

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫНОСА ДОРОЖНОГО СМЕТА С ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДОЖДЕВЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ



М.Б. Мануйлов



В.М. Московкин

В работе представлены результаты многолетних исследований выноса загрязнений, формирующихся на урбанизированных территориях дождевым поверхностным стоком. Изучены данные натурных исследований, физического и математического моделирования процесса. Полученные результаты позволяют проводить прямую и прогнозную эколого-экономическую оценку влияния данной категории сточных вод на качество водных объектов и могут служить основой создания новых и совершенствования существующих технологий отведения и очистки поверхностного стока.

Введение

Разработка новых и совершенствование существующих технологий отведения и очистки поверхностного стока, образующегося на селитебных, рекреационных территориях и промышленных площадках требует проведения исследований по выносу дорожного смета во время выпадения

дождевых осадков с изучением изменений концентраций загрязняющих веществ в образующихся сточных водах (по классификации близких по химическому и микробиологическому составу к хозяйственно-бытовому) в зависимости от объемов накапливающихся загрязнений, гранулометрического состава частиц

смета, слоя выпавших осадков, интенсивности и типов дождей, вида водонепроницаемых поверхностей и от ряда других менее значимых факторов.

Необходимость физического моделирования и создание математических моделей процесса прежде всего диктуется сложностью проведения натурных исследований, что задается значительной неопределенностью. Мы не знаем ни точного времени наступления дождей, не говоря уже об их характеристиках – слое, продолжительности, интенсивности, типе и тому подобного. Неизвестным является и продолжительность без дождевых периодов, а значит нет полной информации о характеристиках дорожного смета – нагрузке, гранулометрическом составе частиц, объеме сорбированных на частицах нефтепродуктах, органических веществ, ионов тяжелых металлов и других ингредиентов.

Результаты экспериментальных и натурных исследований (в расширенном виде), постановка математической модели процесса смыва дорожного смета дождевым стоком публикуются впервые. В статье использованы материалы многолетних исследований, проводившихся учеными ВНИИВО (в настоящее время Украинский НИИ экологических проблем, г. Харьков) и Ялтинского филиала СНИЦ АН СССР в городах Харьков, Ялта и Алушта [1-3].

Экспериментальные исследования процесса выноса частиц дорожного смета в процессе выпадения дождевых осадков.

Экспериментальные исследования проводились на дождевальной уста-

Михаил Борисович Мануйлов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НПП «Современные биохимические технологии», г. Харьков, Украина,

Владимир Михайлович Московкин, доктор географических наук, профессор, кафедра мировой экономики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия, профессор кафедры экологии и неозологии, Харьковский Национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина.

