

УДК 502/504:556.16

И. В. ПРОШЛЯКОВ, Г. Х. ИСМАЙЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

**К ТЕОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО
ДОЖДЕВОГО СКЛОНОВОГО СТОКА**

Цель работы – совершенствование теоретических представлений о процессах формирования дождевого стока со склонов и разработка на этой основе инженерных методов определения расчетных характеристик максимального стока при создании противозерозионных гидротехнических сооружений на склонах и в первичной русловой сети. Формирование склонового стока рассматривается как результат детерминированно-стохастических процессов выпадения дождевых осадков, инфильтрации части дождевых осадков в почву и стекания по склону непитавшейся воды. Представлена методика определения статистических характеристик потенциально образующих сток дождей (со слоем более 10-ти мм), таких как суммарный слой, продолжительность выпадения, интенсивность за различные промежутки времени. Методика основана на имитационном моделировании нестационарного случайного процесса интенсивности выпадения дождей. Она реализуется с помощью фактических безразмерных реализаций нарастания слоя выпавших в течении дождя осадков, полученных по данным ближайших метеостанций. Сформулирована весьма правдоподобная качественная картина впитывания воды в почву и процесса водоотдачи склонов при поверхностном стокообразовании. Приведено аналитическое выражение инфильтрационной способности склона в период выпадения дождя, учитывающее начальное (перед дождем) увлажнение верхнего 10-см слоя почвы. Для вероятностной оценки начального увлажнения почвы предлагается двусторонне ограниченное нормальное распределение. Верхний и нижний пределы колебаний случайной величины начального увлажнения и другие параметры распределения (среднее и среднеквадратическое) определяются по водно-физическим свойствам почвы или по данным наблюдений за влажностью на метеостанциях рассматриваемого района. На основе модели кинематической волны и кривых распределений характеристик водоотдачи предложена методика определения обеспеченности максимальных расходов склонового стока, учитывающая оценку вероятности «действующей» длины склона в формировании рассматриваемого максимума. Сопоставление модулей максимальных расходов, полученных по предлагаемой схеме их определения с нормативными максимумами, показало, что последние завышены на 20...40 % при обеспеченности 5 % и 40 % соответственно. При обеспеченности 1 % они практически совпадают.

Максимальный дождевой сток, влажность почвы, статистические характеристики стокообразующих осадков, интенсивность дождя, впитывание, склоновый сток.

Введение. Проектирование гидротехнических и других инженерных сооружений на склонах и в первичной гидрографической сети требует ответа на вопрос о расчетных значениях характеристик склонового стока, в частности, о максимальных расходах. При этом согласно [1] под расчетным расходом воды понимается расход воды заданной вероятности превышения (обеспеченности), принимаемый в качестве исходного значения для определения размеров проектируемого сооружения. Поэтому гидрологический расчет характеристик стока, имеющих

вероятностную природу колебаний во времени, приобретает законченный вид, когда каждому возможному значению определяемой, характеристики будет поставлена в соответствие ежегодная вероятность превышения этого значения.

Повторяемость максимальных расходов дождевого склонового стока в большинстве существующих инженерных методов расчета, в том числе нормативных [1], принимается равной повторяемости максимальной интенсивности осадков за интервал времени, равный времени склонового добега. В зависимости от

положения этого интервала внутри периода выпадения дождя, а также в зависимости от начального увлажнения почвы, потери стока, учитываемые в существующих формулах коэффициентом стока («сборным коэффициентом стока») будут не постоянными, в общем случае представляя случайную величину с определенным законом распределения. Поэтому использование на практике максимальной интенсивности осадков различной повторяемости приводит к утрате представлений об обеспеченности вычисленных максимальных расходов. Другим допущением при оценке обеспеченности максимальных дождевых расходов является предположение, что в формировании расчетного максимального расхода всегда (с вероятностью равной единице) участвует вся площадь водосбора (длина склона), или же ее определенная постоянная часть, учитываемая весьма условно с помощью коэффициентов «редукции» стока или осадков. Такое допущение нуждается в статистическом обосновании.

