

О РОЛИ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕЛЕВЫХ СМЕСЕЙ В ПЕРЕНОСЕ НАНОСОВ

Канд. техн. наук Б.С. Степанов
Р.К. Яфязова

Приведено обоснование актуальности изучения пластических свойств селевых смесей, показана роль пластических свойств в процессе переноса наносов из верхнего яруса накоплений на относительно более низкий ярус - конусы выноса, расположенные на предгорной равнине. Обращается внимание на необходимость учета пластических свойств смесей при расчете емкости селехранилищ.

Селевая смесь - сложное реологическое тело, обладающее упругостью, вязкостью и пластичностью. В зависимости от плотности смеси, гранулометрического и минералогического составов ее твердой составляющей упомянутые свойства изменяются в широких пределах: от значений, которыми в инженерной практике можно пренебрегать, до значений, в решающей мере определяющих ход селевых процессов. Все другие механические свойства селевых смесей являются проявлением сочетания их фундаментальных свойств.

Одно из важнейших свойств селевых смесей - пластичность, обусловлено способностью глинистых частиц связывать молекулы воды, при этом образуется пространственная структура, необратимая деформация которой становится возможной лишь при напряжениях, превышающих так называемое предельное напряжение сдвига. Существенная роль при высоких концентрациях твердой фазы в селевых смесях может принадлежать и пылеватым частицам, с увеличением размера частиц их влияние на формирование пластических свойств смесей уменьшается. Селевые смеси, обладающие пластическими свойствами, обра-

зуются в процессе обогащения водных потоков рыхлообломочными породами, содержащими глинистые фракции или гумус, либо разжижении грунтов, обладающих сцеплением.

Сели являются основным механизмом переноса наносов из верхнего яруса их накопления (морены, осыпи, флювиогляциальные отложения и т.д.) на средний ярус накопления - конусы выноса, расположенные на предгорной равнине; вершины конусов выноса приурочены к выходу рек из горных долин. Наносы - твердая составляющая селевых смесей, перемещаются на относительно низкие потенциальные уровни за счет энергии водной составляющей (наносоводные сели), либо собственной потенциальной энергии (грязевые, грязекаменные сели).

В смесях, не обладающих пластическими свойствами, частицы горных пород перемещаются во взвешенном состоянии, сальтацией, качением и скольжением. В зависимости от механизма перемещения частиц изменяется разность средних скоростей движения водной составляющей и частиц различной крупности. Частицы, перемещающиеся во взвешенном состоянии, имеют среднюю продольную скорость, близкую к средней скорости водной составляющей. Скорость движения частиц, перемещающихся качением и, особенно, скольжением значительно меньше скорости движения воды.

Объясняется это тем, что взвешивание частиц обеспечивается энергией поперечных пульсаций скорости водных потоков, и частицы быстро приобретают продольную скорость, близкую к таковой движения воды. Движение же влекаемых частиц на относительно малых уклонах возможно лишь за счет динамического воздействия на них водного потока. Необходимые силы образуются при наличии разницы в скоростях движения жидкой и твердой составляющих.

В зависимости от величины разности скоростей, которая, в основном, определяется размерами влекаемых частиц, уклоном русла, его шероховатостью и глубиной потока, количество воды, необходимое для транспортировки единичного объема наносов может существенно разниться. Расчеты показывают, что для транспортировки водными потоками

глыб, размерами 0,5-1 м, на уклонах 2-3 градуса отношение расхода твердой составляющей к расходу воды даже при наиболее благоприятных условиях не превышает первых процентов.

Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете плотности наносоводных потоков, ибо традиционное определение плотности с помощью выражения

$$\rho_c = \rho_T c + \rho_0 (1-c), \quad (1)$$

где ρ_T и ρ_0 - плотности твердой составляющей и воды соответственно; c - объемная концентрация твердой фазы в смеси, приводит к неверным результатам.

При наличии разницы в средних скоростях движения твердой и жидкой фаз потоков плотность смеси следует рассчитывать с помощью выражения

$$\rho_c = (Q_T \rho_T + Q_0 \rho_0) / (Q_T + Q_0), \quad (2)$$

где Q_T и Q_0 - расходы твердой и жидкой фаз соответственно.

В такой ситуации измерение плотности смесей возможно лишь объемным способом. К сожалению, этот способ трудно технически и экономически реализуем.

Качественно иным становится механизм переноса наносов при наличии у смесей пластических свойств. Если в вязкой среде частицы, обладающие плотностью большей, нежели плотность вмещающей их среды, потеряв контакт с руслом стремятся опуститься на дно и их дальнейшее перемещение становится возможным, когда влекущая сила (сила тяжести плюс сила динамического воздействия потока) превышает силу сопротивления, имеющую кулоновскую природу, то в пластической среде, при надлежащих её характеристиках, частицы, потеряв контакт с руслом, остаются в квазивзвешенном состоянии и очень быстро приобретают скорость движения вмещающей их среды. Поэтому в грязекаменных потоках большой плотности скорости движения жидкой и твердой фаз практически одинаковы.