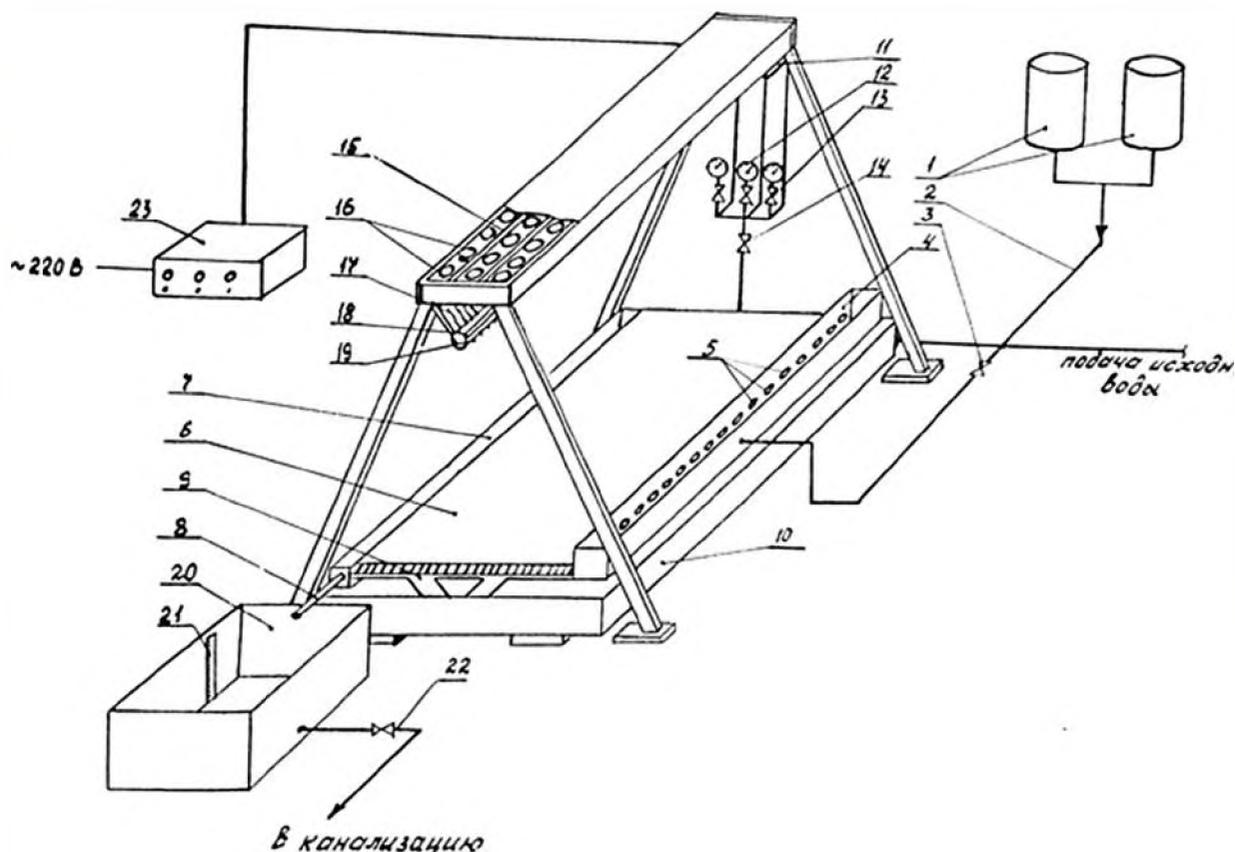


Рис. 1. Принципиальная схема дождевальной установки «Сток»

1 – емкость безнапорной подачи воды; 2 – трубопровод подачи воды в переливной лоток; 3 – регулирующий вентиль подачи воды в лоток; 4 – переливной лоток; 5 – сливная перфорированная стенка переливного лотка; 6 – исследуемая площадка с изучаемой поверхностью (асфальт или бетон); 7 – сборный лоток; 8 – выпуск стока; 9 – опорная рама; 10 – поддон дождевальной установки; 11 – вибратор дождевальной установки с электроприводом; 12 – манометры контроля расхода воды подаваемой в дождевальную установку; 13,14 – вентили регулирования подачи воды в дождевальную установку; 15 – распределительный трубопровод прямоугольного сечения; 16 – электромагнитные клапаны; 17 – полихлорвиниловые трубы; 18 – система рассеивания капель, труба с отверстиями, в которую устанавливаются дюралевые патрубки с резьбой для сменных насадок; 19 – капле образующие насадки; 20 – приемная емкость; 21 – мерная шкала; 22 – запорный вентиль отводного трубопровода; 23 – электронный блок управления магнитными клапанами

новке «Сток» разработанной в Украинском НИИ экологических проблем. Установка имитирует при бордюрную часть автомобильных дорог, характеризующуюся нагрузками дорожного смета – г/ м² при бордюрной зоны (накопление 90% загрязнений происходит в полосе шириной порядка одного метра проходящей вдоль бордюрного ограждения дорог [1,2]) На рисунке приведена принципиальная схема установки.

Характеристики установки «Сток»: высота с которой проводится дождевание – 2,0 м от уровня площадки, средневзвешенный размер капель – 0,529 мм (отверстия в насадках на капле образующих клапанах имеют диаметры 1,8 мм), что соответствует размерам капель энергия удара которых о поверхность при падении с

высоты 2,0 м, 30,0 м и при естественных дождях одинакова [4]. Установка позволяет моделировать дождевые осадки с интенсивностью в пределах от 0,02 до 1,5 мм/минута. Установка «Сток» моделирует участки дороги с асфальтовым или бетонным покрытием. Имитируемая ширина дороги – 7, 10 и так далее метров, соответственно моделируются участки от оси дороги до бордюрного ограждения площадью – 7,5 м², 10 м² и так далее. На площадку (асфальт, бетон) наносится дорожный смет, его нагрузки варьируются. Чаще всего использовался смет с гранулометрическим составом, приведенным в таблице 1 – наиболее характерные значения для городов Ялта, Алушта, а также для дорог центральной части города

Харькова [1,3]. После нанесения на площадку смет равномерно распределялся и тщательно укатывался металлическим валиком (вес 24 кг). При проведении экспериментов наряду с дождеванием осуществлялся боковой смыв, имитирующий поступление дождевых вод от оси дороги до при бордюрной зоны (предполагается, что загрязнениями данной части дороги можно пренебречь – это порядка 10% от общего объема, так как дорожный смет аккумулируется в при бордюрной зоне шириной 90–100 см [1–3]).

Регламент проведения экспериментов на дождевальной установке «Сток» следующий:

1. Выставляется заданный расход подачи воды на дождевальную установку;

Таблица 1. Гранулометрический состав дорожного смета наносимого на площадку установки «Сток»

Диапазон размеров частиц, мкм	Весовое распределение частиц по размерам, %
Более 500	9,62
250 – 500	12,67
100 – 250	63,65
50 – 100	8,12
Менее 50	6,04

2. Производится заполнение емкостей;

3. Выставляется расчетный расход воды из емкостей в переливной лоток;

4. Включаются клапаны и вибратор дождевальной установки;

5. При образовании стока открывается вентиль подачи воды в переливной лоток;

6. Контроль интенсивности стока осуществляется в процессе всего эксперимента по времени заполнения мерных сосудов;

7. Сток, улавливаемый с помощью мерных сосудов, исследуется на содержание взвешенных веществ и дисперсный состав частиц, анализы по определению спектра частиц проводились на оптико-электронной системе РИМС [1];

8. По завершению эксперимента производится выключение подачи воды, вибратора и электромагнитных клапанов, из трубопроводов сливается вода и осуществляется сушка изучаемой площадки;

9. После сушки площадки производится сбор оставшегося дорожного смета с дальнейшим его взвешиванием и исследованием гранулометрического состава частиц.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Вынос частиц дорожного смета при дождевании, в первую очередь, зависит от слоя стока:

$$h_{ст} = \varphi h_{ос}, (1)$$

где $h_{ст}$ - слой дождевого стока, мм; φ - коэффициент стока; $h_{ос}$ - слой дождевых осадков, мм.

