью, разнообразием экспозиции склонов и их крутизны, разнообразностью растений, значительным разбросом показателей интенсивности осадков и т.д. и, что особенно важно – преобладание стока над просачиваемостью; последнее является чуть не основной причиной деградации земель в горных регионах. Поэтому разумно подобранные противоэрозионные мероприятия следует осуществлять сразу при появлении первых же признаков эрозии.

Во многих публикациях дается емкая и обстоятельная информация об эрозионных явлениях, впервые для практики предлагаются методы и способы количественной оценки водной эрозии практически почти для любых случаев, встречающихся в природе.

Однако, главенствующую роль в проблеме борьбы против эрозионных явлений в горных условиях в случае их масштабности следует отнести своевременному осуществлению комплекса мероприятий, в том числе инженерного характера. В отдельных случаях при значительных уклонах поверхности склона и труднодоступности местности весьма эффективным может оказаться способ разведения различных видов растительности, желательна из местной флоры, которые адаптированы к конкретным условиям, быстро растут, отличаются плотной и глубокой корневой системой и характеризуются почвосберегающими свойствами. Эти растения своей корневой системой как бы армируют охваченное ими в почве пространство.

В арсенале способов борьбы против эрозии склонов до последнего времени мало внимание уделялось обоснованным расчетным методом по установлению оптимального расстояния между растениями с целью минимизации

эрозионного процесса. Они, при удачном их подборе и разумном размещении способны если не полностью, то заметно уменьшать смыв почвы. К этим видам растений следует отнести ветиверовые (*Vetiveria Ziziniodes*) и подобные им растения, удачно приспособляемые, особенно, к аридным условиям климата.

Учет некоторых показателей этой растительности и ее группы (например диаметр ствола, развитость корневой системы, расстояние между стеблями в ряду и расстояние между рядами и т.д.), предназначенных в качестве «зеленой дамбы» для уменьшения скорости потока и задержания твердого стока могут сыграть значительную роль, при усилении их почвоохранных свойств.

При создании математической модели рассматриваемой задачи за основу следует принять определенную схему, соответствующую естественно-природным условиям самого эрозионного процесса и показателям зеленых насаждений.

Обычно, во время водной эрозии почв, водный поток представляет собой транспортирующую, а компоненты почвы – твердые частицы – транспортируемую среду, скорость перемещения которой в силу её высокой плотности, часто меньше скорости водного потока, она как бы отстает от водного компонента. Естественно, что не исключается случай перемещения водного потока и транспортируемых им глинистых и коллоидных частиц (обычно весьма малых размеров $<0,05$ мм) с одинаковой скоростью.

Следовательно, во время эрозионного процесса движение слоя воды по склону следует рассматривать, как движение двухфазовой среды.

В свете этих рассуждений установление потери напора

водного потока при его прохождении между стеблями искусственно посаженных на поверхность склона растений дает возможность судить о понижении транспортирующей способности потока, что со своей стороны является средством смягчения эрозионного процесса [3].

Случай 1. Допустим, что стебли растений (ветивера) расположены на склоне по схеме, представленной на рис. 4.1.

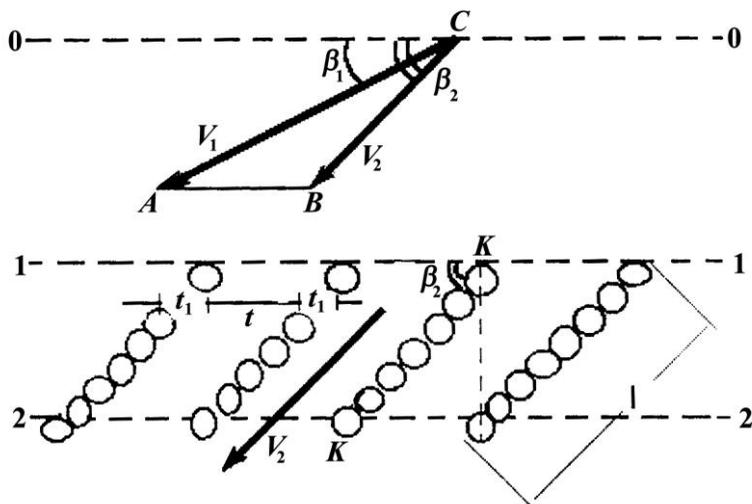


Рис. 4.1. Расчетная схема для установления потери напора при прохождении склонового стока между рядами ботанических валов или других легких противозерозионных сооружений

Расстояние t между стеблями в ряде значительно больше, чем диаметр t_1 отдельного стебля т.е. $t \gg t_1$. β_1 – угол между направлением потока, передвигающегося со скоростью V_1 и плоскостью 0–0, расположенной перед фронтом растений до створа 1–1. β_2 – угол наклона ряда

растений по глубине фронтальной части, совпадающий с углом между вектором скорости V_2 и плоскостью 1–1, т.е. угол между линиями 1–1 и $K-K$.

Резкое изменение направления скорости склонового стока с помощью плотно размещенных рядов стеблевых растений (или из других видов) способствует заметному уменьшению не только транспортирующей способности склонового стока, но и его размывающей способности.

В инженерной практике нередко применяются методы аналогии с использованием основных положений из смежных областей науки. Так, например, гидравлический расчет противоэрозионных сооружений упомянутого выше типа, можно осуществить по аналогии расчета гидротурбин с плоскими лопастями, обеспечивающими интенсивное гашение кинетической энергии поступательного потока [3]; в данном случае ряды стеблей растений следует расположить таким образом, чтобы при прохождении струи воды между ними с изменением направления вектора скорости происходило бы максимальное гашение энергии потока (потеря напора) ради понижения значения размывающей скорости желательного до её неразмывающей величины.

Подобный механизм будет способствовать осаждению частиц взвеси между стеблями растений и созданию т.н. «зеленой дамбы», способствующей отложению в данном створе значительной части транспортируемого водным потоком твердого стока. Установление величины потери напора можно осуществить следующим образом.

Учитывая, что средняя скорость стока перед фронтальной плоскостью ряда растений равна V_1 , а средняя же скорость

между растениям в рядах – V_2 , а также $t \gg t_1$, то можно величиной t_1 пренебречь и принять во внимание лишь расстояние t между соседствующими в ряде растениями. При этом следует предполагать, что стебли растений довольно устойчивы по отношению воздействия наносонесущего потока, чему должно способствовать сильно развитая корневая система.

Уравнение движения на направление $K-K$ (рис. 4.1) будет:

$$p_2 - p_1 = \rho V_1^2 \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \cos(\beta_2 - \beta_1) - \rho V_2^2; \quad (4.1)$$

Здесь $p_2 - p_1$ разность давлений в соседствующих створах 1–1 и 2–2; ρ – плотность потока.

Уравнение неразрывности в рамках рассматриваемой задачи будет иметь вид:

$$\rho t V_1 \sin \beta_1 = \rho t V_2 \sin \beta_2; \quad (4.2)$$

откуда

$$\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (4.3)$$

Вставляя (4.3) в (4.1) будем иметь:

$$p_2 - p_1 = \rho V_1 V_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - \rho V_2^2. \quad (4.4)$$

Пользуясь уравнением Бернулли [4] взамен (4.4) получим:

$$p_2 - p_1 = \Delta p = 0.5 \rho \left[V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) + V_2^2 \right]. \quad (4.5)$$

На основании теоремы косинусов очевидно, что выражение в квадратных скобках соответствует отрезке АВ (рис. 4.1), т.е. разность векторов V_1 и V_2 .

Ясно, что при $\beta_2 - \beta_1 = 0$; $\cos 0^\circ = 1$ и тогда из равенства (4.5) следует:

$$\Delta p = 0.5 \rho (V_1 - V_2)^2, \quad (4.6)$$

т.е. получаем значение потерь, которое известно в гидравлике под названием теоремы Борда [4].

Определяя отрезок AB из треугольника ABC по теореме синусов и сопоставив его с общеизвестной зависимостью гидравлики [4] получим:

$$\Delta h = \xi \frac{V_1^2}{2g}, \quad (4.7)$$

где

$$\xi = \frac{2g\Delta h}{V_1^2} = \frac{\sin^2(\beta_2 - \beta_1)}{\sin \beta_1}.$$

Здесь Δh – разность глубин потока перед фронтальной плоскости (створ 1–1) и плоскости 2–2; ξ – безразмерный коэффициент потери по величине которой можно судить об эффективности гашения энергии потока.

Как явствует из зависимости (4.5), численное значение потери энергии потоком в основном зависит от величины угла β_2 , т.е. от ориентации линии BC расположения стеблей растений вглубь их рядов за фронтальной плоскостью, что способствует изменению направления движения потока.

Случай 2. Когда диаметр одного стебля (или поперечное сечение других оград из плетневых, фашинных, бревенчатых материалов) того же порядка, что и расстояние между ними, (т.е. препятствия, расположенные во фронтальной плоскости находятся на небольшом расстоянии друг от друга), то тогда условие $t \gg t_1$ не будет удовлетворяться.

Для данного конкретного случая количество движения на направление $K-K$ примет вид:

$$\begin{aligned} p_1(t+t_1)\sin\beta_2 + \rho V_1^2(t+t_1)\sin\beta_1 \cos(\beta_2 - \beta_1) = \\ = p_2 t \sin\beta_2 + \rho V_2^2 t \sin\beta_2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

откуда разность давлений будет:

$$p_2 - p_1 \frac{t+t_1}{t} = \rho V_1^2 \frac{(t+t_1)}{t} \frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2} \cos(\beta_2 - \beta_1) - \rho V_2^2. \quad (4.9)$$

С другой стороны, согласно уравнения неразрывности:

$$\rho(t+t_1)V_1 \sin\beta_1 = \rho t V_2 \sin\beta_2, \quad (4.10)$$

получаем, что:

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2} = \frac{t V_2}{(t+t_1)V_1}, \text{ или } V_2 = \frac{t+t_1}{t} \frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2} V_1. \quad (4.11)$$

Вставляя (4.11) в (4.9), будем иметь:

$$p_2 - p_1 \frac{t+t_1}{t} = \rho V_1 V_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - \rho V_2^2. \quad (4.12)$$

Из уравнения Бернулли [4] следует, что

$$p_2 = p_1 + 0.5\rho V_1^2 - 0.5\rho V_2^2. \quad (4.13)$$

Подстановка (4.13) в (4.12) дает:

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 \left(1 - \frac{t+t_1}{t} \right) = p_1 \frac{t_1}{t} = \\ = 0.5\rho V_1^2 - \rho V_2 V_1 \cos(\beta_2 - \beta_1) - 0.5\rho V_2^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Таким образом, соотношение t_1/t представляет коэффициент потери давления, который выражает искомую величину через p_1 .