Принимая во внимание то обстоятельство, что объемное содержание воды в плотных грязекаменных смесях не превышает 10-15%, нетрудно прийти к выводу, что для переноса одного и того же количества наносов смесями, обладающими выраженными пластическими свойствами, требуется значительно меньше воды, нежели при переносе наносов водными потоками.

Поэтому при оценке возможных масштабов селевой деятельности в бассейнах горных рек необходимо, помимо учета гидрометеорологических факторов, уделять должное внимание особенностям геологического строения соответствующих районов, изучению физико-механических свойств селевых смесей.

Только благодаря наличию пластических свойств у селевых смесей плотные сели имеют возможность перемещаться на уклонах, характерных для горных долин. При уклонах менее 10-12 градусов и типичных глубинах потоков, за редким исключением превышающих 10 м, поток не в состоянии за счет изменения его потенциальной энергии поддерживать во взвешенном состоянии твердую фазу смесей, если последние не обладают пластическими свойствами.

Опускаясь в придонную область частицы даже в рыхлом теле не имеют возможности перемещаться качением, поэтому движение плотных смесей, не обладающих пластическими свойствами, возможно только на уклонах, на которых сдвигающая сила превышает силу кулоновского трения.

Угол наклона русла, на котором может произойти сдвиг обсуждаемой смеси, определяется из выражения

$$\alpha = \arctg \frac{(\rho_T - \rho_0) f}{\rho_0}, \quad (3)$$

где f - коэффициент трения.

При плотности смеси $\rho_c = 2400 \text{ кг/м}^3$ и $f=0,7$
 $\alpha = 25^\circ$.

Насколько велико влияние наличия пластических свойств на величины нормального давления частиц на дно русла, можно судить, анализируя выражение для расчета величины нормального давления,

создаваемого частицей шарообразной формы (наиболее неблагоприятная форма из соотношения объем частицы - площадь её поверхности)

$$P_H = \left(\frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_T - \rho_C) g - 4\pi R^2 \tau_{0c} \right) \cos \alpha, \quad (4)$$

где τ_{0c} - предельное напряжение сдвига смеси, вмещающей частицу.

Нетрудно показать, что при

$$\tau_{0c} = 3,2R(\rho_T - \rho_C) \quad (5)$$

нормальное давление окажется равным нулю, т.е. частица перейдет в квазивзвешенное состояние.

В таком состоянии частица не оказывает давления, создающего кулоновское трение, однако для её перемещения необходимо преодолевать пластическое сопротивление на границе поток - русло на площади, соответствующей объему, в котором заключена обсуждаемая частица.

Оценим величину этого сопротивления. Пусть $R = 0,5$ м; $\rho_T = 2650$ кг/м³; $\rho_C = 2000$ кг/м³. Тогда $\tau_{0c} = 1040$ Н/м².

Поскольку частица диаметром в один метр помещается в кубе с ребром, равным одному метру, сила, необходимая для смещения этого куба и будет равной 1040 Н.

Для смещения сдвига той же частицы в условиях полного проявления кулоновского трения ($\tau_{0c} = 0$) потребовалась бы сила

$$F_K = \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_T - \rho_0) g f = 6044 \text{ Н},$$

т.е. практически в шесть раз большая, нежели в условиях квазивзвешивания частицы. Минимальный уклон, на котором пластическая среда способна перемещаться под действием силы тяжести, определяется из известного выражения

$$\sin \alpha = \frac{\tau_{0c}}{\rho_c g H} = 0,044, \quad (6)$$

где $\rho_c = 2325 \text{ кг/м}^3$, $H = 1 \text{ м}$.

Следовательно, при глубине, равной одному метру поток мог перемещаться при $\alpha = 2,5^\circ$; с увеличением глубины, как это следует из выражения (6), минимальный уклон может составлять доли градуса. Именно этим объясняется способность грязекаменных потоков большой плотности перемещаться в относительно пологих горных долинах на десятки километров, формировать конусы выноса, имеющие существенно иные морфометрические характеристики, нежели конусы выноса, образуемые аллювиальными отложениями.