2. Интенсивность дождевания, тип моделируемого дождя, вид водонепроницаемой поверхности (асфальт, бетон) не оказывают заметного влияния на процесс выноса частиц дорожного смета;

3. Вынос дорожного смета поверхностным стоком во многом зависит от ширины проезжей части дорог, что понятно: чем большие объемы воды участвуют в процессе, тем выше вероятность частиц покинуть изучаемый участок при бордюрной зоны. Интересным является то, что при дождевании площадки установки «Сток» (боковой смыв отсутствовал), вынос частиц происходил в незначительном объеме. При отсутствии дождевания, а только при боковом смыве (имитация стока от оси дороги до бордюрного ограждения), вынос частиц был крайне незначителен. Только сочетание дождевания с имитацией поступления стока со всей площади дорог позволяет в полной мере восстановить процесс формирования дождевого поверхностного стока и выноса им частиц дорожного смета. Приведенное объясняется следующим: при выпадении дождевых осадков, в начальный период времени (поверхностного стока ещё нет) происходит смачивание поверхности дороги и дорожного смета при этом образуется грязевая плёнка, что превращает отдельные частички в некий «монолит». При попадании капель дождя «монолит» разрушается (энергия удара капли довольно значительна [4]) в дальнейшем частицы подхватываются условно чистым стоком, образующимся на центральной части дороги и выносятся в систему ливневой канализации, в лоток и тому подобное.

4. Исследования на установке «Сток» позволили получить ряд интересных данных по изменению концентрации взвешенных веществ в стоке в зависимости от слоя осадков (имитируемая ширина дороги

14,0 м). Максимальные концентрации взвешенных веществ в поверхностном стоке наблюдаются при $h_{ст} = 0,25$ мм и составляют 11,5-13,3 г/л, из них 2,5-3,1 г/л – фракция частиц с размерами менее 100 мкм. Приведенные значения справедливы при нагрузках дорожного смета от 150,0 до 250,0 г/м² при бордюрной зоны с гранулометрическим составом частиц близким к приведенному в Таблице 1. При нагрузках дорожного смета равным 50,0-80,0 г/м² концентрация взвешенных веществ при $h_{ст} = 0,25$ мм составляли 3,8-4,6 г/л, из них 1,3-1,8 г/л – частицы с размерами менее 100 мкм. Прослеживается связь между концентрациями взвешенных веществ в стоке и первоначальными нагрузками дорожного смета и она тем заметнее, чем выше нагрузка. При этом надо отметить, что выходы на стационарные концентрации происходят за 10 мм осадков только в случае, когда нагрузки составляют менее 200 г/м² при бордюрной зоны. В случае очень значительных нагрузок дорожного смета – более 900 г/м², содержание взвешенных веществ в зависимости от слоя осадков изменяется слабо и по мере увеличения нагрузок стремится перейти к некоторому постоянному значению, то есть при нагрузках выше 1500 г/м², происходит смыв частиц практически такой же, как и с грунтовых дорог. При нагрузке дорожного смета 150 г/м² необходимо подвергать глубокой очистке лишь первые 4,2 мм стока, остальной объем воды по концентрациям химических загрязнений отвечает требованиям ПДК, предъявляемым к водам при их отведении в водные объекты. Если нагрузка составляет 25 г/м² при бордюрной зоны – необходимость в глубокой очистке стока отпадает, то есть поверхностный дождевой сток может проходить очистку только от плавающего мусора – листьев деревьев, веток, бумажек и тому подобного.

Математическое моделирование процесса выноса твердых частиц дорожного смета с водонепроницаемых поверхностей при выпадении дождевых осадков

При математическом моделировании процесса, с нашей точки зрения,

целесообразно воспользоваться аппаратом цепей Маркова [5,6], что обусловлено большим числом случайных и сложно контролируемых параметров влияющих на вынос частиц дорожного смета при выпадении дождевых осадков.