Перепишем (4.14) следующим образом:

$$p_1 = \frac{t}{2t_1} \rho \left[V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - V_2^2 \right], \quad (4.15)$$

тогда, учитывая, что $p = \gamma h$ и $\gamma = \rho g$, полученное выражение дает возможность определить значение давления перед фронтальной плоскости растений, т.е. в сечении 1–1, или что то же самое:

$$h_1 = \frac{t}{2t_1 g} [V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - V_2^2]. \quad (4.16)$$

Тогда перепад напора с учетом $\Delta p = p_1 \frac{t_1}{t}$ будет:

$$\Delta h = h_1 \frac{t}{t_1}. \quad (4.17)$$

Зависимости (4.15) и (4.16) определяют величину V_2 в плоскости 2–2 между рядами растений.

При $\beta_2 - \beta_1 = 0$ из (4.15) будем иметь:

$$p_1 = \frac{t}{t_1} \rho \frac{(V_1 - V_2)}{2}. \quad (4.18)$$

Приведенные зависимости дают также возможность осуществить расчеты не через t и t_1 , а с помощью миделевой площади растений ω_1 , покрываемой водным потоком и площади живого сечения межстеблевого пространства ω . Тогда:

$$p_1 = \frac{\omega}{\omega_1} \rho \frac{(V_1 - V_2)}{2} \quad (4.19)$$

или

$$h_1 = \frac{\omega}{\omega_1} \frac{(V_1 - V_2)}{2g}. \quad (4.20)$$

Скорость V_2 выразим через V_1 , тогда:

$$V_2 = V_1 (1 + \omega_1 / \omega). \quad (4.21)$$

Если вставить это выражение в (7.2.18), то будем иметь, что

$$p_1 = \xi_1 \rho \frac{V_1^2}{2} \quad (4.22)$$

или

$$h_1 = \xi_1 \frac{V_1^2}{2g}, \quad (4.23)$$

где $\xi_1 = \frac{(\omega - \omega_1)^2}{\omega_1 \omega}$ представляет собой коэффициент гидравлических потерь при вхождении потока воды в межстеблевом пространстве растений.

Далее для установления транспортирующей способности склонового стока можно воспользоваться известной зависимостью академика Е.А. Замарина [4], имеющий вид:

$$\rho_T = 11V \sqrt{\frac{Vhi}{W}} \text{ кг-с/м}^3, \quad (4.24)^*$$

где V – скорость стока;

h – глубина потока;

i – уклон склона;

W – средневзвешенная гидравлическая крупность наносов.

Длину " l " рядов наклоненных под углом β_2 (рис. 4.1) стеблевых растений или других сооружений можно установить следующим образом:

*) Зависимость академика Е.А. Замарина дает результаты в МКГСС (технической) системе единиц. Для установления транспортирующей способности потока можно также воспользоваться другими общеизвестными зависимостями.

$$l = \frac{t}{\cos \beta_2}. \quad (4.25)$$

Приведенные зависимости дают возможность судить об эффективности гашения избыточной энергии склонового стока и об уменьшений транспортирующей способности твердых включения потока.

Подобные сооружения можно размесить на склонах зигзагообразно на определенных расстояниях друг от друга в зависимости от величины защищаемой от водной эрозии площади.

Практическое применение изложенного метода расчета проиллюстрировано примером, для случая, когда t и t_1 соизмеримые величины.

Пример 4.1.

Следует установить количество осажденных между рядами стеблевых растений наносов, стекающих вместе с водным потоком со склона. Расстояние между рядами стеблевых растений вдоль фронтальной плоскости 1–1 (рис. 4.1) $t = 1.5$ м; диаметр отдельных стеблей $t_1 = 0.17$ м. Скорость стекающего со склона потока на участке выше фронтальной плоскости $V_1 = 1.7$ м/с; уклон поверхности склона $i = 0,0005$, $\beta_1 = 40^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$. Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов $W = 0.0018$ м/с.

Решение.

По формуле (4.11) скорость стока в сечении 2–2

$$V_2 = V_1 \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \cdot \frac{t + t_1}{t} = 1.7 \frac{0.642}{0.866} \cdot \frac{1.5 + 0.17}{1.5} = 1.4 \text{ м/с.}$$

По формуле (4.16) глубина потока в створе 1–1:

$$h_1 = \frac{1.5}{2 \cdot 0.17} \cdot 9.81 [1.7^2 - 2 \cdot 1.7 \cdot 0.940 \cdot 1.4 - 1.4^2] = 0.16 \text{ м.}$$

Перепад давления по формуле (4.17):

$$\Delta h = h_1 \frac{t_1}{t} = 0.16 \frac{0.17}{1.5} = 0.018 \text{ м} \approx 0,02 \text{ м} = 2,0 \text{ см,}$$

тогда $h_2 = h_1 - \Delta h = 0.16 - 0.02 = 0.14 \text{ см.}$

Транспортирующая способность потока в створе 1–1 по зависимости (4.4) будет:

$$\rho_{T(1-1)} = 11.0 \cdot 1.7 \sqrt{\frac{1.7 \cdot 0.16 \cdot 0.0005}{0.0018}} = 5.14 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

В данном случае принимается, что нагрузка потока наносами соответствует его транспортирующей способности.

Для створа 2–2 $V_2 = 1.4 \text{ м/с}$, $h_2 = 0.14 \text{ м.}$

Транспортирующая способность потока смеси равна:

$$\rho_{T(2-2)} = 11.0 \cdot 1.4 \sqrt{\frac{1.4 \cdot 0.14 \cdot 0.0005}{0.0018}} = 3.59 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

За счет изменения (уменьшения) скорости между створами 1–1 и 2–2 разность транспортирующих способностей потока равна:

$$\Delta \rho_T = \rho_{T(1-1)} - \rho_{T(2-2)} = 5.14 - 3.59 = 1.55 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

Это означает, что из каждого кубического метра воды, проходящего между створами 1–1 и 2–2 в единицу времени будут осаждаются наносы в количестве 1,55 кг.

Пересчет полученных данных на общую ширину потока с учетом продолжительности движения стока уже не представляет трудности.

Таким образом, резкое изменение направления движения потока на склоне с помощью легких противозерозионных

сооружений из ботанических валов значительно уменьшает размывающую и транспортирующую способность потока. Степень гашения избыточной кинетической энергии поверхностного стока можно регулировать углом β_2 наклона противоэрозионных легких конструкций из местного материала (растения) без полного перекрытия поверхностного стока, что может увеличить эрозионные процессы за счет перелива стока через поперечные препятствия.

В том случае, если сток движется волновым режимом, следует воспользоваться зависимостями, изложенными в первой главе данной работы.

§ 4.2. НОВЫЕ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

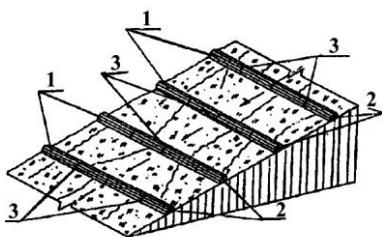
Основы прогнозирования эрозионных процессов и разработки методологии для проектирования противоэрозионных мероприятий в бывшем Советском Союзе, в том числе, и в Грузии, заложил академик Ц.Е. Мирцхулава [5]. Особо следует отметить разработку «Государственной целевой программы защиты почв Грузии от эрозии» под его руководством и при его непосредственном участии в Институте водного хозяйства независимой Грузии, которая утверждена соответствующим постановлением Президента Грузии.

В Институте водного хозяйства разработан ряд противоэрозионных ресурсосберегающих новых конструкций по борьбе с водной эрозией почв, приоритет научнотехнической новизны которых подтвержден грузинскими и зарубежными патентными свидетельствами [6÷9].

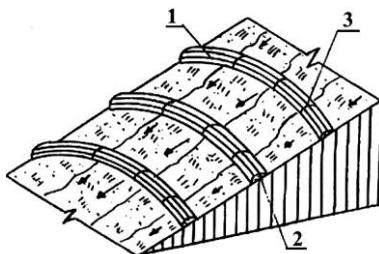
Противоэрозионные валы, которые состоят из мешков с землей, расположенных на горных склонах различными конфигурациями, что обеспечивает гашение кинетической энергии поверхностных потоков воды, возникающих в результате интенсивных дождей. Расстояние между земляными валами и обновление растительного покрова осуществляется по соответствующей методологии, рассмотренной ниже [6÷8].

Сооружение по борьбе с эрозией почв на горных склонах (рис. 4.5), которое составлено секциями из укрепленных по всей ширине горного склона амортизированных автомобильных покрышек, расположенных рядами; использованные покрышки расположены боковыми поверхностями вплотную к друг другу, уложены в грунтовую канаву и плотно связаны между собой металлическим канатом, пропущенному в предварительно сделанные в покрышках отверстия и привязанному к П-образному металлическому элементу прикрепленному к одному концу секции и концы жестко закреплены на П-образном элементе, установленном в другом конце секции, гайкой и болтом; при этом в нижнем бьефе сооружения устроены водоотводящие каналы для отвода с сооружения водного потока [8].

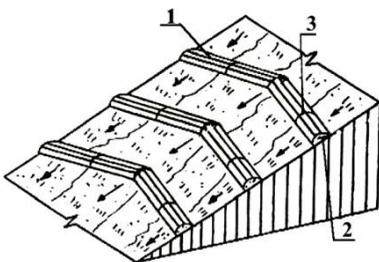
Сооружение по борьбе с эрозией почв на горных склонах (рис. 4.6), состоящее из амортизированных автомобильных покрышек, разрезанных по диаметру, которые одним концом жестко вплотную друг к другу закреплены в грунте, а другая, оставшаяся над почвой часть направлена против водной поверхностной эрозии, возникающей на горных склонах в результате интенсивных дождей [9].