Общая постановка. Генетический подход к определению параметров склонового стока предполагает определение расчетных характеристик случайного процесса водоотдачи склонов, таких как средняя интенсивность за конкретные промежутки времени, продолжительность, суммарный слой и др. Под интенсивностью водоотдачи понимается разность между интенсивностью дождя i и интенсивностью суммарных потерь K (на впитывание и поверхностное задержание) при образовании склонового стока, то есть $a = i - K$. Случайность процесса водоотдачи склонов прямо связана со случайным характером выпадения дождевых осадков во времени. Однако это не исключает наличия детерминированных взаимосвязей между его отдельными составляющими - интенсивностью осадков и интенсивностью потерь, несмотря на их вероятностную природу. Это диктует необходимость рассматривать водоотдачу склонов как детерминированно-стохастический процесс [2].

При подходе к изучению и расчетам стокообразующих процессов следует учитывать качественное их своеобразие в различных физико-географических условиях. В настоящей работе рассматривается классический случай формирования стока,

вызванного превышением интенсивности дождя над интенсивностью потерь и происходящего поверхностным путем. Этот вид стока («подвешенный» [3]) широко распространен на слабопроницаемых поверхностях с глубоким залеганием уровня грунтовых вод, в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения с повышенной эрозионной деятельностью дождевых вод.

Материалы и методы исследований. На основании анализа экспериментальных данных по искусственному дождеванию была получена необходимая для расчета водоотдачи обобщенная модель интенсивности суммарных потерь при образовании поверхностного стока на склонах:

$$K = \begin{cases} i & \text{при } i < K_{mi}, \\ K_{mi} & \text{при } i \geq K_{mi}, \end{cases} \quad (1)$$

где K - интенсивность потерь, мм/мин; i - интенсивность дождя, мм/мин; K_{mi} - инфильтрационная способность (максимально возможная интенсивность потерь для данной интенсивности дождя).

Величина инфильтрационной способности конкретного вида стокообразующей поверхности в произвольный момент времени от начала дождя K_{mi} , входящая в (1), определяется по уравнению:

$$K_{mi} = K_0 \left(1 - e^{-\frac{i}{K_0}} \right) + a e^{-b\theta} / H_k^c, \quad (2)$$

где K_0 - коэффициент фильтрации при неограниченной интенсивности поступления осадков ($i = \infty$) мм/мин; θ - начальная влажность почвы, характеризующаяся запасом в верхнем 10-сантиметровом слое, мм; H_k - слой впитавшихся к моменту времени t осадков, мм; a, b, c - параметры, зависящие от генетического типа почвы, степени ее эродированности и характера сельскохозяйственного использования; e - основание натуральных логарифмов.

В уравнении (2) величина $K_0(1 - e^{-i/K_0})$ представляет собой предельный минимум впитывания, устанавливающийся при длительном течении процесса инфильтрации или при инфильтрации в исходно насыщенную почву, когда основную роль играют гравитационные силы. Фактор $(1 - e^{-i/K_0})$ отражает влияние интенсивности дождя на установившийся коэффициент фильтрации и по смыслу характеризует относительную величину инфильтрующей площади при капельном поступлении на увлажненный до состояния насыщения верхний слой почвы [4].

Второй член уравнения (2) учитывает уменьшение во времени инфильтрационной способности почвы

по мере ее насыщения вследствие уменьшения капиллярно-сорбционного потенциала, значение которого для данного типа поверхности косвенно характеризуется влажностью почвы θ и слоем впитавшихся к рассматриваемому моменту времени осадков H_k .

В свете выполненных полевых экспериментов, а также анализа теоретических моделей инфильтрации как главного элемента потерь стока, качественная картина процесса впитывания во время дождя представляется следующей. В начальный период дождя, после завершения в основном процесса перехвата осадков растительным покровом, очагами инфильтрации являются места падения капель на поверхность. В этих местах происходит мгновенное насыщение почвы и быстрое (до попадания в это же место следующей капли) поглощение и перераспределение влаги из-за громадных градиентов влажности в тонком поверхностном слое. Инфильтрационная способность в этот начальный момент чрезмерно велика и, как правило, превышает реальные значения интенсивности дождя; поэтому фактическая интенсивность впитывания ограничена и равна интенсивности дождя. Средняя влажность на поверхности при этом меньше влажности насыщения и тем больше, чем больше интенсивность дождя. До тех пор, пока влажность поверхности остается меньше насыщения, скорость впитывания определяется интенсивностью дождя $K = i$, и поверхностный сток возникнуть не может, то есть наблюдается фаза свободной инфильтрации.