Рассмотрим постановку задачи. Пусть некоторая усредненная частица дорожного смета в момент времени t_0 находится в покое. Предположим, что в некоторый момент времени t_1 начинается дождь и через промежуток времени $\Delta t = (t_1 - t_2)$ образуется поверхностный сток, посредством которого происходит вынос частицы с изучаемой площади с вероятностью v за некоторый слой осадков Δh . Вероятность усредненной частицы остаться в покое за тот же временной интервал и соответственно за слой осадков Δh равна: $\mu = 1 - v$. Образует цепь Маркова вводя следующие состояния: S_0 - некоторая усредненная частица находится в покое - дождя нет, нет и слоя осадков; S_1 - некоторая усредненная частица выбывает с исследуемой площадки за слой осадков Δh ; S_2 - усредненная частица выбывает за слой осадков $2\Delta h$; S_3 - за $3\Delta h$; S_4 - за $4\Delta h$ и так далее. Состояние S_m характеризует вынос усредненной частицы за слой осадков равным $m\Delta h$, при $m \rightarrow \infty$. Поведение некоторой усредненной частицы, находящейся на площадке при выпадении дождевых осадков можно представить в виде матрицы переходных вероятностей P [6]. Дополнительно отметим, что состояние S_0 соответствует начальному поведению системы, то есть система находится в покое при $t = 0$ - дождя нет и вероятность частицы покинуть площадку равна нулю, следовательно, $P_{00}^{(n)} = 1$. В дальнейшем начинается дождь и при $t \rightarrow \infty$, $h_{ос.} \rightarrow \infty$ соответственно вероятность частицы дорожного смета остаться на площадке стремится к нулю. Тогда $P_{mm}^{(n)} = 1$ для состояния S_m .

Искомые вероятности являются элементами матрицы, которые имеют вид:

$$P^{(n)} = v^n (n = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

что подтверждается соответствующими вычислениями.

Единичная переходная вероятность v определяется по формуле:

$$v = \frac{m_1}{m_0} \quad (3)$$

где m_0 - первоначальная нагрузка дорожного смета в $г/м^2$ при бордюрной зоне; m_1 - масса частиц оставшегося на водонепроницаемой поверхности дорожного смета после образования задаваемого слоя стока Δh (мм), $г/м^2$ при бордюрной зоне.

Тогда масса выносимого дорожного смета при слое стока равном $n\Delta h$ составит:

$$m_n = m_0 v^n = m_0 (1 - \mu)^n \quad (4)$$

Формула (4) описывает вынос твердых частиц дорожного смета при выпадении дождевых осадков, причем при $n=0$ (дождевого стока нет) вынос равен нулю, при $n \rightarrow \infty$ $v^n \rightarrow 0$ так как $v < 1$, следовательно, происходит полный вынос частиц $m_n \rightarrow 0$.

Рассмотрим вынос частиц дорожного смета за единицу стока Δh [0;h]:

$$\Delta m_1 = m_0 - m_1, \text{ где } m_1 = m_0 - \mu^1 m_0, \text{ } m_0 = \mu^0 m_0 \text{ тогда}$$

$$\Delta m_1 = m_0 (\mu^0 - \mu^1) = m_0 \Delta \mu_1, \quad (5)$$

За единицу стока $2\Delta h$ [h;2h], получим:

$$\Delta m_2 = m_1 - m_2, \text{ где } m_1 = m_0 - \mu^1 m_0, \text{ } m_2 = m_0 - \mu^2 m_0 \text{ тогда}$$

$$\Delta m_2 = m_0 (\mu^1 - \mu^2) = m_0 \Delta \mu_2, \quad (6)$$

и так далее.

За единицу стока $n\Delta h$ [$n\Delta h$; $(n-1)\Delta h$] получим:

$$\Delta m_n = m_{n-1} - m_n, \text{ где } m_{n-1} = m_0 - \mu^{n-1} m_0, \text{ } m_n = m_0 - \mu^n m_0, \text{ тогда}$$

$$\Delta m_n = m_0 (\mu^{n-1} - \mu^n) = m_0 \Delta \mu_n, \quad (7)$$

Формула (7) прогнозирует вынос частиц дорожного смета за n одинаковых интервалов стока Δh с водонепроницаемой поверхности водосбора.

Для прогноза изменения концентрации взвешенных веществ в поверхностном дождевом стоке формула (7) запишется в виде:

$$C_n(\Delta h) = \frac{[m_0(\mu^{n-1} - \mu^n)]}{\Delta w}, \quad (8)$$

где $C_n(\Delta h)$ - изменение концентрации взвешенных веществ в дождевом поверхностном стоке в зависимости от слоя осадков $n\Delta h$, $кг/м^3$; m_0 - первоначальная, до выпадения дождевых осадков, нагрузка дорожного смета на исследуемом водосборе, $кг$; ΔW - объем дождевого стока, образующегося на водосборе, $м^3$.

Значение ΔW определяется по следующей формуле [7]:

$$w = 10 F h_{ос} \varphi = 10 F n \Delta h, \quad (9)$$

где F - площадь водосбора, $га$; φ - коэффициент стока.

Единичные переходные вероятности, входящие в формулу (8) определяются зависимостью (3) - для общего объема дорожного смета и аналогичным образом для частиц с размерами менее 100 $мкм$, на которых сорбировано до 98% нефтепродуктов, 97% органических веществ, $99,7\%$ ионов тяжелых металлов и так далее [1-3].