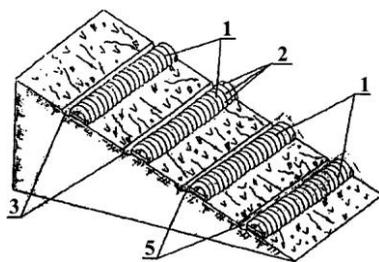
4.2



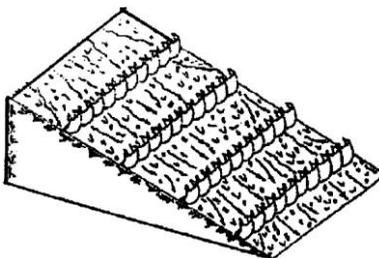
4.3



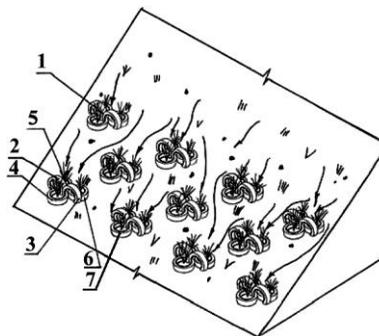
4.4



4.5



4.6



4.7

Рис. 4.2÷4.7. Новые противоэрозионные конструкции

Сооружение по борьбе с эрозией почв на горных склонах (рис. 4.6), состоящее из амортизированных автомобильных

покрышек, расположенных в шахматном порядке составленных секциями [9], из которых две закреплены приблизительно 1/3 частью длины диаметра и вплотную друг к другу рабочими поверхностями связаны так, чтобы их диагональ была перпендикулярна к поверхности склона, а третья помещается на поверхности почвы и введена в полость укрепленных в почве покрышек, а остальные покрышки – на поверхности почвы вплотную друг к другу боковыми поверхностями так, что их рабочие поверхности помещены в почву во внутреннюю часть вмонтированных покрышек. Для усиления устойчивости расположенных на поверхности горного склона в покрышках секций посажены растения.

С учетом топографических, геологических, почвенных, климатических, гидрологических и гидравлических параметров потока поверхностных вод, формирующихся на горном склоне, применяя методологию акад. Ц.Е. Мирцхулава, в Институте водного хозяйства было установлено то критическое взаимное удаление (расстояние) между противоэрозионными валами, которое обеспечивает защиту почвы от водной эрозии [10, 5]

$$X_0 = \frac{V_{\Delta 0}^{5,4} (BH_0)^{2,7} n^{4,4} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2,25 \ln^2(1-R) \cdot d \cdot t \cdot g^{0,8} \theta q} \text{ (м)} \quad (4.26)$$

где $V_{\Delta 0}$ – предельная (неразмывающая) донная скорость почвы (м/с);

B – ширина склона, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$B = \frac{156250}{w \cdot d \cdot t}, \quad (4.27)$$

где w – среднее значение частоты пульсации потока;

d – размер оторвавшейся частицы почвы ($d = 0,0004$ м);

t – продолжительность данной интенсивности дождя, с;

H_0 – допустимая высота размыва дна потока, м;

n – коэффициент шероховатости склона;

α, β – коэффициенты, характеризующие неровность поверхности склона (для вспаханной почвы $\alpha = 13,4$; $\beta = 17,6$);

R – надежность склона с точки зрения эрозии;

θ – угол наклона склона (градус);

q – сток склона (м/с).

Используя значения неразмывающей донной скорости, рекомендованной акад. Ц.Е. Мирцхулава – для супесей – 0,11 м/с, для суглинков – 0,115 м/с, для глин – 0,12 м/с, мы получаем рассчитанные по зависимости оптимальные значения расстояния между противоэрозионными валами, которые приведены в таблице.

Полученные данные были сопоставлены с данными известных в мире ученых Р. Моргана [11], Р. Маршала [12] и USLE для условий супесчаного склона без растительного покрова. В результате анализа было установлено, что методология акад. Ц.Е. Мирцхулава [8] более приемлема, так как кроме основных параметров определяющих эрозию, в расчете учитывается вероятностный характер эрозионных процессов.

Что касается строительного-монтажного стоимости противоэрозионных сооружений, то по предварительным расчетам для устройства 1 погонного метра она не превышает 12-25 лари.

Таблица 4.1

**Значения расстояний между
противоэрозионными валами**

Уклон склона (градус)	Супесь		Суглинок		Глина	
	$V_{\Delta 0} = 0,11$ м/с		$V_{\Delta 0} = 0,115$ м/с		$V_{\Delta 0} = 0,12$ м/с	
	$R=0,95$	$R=0,99$	$R=0,95$	$R=0,99$	$R=0,95$	$R=0,99$
5	39,1	16,6	49,7	21,1	62,6	26,6
10	22,5	9,5	28,6	12,1	35,9	15,3
15	16,2	6,9	20,6	8,8	26,0	11,0
20	12,9	5,5	16,4	7,0	20,6	8,8
30	9,3	4,0	11,9	5,0	14,9	6,3
40	7,4	3,1	9,4	4,0	11,9	5,0
50	6,2	2,6	7,9	3,3	9,9	4,2
60	5,4	2,3	6,8	2,9	8,6	3,6
70	4,7	2,0	6,0	2,6	7,6	3,2

Предложенные методы расчета и конструкции новых противоэрозионных сооружений дадут возможность довести до минимума экологические нарушения горных ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирицхулава Ц.Е.** Противоэрозионные гидротехнические сооружения. Тбилиси, изд-во «Мецниереба» («Наука»), 2005, 270 стр.
2. **Мирицхулава Ц. Е.** Оценка частоты появления селей катастрофического характера. //ж. «Гидротехническое строительство», М., №5, 1988.
3. **Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.** Расчетная модель почвоохранного мероприятия с использованием стеблевых растений. //Экологические системы и приборы, №9, 2006, стр. 40-43.

4. **Штеренлихт Д.В.** Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984, 640 с.
5. **Мирихулава Ц.Е.** Инженерные методы расчета прогноза водной эрозии. М., 1970, 179 стр.
6. **Гавардашвили Г.В.** Противоэрозионное устройство. Патент Грузии №925U, Бюлл. №15(115), Тбилиси, 2002, стр. 25.
7. **Гавардашвили Г.В.** Оценка эрозионных процессов горных ландшафтов в «коридоре» нефтегазопроводов //Инженерная экология, М., №6, 2003, стр. 51-57
8. **Гавардашвили Г.В., Цулукидзе Л.Н.** Противоэрозионное сооружение. Патент Грузии №1080U, Бюлл. №5(153), Тбилиси, 2004, стр. 18.
9. **Гавардашвили Г.В., Цулукидзе Л.Н.** Противоэрозионное сооружение. Патент Грузии №1118U, Бюлл. №5(163), Тбилиси, 2004, стр. 22.
10. **Гавардашвили Г.В.** Эрозионно-селевые процессы и солнечная активность //Экологические системы и приборы, № 2, М., 2007, стр. 50-53.
11. **Morgan, R.P.C.** Topics in Application Geography. Soil Erosion. Longmont, London, 1979, 114 p.
12. **Marshall, R.G. and Ruban, T.F.** Geotechnical aspects of pipeline construction in Alberta. Canadian Geotechnical Journal, 20: 1983, pp. 1-10.

V ГЛАВА. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВОЛНООБРАЗНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СВЯЗНЫХ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ В ЭРОЗИОННЫХ ОЧАГАХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИХ ДВИЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Мощные, насыщенные наносами потоки, в том числе и сели, в основном формируются в эрозионных врезках, представляющих собой целую систему русел в верховьях горных водотоков, которые в результате непрерывных разрушений пород и движения их с вышележащих участков заполняются обломочной массой, подвергающихся затем выветриванию, дроблению и измельчению под влиянием различных естественных факторов. Образующаяся в результате подобных явлений грязевая масса обволакивает обломочные материалы и заполняет пустоты между ними. Подготовленная таким образом в эрозионном врезе селевая смесь находится в связанном состоянии; достаточно ливня, интенсивного таяния снега, появления грунтовых вод или других подобных причин, чтобы она обрушилась вниз по течению захватывая по пути скальные обломки, камни, стволы деревьев и т.д. и превратиться в мощный селевой поток с огромной разрушительной силой [1, 2].

Сформировавшаяся смесь движется по руслу водотока в виде гиперконцентрированного (связного, структурного) грязекаменного потока (если количество ливневых осадков

находится в пределах 10÷20% от веса всей селевой смеси) или несвязного (низко концентрированного турбулентного) потока (количество ливневых осадков находится в пределах 70÷80% от веса всей селевой смеси) или ливневого потока (количество ливневых осадков 95% от веса смеси).

Плотность гиперконцентрированной селевой смеси 1,8÷2,3 т/м³; движущая среда – пластический грязекаменный конгломерат.

Турбулентный селевой поток – это водная среда, часто обогащенная коллоидной взвесью, он транспортирует щепнистую массу и отдельные крупные камни; его плотность меняется в пределах 1,1÷1,7 т/м³, твердые включения 10÷70% по весу. Транспортирующая среда – вода или водокolloидная смесь [1, 2].

Как видно из отмеченного селевые потоки в зависимости от плотности можно отнести как к ньютоновским, так и неньютоновским жидкостям. Поэтому при решении конкретных задач требуется использование законов механики как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

Ниже будет рассмотрены гиперконцентрированные селевые потоки, как наиболее опасные и разрушающегося действия явления. Они формируются редко, но ущерб, наносимый ими окружающей среде, настолько внушителен, что они заслуживают особого внимания.

§ 5.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВОЛНООБРАЗНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СВЯЗНОГО СЕЛЯ В ЭРОЗИОННЫХ ОЧАГАХ

В верхней области части бассейна водотока селевого характера расположены селеобразующие очаги [1]. В очагах, в результате процессов выветривания и размывающей способности воды (ливневой сток, таяние снега и др.) происходит непрерывное разрушение горных пород, слагающих крутые склоны. Нередко непосредственно в этих очагах происходит формирование «микроселевых» потоков (небольшими порциями), которые накапливаются в углубленной части эрозионного вреза у истоков водотока.

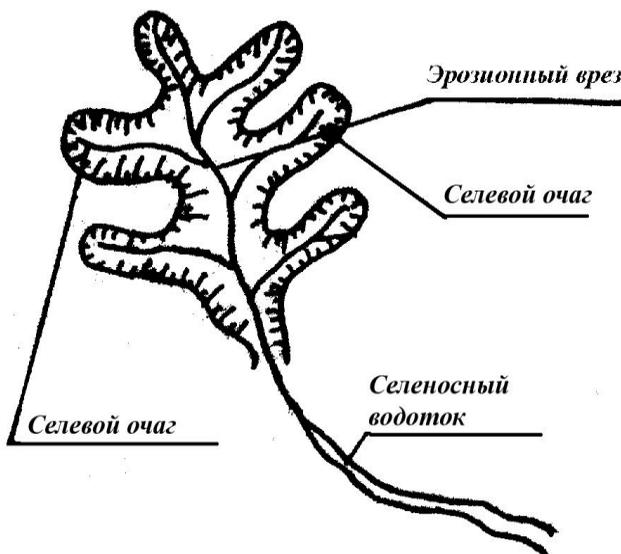


Рис. 5.1. Схема расположения селевых очагов эрозионного вреза

Передвижение «микроселевых» потоков в сторону углубленной части эрозионного вреза происходит, накладываясь друг на друга волновым режимом.

