

Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПО ОХРАНЕ ВОД (ВНИИВО)

# ОХРАНА ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ

(Сборник научных трудов)

Харьков — 1983

11. Nash J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph.—Int. Assos. Sci. Hydrol., 1957, vol. 3, N 5.

12. Williams J. R. SPNM. A Model for Predicting Sediment, Phosphorus and Nitrogen Yields from Agricultural Basins.—Water Resources Bulletin, 1980, vol. 16, N 5, y. 843—848.

13. Witinok P. M., Whelan G. Distributed parameter watershed sedimentation model.—Proc. Iowa Acad. Sci., 1980, vol. 87, N 3, p. 103—111.

Developed is a mathematical model of sediments and pesticides discharge from water catchment areas under agricultural use, which is based on balance equations. Water erosion block of the model is a system of common differential equations of the first order which can be solved by using numerical method of Runge-Kutt. Chemical block of the model is based on a balance principle with use of the Freindlich equations and disintegration of pesticides and is presented by transcendent equation for determination of equilibrium concentration of a pesticide in soil solution. Numerical experiments on the submodel of water flow were also carried out.

*В. М. МОСКОВКИН, В. Е. ЛЫСЕНКО, В. З. КОЛПАК*

(ВНИИВО)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ С ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА**

Осуществление контроля неточечных источников загрязнения водных объектов невозможно без построения математических моделей формирования состава поверхностного стока, позволяющих также наиболее эффективно назначать мероприятия по его перехвату.

Поверхностный сток формируется на больших площадях, его поступление в водные объекты рассредоточено по их длине.

Для наиболее точного представления о процессах, влияющих на формирование поверхностного стока, в настоящее время используются детерминированные модели, так как из-за сложных связей и ограниченности данных натуральных исследований статистические модели не эффективны в оценке неточечных источников загрязнения, в них используются средние условия и характеристики, экстраполяция к другим географическим регионам или условиям часто невозможна [9]. При непрерывном моделировании внимание уделяется междождевым событиям. Непрерывное моделирование неточечного загрязнения аналогично «трехслойной пирамиде», в основании которой лежит гидрология водосбора, средним слоем является моделирование эрозии и транспорта наносов, верхним—взаимодействие различных загрязняющих веществ с жидкой и твердой фазами стока, в результате чего происходит их транспорт [9]. Верхний слой пирамиды полностью обусловлен двумя нижними слоями. Учитывая дополнительно, что транспорт химических веществ городским поверхностным стоком осуществляется в основном на взвешен-

ных веществах, в данной работе мы ограничились построением модели выноса взвешенных веществ.

Методология непрерывного моделирования неточечного загрязнения широко сочетается с системной методологией в части учета большого количества параметров, процессов и факторов, их взаимосвязи и пространственной распределенности по субводосборам, реализация которых требует мощных вычислительных средств, обладающих большой памятью и быстродействием.

Анализ работ [6—10] по математическому моделированию формирования поверхностного стока и его состава с территории городов показал, что наиболее перспективные модели основаны на следующих принципах:

— разбиение городской территории на отдельные участки в зависимости от типа использования земель (модели, разработанные американскими специалистами, *NPS*, *SWMM*, *STORM*);

— выделение главного водотока и канализационной системы (модели *SWMM*, *STORM*), по которым происходит сосредоточенный выпуск поверхностного стока (в модели *STORM* главный водоток (русло) не выделяется);

— представление городской территории, с которой сток загрязненных поверхностных вод происходит рассредоточенно, одним эквивалентным водосбором, накопление загрязняющих веществ суммируется по отдельным типам использования земель (канадская модель *LQM*);

— расчет начальной загрязняющей нагрузки производится с учетом ежедневной скорости накопления смета, бездождевого периода и уборки улиц (модели *NPS*, *SWMM*, *STORM*, *LQM*); используются разные структуры расчетных зависимостей;

— расчет поверхностного стока ведется на основе непрерывных балансовых моделей (для моделей *NPS*, *SWMM* и *LQM*), методов коэффициента стока (расчет стока на ежечасной основе) и единичного гидрографа (для расчета выходных гидрографов с каждого субводосбора (модель *STORM*);

— расчет выноса загрязняющих веществ производится на основе методологии Меткаффа и Эдди [8], по которой интенсивность выноса веществ, в том числе и взвешенных, пропорциональна их количеству, находящемуся на поверхности (модели *SWMM*, *LQM*, *STORM*), и использования эмпирических коэффициентов, учитывающих долю каждого вещества, выносимого твердой фазой стока (модель *NPS*, где твердая фаза стока берется в степенной зависимости от жидкой или приравнивается объему накапливающихся за рассматриваемый бездождевой период наносов).