Для определения параметра μ проводилась серия экспериментов на дождевальной установке «Сток». Методика проведения исследований. 1. Моделируется дорожный смет с гранулометрическим составом частиц, приведенным в таблице 1; 2. Дорожный смет, при различных его нагрузках на 1 $м^2$, наносится на водонепроницаемую поверхность (асфальт, бетон) по методике, приведенной выше; 3. Осуществляется дождевание с имитацией различного типа дорог - задавалась различная ширина дорожного покрытия от оси до бордюра: $3,5$; $7,0$; $10,5$ и 14 метров. На экспериментальной установке задавались расходы воды, как дождевания, так и бокового смыва соответствующие слою дождевого стока равного $\Delta h = 0,5$ мм стока; 5. После проведения эксперимента площадка высушивалась, собирался оставшийся дорожный смет который взвешивался и изучался на гранулометрический состав частиц; 6. По полученным результатам рассчитывались единичные переходные вероятности μ при различных первоначальных нагрузках дорожного смета и при различной ширине проезжей части дороги.

По результатам проведенных исследований была получена следующая аппроксимированная зависимость:

$$\mu = 1 - \left\{ e^{-\frac{1}{m_j^0} \sqrt{\frac{1}{m_j^0}}} \right\}, \quad (10)$$

где m_j^0 - усредненная нагрузка частиц дорожного смета в пересчете на единичное сечение дорожного полотна, $г/м^2$.

Таблица 2. Сравнительный анализ физического моделирования процесса выноса частиц поверхностным дождевым стоком и данных натуральных исследований

Концентрация взвешенных веществ в стоке, мг/л						
№	T,	Натурные данные	Физическое моделирование	$h_{\text{стока}}$		
п/п	(минут)	C_N	C_N^*	C_{F1}	C_{F1}^*	(мм)
1	1	13200,0	4200,0	13620,0	4100,0	0,0960
2	21	5102,0	1186,5	5020,0	1200,0	1,2076
3	41	3820,5	603,0	3900,5	560,5	2,0376
4	61	3210,5	315,0	3020,5	271,5	2,6425
5	81	1920,5	152,5	1990,0	140,5	3,2136
6	101	1680,0	150,0	1540,5	90,5	3,6180
7	121	1505,5	102,0	1480,0	82,0	4,1043
8	141	1320,0	73,5	1300,0	48,5	4,6376
9	161	1220,0	46,5	1203,5	40,5	4,8376
10	181	820,5	20,0	818,0	18,5	5,0140
11	201	783,5	15,5	780,5	13,0	5,4176
12	221	583,0	11,0	560,5	10,5	5,9776
13	241	445,5	8,5	341,0	8,5	6,3076
14	261	382,5	8,0	333,0	7,5	6,9578

Значения m_j^0 определяются следующим образом:

$$m_j^0 = 2,2 \frac{m_0}{\Delta S}, \quad (11)$$

где 2,2 – коэффициент, показывающий накопление загрязнений в при бордюрных зонах (по обе стороны дороги) и на проезжей части дороги; ΔS – площадь единичного сечения дороги, м².

$$\Delta S = HL, \quad (12)$$

где H – ширина дорожного покрытия между бордюрами ограждениями, м; L – единичное сечение дороги принимается равным 1,0 метр.

Тогда уравнение (8) запишется следующим образом:

$$C_n(\Delta h) = \frac{m_1 \cdot \Delta \mu_n \cdot \Delta S}{\Delta h \Delta S} = \frac{1}{2} (m_1 \cdot \Delta \mu_n), \quad (13)$$

где Δh – единичный слой дождевого стока принимаемый равным 1/2 мм.

С целью проверки адекватности результатов физического моделирования и полученных математических моделей была проведена серия натуральных исследований по определению зависимостей выноса твердых частиц дорожного смета при выпадении дождевых осадках [1,2]. Надо отметить, что за два года исследований удалось изучить в полном объеме динамику выноса частиц только для

трех дождей. Это вызвано сложностью проведения натуральных исследований: дожди выпадали в самые не благоприятные периоды суток, многие носили залповый кратковременный характер, уборка дорожных покрытий вносила неопределенность в нагрузках дорожного смета и многие другое. Именно данные соображения и послужили основанием для разработки и изготовления экспериментальной дождеваль- ной установки «Сток».

Натурные исследования по изучению выноса частиц дорожного смета в процессе выпадения дождевых осадков.

Методика проведения натуральных исследований:

1 – выбирался участок дороги с четко выраженными границами водосбора;

2 – производился регулярный мониторинг нагрузок дорожного смета на выбранном участке водосбора;

3 – выбирался ливневой колодец, через который происходит отведение образующегося на изучаемом водосборе поверхностного стока в ливневую канализацию;

4 – в предполагаемый период выпадения дождевых осадков выбран- ные участки дороги не подвергались уборке, что согласовывалось с соответ-

ствующими городскими службами;

5 – в выбранном ливневом колодце под решеткой устанавлива- лась крепёжная рама пробоотбор- ника;

6 – пробоотборник представляет собой емкость прямоугольной формы, разбитую на четыре секции по 5,0 л каждая; общий объем отбираемого стока 20 л; каждая секция снабжена подвижной крышкой с пенопластовым поплавком и резиновыми проклад- ками, что позволяет изолировать ото- бранную пробу от последующих пор- ций дождевого стока; в нижней части каждой секции расположен патру- бок слива отобранной пробы стока с запорной крышкой;