Как только средняя влажность на поверхности становится равной влажности насыщения (по мере развития процесса или в результате увеличения интенсивности дождя), возникают условия для образования стока за счет превышения интенсивности дождя над инфильтрационной способностью, которая, в свою очередь, определяется градиентом влажности на поверхности, уменьшающимся по мере насыщения почвы.

При длительном течении процесса инфильтрации (или при выпадении дождя на сильно увлажненную почву) градиент влажности на поверхности становится бесконечно малым, основную роль играют не капиллярно-сорбционные, а гравитаци-

онные силы, вследствие чего процесс приобретает стационарный характер, определяемый соотношением интенсивности дождя и коэффициента влагопроводности верхнего насыщенного слоя почвы в соответствии с первым слагаемым в правой части уравнения (2).

Значения параметров K_0 , a , b , c в уравнении (2) для некоторых видов поверхностей склонов приведены в работе [2]. Модель интенсивности водоотдачи a , учитывая (1), имеет следующий вид:

$$a = \begin{cases} 0 & \text{при } i \leq K_{mi} \\ i - K_{mi} & \text{при } i \geq K_{mi} \end{cases} \quad (3)$$

Зная значение начальной влажности θ для определенного вида поверхности, а также динамику конкретного дождя, представленную в результате обработки плювиограммы последовательностью осредненных за малый интервал времени интенсивностей $\bar{i}_j (j = \overline{1, n})$ можно, используя выражения (1)–(3) получить гидрограф водоотдачи $\bar{a}_j (j = \overline{1, n})$. При этом все или часть значений \bar{a}_j могут иметь нулевые значения, то есть гидрограф водоотдачи в общем случае имеет разрывной характер, состоящий из r тактов. Располагая гидрографом водоотдачи, легко определить по нему такие элементы как слой и продолжительность l -го такта водоотдачи: H_{a1}^1 и T_{a1}^1 – суммарные значения продолжительности и слоя водоотдачи за время дождя; H_a и T_a ; максимальные за заданный интервал времени τ значения интенсивности водоотдачи $\bar{a}_{m\tau}$ и ряд других характеристик, представляющих интерес при расчетах стока.

Преобразование гидрографа водоотдачи в гидрограф стока (притока к сооружению) под влиянием бассейнового регулирования осуществляется с помощью простого оператора скользящего осреднения по максимальному времени бассейнового (склонового) добегания τ_m .

$$Q_j = \frac{1}{\tau_m} \sum_j^{j-\tau_m} Q_{aj}, \quad (4)$$

где Q_j и Q_{aj} – расчетные расходы стока и водоотдачи в j -ом интервале времени $Q_{aj} = \bar{a}_j F$; F – площадь водосбора.

Количественная оценка точности методик расчета слоев стока (водоотдачи) H_a и максимальных расходов воды за паводок Q_m , произведенная для 37 паводков на 3-х водотоках с помощью критерия

применимости и качества метода S_0/σ (где S_0 – средняя квадратическая ошибка расчета; σ – среднее квадратическое отклонение от нормы, позволяют считать методику хорошей; $S_0/\tau = 0,18...0,40$).

Описанная модель преобразования осадков в водоотдачу относится к классу детерминистических моделей, поскольку в ней условия, определяющие численных результат (начальная влажность почвы, продолжительности и динамика дождя), предполагаются заранее известными. Поскольку указанные условия имеют вероятностный смысл, наибольший практический интерес представляет получение статистических характеристик отдельных элементов случайного процесса водоотдачи.

Аналитическое описание нестационарного случайного процесса выпадения дождей $\tilde{i}(\tau)$ и преобразование его с помощью модели (1)–(3) в случайный процесс водоотдачи встречает серьезные затруднения. Поэтому предлагается численный подход, суть которого состоит в следующем.