Семейством микроволн накопленный объем селевой массы, достигнув критического состояния, мгновенно начинает передвигаться по руслу транзитной зоны водотока.

Модель волнообразного формирования связного селя в верховьях селеносного бассейна ориентировочно можно представить изложенным ниже методом.

Рассмотрим движение микроселя из одного характерного селевого очага. Приняв коэффициент трения «стекающей» порции селя из селевого очага постоянным и обозначив глубину «порции» элементарного селя через h_c , то тогда для данной конкретной волны общеизвестное уравнение неразрывности (с переменным расходом вдоль пути) будет иметь вид [6]:

$$q'_n = \frac{dh_c}{dt}, \quad (5.1)$$

где: q'_n – интенсивность изменения расхода на единицу длины и ширины;

t – время.

Допустим, $q'_n = const$. Тогда интегрирование (5.1) дает:

$$h_c - h_0 = q'_n(t - t_0), \quad (5.2)$$

Индекс «0» относится к начальным условиям задачи.

Скорость волны по зависимости [2, 3, 5] будет $V_0 = 3V$, где V – средняя скорость при наличии равномерного движения порции селя, тогда имеем:

$$V_0 = \frac{3gih_c^2}{v_c} f(\beta), \quad (5.3)$$

i – осредненный уклон крутых склонов очагов, где непосредственно формируются элементарные «порции» селевых масс.

ν_c – коэффициент кинематической вязкости селя.

Принимая во внимание допущение, что движение селя возможно при $\beta \geq 0,9$, то тогда $f(\beta) = 0,018$.

Для конкретной волны, учитывая (5.3), когда ось « $0x$ » совпадает с направлением движения волны:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{3gih_c^2 \cdot f(\beta)}{\nu_c}. \quad (5.4)$$

Объединяя (5.1) и (5.4), получим:

$$\frac{dh_c}{dx} = \frac{dh_c/dt}{dx/dt} = \frac{q'_n \nu_c}{3gih_c^2 f(\beta)}. \quad (5.5)$$

После интегрирования (5.5) имеем:

$$\frac{(h_c^3 - h_0^3)gif(\beta)}{\nu_c} = q'_n(x - x_0). \quad (5.6)$$

Индекс «0» в приведенных выше зависимостях и в последующих формулах означает начальные условия параметров.

Уравнение (5.6) характеризует профиль траектории поверхности волны в плоскости $h_c x$.

Определяя h_c из зависимости (5.2) и подставляя в (5.6), можно получить форму распространения волны в плоскости xt в функции начальных параметров:

$$[q'_0(t - t_0) + h_0]^3 = h_0^3 + \frac{q'_n(x - x_0)\nu_i}{gif(\beta)}. \quad (5.7)$$

Исключая h_0 из (5.2) и (5.6), можно определить h_c , зависящий от x в нужный момент времени, т.е. профиль

поверхности волны. Из (5.2) следует:

$$h_0 = h_c - q'_n(t - t_0). \quad (5.8)$$

Принимая во внимание (5.8), взамен получим:

$$h_0^3 = [h_c - q'_n(t - t_0)]^3 + \frac{q'_n(x - x_0)v_c}{g \operatorname{if}(\beta)}. \quad (5.9)$$

Когда движение микроселя начинается при $t_0 = 0$ из начальной позиции $x_0 = 0$, дело имеем с первым семейством волн при разных значениях h_c .

Тогда из зависимости (5.6) следует:

$$h_c^3 = h_0^3 + \frac{q'_n v_c x}{g \operatorname{if}(\beta)}. \quad (5.10)$$

Линия распространения волны в плоскости xt , как видно из зависимости (5.7) будет:

$$[q'_n t + h_0^3]^3 = h_0^3 + \frac{q'_n v_c x}{g \operatorname{if}(\beta)}. \quad (5.11)$$

Что касается профиля поверхности, согласно зависимости (5.9), т.к. $t_0 = 0$ и $x_0 = 0$, получим:

$$h_c^3 = (h_c - q'_n t)^3 + \frac{q'_n v_c x}{g \operatorname{if}(\beta)}. \quad (5.12)$$

Для второго семейства волн последующие моменты времени отсчитываются из условий $x_0 = 0$ и $h_0 = 0$. Тогда линия распространения волны и профиль поверхности второго семейства волн описываются одним уравнением, т.е. из (5.6) получим:

$$h_c^3 = \frac{q'_n v_c x}{g \operatorname{if}(\beta)}. \quad (5.13)$$

Зависимость (5.13) характеризует профиль волны в установившемся состоянии.

Линия распространения микроволн в плоскости (т.е. в координатах) xt по зависимости (5.7) будет:

$$t = t_0 + \sqrt[3]{\frac{v_c x}{(q'_n)^2 g f(\beta)}}. \quad (5.14)$$

Приведенные зависимости дают возможность в первом приближении ориентировочно судить о процессе формирования связной селевой массы из селевых очагов до полного формирования селевого потока в эрозионном врезе главного русла (водотока).

Для решения поставленной задачи требуется иметь полную топографическую и морфологическую картину расположения эрозионных врезов, наличие в них отдельных объемов «порции» селевых масс и др. [6].

Рассмотренный подход дает возможность судить также о формировании «моноклиальной» волны селевого потока, о чем идет речь в [3, 4].

§ 5.2. БЕЗНАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГИПЕРКОНЦЕНТРИРОВАННОГО НАНОСАМИ СЕЛЕВОГО ПОТОКА В РУСЛЕ ВОДОТОКА

В данном параграфе будет рассмотрен вопрос равномерного движения гиперконцентрированного селевого потока. Эта некоторая абстракция, т.к. в реальных условиях основной селевой поток движется волновым или лавинообразным режимом движения. Учитывая, что решение ряда задач динамики этого сложного явления невозможно без допущения подобного фиктивного подхода в форме «абстрактного равномерного» режима движения, поэтому здесь рассматривается и этот режим движения.

Ниже дается упрощенный подход для трактовки действительного процесса динамики селевых потоков с квази-однородной позиции. Этот простейший но удобный для анализа метод исследования, где упрощение осуществляется путем осреднения по живому сечению потока как физических величин составных фаз, так и исходных уравнений еще на стадии их составления, где смесь потока трактуется как квазиконтинуум, дающая возможность поведению полифазных потоков описать уравнениями однофазной среды.

Подобное допущение позволяет при анализе оперировать средними параметрами и характеристики смеси (удельный вес, плотность, вязкость и т.д.). Отмеченные кажущиеся характеристики являются средневзвешенными и не соответствуют свойствам составных элементам смеси (вода, камень, мелкозернистая фракция, коллоидные частицы и др.).

Наряду с отмеченным если трактовать явления в рамках одномерной (гидравлической) задачи, то процесс еще более упрощается и с практической точки зрения полученные окончательные зависимости в большинства случаев дают удовлетворительные результаты.

Простота подхода с одномерной точки зрения выгодна и с той позиции, что взаимодействие между фазами и руслом можно оценить интегральным членом сопротивления, который легко поддается измерению как в лабораторных, так и в полевых условиях.

1) Определение расхода «абстрактно-равномерного» движения гиперконцентрированного наносами селевого потока

Описание движения жидкости возможно как с аксиоматической, так и феноменологической точки зрения.

Аксиоматический подход, это чисто математический подход, дающий возможность решить только определенный узкий круг практических задач. Феноменологической же подход является чисто прагматичным, дающий возможность приближенно решать конкретные инженерные задачи. Этот подход черпает результаты из достижений, как с аксиоматического, так и феноменологического (практического) подхода и использует их для решения возникающих перед нею конкретных задач.

В настоящем параграфе предпочтение дается феноменологическому подходу, где некоторые рассуждения часто носят интуитивный характер и не опираются на строгие математические и физические постулаты. При таком подходе иногда допускаются кажущиеся на первый взгляд противоположные рассуждения для рассмотрения разных проблем, что делается для достижения конкретной цели при решении гидравлических задач. Для наглядности этого суждения достаточно сослаться на случай описания вязкого (гиперконцентрированного) селевого потока, при котором делаются рассуждения относительно «твердых» и «текучих» (вязких) тел (движение «квазитвердого» тела). Такое представление о движении ньютоновских тел приводит нас к нестрогому (приближенному) определению этих понятий. Для инженера это несущественно; важно, что подход удачно работает с позиции практических расчетов.

Концепция о «твердом» теле подразумевает, что величина деформации зависит от величины действующей силы, тогда как согласно концепции «вязкого» тела, величины деформации зависят от скорости деформации. В первом случае тело сохраняет свою первоначальную форму, тогда

как во втором случае этим свойством тело не обладает или обладает частично. Несмотря на противоречие, с практической точки зрения в феноменологическом подходе представляется возможным изучение вопросов динамики неньютоновских жидкостей, в том числе и селевых потоков, совмещающая несовместимое.

В данном случае основное внимание сосредотачивается на то, что жидкость (т.е. селевой поток) «прилипает» к стенке русла, в результате чего у контактной поверхности потока с руслом наблюдается градиент скорости.

В настоящей работе делается попытка выразить расход безнапорного движения с помощью модели $Q = f(\tau)$, (Q – расход, τ – касательное напряжение) [3, 4, 5].

Принимая во внимание, что по Шведову-Бингэму:

$$\tau = \tau_0 - \mu \frac{du}{dy}, \quad (5.15)$$

где τ_0 – «динамическое» напряжение сдвига, фактически выражает величину напряжения на глубине h_0 (рис. 5.2); u – местная переменная скорость в градиентном слое; μ – динамический коэффициент вязкости.