7 – в момент начала дождя уста- новленные пробоотборники улав- ливают первые порции стока в дальнейшем во время выпадения осадков регулярно производится выемка заполненных пробоотборни- ков и установка новых, при этом каж- дый раз отмечалось время установки;

8 – в дальнейшем отобранные пробы изучались на содержание взвешенных веществ, в том числе и на содержание взвеси с размерами частиц менее 100 мкм и на присут- ствие нефтепродуктов, органики и ионов тяжелых металлов;

Таблица 3. Сравнительный анализ результатов математического и физического моделирования выноса частиц дорожного смета дождевым поверхностным стоком

Концентрация взвешенных веществ в стоке, мг/л					
№	Физическое моделирование	Математическое моделирование	$h_{\text{стока}}$		
п/п	C_{F2}	C_{F2}^{**}	C_M	C_M^{**}	(мм)
1	8015,0	2390,0	7868,5	2434,0	0,5
2	5845,0	1470,5	6278,1	1447,1	1,0
3	5010,0	806,5	4954,4	855,1	1,5
4	3909,5	560,0	3933,2	508,3	2,0
5	3118,0	323,0	3101,2	299,0	2,5
6	2502,0	201,0	2420,4	179,6	3,0
7	2005,0	132,0	1928,8	107,6	3,5
8	1570,0	63,0	1550,6	59,8	4,0
9	1203,0	41,0	1210,2	35,8	4,5
10	1008,0	23,0	945,5	17,9	5,0
11	761,0	16,0	756,4	11,9	5,5
12	561,0	10,5	567,3	5,9	6,0
13	508,0	6,5	491,6	2,3	6,5

9 – по результатам записей автоматического дождемера – плевниографа П-2 и времени начала дождя и времени установки пробоотборников в процессе дождя расшифровывались моменты отбора проб относительно слоя выпавших осадков.

В виде иллюстративного примера приведем один из изученных дождей. Условия проведения натурных исследований: Украина, г. Харьков, ул. Космическая: пробоотборник устанавливался в ливневом колодце обслуживавшим водосбор площадью 651 м²; расстояние до предыдущего колодца 62 м; ширина дорожного покрытия 21 м; бордюрное ограждение не позволяет попадать стоку с тротуаров на проезжую часть дороги; род покрытия – асфальт; состояние дорожного покрытия – хорошее; периодичность отбора проб – 1 раз в 20 минут; нагрузка дорожного смета 198,6 г/м² при бордюрной зоны (проба отобрана за 40 минут до начала дождя); гранулометрический состав частиц близок к приведенному в таблице 1; дождь относится к первому типу; слой выпавших осадков – 12,6 мм; продолжительность дождя 265 минут; средняя интенсивность дождя 0,0285 мм/минута; слой дождевого стока составил 7,56 мм (коэффициент стока принимался равным $\phi = 0,6$) [2].

Анализ физического и математического моделирования процесса выноса дорожного смета дождевым стоком

Для оценки адекватности полученных при физическом моделировании данных на установке «Сток» проводились эксперименты имитирующие реально полученные зависимости. Методика физического моделирования была описана выше при этом нагрузка дорожного смета составляла 198,6 г/м² (гранулометрический состав приведен в таблице 1), тип дождя и его характеристики во времени задавались по записи плевниографа. Сравнительные результаты помещены в таблице 2.

Где C_{N_i} , C_{F1} – концентрации взвешенных веществ в дождевом поверхностном стоке, данные натурных исследований и результаты эксперимента на установке «Сток», мг/л; C_{N_i} , C_{F1} – концентрации взвешенных веществ с размерами частиц менее 100 мкм в дождевом стоке, натурные и экспериментальные данные.

Оценка точности результатов физического имитационного моделирования процесса выноса загрязнений дождевым стоком проводилась с использованием методики [8].

$$\sigma_{fn} = \sqrt{\sum \frac{(C_{Nn} - C_{F1n})^2}{(n-1)}}, \quad (14)$$

где: C_{Nn} – данные натурных исследований, мг/л; C_{F1n} – данные физического моделирования, мг/л.

При переходе к относительным единицам погрешность полученных данных физического моделирования составляет: для изменения общей концентрации взвешенных веществ в дождевом стоке $\sigma_f = 1,18\%$; для изменения концентрации частиц с размерами менее 100 мкм $\sigma_{f < 100 \text{ мкм}} = 1,25\%$.

Проведем сравнительный анализ прогнозных зависимостей, полученных по формуле (13) с результатами физического моделирования приведенных в таблице 2. Естественно взяв данные по изменению концентраций взвешенных веществ с разбиением на одношаговые интервалы стока – 0,5 п мм стока, где $n = 1, 2, 3, \dots, 13$ (6,5 мм стока). Параметры, входящие в формулу (13) определялись по следующей процедуре: $m_0 = 198,6 \text{ г/м}^2$ при бордюрной зоны, ширина проезжей части дороги – 21 м; $m = 20,8 \text{ г}$, определяется по формуле (11); $\mu = 0,79$ определяется по формуле (10); $m_{< 100 \text{ мкм}}^* = 3,29 \text{ г}$ определяется по формуле (11); $\mu_{< 100 \text{ мкм}}^* = 0,593$ определяется по формуле (10). В таблице 3 помещены результаты физического и математического моделирования.