Случайные факторы, определяющие динамику отдельных реализаций процесса водоотдачи, такие как начальная влажность почвы θ , слой H и продолжительность T дождя многократно моделируются методом Монте-Карло, исходя из совместной плотности распределения $\varphi(\theta, \mu, \nu)$ (где μ и ν – нормализованные значения величин H и T). При этом рассматриваются лишь «стокообразующие» дожди с $H \geq 10$ мм. В качестве нормализующих функций для H и T использованы следующие соотношения

$$\mu = \lg(H - a);$$

$$\nu = T^{1/3},$$

где a – параметр, который изменяется в пределах 7,0...8,5.

Величина θ имеет двусторонне ограниченный закон распределения с плотностью вероятностей

$$\varphi(\theta) = \begin{cases} \varphi_1(\theta) & \text{при } \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}, \\ C_1 \delta(\theta - \theta_{\min}) & \text{при } \theta = \theta_{\min}, \\ C_2 \delta(\theta - \theta_{\max}) & \text{при } \theta = \theta_{\max}, \\ 0 & \text{при } \theta > \theta_{\max} \text{ или } \theta < \theta_{\min}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\varphi_1(\theta)$ – плотность нормального распределения начальных влагозапасов в интервале $(-\infty; +\infty)$; δ – символ дельта-функции; C_1 и C_2 – параметры, характеризующие степень ограничения в точках $\theta = \theta_{\min}$ и $\theta = \theta_{\max}$,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\theta) d\theta = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \varphi_1(\theta) d\theta + C_1 + C_2 = 1.$$

Пределы колебания $\theta_{\min} = \theta_{\text{мр}}$, а $\theta_{\max} = (0,90...0,95)\theta_{\text{пв}}$ для необрабатываемых поверхностей и $\theta_{\max} = \theta_{\text{пв}}$ – для обрабатываемых (здесь $\theta_{\text{мр}}$, $\theta_{\text{пв}}$, $\theta_{\text{пв}}$ – соответственно запасы влаги в 10-см слое почвы при максимальной гигроскопичности, полной влагоемкости и наименьшей влагоемкости. По ориентировочным подсчетам степень усечения составляет примерно 0,5...3,0 %, то есть лишь это количество значений θ относится к предельным влагозапасам.

Сведения об H , T и θ могут быть получены по данным наблюдений на ближайших метеостанциях. При отсутствии данных наблюдений за влагозапасами накануне дождя с $H > 10$ мм, без больших погрешностей можно использовать (в условия глубокого залегания грунтовых вод) следующие соотношения для определения параметров $\bar{\theta}, \sigma_{\theta}$:

а) луговая поверхность (пастбища и сенокосы)

$$\bar{\theta} = 0,57\theta_{\text{пв}};$$

$$\sigma_{\theta} = 0,26\bar{\theta};$$

б) обрабатываемая поверхность под сельскохозяйственными культурами

$$\bar{\theta} = 0,50\theta_{\text{пв}};$$

$$\sigma_{\theta} = 0,23\bar{\theta}.$$

Результаты исследований. Динамика дождей описывается с помощью достаточно большого набора (равного числу зарегистрированных плювиографами данного района дождей с $H \geq 10$ мм) хранящихся в памяти ЭВМ безразмерных реализаций случайного процесса нарастания слоя дождя во времени:

$$H_t/H = f(t/T), \quad (6)$$

где H_t – слой осадков за время $t \leq T$; H – суммарный слой дождя.

Кривые (6), являясь моделями реально наблюдаемых гистограмм, автоматически учитывают как нестационарность процесса $\tilde{i}(\tau)$, так и стохастическую связь между значениями интенсивности дождя в отдельных интервалах времени.

После генерирования случайных величин H , T и θ случайным образом производится выбор реализации (6) (из группы, соответствующей разыгранным значениям H , T , так как между H и T имеется стохастическая связь) и ее пересчет в последовательность $i_j(t)$, $j = \overline{1, n}$. Процедура перехода от $i_j(t)$ к \bar{a}_j осуществляется с помощью модели (2), (3).

Описанная имитационная схема

моделирования дает возможность получить достаточно большое число реализаций случайного процесса водоотдачи $\tilde{a}(t)$. В результате статистической обработки этих реализаций получают вероятностные характеристики отдельных элементов процесса водоотдачи, используемые при расчетах склонового стока.