Из (5.15) следует:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau_0 - \tau}{\mu} = f(\tau). \quad (5.16)$$

Расход безнапорного равномерного движения потока полной глубиной H и при условии «прилипания» жидкости на стенке русла можно определить по зависимости [2÷4,7,8]

$$Q = \frac{bH^2}{\tau_c^2} \int_{\tau_c}^{\tau_0} \frac{\tau(\tau_0 - \tau)}{\mu} d\tau. \quad (5.17)$$

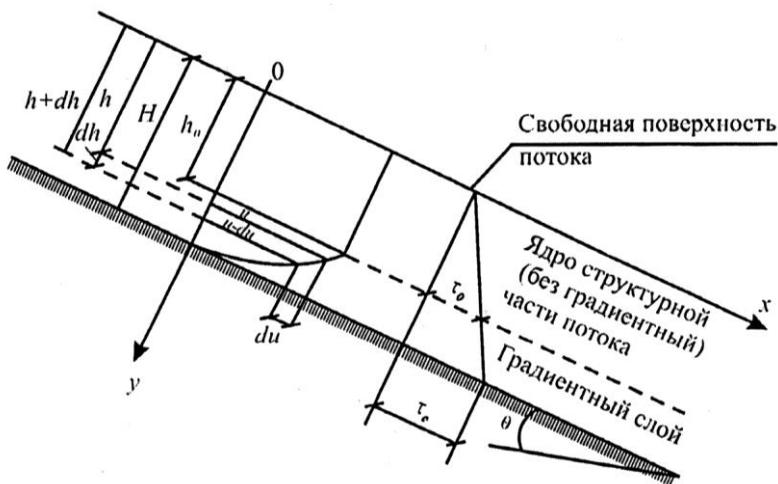


Рис. 5.2. Схема эиюр распределения скоростей и касательных напряжений в безнапорном «абстрактно» равномерном потоке неньютоновской жидкости (ядро потока движется почти как твердый стержень)

После интегрирования с учетом $\tau_c = \gamma Hi$, $\tau_0 = \mu_0 i$, где: i – уклон для русла; γ – объемный вес селевой массы; τ_c – касательное напряжение на дне потока (т.е. у контактной поверхности потока с руслом), b - ширина прямоугольного русла, получим:

$$Q = \frac{bgiH^3}{\nu_c} f(\beta), \quad (5.18)$$

где

$$f(\beta) = \frac{\beta}{2} (\beta^2 - 1) + \frac{1}{3} (1 - \beta^3),$$

где: $\beta = \frac{h_0}{H}$ – относительная глубина;

V_c – коэффициент кинематической вязкости.

Из полученной зависимости (5.18) следует, что движение гиперконцентрированного (связного) селевого потока обеспечивается из эрозионного вреза при условии $h_0 < 0,9H$.

В том случае, когда $\tau_c = 0$, зависимость принимает вид, аналогичной зависимости для водного потока при ламинарном режиме движения (т.е. для потоков ньютоновских жидкостей).

2) Непрерывные волны в гиперконцентрированных селевых потоках

Непрерывные волны наблюдаются всякий раз, когда одно установившееся (стационарное) значение параметров движения постепенно переходит в другое установившееся движение, в результате изменения расхода, при отсутствии динамических эффектов, связанных с инерцией или импульсом. Это квазистационарное явление, которое наблюдается, когда гравитационные силы постепенно уравниваются силами сопротивления.

Естественно, что расход селя при стационарном режиме движения зависит от глубины.

Скорость непрерывной волны V_B , проходящей контрольные створы можно определить из условия неразрывности. Тогда можно написать [3, 5]:

$$Q - \omega V_B = Q + \delta Q - V_B(\omega - \delta\omega), \quad (5.19)$$

или

$$V_B = \frac{\partial Q}{\partial \omega}, \quad (5.20)$$

где ω – площадь живого сечения.

Учитывая, что $Q = V\omega$, взамен (5.20) можно написать:

$$V_{\epsilon} = V + \omega \frac{\partial V}{\partial \omega}, \quad (5.21)$$

где V – средняя по живому сечению скорость потока.

Из (5.21) следует, что скорость непрерывной волны V_B превышает среднюю по сечению скорость V на величину $\omega \frac{\partial V}{\partial \omega}$.

Принимая во внимание (5.18) и $V = \frac{q}{H}$, после несложных преобразований взамен (5.20) получаем:

$$V_B = \frac{\partial Q}{\partial \omega} = \frac{dq}{dH} = \frac{3giH^2}{v_c} f(\beta), \quad (5.22)$$

$$V = \frac{\partial Q}{bH} = \frac{q}{H} = \frac{giH^2}{v_c} f(\beta), \quad (5.23)$$

где q - расход на единицу ширины потока.

Сравнивая (5.22) и (5.23) получим:

$$V_B = 3V. \quad (5.24)$$

Таким образом, скорость непрерывной волны в три раза больше средней по сечению скорости поступательного потока.

С опорожнением эрозийного вреза объем отложенной в нем селевой смеси уменьшается и непрерывные волны будут передвигаться с соответствующими значениями глубин потока, при этом каждая непрерывная длинная волна будет распространяться со своей скоростью.

3) Динамические волны в гиперконцентрированных селевых потоках

Динамические волны характеризуются ступенчатыми изменениями характеристик потока.

Следуя классическому подходу получение скорости распространения динамической волны в ньютоновских жидкостях, по формуле Лагранжа можно написать:

$$C = \sqrt{gH} . \quad (5.25)$$

Но так как гиперконцентрированная селевая смесь в отличие от воды характеризуется т.н. «динамическим напряжением сдвига» – что понятие условное и выражает постоянную часть касательного напряжения (не зависящей от скорости) во время движения. В силу отмеченного селевая масса при определенной глубине не движется даже на накопленной поверхности т.е. не «стекает», поэтому в отличие от воды, зависимость (5.25) для неньютоновских жидкостей и в том числе для гиперконцентрированной селевой смеси, следует выразить следующим образом:

$$C = \sqrt{gH \cos \theta_1} , \quad (5.26)$$

где θ_1 – предельное значение наклона плоскости для водотока, при котором гиперконцентрированная селевая смесь определенной глубины и заданной консистенции начинает перемещаться.

При этом же угле наклона для водотока селевой поток достигнув определенной глубины, меньше чем при движении прекращает перемещение.

Исходя из сказанного зависимость (5.26) характеризует динамическую волну в гиперконцентрированном (связанном) селевом потоке, которая (волна) включает в себе ту

часть напряжения, которая необходимо для преодоления т.н. уклона сопротивлению движения.

4) Исследование неустойчивости длинных одномерных волн

Приведенные выше зависимости (5.22), (5.25), (5.26) позволяют судить о неустойчивости или устойчивости появления волн в гиперконцентрированных селях.

Неустойчивость в селях как и при перемещении ньютоновских жидкостей, возникает тогда, когда скорость непрерывных однородных волн V_B превышает скорость динамических волн «С», распространяющихся на поверхности потока, т.е.:

$$V_B > V + C, \quad (5.27)$$

Подставляя (5.22), (5.22), (5.26) в (5.27) и учитывая, что $i = \sin \theta$, получим условия неустойчивости в форме неравенства:

$$\frac{4g \sin^2 \theta \cdot H^3}{v_c} [f(\beta)]^2 > \cos \theta_1. \quad (5.28)$$

Принимая во внимание (5.23), взамен (5.28) получим:

$$\frac{VH}{v_c} f(\beta) > \frac{1}{4} \cdot \frac{\cos \theta_1}{\sin \theta}, \quad (5.29)$$

где: $\theta_1 \leq \theta$.

Левая часть (5.29) выражает число Рейнольдса для гиперконцентрированного селевого потока.

Зависимость (5.29) характеризует условия неустойчивости одномерных длинных волн в гиперконцентрированном селевом потоке, движущемся со скоростью V в русле водотока с положительным уклоном дна, когда движение

потока обусловлено силой тяжести.

Неустойчивость в рассмотренном случае будет наблюдаться в виде резко выраженных фон волны, по размерам, соизмеримым глубине равномерно движущегося потока, что и наблюдается в натуре.

В случае водного потока (без наносов) $f(\beta) = \frac{1}{3}$ и взамен (5.29) будем иметь:

$$\frac{vH}{\nu} > \frac{3}{4 \sin \theta}. \quad (5.30)$$

Неустойчивость в водном потоке будет наблюдаться в виде скатывающихся волн на наклонной плоскости.

5) Критерии устойчивости «абстрактно-равномерного» движения гиперконцентрированного селевого потока, в руслах с крутыми уклонами

В зависимости от затухания или нарастания со временем возмущенного состояния движение, что вызывает (нарастание) со своей стороны переход бурного поступательного потока в сверхбурный (волновой) режим называется устойчивым или неустойчивым.

Вопросом устойчивости равномерного течения потока в руслах с большими уклонами посвящено ряд теоретических и экспериментальных исследований, причем, в большинстве этих работ рассматривают вопросы устойчивости течения потока чистой воды (без наносов). Прикладное значение этих работ весьма велико, так, например, на водосборных сооружениях гидроузлов гидроэнергетического и ирригационного назначения, осуществляемых в виде быстотоков с крутыми уклонами.

Правда, на быстротоках таких сооружений нередко имеет место явления аэрации потоков; причем некоторые общие черты аэрированного потока с потоком, несущим наносы тяжелее воды, казалось, могли бы служить основанием для того, чтобы результаты анализа устойчивости аэрированного потока непосредственно распространить на движение потока содержащего наносы тяжелее воды. Однако это делать нельзя т.к. наряду с схожими чертами между этими потоками имеется целый ряд существенных отличительных особенностей, которые накладывают своеобразный и специфический отпечаток.

Особенно существенно то, что в первом случае мы имеем дело с ньютоновскими жидкостями, а во втором случае – с неньютоновскими, что очень важно для решения проблем связанных особенно с гиперконцентрированными наносами селя.

Для переборки селевого стока часто по быстротокам течет селевой поток и на них возникают волны имеющие настолько большую амплитуду, что селевой поток переливается через стенки направляющих каналов и нарушает экологическую стабильность окружающей среды вдоль сбрасывающегося тракта.

Поэтому прогнозирование возникновения волн при движении селевого потока в быстротоках имеет большое практическое значение.

В качестве исходных зависимостей используем общие уравнения теории длинных волн конечной амплитуды в форме Сен-Венана. Будем считать движение медленно изменяющимся по времени и поэтому кривизну мгновенного профиля весьма малой (откуда и название «длинные волны»),

силы сопротивления учитываются по (5.18), то следуя [7], получим:

$$\frac{1}{Fr_0} > 4\mu_1^2, \quad (5.31)$$

где

$$\mu_1 = \frac{\omega_0}{b_0 H_0}, \quad (5.32)$$

$$Fr_0 = \frac{V_0^2 b_0}{g \omega_0}, \quad (5.33)$$

Fr_0 – число Фруда.

Индекс «0» обозначает первоначальные параметры движения невозмущенного состояния потока.

Зависимость (5.31) является критериальным соотношением для прогнозирования волнообразования на поверхности гиперконцентрированного селевого потока.

Если соблюдается условия (5.31), волны не образуются, т.е. поток движения первоначальным режимом не теряет устойчивость. Сказанное указывает на то, что стационарное движение потока не перерастает в нестационарный.