Однако эти модели сложны для широкого практического использования, так как заложенная в них информация либо отсутствует, либо непригодна для условий нашей страны.

Для моделирования состава поверхностного стока с территории городов, применительно к нашим условиям, необходимо

было основные принципы, заложенные в вышеперечисленных моделях, трансформировать и конкретизировать следующим образом.

Городская территория разбивается на участки, в пределах которых годовая норма накопления смета ( $V$ , кг/м<sup>2</sup>·год) и коэффициент стока одинаковы. Для проезжей части дорог с усовершенствованным покрытием  $V=10$ , брусчато-булыжным —  $V=15$ ; для дорожек, аллей в парках и садах с асфальтным и бетонным покрытиями  $V=5-6$ ; для тротуаров и дворовых территорий с асфальтным покрытием  $V=3$ , булыжным  $V=14$  и грунтовыми —  $V=20$  [1].

Расчет выноса примесей ведется для каждого из участков, чтобы оценить их вклад в общий вынос.

Расчет начальной загрязняющей нагрузки проводится по модифицированному уравнению модели *STORM* [10], учитывающему наибольшее количество доступных параметров, а для неубираемых площадей предусмотрена возможность расчета этой нагрузки с помощью предложенного в этой работе уравнения баланса смета, учитывающего его уплотнение и недоступность для последующего его транспорта водным потоком.

Для простоты в первом приближении расчет поверхностного стока производится на основе метода коэффициента стока, а расчет выноса смета — на основе общепринятого и наиболее обоснованного уравнения Меткаффа и Эдди [8].

Для выполнения расчетов выноса взвешенных веществ (смета) за отдельный дождь необходимо задать следующие исходные данные:  $M$  — количество участков городской территории, различающихся скоростью накопления смета и коэффициентом стока;  $N_6$  — бездождевой период, сут;  $H$  — слой осадков за дождь, мм;  $E$  — эффективность уборки в долях от единицы;  $N_s$  — интервал между уборками на участках, сут;  $f$  — площадь участков, м<sup>2</sup>;  $V$  — годовая норма накопления смета на участках, кг/м<sup>2</sup>·год;  $\lambda$  — доля убираемой площади на участках;  $\delta$  — коэффициент стока на участках;  $\delta_{\text{гор}}$  — коэффициент стока для городского водосбора;  $F$  — площадь городского водосбора, га;  $P_{\text{оу}}$  — количество смета на убираемой площади каждого участка на начало бездождевого периода, кг;  $P_{\text{он}}$  — то же для неубираемой площади, кг;  $T$  — период летней уборки, сут.

Параметры  $N_6$ ,  $H$ ,  $T$  определяются по климатическим и гидрологическим справочникам, величина  $T$  при расчетах на перспективу — как среднегодовое количество суток с температурой выше 0°C. Эта величина приведена в схемах санитарной очистки и уборки городов. Параметры  $N_s$ ,  $f$ ,  $V$ ,  $\lambda$ ,  $F$  определяются по схемам санитарной очистки и уборки городов, кроме того, значения параметров  $N_s$  и  $V$  можно найти в работе [1]. Коэффициенты стока  $\delta$ ,  $\delta_{\text{гор}}$  берутся по литературным данным в зависимости от типа покрытий [2, 3]. Значения параметров  $P_{\text{оу}}$ ,  $P_{\text{он}}$  в случае отсутствия натуральных данных можно брать или нулевы-

ми (интенсивные весенний или предыдущий дождевой паводки), или оценивать по предельно допустимым нормам засоренности городских территорий [1] с учетом площадей рассматриваемых участков.

Под эффективностью уборки  $E$  понимается эффективность уборки подметальных машин (какую часть смета на убираемой площади они в состоянии убрать). Согласно литературным данным эта величина лежит в интервале  $0,1 \div 0,5$  [6—8].