Решение одномерной гидравлической модели кинематической волны с сосредоточенными параметрами [5], приводит к различным функциональным выражениям для определения максимального расхода воды Q_{mL}^1 с единицы ширины склона на расстоянии L от водораздела, вызванного отдельным стокообразующим дождем:

$$Q_{mL}^1 = \begin{cases} k\varepsilon(\bar{a}_m)_\tau L \text{ при } l_{T_a} \geq L \text{ или } \tau \leq T_a \\ k c_1 H_a^{n+1} \text{ при } l_{T_a} < L \text{ или } \tau > T_a \end{cases}, \quad (7)$$

где k – коэффициент пропорциональности; ε – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность и несимметричность гидрографа водоотдачи $\tilde{a}(t)$, $(\bar{a}_m)_\tau$ – максимальная интенсивность водоотдачи, осредненная за время τ добега волн стока; H_a – слой водоотдачи за общую продолжительность водоотдачи T_a ; n и $c_1 = m_0 I^u$ – параметры уравнения скорости $v = m_0 I^u y^n$ (y – глубина склонового потока); l_{T_a} – путь добега волн стока, определяемый при переменной интенсивности водоотдачи по уравнению

$$l_{T_a} = (n + 1) c_1 \int_0^{T_a} \int_0^\tau a(t) dt. \quad (8)$$

При постоянной во времени интенсивности водоотдачи путь добега волн равен

$$l_{(T_a)}^* = c_1 a^n T_a^{(n+1)} = c_1 H_a^n T_a^n = \varepsilon l_{(T_a)}. \quad (9)$$

Для решения практических задач значения параметров n и u в формуле скорости склонового стекания $v = m_0 I^u y^n = c_1 y^n$ приняты в соответствии с СП 33-101-2003 [1] по Г. А. Алексею: $n = 1$ и $u = 0,5$.

Выполненные по результатам моделирования гидрографов водоотдачи расчеты величины $\varepsilon = l_{(T_a)}^*/l_{T_a}$, являющейся случайной, показали, что с 95 % вероятностью и имеет равномерное распределение в интервале 0,8...1,2, то есть без больших систематических погрешностей в практических расчетах можно принять $\varepsilon = 1$. Это допущение значительно упрощает определение Q_{mL}^1 по модели (1), так как позволяет принимать осредненные значения интенсивности водоотдачи за интервалы времени τ или T_a . Согласно (7) в зависимости от соотношения l_{T_a} и L (или

τ и T_a) максимальный расход на склоне длиной L , вызванный конкретным стокообразующим дождем со слоем $H \geq 10$ мм, определяется по различным функциональным выражениям. При $l_{T_a} \geq L$ наблюдается полный сток (по терминологии А. Н. Бефани), когда в формировании максимального расхода участвует вся длина склона (весь водосбор). В противном случае при $l_{T_a} < L$, имеет место неполный сток и в формировании максимального расхода участвует не вся длина склона (весь водосбор), а только его часть, равная пути добега волн l_{T_a} за время T_a .

Эти обстоятельства следует иметь в виду при оценке обеспеченности, так как в общем $(\bar{a}_m)_\tau$ случае она определяется не только вероятностными характеристиками водоотдачи $(\bar{a}_m)_\tau$ и H_a , но также и вероятностью возникновения самого вида стока (полного или неполного), поскольку величина l_{T_a} , являясь функцией произведения случайных величин $H_a T_a = z_1$, сама является случайной. Вероятность полного стока определяется вероятностью осуществления события $l_{T_a} \geq L$, то есть $P(l_{T_a} \geq L) = P(L) = q$, (10) где $P(L)$ – обеспеченность значения $l_{T_a} = L$ среди всей совокупности гидрографов водоотдачи.

