

ISSN 0130—2906

МЕТЕОРОЛОГИЯ
И ГИДРОЛОГИЯ

4 1988

УДК 566.164.072

Имитационная модель накопления и выноса взвешенных веществ поверхностным стоком с застроенной территории

Кандидат географ. наук В. М. Московкин, М. М. Вавельский,
кандидат техн. наук В. М. Хват

Разработана имитационная модель формирования качества воды поверхностного стока, отводимого с застроенной территории, включающая в себя алгоритм расчета гидрографа поверхностного стока; алгоритм расчета накопления веществ на поверхности в течение бездождевых периодов, алгоритм расчета выноса взвешенных веществ во время дождей. Модель численно реализована в системе ЕС ЭВМ на языке ПЛ-1. Модель калибрована и проверена на основе последовательного ряда пяти дождей для условий территории Тираспольского мясокомбината.

В работе [4] на основе модифицированных алгоритмов американской системной модели STORM [8] была предложена математическая модель выноса загрязняющих веществ с застроенной территории, которая состоит из убираемых и неубираемых участков. Основные ее расчетные алгоритмы накопления и выноса загрязняющих веществ следующие.

Количество смета (взвешенных веществ) в килограммах на убираемой площади на конец бездождевого периода (N_6 сут) определяется по модифицированной формуле модели STORM, вытекающей из баланса веществ, с учетом процессов их накопления и изъятия:

$$P_{ку} = (P_{оу} - B \lambda A N_s)(1 - E)^n + \lambda A N_s (B - n) + \lambda A N_6, \quad (1)$$

где $P_{оу}$ — количество смета на убираемой площади на начало бездождевого периода, кг;

$B = (1 - E) / E$; E — эффективность уборки в долях единицы;

λ — доля убираемой площади в общей площади застроенной территории;

$A = K_n V F / T$, кг/сут — ежесуточная скорость накопления смета [6]; K_n — коэффициент неравномерности накопления смета, изменяющийся в интервале 1,5—2,0 [6];

V — годовая норма накопления смета, кг/(м²·год);

F — площадь застроенной территории, м²;

T — период летней сухой уборки, сут;

N_s — интервал между уборками, сут;

$n = [N_6 / N_s]$ — количество уборок (целая часть числа N_6 / N_s).

Для неубираемой площади учитывается процесс уплотнения смета, согласно уравнению баланса смета

$$\frac{dP_0}{dt} = A(1-\lambda) - K_y P_0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) на момент времени $t = N_6$, когда $P_0 = P_{ку}$, имеет вид

$$P_{ку} = \frac{A(1-\lambda)}{K_y} [1 - \exp(-K_y N_6)] + P_{он} \exp(-K_y N_6), \quad (3)$$

где $K_y \neq 0$ — коэффициент уплотнения смета, $сут^{-1}$;
 $P_{он}$ — количество смета ($кг$) на начало бездождевого периода.
 Коэффициент K_y может оцениваться по формуле

$$K_y = \frac{4,6}{\bar{N}_6},$$

где \bar{N}_6 — характерный бездождевой период, при котором процесс накопления смета стабилизируется [$\exp(-K_y \bar{N}_6) \approx 0$] на уровне $A(1-\lambda)/K_y$. Если $K_y = 0$, тогда $P_{ку} = P_{он} + A(1-\lambda)N_6$.

При расчете выноса веществ используется уравнение Меткафа и Эдди [7], которое наиболее просто и обоснованно описывает процесс выноса веществ во время дождя и является составной частью модели STORM [8]. Согласно этому уравнению, количество взвешенных веществ, смытых с застроенной территории за единицу времени (интенсивность смыва веществ), пропорционально количеству веществ, остающихся на поверхности (P),

$$\frac{dP}{dt} = -kP, \quad (4)$$

откуда

$$P_b = P_0 - P = P_0(1 - e^{-kt}), \quad (5)$$

где P_0 — исходная нагрузка;

P — нагрузка, остающаяся после времени t ;

$P_b = P_0 - P$ — нагрузка, смытая за промежуток времени t .

Коэффициент выноса k является функцией от интенсивности поверхностного стока. Для его определения согласно данным натурных исследований, проведенных в США [7], принято, что за счет равномерно распределенного поверхностного стока с интенсивностью 0,5 дюйма в час происходит унос 90% исходной загрязняющей нагрузки в течение одного часа. Это приводит к следующей формуле при расчете выноса (в килограммах) за весь дождь [4]:

$$P_b = P_0 [1 - \exp(-0,18\delta H_{oc})], \quad (6)$$

где δ — коэффициент стока, H_{oc}

В данной работе при расчете выноса взвешенных веществ в динамике (во времени) мы предлагаем использовать уравнение типа

$$P_b(t) = P_0 [1 - \exp(-kh(t))], \quad (7)$$

где $h(t)$ — нарастающий во времени слой стока, $мм$.