Коэффициент уплотнения смета  $K_y$  вводится только для неубираемых участков и представляет собой часть смета, изымающегося из его баланса в единицу времени бездождевого периода в результате уплотнения, и недоступен для транспорта потоком. Для расчета выноса смета дождевым стоком рассмотрим типовой участок площади  $f$ . Для убираемой его площади  $\lambda f$  расчет накопления смета, кг, на конец бездождевого периода проводится по схеме.

Вычисляется:

— ежесуточная скорость накопления смета на всем участке по формуле работы [5]

$$A = 1,75 V f / T, \text{ кг/сут.}, \quad (1)$$

где 1,75 — среднее значение коэффициента неравномерности накопления смета, изменяющегося в интервале  $1,5 \div 2$  [1];

— количество уборок на участке по формуле

$$n = [N_6 / N_s], \quad (2)$$

где  $[N_6 / N_s]$  — целая часть числа  $N_6 / N_s$ ;

— количество смета на убираемой части участка на конец бездождевого периода (кг) по модифицированной формуле модели STORM [10].

$$P_{кy} = (P_{0y} - B \lambda A N_s) (1 - E)^n + \lambda A N_s (B - n) + \lambda A N_6, \quad (3)$$

где  $B = (1 - E) / E$ .

Для неубираемой площади участка, если  $K_y \neq 0$ , тогда

$$P_{кн} = \frac{A(1 - \lambda)}{K_y} [1 - \exp(-K_y N_6)] + P_{0н} \exp(-K_y N_6). \quad (4)$$

Эта формула является решением предлагаемого уравнения баланса смета

$$\frac{dP_0}{dt} = A(1 - \lambda) - K_y P_0 \quad (5)$$

на момент времени  $t = N_6$ , когда  $P_0 = P_{кн}$ . Коэффициент  $K_y$  может оцениваться из условия  $\frac{dP_0}{dt} = 0$ , откуда  $P_0 = P_{кн} = A(1 - \lambda) / K_y$ . Его можно оценить также, зная характерное время, за которое процесс накопления смета выходит на

стационарный режим и при котором экспоненциальные члены в формуле (4) малы:  $\exp(-K_y \bar{N}_6) \approx 0,01$ , откуда  $K_y = 4,6/\bar{N}_6$ .

Если  $K_y = 0$ , тогда

$$P_{\text{кн}} = P_{\text{он}} + A(1 - \lambda) N_6. \quad (6)$$

Вынос смета, кг, с убираемой и неубираемой части участков производится по формуле Меткаффа и Эдди [8]

$$P_{\text{ву}} = P_{\text{ку}} [1 - \exp(-0,18\delta H)], \quad (7)$$

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{кн}} [1 - \exp(-0,18\delta H)], \quad (8)$$

где величины  $P_{\text{ку}}$ ,  $P_{\text{кн}}$  определяются по формулам (3), (4), (6).

Оставшееся количество смета после дождя на убираемой и неубираемой площадях участка

$$P_{\text{оу1}} = P_{\text{ку}} - P_{\text{ву}}, \text{ кг} \quad (9)$$

$$P_{\text{он1}} = P_{\text{кн}} - P_{\text{вн}}, \text{ кг} \quad (10)$$

рассчитывается для того, чтобы можно было производить расчет для следующего бездождевого периода и дождя.

Производятся аналогичные расчеты для остальных участков. Общий вынос ( $P_{\text{в}}$ , кг) находится суммированием по всем участкам, а объем стока ( $m^3$ ) с городской территории находится по формуле (метод коэффициента стока)

$$W = 10\delta_{\text{гор}} FH. \quad (11)$$

Определяется средняя концентрация выносимого с поверхностным стоком смета

$$C = P_{\text{в}}/W, \quad (12)$$

где  $P_{\text{в}} = P_{\text{ву}} + P_{\text{вн}}$ .

После этого производятся аналогичные расчеты для следующего бездождевого периода и дождя, где в качестве начального количества смета имеем рассчитанные по формулам (9), (10) величины предыдущего цикла.

Изложенный алгоритм был численно реализован в системе ЕС ЭВМ на языке ПЛ-1 в виде стандартной процедуры, с помощью которой проведены численные эксперименты для условий г. Харькова. Основная часть параметров на современное состояние бралась согласно схеме санитарной очистки и уборки города с разбиением его территории на четыре типовых участка с убираемыми и неубираемыми площадями.

