



А.Ю.Сидорчук

Московский университет

Вероятностный механизм размыва грунта

Размыв грунта, связного или несвязного, является результатом взаимодействия потока и русла. Характер этого взаимодействия определяется сложной комбинацией движущих сил в потоке (таких как подъемная сила, динамическое пульсационное и статическое давление, сила трения на границе вода – грунт и др.) и сил сопротивления в грунте (сила тяжести, сила сцепления и др.). Интенсивность размыва грунта также должна определяться этой комбинацией сил. При этом комбинации разных сил должны давать качественно разную картину размыва грунта. Эта сложность не проявляется в существующих способах описания размыва грунта - моделях эрозии. Большинство этих моделей, несмотря на их значительное количество, принадлежит к двум группам: эмпирических статистических и полуэмпирических физически-обоснованных. Статистические модели базируются на эмпирически установленных связях между скоростями эрозии и величинами влияющих на эрозию факторов, обычно косвенных (например, связь скорости эрозии с длиной склона). Эти связи не несут прямого физического смысла, хотя могут вполне удовлетворительно описывать интенсивность размыва грунта и часто используются в прикладных целях. В физически-обоснованных моделях делается попытка установить прямые связи, например зависимость интенсивности эрозии от скорости и глубины потока (или их производных – касательного напряжения, мощности, энергии и т.п.). Однако и здесь первичным источником информации являются опытные данные, что резко ограничивает область применения моделей. Модели обеих групп являются априорными – входящие в них функциональные зависимости устанавливаются заранее, исходя их предыдущего опыта, а затем применяются к конкретному сочетанию характеристик потока и грунта. Такие модели в принципе не могут быть универсальными (хоть некоторые из них так называются) и мало способствуют пониманию фундаментального механизма размыва грунта.

Возможно ли построить модель размыва грунта на дедуктивной основе, исходя из существующих четко установленных физических законов? Основы такого подхода заложены в работах Мирцхулавы (1988), Ниринга (1991), Вильсона (1993), автора (1999, 2005). Это модели третьей группы, где функциональные зависимости между интенсивностью эрозии и величинами факторов эрозии устанавливаются исходя из конкретного сочетания сил, возникающих при взаимодействии потока и размываемого грунта. Так как это взаимодействие носит вероятностный характер, то модели третьей группы являются стохастическими.

Будем рассматривать интенсивность эрозии, осредненную на некотором участке поверхностного слоя грунта за некоторый интервал времени. Эта средняя интенсивность эрозии может быть вычислена двумя путями: 1) как произведение концентрации неустойчивых частиц в

поверхностном слое грунта на их среднюю скорость взмыва; и 2) как пространственно-временное среднее скоростей всех частиц (включая неподвижные) в поверхностном слое грунта. Математические выражения для обоих методов расчета строго равны, поэтому в дальнейшем рассматриваем более простой второй способ. Скорость взмыва конкретной частицы грунта вычисляется из второго закона Ньютона при известных размерах и плотности частицы, а также модуле суммы сил в потоке и грунте, которые на нее воздействуют. Среднюю скорость взмыва можно вычислить двумя путями. Можно задать пространственные поля характеристик потока и грунта (на основе некоторых стохастических закономерностей), рассчитать скорость взмыва в каждом элементе этого поля, а затем провести осреднение – этот путь использован Белошапковой (2004). Можно вычислить среднее как сумму произведений случайных величин на их частоты (вероятности) – этот путь использован нами. В этом способе главным становится нахождение функции распределения плотности вероятности (РПВ) для скорости взмыва частиц грунта. Так как скорость взмыва есть функция от геометрии частиц и составляющих воздействующих сил, то задача сводится к расчету РПВ этой функции на основе частных РПВ для каждого из аргументов функции. В общем виде решение этой задачи предельно сложное, но с некоторыми упрощениями может быть доведено до числа. Так, в работе (Sidorchuk, Smith, Nikola, 2004) показано такое решение для случая эрозии агрегированного связного грунта под воздействием вертикальных составляющих срывающих и стабилизирующих сил.

Главным преимуществом предлагаемой стохастической модели размыва грунтов над моделями первых двух групп является возможность теоретического анализа процесса размыва, сопоставления результатов при разных сценариях взаимодействия потока и размываемого грунта, проведения численных экспериментов с заданными начальными условиями и сопоставления результатов расчета с данными измерений. Даже упрощенная модель позволяет найти теоретическое объяснение некоторых известных из наблюдений явлений. Так, расчеты по стохастической модели показывают, что зависимость между интенсивностью эрозии и скоростью потока не может быть описана единой степенной функцией - факт, хорошо известный из экспериментов. Стохастическая модель позволяет найти вид этой функции в каждом конкретном случае, для заданного сочетания вероятностных характеристик потока и грунта. Теория показывает сильное влияние дисперсии свойств потока и грунта на скорость эрозии и необходимость измерения этой дисперсии в экспериментах для правильной интерпретации их результатов. Теория показывает качественно разный характер взаимодействия потока и грунта при малых и больших скоростях потока и позволяет объяснить объективно малую точность при прогнозе эрозии малой интенсивности. Теория показывает, в каком направлении следует развивать экспериментальные исследования взаимодействия потока и размываемого грунта для фундаментального объяснения этого процесса.