Последнее уравнение используется при расчете концентрации взвешенных веществ $C(t)$ (поллютографа). Полагаем, что $C(t) = q(t)/Q(t)$, где $q(t)$, $Q(t)$ — соответственно твердые и жидкие расходы поверхностного стока, $кг/с$, $м^3/с$. Слой стока в уравнении (7) запишем через объем стока $W(t)$, $м^3$:

$$h(t) = \frac{10^3}{F} W(t). \quad (8)$$

Твердый расход определим через дифференцирование во времени выражения (7):

$$q(t) = \frac{dP_b(t)}{dt} = \frac{P_0 k \cdot 10^3}{F} \frac{dW}{dt} \exp\left(-\frac{k \cdot 10^3}{F} W(t)\right). \quad (9)$$

С учетом связи объема стока с жидким расходом

$$\int_0^t Q(t) dt = W(t) \text{ или } \frac{dW(t)}{dt} = Q(t),$$

из уравнения (9) получим

$$q(t) = \frac{10^3 P_0 k}{F} Q(t) \exp\left(-\frac{10^3 k}{F} W(t)\right), \quad (10)$$

откуда

$$C(t) = \frac{10^3 P_0 k}{F} \exp\left(-\frac{10^3 k}{F} W(t)\right), \text{ кг/м}^3. \quad (11)$$

Последняя формула (11) через слой стока запишется в виде

$$C(t) = \frac{10^3 P_0 k}{F} \exp(-kh(t)). \quad (12)$$

Отметим, что такая экспоненциально-затухающая зависимость концентрации загрязняющих веществ от нарастающих слоев стока была получена и при статистической обработке натуральных данных для условий Тираспольского мясокомбината [1]. Эти данные будут ниже использованы при калибровке математической модели.

Территория Тираспольского мясокомбината представляет собой практически неубираемую территорию с водонепроницаемой поверхностью и уклоном в сторону водотока не менее 0,001. Система ливневой канализации отсутствует, поэтому поверхностный сток по поверхности территории стекает по уклону в сторону водотока и отводится в водоем по железобетонному лотку прямоугольной формы.

На территории происходит накопление не только загрязняющих веществ минерального происхождения (взвешенных веществ), но и органического происхождения. Учитывая, что моделировать накопление и вынос загрязняющих веществ органического происхождения очень сложно, нами произведено моделирование накопления и выноса взвешенных веществ, а потом, используя существующие зависимости между содержанием взвешенных и органических веществ в поверхностном стоке, можно оценить величину выноса загрязняющих веществ органического происхождения, выраженных через ХПК и БПК₅.

Отбор проб и производство анализов осуществлялись по известным методикам [2], а количество выпавших осадков определялось при помощи плювиографа, установленного на открытой площадке территории комбината. Пробы дождевых вод отбирались вручную в месте концентрации стока со всей территории (в железобетонном лотке) перед выпуском стока в водный объект.

Соответствующие выносы смета (кг) с убираемых и неубираемых площадей во времени можно определять по формуле (7) с учетом выражений (2), (3):

$$\begin{cases} P_{\text{ву}}(t) = P_{\text{ку}} [1 - \exp(-kh(t))], \\ P_{\text{вн}}(t) = P_{\text{кн}} [1 - \exp(-kh(t))]. \end{cases} \quad (13)$$

Соответствующие твердые расходы и концентрации взвешенных записываются аналогично формулам (9) — (12). Необходимый для расчета вышеуказанных характеристик твердого стока расход воды $Q(t)$ вычисляем на основе уравнения баланса воды, предложенного в работе [5],

$$\frac{dh}{dt} = (I(t) - R(t)) \frac{10^{-3}}{60} - \frac{V \bar{i}}{n_{\text{ш}} l} \bar{h}^{5/3} + \frac{Q_{\text{вх}}(t)}{F}, \quad (14)$$

где I, R — интенсивности дождя и потерь стока, мм/мин;

\bar{h} — средняя глубина потока, м;

$n_{\text{ш}}$ — коэффициент шероховатости;

l — длина склона (участка), м;

i — средний уклон участка;

$Q_{\text{вх}}(t)$ — входной расход воды, м³/с;

$$Q_{\text{вх}}(t) = Q_0 + \int_0^t q_{\text{бок}} dx;$$

Q_0 — расход воды в начальном створе участка, м³/с;

$q_{\text{бок}}$ — боковой приток, м³/с;

F — площадь склона (участка), м².