Зависимость (6.31) можно представить в виде:

$$V_0 < \frac{H_0}{2} \sqrt{\frac{g b_0}{\omega_0}}. \quad (5.34)$$

Для русел с прямоугольным поперечным сечением (6.34) принимает вид:

$$V_0 < 0,5 \sqrt{g H_0}. \quad (5.35)$$

Сопоставляя (5.31) с аналогичными критериальными условиями наносонесущих потоков [9, 10], можно заключить, что в гиперконцентрированных селевых потоках

волны на свободной поверхности потока формируются при относительно малых скоростях чем в водных потоках с наносами при одинаковых расходах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гагошидзе М.С.* Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, Изд. «Сабчота Сакартвело», 1970, 386 стр.
2. *Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.* Основы динамики и селей. Тбилиси, 2007, 213 стр.
3. *Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.* Волны в селеях. Москва, «Науч-техлитиздат», 2011, 160 стр.
4. *Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.* Некоторые соображения расчета селепропускных сооружений. // ж. «Гидротехническое строительство», Москва, 2006, №10, стр. 89-91.
5. *Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И.* Волны в селевых потоках. //ж. «Метеорология и гидрология», Москва, 2003, №2, стр. 91-96.
6. *Натишвили О.Г.* Элементы теории волнообразного формирования связного селея в эрозионных очагах. //ж. «Метеорология и гидрология», Москва, 2014, №3, стр. 98-100.
7. *Уилкинсон У.Л.* Неньютоновские жидкости (перевод с английского). М.: изд-во «Мир», 1964, 216 стр.
8. *Астарита Дж., Маруччи Дж.* Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей (перевод с английского). М.: изд-во «Мир», 1978, 309 стр.
9. *Натишвили О.Г.* Об устойчивости движения наносонесущего турбулентного потока при течении с большими скоростями в руслах с крутыми уклонами. //Труды ГрузНИИГиМ, вып. 22, 1963, стр. 67-76.
10. *Натишвили О.Г.* О некоторых особенностях движения взвешенного потока в открытых руслах. //Труды координатного совещания по гидротехнике, вып. 36, Ленинград, 1967, стр. 32-41.

VI ГЛАВА. ЭРОЗИЯ ПОЧВ В ГРУЗИИ

Эрозия почв в Грузии является существенным фактором их деградации. По последним данным, по меньшей мере 400 000 га сельскохозяйственных земель подвержены эрозии, среди них 300 000 га – водной эрозии и 100 000 га – ветровой (особенно в восточной части страны). К концу XX века более 1 млн. га почвенного покрова эродировано. Среднегодовой смыв почв оценивается в 15-20 т/га (Gogichaishvili&Urushadze, 2006).

Таблица 6.1

Средние потери почв в результате эрозии по основным водным бассейнам Грузии

(Gogichaishvili&Urushadze, 2006)

Потери почв (т/га)	Площади бассейнов рек (км ²)	
	Западная Грузия	Восточная Г Грузия
< 5	–	4,217
5 - 10	5,118	10,803
10 - 15	–	–
15 - 20	5,900	4,980
20 - 30	17,060	4,351
> 30	6,484	10,987

Площадь эродированных почв находится в тесной связи с крутизной склонов пахотных земель.

Таблица 6.2**Распространение пахотных земель по крутизне склонов
(G. Gogichaishvili, 2007)**

(т/га)

Регионы Грузии	Пахотные земли	В том числе						
		0-2°	2-5°	5-10°	10-15°	15-20°	20-25°	>25°
Западная	186,8	89,7	33,0	26,0	21,6	11,3	3,2	2,0
Восточная	486,4	266,6	127,4	66,9	18,8	5,1	0,8	0,8
В целом	673,2	356,3	160,4	92,9	40,4	16,4	4,0	2,3

Водная эрозия отмечается на всей территории страны, в том числе в Западной, Восточной и Южной Грузии. Осадки являются одним из главных факторов эрозии, которые изменяются на всей территории страны от 300 мм (Красный мост) до 4000 мм (гора Мтирала). Известно, что количество осадков не соотносится с уровнем опасности эрозии, т.к. эрозия в большей степени связана с эрозионным потенциалом осадков. В Грузии эрозионный потенциал осадков изменяется от 120 (зона влажных субтропиков) до 3 (Джавахети).

Эрозия тесно связана с рельефом. На склонах почвы более податливы эрозии. Грузия горная страна, где 13% занимают равнины. Предгорья занимают 17,5% территории и распространены от 200 м до 600 м над уровнем моря. Эта зона используется в сельском хозяйстве.

Предгорья и зона низких гор (600-1400 м) включает определенную часть горной зоны (31,3 %) и которая активно используется в сельском хозяйстве.

В Грузии 16,4% пахотных земель слабо эродированы,

11,0% – умеренно, 3,1% – сильно эродированы. Таким образом, 30,5% пахотных земель эродированы, т.е. каждый третий гектар эродирован в разной степени. Как результат потери урожая в среднем составляют 30-40%.

Ветровая эрозия не имеет постоянный характер. Сильное проявление ветровой эрозии отмечается раз в 5-10 лет.

Водная эрозия, процессы поверхностного смыва почв и образование оврагов особенно интенсивно протекает и достигает опасных масштабов во влажных субтропиках и в предгорной холмистой части регионов сухого климата. Установлено, что со склонов крутизной 10-20 градусов в год часто смывается 200-300 т/га почвы. В Имеретии (Западная Грузия) со склонов крутизной 20 градусов смывается в году 100 и более тонн почвы, В том же регионе со склонов до 35 градусов смывается 150 тонн и более. В отмеченном регионе на везде на крутых склонах отмечаются следы эрозии. Глубина водотоков часто достигает 0,5 м и более. При наличии соответствующих условий такие водотоки постепенно трансформируются в овраги. В некоторых районах Восточной Грузии на склонах лишенных растительности водная эрозия протекает еще более интенсивно. Это связано со слабой устойчивостью почв против эрозии. Здесь при наличии дождей обыкновенной интенсивности со склонов крутизной 6-12° с одного га площади в год в среднем смывается 30-40 т почвы, при ливнях до 150-200 т/га.

В последние десятилетия в связи с мелиорацией земель возник целый ряд проблем, которые способствовали усилению эрозионных процессов. В частности, при неправильном орошении крутосклонных площадей имеет место сильный смыв почв.

С эрозионной точки зрения потенциально опасные площади характеризуются значительной расчлененностью, что следует принять во внимание при подборе правил и техники полива.

Значительная часть территории Восточной Грузии испытывает воздействие ветровой эрозии. Часто т.н. ветровые бури отмечаются на площади в тысяча гектар. Ветровая эрозия наиболее интенсивно проявляется в восточной части Восточной Грузии. (Самгорская и Алазанская равнины, площади Шираки, Тарибана и Эльдари).

Для Грузии ущерб наносимый этим видом эрозии оценивается в десятки миллионов лари. Только стоимость ежегодных потерь питательных элементов достигает около 1 миллиона долларов в эквиваленте стоимости удобрений. Уменьшение интенсивности процесса ветровой эрозии имеет большое значение не только для производства сельскохозяйственных продуктов, но и сохранения почвы, как существенного компонента биосферы.

Для уменьшения ветровой эрозии обязательно, что бы на сельскохозяйственных угодьях были внедрены почвозащитные технологии, устроены ветрозащитные полосы, установлены и соблюдены определенные ограничения и требования по использованию сельскохозяйственных механизмов. Следует исключить опасность их воздействия на усиление процессов эрозии.

Интенсивность процесса ветровой эрозии определяет климат, скорость ветра. Периодами выявления ветровой эрозии в Восточной Грузии являются зима и ранняя весна, когда сельскохозяйственные угодья менее защищены растительностью и почва оголена. Усиление ветровой эрозии