Где C_M – прогнозные значения изменения концентрации взвешенных веществ в дождевом стоке, мг/л; C_M^{**} –

прогнозное изменение концентрации взвешенных веществ с размерами частиц менее 100 мкм в дождевом стоке, мг/л.

Оценка погрешности результатов математического моделирования проводилась по формуле (14). Погрешность составляет: при прогнозе изменения общей концентрации взвешенных веществ в стоке $\sigma_m = 0,39\%$; при прогнозе изменения концентрации взвешенных частиц с размерами менее 100 мкм $\sigma_{m < 100 \text{ мкм}} = 0,49\%$.

Погрешности между прогнозными данными математического моделирования и результатами натурных исследований определяются по формуле

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{fm}^2 + \sigma_{mn}^2}, \quad (15)$$

и составляют: $\sigma_m = 1,24\%$ – для всего спектра взвешенных веществ, содержащихся в дождевом стоке и $\sigma_{m < 100 \text{ мкм}} = 1,31\%$ – для частиц с размерами менее 100 мкм.

Надо отметить, что для остальных двух изученных в процессе проведения натурных исследований дождей погрешности между реальными данными и результатами математического моделирования имеют значения близкие к приведенным выше.

При необходимости информации об изменении концентраций нефтепродуктов, органики, ионов тяжелых металлов и других ингредиентов в поверхностном дождевом стоке во времени (в зависимости от слоя выпавших осадков) в формулу (13) вносится коэффициент: η , мг/г-содержание загрязняющих веществ, сорбированных на частицах с размерами менее 100 мкм.

Очень важным является вопрос: какие площади водосборов можно имитировать на установке «Сток», а значит и моделировать с помощью полученных математических моделей?

Максимальная площадь водосбора поверхностный дождевой сток с которого был изучен в течении полного периода выпадения дождевых осадков (г. Харьков, улица Новгородская – в связи с проведением ремонтных работ расстояние между рабочими ливневыми колодцами составляло 620 м), составляла 0,868 га [3]. При моделировании

дождя на установке «Сток» и при математическом прогнозе погрешности составили: $\sigma_f = 1,18\%$; $\sigma_{f < 100 \text{ мкм}} = 1,25\%$ (физическое моделирование), для математического прогноза $\sigma_m = 1,81\%$; $\sigma_{m < 100 \text{ мкм}} = 2,43\%$. Натурные исследования, проводившиеся в г. Ялта [3] показали, что при площадях водосбора 1,6 га и 1,92 га погрешность математической модели (13) возрастает в 3,6–5,1 раза. Следовательно, физическое моделирование и математический прогноз проводимый по формуле (13) возможны только при описании процесса выноса дорожного смета дождевым поверхностным стоком с водосборов площадью не более 1 га. Для практических целей этого вполне достаточно, так как ливневые колодцы обслуживают водосборы со средней площадью 0,2 га.

Заключение

В представленной работе на основании проведенных натурных исследований и физического моделирования процесса выноса частиц дорожного смета дождевым поверхностным стоком на установке «Сток» разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать процесс изменения концентраций загрязняющих веществ в зависимости от слоя выпавших осадков. Полученные результаты исследований могут найти применение при разработке новых технологий отведения и очистки поверхностного стока и в решении задач эколого-экономического характера. Например, для оценки влияния поверхностного стока на качество воды рекреационных объектов, водных объектов служащих нерестилищами и использующихся для сельскохозяйственного назначения и так далее [9,10].

Литература

1. Хват В.М., Московкин В.М., Медведев В.С., Мануйлов М.Б., Шевченко Л.П., Роненко О.П., Колова И.П. Разработать и внедрить технологический процесс отведения и очистки поверхностного стока с

застроенных территорий (промежуточный) // Отчёт о научно-исследовательской работе (НИР): ВНИИВО, № государственной регистрации 01.870084. – Харьков. – 1988. – 115 с.

2. Хват В.М., Медведев В.С., Мануйлов М.Б., Шевченко Л.П., Роненко О.П., Колова И.П. Разработать и внедрить технологический процесс отведения и очистки поверхностного стока с застроенных территорий (заключительный) // Отчёт о научно-исследовательской работе (НИР): ВНИИВО, № гос. Регистрации 01.870084. – Харьков. – 1990. – 123 с.

3. Московкин В.М., Мануйлов М.Б., Мендыгулов Ю.Д., Морозов С.В., Скрипкина С.В. Разработка и создание моделей эколого-экономического прогноза (методологические аспекты проведения экологического мониторинга и экологической экспертизы) // Отчёт о научно-исследовательской работе (НИР): Ялтинский отдел Крымского филиала СНИЦ АН СССР, № государственной регистрации 03.890081. – Сочи. – 1990. – 106 с.