Уравнение (14) численно решается методом Рунге—Кутты. Подмодель поверхностного стока, основанная на решении уравнения (14), численно реализована в системе ЕС ЭВМ на языке

ПЛ-1 в виде стандартной процедуры FLOW [3]. Расход воды при этом вычисляется по формуле Шези—Манинга

$$Q(t) = \frac{1}{n_{\text{ш}}} \bar{h}^{5/3} \sqrt{\bar{i}} b, \quad (15)$$

где $b = F/l$ — средняя ширина участка, м.

В новой версии подмодели поверхностного стока предусмотрено вычисление функции $W(t) = \int_0^t Q(t) dt$, используемой в алгоритме

качества воды поверхностного стока, которая численно реализована в системе ЕС ЭВМ в виде стандартной процедуры USYP на языке ПЛ-1; при этом входящий сюда алгоритм расчета накопления смета полностью соответствует старой версии процедуры USYP [4].

Полная имитационная модель выноса взвешенных веществ с застроенной территории организована в виде управляющей программы, обращающейся в процессе счета к процедурам FLOW и USYP.

При расчете выноса различных растворимых химических веществ, хорошо сорбируемых на взвешенных веществах, следует вводить пересчетные коэффициенты, определяемые в результате натуральных и экспериментальных исследований.

На основе вышеописанной имитационной модели проведено непрерывное моделирование формирования поверхностного стока и его качества для территории мясоперерабатывающего предприятия (для пяти дождевых событий (табл. 1)).

Таблица 1
Характеристика дождей и стока

Дожди, дата	Слой осадков, мм	Продолжительность дождя, мин	Средняя интенсивность дождя, мм/мин	Средняя интенсивность потерь стока, мм/мин	Слой стока, мм
25.05.82	22,2	120	0,184	0,032	18,27
14.06.82	7,3	100	0,073	0,033	4,02
08.07.82	7,9	87	0,091	0,032	5,12
10.07.82	3,9	117	0,033	0,017	1,86
05.08.82	8,5	54	0,157	0,063	5,07

Характеристики дождей и поверхностного стока приведены в табл. 1. Постоянные параметры модели: $l = 300$ м; $b = 163,3$ м; $F = lb = 49\,000$ м²; $i = 0,001$; $K_n = 1,75$; $T = 238$ сут; $V = 1$ кг/(м²·год); $E = N_6 = \lambda = 0$ (неубираемая территория); $Q_{\text{вх}}(t) = Q_0 = 0$; $n_{\text{ш}} = 0,02$.

Гидрограммы дождей приведены на рис. 1. Интенсивность потока стока задавалась постоянной в течение каждого дождя, а после прекращения дождя бралась нулевой. Шаг интегрирования в уравнении (14) брался равным 5 мин ($\Delta t=300$ с). С этим же шагом проводилось моделирование процессов накопления (в бездождевой период) и выноса смета. Интервал моделирования характеристик стока воды и наносов для всех дождей брался равным 250 мин (в 2—4 раза больше периода дождя (табл. 1)). На этом интервале расхождение рассчитанных и измеренных объемов (W) стока воды, которое достигалось изменением коэффициента шероховатости $n_{ш}$, составляло не более 2%. Моделированный гидрограф стока по всем дождям показан на рис. 1 (крестиком показаны измеренные значения расхода воды). В целом наблюдается удовлетворительная сходимость измеренного и рассчитанного гидрографов стока. Ввиду небольшой длины пути стока (l) запаздывание между осадками и стоком слабо выражено (в большинстве случаев пик расхода воды приурочен к конечной фазе максимальной интенсивности осадков).

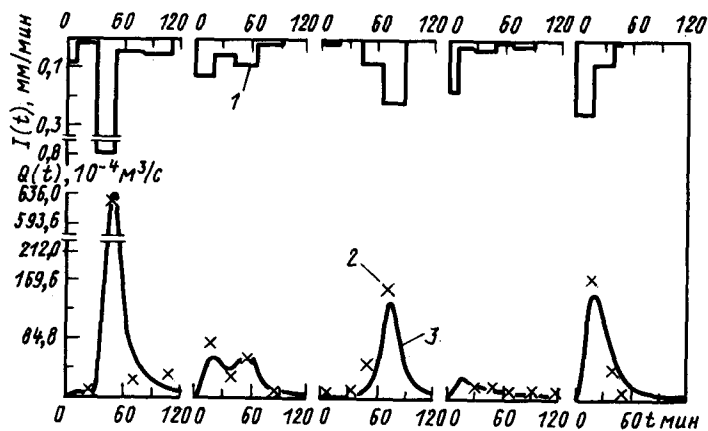


Рис. 1. Измеренный и рассчитанный гидрографы стока для пяти дождевых событий.
1 — гнетиограмма дождей; 2 — измеренные значения; 3 — рассчитанные значения.