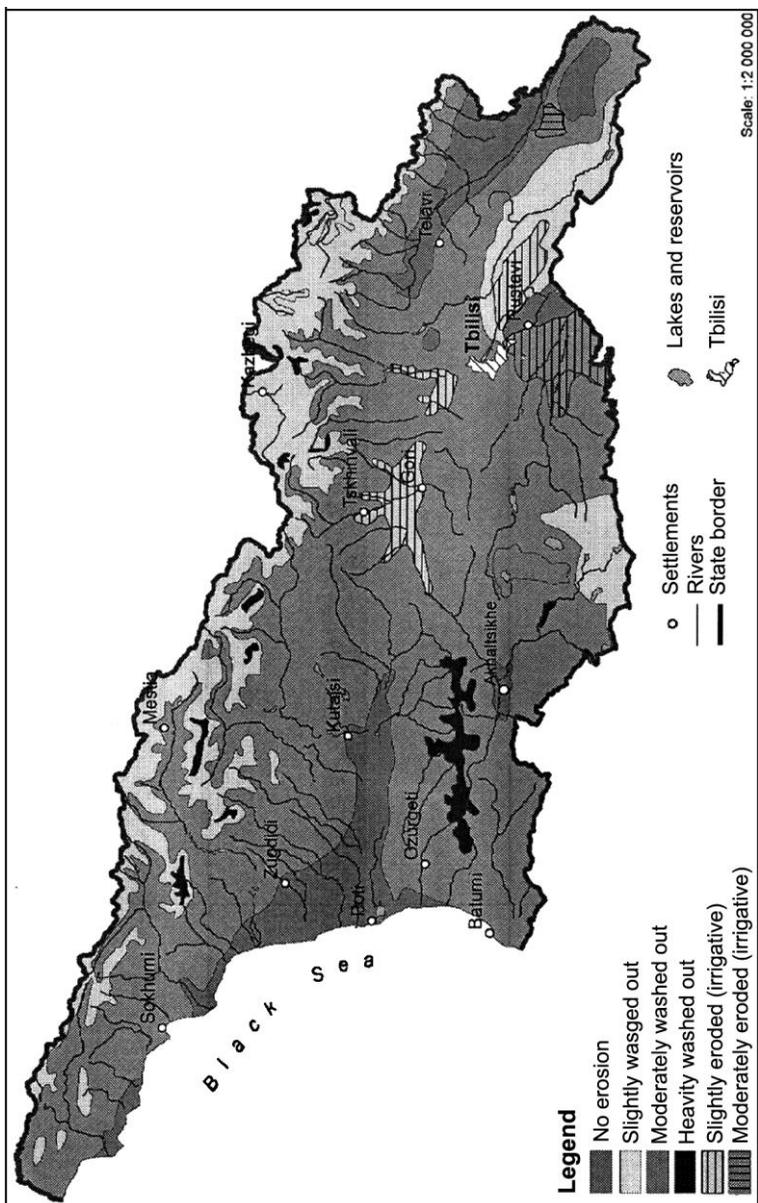


Рис. 6.1. Водная эрозия в Грузии

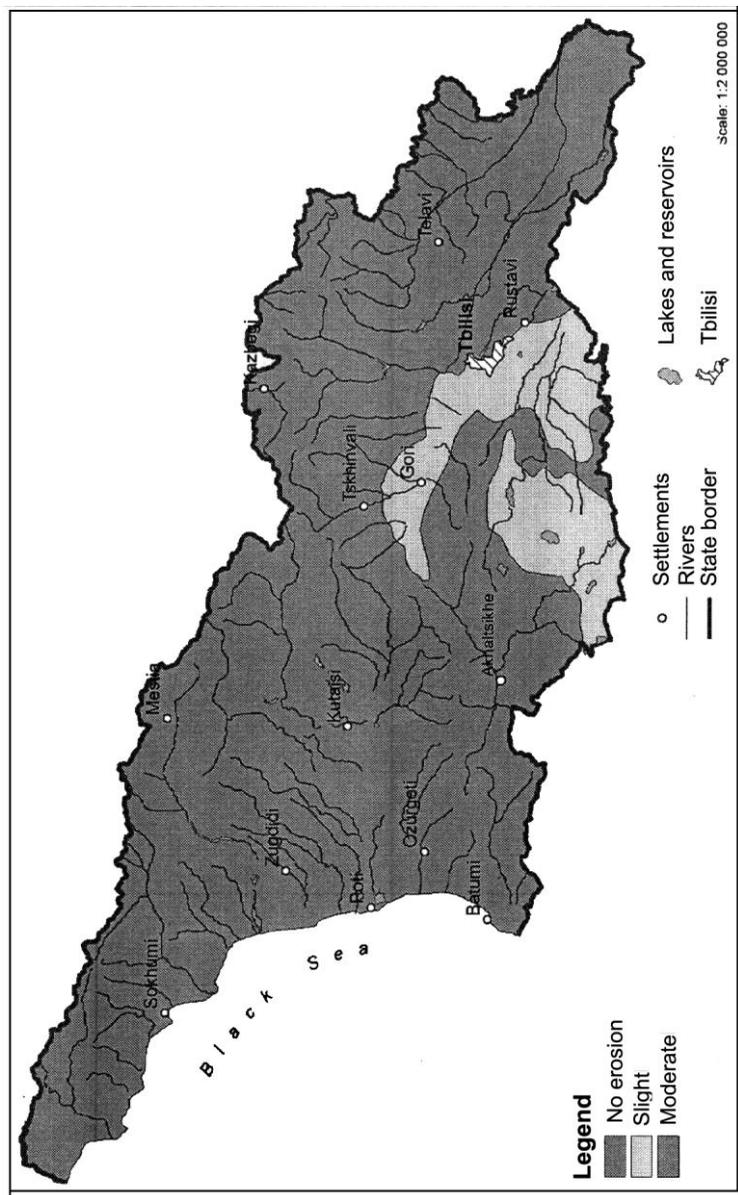


Рис. 6.2. Ветровая эрозия в Грузии

вызывает обработка почвы с переворот пласта почв, в результате чего укрепленный корнями растения слой почвы оказывается внизу а менее устойчивой к эрозии слой оказывается на поверхности.

Ветровая эрозия интенсивна в Гаре Кахети и Картли (как в Верхней, так и в Нижней). Процесс ветровой эрозии особенно интенсивен от декабря до апреля, когда в на территории Восточной Грузии имеют место частые и сильные ветры. При этом скорость ветра часто достигает 18-28 м/сек и более.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Агробиогеоценоз. Вторичные измененные человеком биоценозы в результате сельскохозяйственной деятельности.

Агролесомелиорация. Система лесоводственных мероприятий, направленных на улучшение почвенных и климатических условий получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Агротехнические мероприятия по охране земель от эрозии. Система агрономических мер предотвращения эрозии.

Анализ риска. Установление природы и вероятности риска связанные с реализацией поставленной задачи природопользования.

Антропогенные изменения в природы. Изменения в природе, вызванные деятельностью человека.

Артезианский водоносный горизонт. Водоносный горизонт повышенного давления воды, обладающий подъемной силой.

Аэрозоль. Частицы твердого/жидкого состояния в атмосфере или другой газовой среде с малыми скоростями осаждения.

Безвозвратное водопотребление. Невозможность вторичного использования воды.

Безотходная технология. Технологические средства рационального использования природных ресурсов без вредного воздействия на окружающую среду.

Берегоукрепительные насаждения. Система посадок древесных, кустарниковых и травянистых растений на предмет ослабления/прекращения абразионных процессов на берегах рек, водохранилищ.

Вещество. Компоненты природы (газ, жидкость, твердое тело) с объемом и массой.

Водный баланс. Соотношение за определенный промежуток времени прихода, расхода и аккумуляции воды.

Водный кадастр. Систематизированный свод сведений о водных ресурсах страны.

Водоносный горизонт. Подземный горизонт перемещения воды.

Водоохранные леса. Леса, обеспечивающие равномерное поступление воды в источники, предохраняющие водоемы от загрязнения и засорения.

Водосборный бассейн. Территория сбора всех стекающих вод определенного водоема.

Гидрология. Наука, которая изучает явления и процессы природных вод.

Гидросфера. Совокупность всех вод Земли, в том числе материковых, океанических и атмосферных.

Гравитационная вода. Вода, подверженная передвижению под действием силы тяжести.

Грунт. Слой горной породы, лежащей непосредственно под почвенной толщей.

Грунтовая вода. Порами и пустотами горных пород и/или почв заполненная вода.

Деструкция ландшафта. Нарушение установившегося равновесного состояния ландшафта.

Инфильтрация. Перемещение воды в почве.

Ирригация. Орошение с целью получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Климат. Многолетняя совокупность условий погоды.

Контурное земледелие. Обработка земель поперек склона.

Кризисные экологические ситуации. Нарушение экологического равновесия под воздействием стихийных природных явлений или антропогенного фактора.

Липкость почвы. Свойство влажной почвы прилипать в другим телам.

Мелиорация осушительная. Осушение путем использования инженерных мероприятий с целью обеспечения высокого плодородия почв.

Механический состав почв. См. также ***Гранулометрический состав почв.*** Относительное содержание в почве или породе фракций механических элементов.

Мониторинг. Система наблюдения и контроля за состоянием окружающей среды.

Набухание почвы. Увеличение объема почвы при увлажнении.

Овражная эрозия. Формирование оврагов под воздействием водной эрозии.

Орошение. Подача воды на сельскохозяйственные земли.

Охрана земельных ресурсов. Систем мер по охране земельных ресурсов.

Охрана природы. Принципы и методы рационального использования той части окружающей среды, которая состоит из природных компонентов (воздух, вода, почвы и организмы), путем поддержания их потенциала в интересах нынешнего и будущего использования человечеством.

Пахотный слой. Поверхностный слой сельскохозяйственного использования.

Поверхностные воды. Постоянно или временно находящиеся на земной поверхности.

Почвенный покров. Пространственное распределение почв.

Переувлажнение. Предельное насыщение почвы водой.

Пластичность почвы. Способность почвы изменять свою форму под влиянием какой-либо внешней силы без нарушения сплошности и сохранять приданную форму после устранения этой силы.

Плотность почвы. Масса единицы объема абсолютно сухой почвы, взятой в естественном сложении.

Плотность твердой фазы почвы. Отношение массы ее твердой фазы к массе воды в том же объеме при +4°C.

Подпочва. Слой грунта ниже почвенного тела.

Полезационные полосы. Искусственные древесные посадки перпендикулярно направлению господствующих ветров с целью предотвращения/уменьшения ветровой эрозии на сельскохозяйственных угодьях.

Пористость почвы. Суммарный объем всех пор между частицами твердой фазы почвы.

Почва. Естественно-историческое тело природы, как результат воздействия живых и мертвых организмов и природных вод и обладающее плодородием.

Почвенный профиль. Единство различных по свойствам естественных горизонтов почвы.

Предел устойчивости. Показатель ограничивающий жизнедеятельность организмов или популяций.

Предельно допустимая концентрация. Максимально допустимая жизнеобеспечивающая концентрация отдельных веществ.

Природный. Независимо от деятельности и вмешательства человека существующие в природе вещества или факторы.

Природопользование. Всеобъемлющее воздействие человека на окружающую среду.

- Просадка грунта.** Опускание земной поверхности.
- Просачивание.** Прохождение воды через почву или горные породы.
- Рентабельный.** Экономически выгодный проект или технологический процесс.
- Реутилизация.** Повторное использование сырья или материалов.
- Родник.** Естественный выход на поверхность грунтовых/подземных вод.
- Связность почвы.** Способность почвы сопротивляться внешнему усилию, стремящемуся разъединить почвенные частицы.
- Сельскохозяйственная территория.** Территория сельскохозяйственного использования.
- Струйчатая эрозия.** Образование мелких ветвящихся промоин в результате водной эрозии.
- Структура почвы.** Совокупность агрегатов различной величины, формы и качественного состава.
- Структурность почвы.** Способность почвы распадаться на агрегаты.
- Твердость почвы.** Сопротивление, которое оказывает почва проникновению в нее под давлением какого-либо тела.
- Террасирование.** Ступенчатое расположение земель сельскохозяйственного использования.
- Удельное сопротивление почв.** Усилие, затрачиваемое на подрезание пласта, его оборот и трение о рабочую поверхность.
- Уровень грунтовых вод.** Верхняя граница грунтовых вод.
- Усадка почвы.** Сокращение объема почвы при высыхании.
- Фильтрат.** Раствор веществ вымываемый из почвы.