4. Московкин В.М., Гахов В.Ф. К методике расчета кинетической энергии осадков // Почвоведение. -№2-1981 – с.150-152.

5. Бруча-Рид А.Т. Элементы теории Марковских процессов и их приложения. // М.: Наука. – 1986. – 305 с.

6. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. // М.: Наука. – 1970. – 271 с.

7. Калицун В.И. Водоотводящие системы и сооружения. // М.: Стройиздат. – 1985. – 335 с.

8. Громыко Г.Л. Статистика. // М.: Издательство МГУ. – 1976. – 333 с.

9. Мануйлов М.Б., Московкин В.М. Влияние поверхностного стока (дождевых и талых вод) на экологическую и техногенную ситуацию в городах // Вода и экология. Проблемы и решения. - №2 (66). – 2016. – С. 58-65.

10. Мануйлов М.Б., Московкин В.М. Влияние поверхностного стока (дождевых и талых вод) на экологическую и техногенную ситуацию в городах (Окончание. Начало в №2-2016) // Вода и экология. Проблемы и решения. - № 4 (68). – 2016. – С. 48-74.

Девятая Межотраслевая конференция «ВОДА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ-2018»

30–31 октября 2018 г, Москва, ГК «ИЗМАЙЛОВО»

Девятый год подряд проводится межотраслевая конференция, посвященная демонстрации эффективных решений и оборудования для систем водоподготовки, водоочистки и водоснабжения промышленных предприятий.

Организатор конференции:

ООО «ИНТЕХЭКО».

Информационные партнеры:

ведущие СМИ России и стран СНГ.



Открыл конференцию председатель оргкомитета **А.В. Ермаков**, директор по маркетингу ООО «ИНТЕХЭКО».

Состав участников: представители от предприятий металлургии, энергетики, химической, нефтегазовой и других отраслей промышленности, городских водоканалов, ведущих разработчиков и производителей водоочистного оборудования, контрольно-измерительных приборов и материалов, научных и проектных институтов, инжиниринговых и сервисных компаний России и зарубежных стран.

Вниманию делегатов конференции были представлены 28 докладов на самые актуальные темы:

- Наилучшие доступные технологии очистки сточных вод АО «Мосводоканал».
- Вечные проблемы при эксплуатации водооборотных циклов и новые подходы их решений. ООО «Миррико менеджмент».
- Оборудование для водоподготовки и очистки стоков. АО «СвердНИИХиммаш».
- Опыт внедрения мембранной доочистки на Новокуйбышевском НПЗ. ООО ТД «ЭКОЛОС».
- Технические решения АУМА для водной отрасли. ООО «ПРИВОДЫ АУМА».
- Измерительные приборы для промышленного контроля воды. ООО «Хах Ланге».
- Решения компании КРОНЕ по измерению расхода. ООО «КРОНЕ Инжиниринг».
- Аналитические приборы для определения качества воды. ЗАО «НПП «Автоматика».

- Очистка воды для лаборатории. ООО «Компания СИМАС ПЕТРОЛЕУМ».
 - Инновационные решения в насосостроении. ООО «Грундфос».
 - Автоматические регуляторы давления и расхода. BERMAD Ltd. (Израиль).
 - Адсорбционные фильтры ПьюрАэр. Область применения. ООО «ОКС Групп».
 - Биотестирование вод. Современный подход. ООО «Европолитест».
 - Аварийные души и фонтаны для защиты персонала. ООО «ТИ-СИСТЕМС».
 - Автоматические самопромывные фильтры для систем водоочистки. ООО «Стронг-Фильтр».
- и другие темы – программу и сборник докладов см. на сайте www.intecheco.ru

В дополнение к докладам, в холлах конференц-зала проводилась выставка по технологиям и оборудованию для систем водоочистки и водоподготовки

Ознакомиться с фотоальбомом, видеороликами, условиями участия и дополнительной информацией можно на сайте www.intecheco.ru

Следующая – юбилейная Десятая конференция «ВОДА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ-2019» состоится 29-30 октября 2019 г. в Москве в гостинице «ИЗМАЙЛОВО». см. www.intecheco.ru

На выставке

Оргкомитет конференций:

Ермаков Алексей Владимирович,
тел.: +7 (905) 567-8767
факс: +7 (495) 737-7079
admin@intecheco.ru
www.intecheco.ru



В конференции приняли участие более 130 делегатов, в том числе:

- АО «Ачинский НПЗ ВНК».
 - «Донской ГОК»-АО «ТНК Казхром».
 - АО «Ионообменные Технологии».
 - ОАО «Красцветмет».
 - ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».
 - ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».
 - ПАО «Михайловский ГОК».
 - АО «Мосводоканал».
 - ГОУП «Мурманскводоканал».
 - ПАО «МОЭК».
 - ПАО «Нижекамскнефтехим».
 - АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР».
 - ООО «РН-Туапсинский НПЗ».
 - ООО «ТД «Курганхиммаш».
 - ПАО «Тулачермет».
- и другие компании, см. www.intecheco.ru

Доклады и дискуссия