Результаты численных экспериментов при  $K_y = 0$  приведены в таблицах 1 и 2.

Во всех расчетах величины  $P_{\text{оу}}$ ,  $P_{\text{он}}$  на всех участках брались нулевыми,  $T = 238$  сут,  $\delta_{\text{гор}} = 0,4 - 0,6$ ,  $F = 36700$  га — современное состояние;  $V = 8$  кг/ $m^2 \cdot$ год,  $N_s = 0,5$  сут,  $\lambda = 0,73$ ,  $\delta = 0,85$ ,  $f = 5,0036 \cdot 10^6 m^2$  — улицы и дороги с усовершенствованными по-

Таблица 1

Вынос и концентрация взвешенных веществ в дождевом стоке для дождей с различным слоем осадков ( $E=0,1$ ,  $N_6=8$  сут)

Показатель	$H$ , мм					
	5	10	15	20	25	30
$P_b$ , тыс. т	1,7	2,5	3,0	3,2	3,35	3,5
$C$ , мг/л	1750	1370	1150	950	800	700

Таблица 2

Концентрация взвешенных веществ, мг/л, в дождевом стоке при слое осадков  $H=10$  мм при различных параметрах  $E$  и  $N_6$

$E$	Параметры			
	$N_6$ , сут			
	5	10	15	20
0	1400	2700	4200	5600
0,1	1150	2100	2900	3700
0,2	1000	1800	2550	3250
0,3	900	1650	2350	3050
0,4	850	1550	2250	2950

крытиями;  $V=5,6$  кг/м<sup>2</sup>·год,  $N_s=1$  сут,  $\lambda=0,39$ ,  $\delta=0,45$ ,  $f=1,56 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup> — тротуары и дорожки внутри микрорайонов;  $V=15$  кг/м<sup>2</sup>·год,  $N_s$ ,  $\lambda=0$ ,  $\delta=0,5$ ,  $f=7,31 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup> — улицы и дороги с неусовершенствованными покрытиями;  $V=5,6$  кг/м<sup>2</sup>·год,  $N_s=1$  сут;  $\lambda=1$ ,  $\delta=0,6$ ,  $f=3,6 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup> — тротуары и дорожки в парках и скверах.

Отметим, что вынос взвешенных веществ с проницаемых поверхностей (площади без дорожных покрытий  $\delta=0,2-0,3$ , газоны  $\delta=0,1$  [2]) не производился согласно работе [6].

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными натурных исследований лаборатории поверхностного стока городов ВНИИ по охране вод [2—5]. Например, средняя концентрация взвешенных веществ в поверхностном стоке, полученная в результате обработки данных натурных исследований 1973 г. в Харькове [3], равнялась 1570 мг/л, что укладывается в расчетный диапазон концентраций (табл. 1—3).

Таблица 3

Вынос и концентрация взвешенных веществ в дождевом стоке для различных бездождевых периодов ( $E=0,1$ ,  $H=10$  мм)

Показатель	$N_6$ , сут					
	20	20	30	40	50	60
$P_b \cdot 10^3$ т	2,57	3,24	3,35	3,38	3,39	3,39
$C$ , мг/л	1402	1764	1828	1843	1847	1849

К нижней границе расчетного интервала выноса взвешенных веществ близка величина выноса (1,25 тыс. т), соответствующая усредненному удельному выносу взвешенных веществ с двух водосборов центральной части Харькова (4,1 кг/га·мм), полученному на основе данных натуральных исследований [4].

С увеличением продолжительности бездождевого периода пропорционально растет (см. табл. 2) концентрация взвешенных веществ в дождевом стоке, что может приводить к необоснованно завышенным их концентрациям при больших бездождевых периодах. Поэтому при дальнейших расчетах нами вводился ненулевой коэффициент уплотнения, который определялся по выражению  $K_y = 4,6/30 \text{ сут} = 0,153 \text{ 1/сут}$  с учетом численных экспериментов. Результаты расчетов при этом коэффициенте и различных значениях  $N_6$  для современного состояния приведены в табл. 3. Здесь в отличие от случая, когда принимается  $K_y = 0$  (см. табл. 2), происходит достаточно быстрая стабилизация (при  $N_6 \approx 30$  сут) выноса в зависимости от продолжительности бездождевого периода (это и служило основанием для выбора  $K_y$ ).