Моделирование твердого стока и концентрации взвешенных веществ показано на рис. 2. Удовлетворительная сходимость расчетных и натуральных данных имела место для второго и пятого дождя. Неудовлетворительную сходимость по остальным дождям следует отнести за счет отсутствия автоматического пробоотборника (осуществляет одновременно отбор представительных проб стока и измерение количества выпавших осадков) и возможных погрешностей, допущенных при определении расхода стока (расход определялся при помощи треугольного водослива). Рассчитанные

Таблица 2
Некоторые натурные и рассчитанные значения параметров и выходных данных модели

N_6 сут	K_y сут	k мм	$P_{он}$ кг	P_0 кг	$W_{изм}$ м ³
10	1,41	0,16	0	204,42	895,20
20	7,90	0,66	13,40	36,49	197,00
24	0,77	0,67	2,60	374,57	250,90
2	19,90	2,98	10,30	14,48	91,10
26	0,29	0,54	0,49	999,91	248,40

значения $P_{он}$, P_0 , P_v показаны в табл. 2. Коэффициенты выноса смета k и P_0 оценивались по начальным и конечным концентрациям на основе уравнения (12), а коэффициент уплотнения K_y оценивался в предположении стабилизации процесса накопления: $K_y = A(1-\lambda)/P_0$, согласно уравнению (3). Значения этих коэффи-

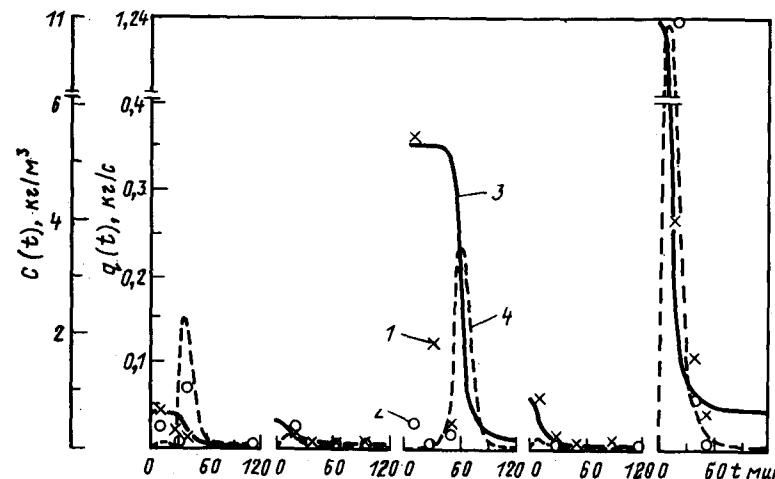


Рис. 2. Измеренные и рассчитанные значения зависимостей $C(t)$, $q(t)$.
1 — измеренные значения $C(t)$; 2 — измеренные значения $q(t)$; 3 — зависимость $C(t)$; 4 — зависимость $q(t)$.

циентов приведены в табл. 2. Здесь же приведены значения бездождевых периодов (N_6). Для первого дождя предшествующий бездождевой период условно взят равным 10 сут с нулевой нагрузкой на начало этого периода ($P_{он}=0$).

Отметим, что разработанная имитационная модель может использоваться при моделировании поверхностного стока со сложных водосборов, разбиваемых на элементарные водосборы со своим набором параметров, к каждому из которых применяется описанная выше модель.

Литература

1. Вавельский М. М., Московкин В. М., Хват В. М. Качество поверхностного стока с территории предприятий мясоперерабатывающей промышленности. — В сб.: Комплексное использование и охрана водных ресурсов. М., ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1986, вып. 8.
2. Инструкция по отбору проб и производству анализов сточных вод предприятий мясной промышленности. — М., ВНИИМП Минмясомолпрома СССР, 1978.
3. Колпак В. З., Московкин В. М., Лысенко В. Е. Математическое моделирование формирования стока воды и наносов на малых речных водосборах со сложным рельефом. — В кн.: Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции. Т. 1. М., 1984.
4. Московкин В. М., Лысенко В. Е., Колпак В. З. Моделирование выноса взвешенных веществ поверхностным стоком с территории города. — В кн.: Охрана вод от загрязнения поверхностным стоком, Харьков, ВНИИВО, 1983.
5. Московкин В. М., Лысенко В. Е., Колпак В. З., Курносенко А. Х. Моделирование выноса наносов и пестицидов поверхностным стоком с сельскохозяйственных водосборов. — В кн.: Охрана вод от загрязнения поверхностным стоком. Харьков, ВНИИВО, 1983.
6. Шевченко Ю. А., Дмитренко Т. Д. Справочник по санитарной очистке городов и поселков. Киев, Будивельник, 1978.
7. Metcalf and Eddy Inc. storm water management model, vol. I—IV, EPA, July—October 1971.
8. Storage, treatment, overflow runoff model. STORM users manual. — Hydrol. Eng. Center, Corps of Engrs US Army, Davis, Calif., July 1976.