- Экологические последствия.** Показатели воздействия человека на окружающую среду.
- Экологические нарушения.** Изменение установившихся естественных связей в экосистеме.
- Экологическое равновесие.** Устойчивое состояние экологической системы.
- Экологическая экспертиза проектов.** Оценка возможных экологических и социально-экономических воздействий человека на окружающую среду.
- Экосистема.** Единое функциональное целое сообщества живых существ и окружающей среды.
- Эрозия береговая.** Размывание берегов проточных водоемов.
- Эрозия ветровая.** См. также *Дефляция*. Разрушение почв под действием ветра.
- Эрозия водная.** Разрушение почв под действием воды.
- Эрозия геологическая.** Медленный процесс смыва частичек с поверхности почвы, покрытой естественной растительностью.
- Эрозия ирригационная.** Эрозия, как результат неправильно организованного орошения.
- Эрозия капельная.** Разрушение и уплотнение почвы под воздействием капель дождя.
- Эрозия линейная.** Размыв почв в глубину более мощной струей воды, стекающей по склону.
- Эрозия поверхностная.** Смыв верхнего горизонта почв под влиянием стекающих по склону дождевых или талых вод.
- Эрозия почв.** Процесс разрушения почв под воздействием воды и ветра.
- Эрозия ускоренная.** Эрозия повышенного темпа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Небел Б.** Наука об окружающей среде. М.: Изд. «Мир», 1993, 420 стр.
2. Почвоведение. М.: Изд. «Колос», 1982. 496 стр.
3. **Реймерс Н.Ф.** Природопользование. М.: Изд. «Мысль», 635 стр.
4. Толковый словарь по почвоведению М.: Изд. «Наука», 1975, 286 стр.
5. **Gogichaishvili G.P. & Urushadze T.T.** Estimation of Erosion Lands of the Reclamation Fund in Georgia. //J. Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics. Kassel University Press, Vol. 107, No 1, 2006, pp. 85-94.
6. **Gogichaishvili G.P.** Quantitative Assessment of Soil Erodibility on the Ameliorated Lands in Georgia. J. Eurasian Soil Science. Vol. 40, No. 11, 2007, pp. 1227-1232.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая книга является попыткой изложить результаты исследований авторов за последние годы. Их значительная часть опубликована как в ведущих зарубежных журналах, так и в республиканских изданиях.

Основное внимание данной работе уделяется эрозионным процессам, с учетом волнового движения как водного, так и наносонесущих потоков. Рассмотренные в работе вопросы следует оценивать, как определенный этап на пути раскрытия сложных явлений, свойственных эрозионным процессам.

Толчком к написанию данной работы, как было отмечено в вводной части, послужили невиданные по масштабам природные катаклизмы в форме эрозии почвогрунтов последних лет, особенно на Кавказе.

Нужно признаться, что при отборе материала не могли не появляться личные позиции и оценки авторов, которые послужили основой для принятия предложенных подходов и обоснования многих принятых допущений. Поэтому в некоторых случаях трактовка тех или иных положений может представлять для дискуссии, не исключены также некоторые неточности и спорные допущения, которые обычно сопутствуют работам подобного характера, за что авторы приносят свои извинения.

Авторы заранее благодарны читателям за ценные и принципиальные замечания, что будут нами учтены в дальнейших наших исследованиях.

CONCLUSION

The proposed book is an effort to give the results of the investigations carried out by the book authors in recent years. Many of them are published both, in leading foreign journals and in the publications of the Republic.

Main attention in the given work is paid to erosive processes by considering the wavy motion both, of water and silt-carrying flows. The questions considered in the work must be considered as a certain stage on the way to open complex phenomena typical to erosion processes.

The impetus to write the present work, as mentioned in the introduction, was the natural cataclysms of unprecedented scales, like soil erosions of recent years, particularly in the Caucasus.

We must confess that when selecting the material, we, as the book authors, could not help showing our personal views, which served as the basis for accepting the offered approaches and substantiations of many accepted assumptions. Therefore, in some cases, interpretation of some or other provisions can be made disputable, and some inaccuracies or disputable assumptions, which usually are typical to the works like this, can also be the case, and authors would like to bring their apologies for this.

The authors would like to thank the readers in advance for their valuable or principal remarks to consider in their further research.

Системы единиц

Физические величины и формулы	Единицы измерения систем		
	СГС	МКГСС	СИ
Площадь ω	$см^2$	$м^2$	$м^2$
Объем W	$см^3$	$м^3$	$м^3$
Скорость V	$см/сек$	$м/сек$	$м/сек$
Ускорение a	$см/сек^2$	$м/сек^2$	$м/сек^2$
Масса M	$г$	$кгс \cdot сек^2/м$	$кг$
Сила $ P = Ma $	$г \cdot см/сек^2 = дина$ ($дн$)	$кгс$	$кг \cdot м/сек^2 =$ ньютон ($н$)
Удельный вес $ \gamma = G/W $	$г/см^2 \cdot сек^2 = дн/см^3$	$кгс/м^3$	$кг/м^2 \cdot сек^2 = н/м^3$
Плотность $ \rho = M/W $	$г/см^3$	$кгс \cdot сек^2/м^4$	$н \cdot сек^2/м^4 = кг/м^3$
Напряжение $ \tau = T/\omega $	$г/см \cdot сек^2$	$кгс/м^2$	$кг/м \cdot сек^2 = н/м^2$
Давление $ p = P/\omega $	»	»	»
Коэффициент динамической вязкости $\mu = \left T/S \frac{du}{dn} \right $	$г/см \cdot сек = пуаз$ ($пз$)	$кгс \cdot сек/м^2$	$н \cdot сек/м^2 = кг/м \cdot сек$
Коэффициент кинематической вязкости $ \nu = \mu/\rho $	$см^2/сек = стокс$ ($ст$)	$м^2/сек$	$н \cdot м \cdot сек/кг =$ $м^2/сек$

*1) Богомолов А.Ц., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972, 609 стр.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>I Глава. Водная эрозия почвогрунтов</i>	<i>6</i>
§ 1.1. Гидравлическая интерпретация эрозионных процессов	6
§ 1.2. Сводка некоторых соотношений для характеристики двухфазных потоков в рамках одномерного квази-однородного движения	9
§ 1.3. Влияние волнообразного движения склонового стока на интенсивность эрозии почв	13
§ 1.4. Прогноз волнообразования в потоках малой глубины при линейном размыве почв	22
А) Вывод основного уравнения возмущенного движения взвесенесущего потока	23
Б) Частное решение уравнения движения взвесенесущего потока и его анализ	28
В) Критерий перехода равномерно движущегося взвесенесущего потока в волновой режим	33
Литература	39
<i>II Глава. Некоторые вопросы овражной и речной эрозии</i>	<i>43</i>
Введение	43
§ 2.1. Установление высоты волны разрушения для невысоких земляных плотин	45
§ 2.2. Силы, действующие на крупный камень расположенный на дне русла при воздействии водного потока	52
§ 2.3. Перемещение крупного камня в русле водотока	59
§ 2.4. Работа, затрачиваемая на перемещение крупного камня при его движении на прямолинейном участке водотока	66
Литература	74
<i>III Глава. Прикладные вопросы оценки эрозионных процессов горных ландшафтов в «коридоре» нефтегазопроводов Грузии</i>	<i>76</i>

Введение	76
§ 3.1. Оценка эрозионных процессов ландшафтов в «коридоре» нефтегазопроводов	77
§ 3.2. Оценка надежности горных склонов Грузии в коридоре нефтетрубопровода Баку-Супса	86
А) Определение геометрических размеров промоин на горных склонах	87
Б) Оценка надежности и риска на горных склонах	95
Литература	101
<i>IV Глава. К вопросу проектирования противоэрозионных мероприятий</i>	<i>103</i>
§ 4.1. Проектирование противоэрозионных мероприятий с использованием растений ветивер	103
§ 4.2. Новые противоэрозионные ресурсосберегающие конструкции и методы их проектирования	115
Литература	120
<i>V Глава. Общие принципы волнообразного формирования связных селевых потоков в эрозионных очагах и гидравлические основы их движения</i>	<i>122</i>
Введение	122
§ 5.1. Элементы теории волнообразного формирования связного селя в эрозионных очагах	124
§ 5.2. Безнапорное движение гиперконцентрированного наносами селевого потока в русле водотока	128
1) Определение расхода «абстрактно-равномерного» движения гиперконцентрированного наносами селевого потока	129
2) Непрерывные волны в гиперконцентрированных селевых потоках	133
3) Динамические волны в гиперконцентрированных селевых потоках	135

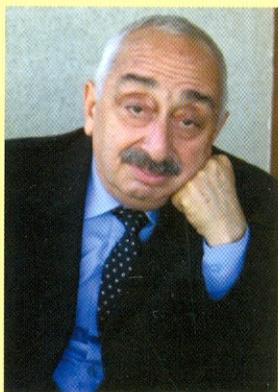
4) Исследование неустойчивости длинных одномерных волн	136
5) Критерии устойчивости «абстрактно-равномерного» движения гиперконцентрированного селевого потока, в руслах с крутыми уклонами	137
Литература	140
<i>VI Глава. Эрозия почв в Грузии</i>	141
Словарь терминов	148
Литература	154
Заключение	155
Заключение (на английском)	156
Приложение	157



ОТАР ГЕОРГИЕВИЧ НАТИШВИЛИ

Известный ученый в области гидравлики, гидро-техники и инженерной экологии, доктор технических наук, профессор, Залужный деятель науки Грузии, академик Национальной Академии наук Грузии, Академик-секретарь отделения НАН Грузии. Автор 170 опубликованных в Грузии и за рубежом научных работ, в том числе 17 монографии и учебников для технических ВУЗов. Печатается в Российских журналах «Экологические системы и приборы», «Гидротехническое строительство», «Метеорология и гидрология», «Инженерная экология» и др., а также в «Сообщения НАН Грузии», тематиче-

ских сборниках Института водного хозяйства Грузии, в научных трудах международных конференций.



ТЕНГИЗ ФЕДОРОВИЧ УРУШАДЗЕ

Доктор биологических наук, профессор, директор Института почвоведения, агрохимии и мелиорации имени Михаила Сабашвили Грузинского аграрного университета, действительный член Грузинский национальной Академии наук, член-корреспондент Испанской (Барселона) Академии наук и искусства, почетный доктор ряда Университетов, Автор более 450 научных работ, в том числе около 40 монографий и учебников. Им выделено несколько новых почв, что внесено в учебники (Грузия, Россия, Польша). Главный редактор международного журнала «Известия аграрной науки». Член редколлегии ряда журналов (Россия, Индия, Германия, Австрия, Венгрия, Чили, Грузия).



ГИВИ ВАЛЕРИАНОВИЧ ГАВАРДАШВИЛИ

Директор Института водного хозяйства Грузинского технического университета (бывший ГрузНИИГиМ), доктор технических наук, профессор, академик инженерной академии Грузии. Автор 150 научных работ, опубликованных в грузинских и зарубежных научных журналах, среди них: 5 монографий на грузинском, английском французском и русском языках и 22 изобретений (10 за рубежом). Он был руководителем многочисленных грантов, проектов, которые финансировали международные организации (UNESCO, NATO, EU, SDC, ASCE, UN FAO, FB) по проблемам водных ресурсов, энергобезопасности, мелиорации и охраны окружающей среды, а также Главный редактор международного жур-

нала сборник научных трудов института и член редколлегии Российского журнала «Экологические системы и приборы».