Уравнение предельного равновесия пластической среды, находящейся на наклонной плоскости, записывается согласно [3]:

$$\Pi + Z \left(\frac{dZ}{dX} - 1 \right) = 0, \quad (7)$$

Π , X и Z являются критериями подобия состояния пластической среды

$$\Pi = \frac{\tau_{0c}}{\rho_c g z_0 \sin \alpha}, \quad Z = \frac{z}{z_0}, \quad X = \frac{x \operatorname{tg} \alpha}{z_0}.$$

Здесь α - угол наклона плоскости, Z_0 - глубина потока в начале координат, за начало координат принимается створ, выше которого наблюдается значительное увеличение уклона селевого русла.

Интегральная кривая этого уравнения при условии, что $Z=1$ при $X=0$ имеет вид

$$X = \Pi \ln \left| \frac{\Pi - Z}{\Pi - 1} \right| + Z - 1. \quad (8)$$

Из последнего уравнения, полагая $Z=0$, можно

получить уравнение для определения дальности выброса селя

$$X_{\max} = \frac{\Pi}{\Pi - 1} - 1, \quad (9)$$

при $\Pi \rightarrow 1$ дальность выброса становится теоретически неограниченной, реальная дальность определяется объемом селя, прошедшего через начало координат.

Проявлению пластических свойств обязана и та особенность движения селей на плоскости, что поток движется относительно узкой полосой в создаваемых им же "берегах". Как показано в работе [3], величина растекания определяется из уравнения

$$y_{\max} = \frac{\rho_c g Z_0^2(x)}{2\tau_{0c}}. \quad (10)$$

При $Z=1\text{ м}$; $\tau_{0c}=1040 \text{ Н/м}^2$; $\rho_c=2325 \text{ кг/м}^3$ и $g=9,8 \text{ м/с}^2$ $y_{\max}=10,95 \text{ м}$. Таким образом, при указанных значениях характеристик потока и селевой смеси минимальная ширина потока составит всего 22 м.

Наличие у селевых смесей пластических свойств, достаточных для поддержания частиц твердой фазы в квазивзвешенном состоянии, приводит к принципиальным изменениям механизма заполнения селехранилищ. Если при проявлении кулоновских сил заполнение носит послойный характер, то заполнение селехранилищ пластическими средами характеризуется их объемными деформациями.

Анализ уравнения, описывающего уравнительную поверхность отложений пластических сред в селехранилищах [2], показывает, что даже при очень больших реальных значениях предельного напряжения сдвига селевых смесей (при глубинах селехранилищ 20-50 и более метров) величина уравнительного уклона не может превышать одного градуса.

Указанное обстоятельство свидетельствует о необходимости проведения ревизии расчетных характеристик существующих селезащитных сооружений,

так как их фактическая ёмкость может оказаться значительно меньшей, нежели значащаяся в их паспортных данных. Несоответствие селезащитных сооружений реальным селям приведет к катастрофическим последствиям.

Изучение пластических свойств селевых смесей имеет особую актуальность при использовании получаемых данных в ходе проектирования селезащитных сооружений и планирования мероприятий, направленных на снижение ущерба, наносимого селями.

К сожалению, неверная оценка реологических характеристик селевых смесей, полученная более 30 лет назад, встречается даже в современной литературе [1], представляющей несомненный научный и практический интерес. В отсутствие нормативных документов, регламентирующих порядок и методики проектирования работ по защите населения и объектов хозяйственного назначения от селей, не исключено конъюнктурное использование подобных материалов, что чревато печальными последствиями.

Правительство Казахстана уделяет большое внимание противоселевой защите, поэтому разработка СНиП по проектированию и строительству противоселевых защитных сооружений является первоочередной задачей, стоящей перед научными и проектными организациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медеуов А., Колотилин Н.Ф., Керемкулов В.А. Сели Казахстана. - Алматы: Галым, 1993. - 160 с.
2. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. - М.: Гидрометеиздат, 1991. - 379 с.
3. Степанов Б.С., Цукерман И.Г. Оценка дальности продвижения селевых потоков на конусе выноса // Селевые потоки. - 1984. - Сб. 8. - С. 39-42.

Казахский научно-исследовательский
гидрометеорологический институт

СЕЛДЕН ПАЙДА БОЛҒАН ҚОСПАЛАРДЫҢ ПЛАСТИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЙТА ШАЙЫЛЫМДАҒЫ РОЛІ ТУРАЛЫ

Техн. ф. канд. Б.С. СТЕПАНОВ

Р.К. ЯФЯЗОВА

Селден пайда болған қоспаларға тексеру жүргізу өзекті мәселелердің бірі. Таудың жоғарғы құздарындағы селдің жиынтық қалдықтары төмендегі сел іркінділеріне қайта шайылғанда пайда болатын сел қоспаларының пластикалық құрылымы туралы сөз қозғалады. Қоспаларға талдау жасау арқылы сел қоймаларының сымдылығын есептеуге назар аударылған.