Приведены также два варианта прогнозных расчетов с учетом планируемой структуры использования городской территории и увеличения ее площади: 1 — с эффективностью уборки, совпадающей с таковой при расчетах на современное состояние ( $E = 0,1$ ), и 2 — с удвоенной эффективностью ( $E = 0,2$ ). Расчеты проводились при  $N_6 = 6$  сут,  $K_y = 0$ ,  $H = 5, 10, 15, 20$  мм. Они показали, что при  $E = 0,1$  вынос и концентрация взвешенных веществ достигают 3,63 тыс. т и 1650 мг/л, соответственно при  $H = 20$  мм и  $H = 5$  мм, а увеличение эффективности уборки в 2 раза приводит к уменьшению концентрации смета в дождевом стоке на 8—10%.

Предложенная модель и основанная на ней методика расчета выноса взвешенных веществ городским поверхностным стоком может найти применение при планировании водоохранных мероприятий и назначении режима уборки городской территории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко Ю. Л., Дмитренко Т. Д. Справочник по санитарной очистке городов и поселков. — Киев: Будівельник, 1978. — 214 с.
2. Временные рекомендации по предотвращению загрязнения вод поверхностным стоком с городской территории. — М., 1975. — 38 с.
3. Бухолдин А. А. и др. Особенности состава поверхностного стока с территории городов. — В кн.: Проблемы охраны вод. Харьков, 1974, вып. 5, с. 61—69.
4. Хват В. М., Симкин В. Н., Мостовенко В. П. Поверхностный сток городов и пути ликвидации его вредного влияния на водные объекты. — В кн.: Материалы Всесоюзного научно-технического совещания «Разработка и организация комплекса водоохранных мероприятий», Харьков, 1973, с. 231—236.

5. Хват В. М., Рокшевская А. В. Контроль за сбросом поверхностного стока с застроенных территорий в водные объекты. — В кн.: Контроль качества природных и сточных вод. Харьков, 1982, с. 34—40.

6. Amy G., Pitt R., Singh R., et al. Water quality management planning for urban runoff, US EPA, Washington, DC., 20460, EPA 440/9—75—004, December, 1974.

7. Donigian A. S. Jr., Crawford N. H. User's manual for the nonpoint source (NPS) model. Envir. Res. Lab. ORD US EPA, Athens, Georgia, 30605, April, 1979, 45 pp.

8. Metcalf and Eddy, Inc. Storm Water Management Model, vols I—IV, EPA, July—October, 1971.

9. Modelling nonpoint pollution from the land surface Ecological Research Series, EPA—600/3—76—083, Envir. Res. Lab. ORD US EPA, Athens, Georgia, 30601, July, 1976.

10. Storage, treatment, overflow, runoff model STORM. Users manual. Hydrol. Eng. Center Corps of Engrs, US Army, 609, Second Str., Davis, California, 95616, July, 1976.

A mathematical model of suspended solids drift with surface run-off from the territories of a city has been developed, which can be used for planning of water protection measures and works on cleaning of streets. The model has been numerically realized in the system of the EC-type computer in the PL-1 language in a form of a standard procedure. Numerical experiments for condition of the city of Kharkov were also performed.

*Г. А. СУХОРУКОВ, Л. Л. ЛЮБИЧ*

(ВНИИВО)

## **МЕТОД ВОГНУТОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

В статье предложен метод оптимизации технологических схем обработки промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод и поверхностного стока с территории городов и предприятий. Возможность и необходимость единого подхода к такой задаче обнаруживается в результате анализа современных и перспективных схем обработки сточных вод и исследований по поверхностному стоку с территории городов [1, 2, 8], который показывает: влияние поверхностного стока на качество вод сравнимо с влиянием сточных вод; обработка поверхностного стока в ряде случаев не отличается от обработки сточных вод; возможна совместная очистка сточных вод и поверхностного стока; их повторное использование после очистки; допустима обработка части поверхностного стока. Это обуславливает идентичность моделей оптимизации схем очистки сточных вод и поверхностного стока. Кроме того, унифицированный подход целесообразен в связи с бассейновым планированием.

Задачи выбора оптимальных схем обработки сточных вод при заданных требованиях к концентрации на выпуске рассматривались в ряде работ, опубликованных в СССР и за рубежом. В частности, определены технико-экономические характеристики