

## Методика расчета

Смывом называется процесс эрозии или растворения компонент (веществ) с поверхности водосбора (подбассейна) в период формирования стока. Если глубина воды превышает несколько миллиметров, то процессы эрозии могут быть описаны с помощью теории транспорта наносов, в рамках которой удельный поток массы наносов пропорционален водному потоку и напряжению сдвига у дна. С помощью критического напряжения сдвига можно определить начальное движение частицы, находящейся в покое на дне русла. Такой механизм мог бы применяться на проницаемых участках водосбора или для уличных дренажных канав (желобов стока), а также для каналов большего размера. Однако в случае малых глубин поверхностных потоков энергия ливня также может вызвать отрыв и движение частиц. Этот эффект часто включается в методы прогнозирования эрозии проницаемых поверхностей и может быть применен к смыву с непроницаемых поверхностей, хотя в этом случае необходимо учитывать роль ограниченного накопления смываемого материала. Далее рассмотрим подходы к оценке смыва, основанные на упрощенных эмпирических соотношениях.

Несмотря на привлекательность теории, основанной на транспорте наносов, на практике ее использование сильно ограничено. Данное ограничение связано с недостатком данных для определения параметров (например, напряжения сдвига), чувствительностью к шагам по времени и пространству, а также по той причине, что более простые методы (с некоторой теоретической основой) обычно работают также хорошо и могут воспроизводить наблюдаемые явления смыва достаточно приемлемо. Что касается последних предложений, то наиболее часто цитируются результаты, полученные на основе экспериментов, в которых составляющие (загрязняющие вещества) были смыты с улиц с применением дождевальной системы.

Для описания смыва можно предложить следующее экспоненциальное соотношение:

$$POFF(t) = PSHEd_0(1 - e^{-kt}), \quad (1)$$

где  $POFF$  - суммарное количество вещества, смытое за время  $t$ ,

$PSHEd_0$  – начальное количество вещества на поверхности в момент  $t = 0$ ,

$k$  – коэффициент.

Или, поскольку оставшееся количество (вещества),  $PSHED(t)$ , равняется  $PSHED_0 - POFF$ , то

$$PSHED(t) = PSHED_0 e^{-kt} \quad (2)$$

где  $PSHED(t)$  – количество (вещества), остающееся на поверхности в момент времени  $t$ ,

Очевидно, что коэффициент  $k$  есть функция как от размера частиц, так и от модуля стока.  $k$  возрастает с ростом модуля стока, что вполне ожидаемо, и уменьшается с увеличением размера частиц.

Данные, полученные Sartor and Boyd [1], подтвердили правильность предположения, включенного в алгоритмы модели SWMM (и во все версии моделей смыва на сегодняшний день), что удельный смыв (например, mg/sec) в любое время пропорционален остающемуся на поверхности водосбора количеству вещества:

$$dPSHED/dt = -k \times PSHED \quad (3)$$

Решением уравнения (3) является уравнение (2). Это уравнение впервые предложил А. Бурдоин при оригинальной разработке SWMM. Коэффициент  $k$  можно определить, предположив, что он пропорционален модулю стока,  $r$ :

$$k = RCOEF \times r, \quad (4)$$

где  $RCOEF$  – коэффициент смыва,  $\text{см}^{-1}$  ( $\text{in.}^{-1}$ ),

$r$  – модуль стока с подбассейна,  $\text{см}/\text{час}$  ( $\text{in.}/\text{час}$ ).

Было сделано предположение, что полдюйма общего стока за час смывает 90% первоначальных поверхностных взвешенных наносов, что привело к известному в настоящее время значению  $RCOEF$  в 4.6 дюйма<sup>-1</sup>. При этом принято, что реальное распределение интенсивности по времени не влияет на вычисление  $RCOEF$ .

Sonnen [2] получил несколько оценок значений  $RCOEF$ , исходя из теории транспорта наносов, в пределах 0.052 – 6.6 дюймов<sup>-1</sup>, которые тем больше, чем меньше диаметр частиц, интенсивность дождя и площадь водосбора. В этой работе отмечено, что величина 4.6 дюйма<sup>-1</sup> относительно велика по сравнению с большей частью полученных им значений. Хотя экспоненциальные формулы смыва (3) и (4) недостаточно хороши, их можно верифицировать на основе специально организованных экспериментов.

Еще при разработке оригинальной версии SWMM было обнаружено, что данные экспоненциальные формулы не соответствовали некоторым экспериментальным данным, и в качестве коррекции был введен коэффициент готовности в виде

$$AV = a + br^c, \quad (5)$$

где  $AV$  - коэффициент готовности,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, которые были введены в качестве корректирующих множителей в уравнение (1), чтобы привести результаты в соответствие с измеренными значениями концентрации взвешенного твердого стока в Цинциннати и Сан-Франциско. Основная трудность заключается в том, что применение уравнений (3, 4) всегда приводит к уменьшению концентраций со временем независимо от распределения стока по времени. Это противоречит интуитивным ощущениям, т.к. ожидается, что высокие скорости потока в максимальной фазе ливня действительно могут привести к смыву более высоких концентраций загрязняющих веществ, чем до указанной фазы. Вероятно, это можно объяснить тем, что концентрации вычислены путем деления модуля твердого стока (например, мг/сек) для получения количества на единицу объема (например, мг/л). Таким образом

$$C = \frac{1}{Q} \left( \frac{dPSHED}{dt} \right) = const \times \frac{RCOEF \times r \times PSHED}{A \times r}, \quad (6)$$

где  $C$  – концентрация (количество/объем),

$Q = A \times r$  – расход,

$A$  – площадь подводосбора,

$r$  – модуль стока, дюймы /час,

$a$  константа включает коэффициенты пересчета.

Очевидно, что концентрация всегда будет уменьшаться со временем, т.к. модуль стока  $r$  получается из уравнения и остаточное количество загрязнений (вещества)  $PSHED$ , продолжает уменьшаться. Эта проблема решается в SWMM за счет того, что смыв при каждом шаге по времени,  $POFF$ , принимается пропорциональным модулю стока в степени  $WASHPO$ :

$$-POFF(t) = \frac{dPSHD}{dt} = -RCOEFX \times r^{WASHPO} \times PSHED, \quad (7)$$

где POFF – количество вещества, смытое в момент времени  $t$ , количество/сек (например, мг/сек),

PSHED – количество вещества, которое может быть смыто в момент времени  $t$  (например, мг)

$$RCOEFX = \text{коэффициент смыва} = RCOEF/3600, (\text{дюймы/час}^{-WASHPO} \times \text{сек}^{-1}),$$

R – модуль стока, дюймы/час.

В случае если уравнение (7) разделить на модуль стока с целью получить концентрацию, то она будет пропорциональна величине  $rWASHPO^{-1}$ . Следовательно, если увеличение модуля стока существенно, концентрации в разгар ливня могут увеличиваться даже если PSHED уменьшилось. Уравнение (7) было впервые предложено в докладе Инженерного корпуса Бостонского района в 1974 г. Таким образом, для расчета смыва загрязняющих веществ необходимо определить 2 параметра: RCOEF и WASHPO. Коэффициенты готовности в уравнении 5 больше не используются, т.к. есть достаточная для калибровки вариабельность при использовании уравнения 7.

## Литература

1. Sartor , J.D., Boyd G.B. Water pollution aspects of street surface contaminants. EPA-R2-72-081,(NTIS PB-214408) Washington, DC,1972.
2. Sonnen, M.B.Urban runoff quality:information needs, Journal of the technical councils, ASCE, Vol.106, No TC1, August 1980, p.p 29-40