Практически для вычисления q необходимо иметь кривую обеспеченности величины $z_1 = H_a T_a$, получаемую по результатам моделирования водоотдачи, и по ней для $z_1 = L/c_1$ (L/c_1 для конкретного водосбора является постоянной величиной) определить искомую вероятность полного стока. Поскольку полный сток и неполный образуют полную группу несовместных событий, вероятность неполного стока (включая и нулевой) равна $1 - q$. Применяя формулу полной вероятности к вычислению обеспеченности $P(Q_{mL}^1)$ (среди всей совокупности максимумов) конкретного рассматриваемого значения Q_{mL}^1 , определяемого выражением (1) при $\varepsilon = 1$ будет иметь вид:

$$P(Q_{mL}^1) = qP\left[Q_{mL}^1 \left| Z_1 \geq \frac{L}{c_1} \right.\right] + (1-q)P\left[Q_{mL}^1 \left| Z_1 < \frac{L}{c_1} \right.\right] = \\ = qP\left[(\bar{a}_m)_\tau = \frac{Q_{mL}^1}{kL} \left| Z_1 \geq \frac{L}{c_1} \right.\right] + (1-q)P\left[H_a^n = \frac{Q_{mL}^1}{kc_1} \left| Z_1 < \frac{L}{c_1} \right.\right]. \quad (11)$$

Время добега (наступления установившегося режима стекания) τ при известном $(\bar{a}_m)_\tau = Q_{mL}^1/kL$ определяется по формуле (мин.)

$$\tau = L^{1/2} / (m_c I^{1/4} (\bar{a}_m)_\tau^{1/2}), \quad (12)$$

где L в м, I в %, $(\bar{a}_m)_\tau$ в мм/мин.

Значение параметра шероховатости склонов $m_c = m_0^{1/2}$, колеблющиеся для различных видов поверхности (сельскохозяйственных угодий) в пределах 0,2...0,3, приведены в СПЗЗ-101-2003 [1]. При принятых размерностях τ , L , I , H_a , $(\bar{a}_m)_\tau$ и Q_{mL}^1 в л/(с м) значение коэффициента пропорциональности k в (7) и (11) равно 0,0167.

Для вычисления $P(Q_{mL}^1)$ на практике необходимо иметь помимо кривой $P(z_1)$, определяющей вероятность возникновения полного стока на данном водосборе, также и серии условных функций (кривых) обеспеченности $P[(a_m)_\tau / Z_1 \geq \text{const}]$ и $P[H_a^2 / Z_1 < \text{const}]$ для различных видов поверхности склонов в рассматриваемом районе.

При проектировании гидротехнических сооружений в настоящее время в качестве нормативного критерия служит вероятность ежегодного превышения P_r наибольшего за годовой отрезок времени значения рассматриваемой гидрологической характеристики. В рассматриваемом случае это $P_r(Q_{mL}^1)$. При переходе от обеспеченности среди всей совокупности значений Q_{mL}^1 к ежегодной вероятности превышения годовых максимумов Q_{mL}^1 , можно воспользоваться подходом, изложенном в работе Ю. Б. Виноградова [4] для определения обеспеченности годовых суточных максимумов по всей совокупности суточных осадков. Кроме того, следует учитывать, что рассматриваемое конкретное значение Q_{mL}^1 в течение года может быть превышено как при полном стоке, так и при неполном стоке. Поэтому на основе теоремы сложения вероятностей для двух совместных событий с учетом выражения (11) будем иметь

$$P(Q_{mL}^1 \geq Q_{mL}^1) = P_r(Q_{mL}^1) = P_{\text{гп}}(Q_{mL}^1) + P_{\text{гн}}(Q_{mL}^1) - P_{\text{гп}}(Q_{mL}^1)P_{\text{гн}}(Q_{mL}^1), \quad (13)$$

где

$$P_{\text{гп}}(Q_{mL}^1) = 1 - \left\{ 1 - qP \left[(\bar{a}_m)_\tau = \frac{Q_{mL}^1}{kL} \middle| Z_1 > \frac{L}{c_1} \right] \right\}^m -$$

ежегодная вероятность превышения $Q_{mL}^1 = Q_{mL}^1$ среди случаев полного стока;

$$P_{\text{гн}}(Q_{mL}^1) = 1 - \left\{ 1 - (1-q)P \left[H_a^2 = \frac{Q_{mL}^1}{kc_1} \middle| z_1 < \frac{L}{c_1} \right] \right\}^m -$$

ежегодная вероятность превышения $Q_{mL}^1 = Q_{mL}^1$ среди случаев неполного стока; m – среднее годовое число гидрографов водоотдачи, получаемое

по результатам имитационного моделирования.

Выполненные на основе выражения (13) расчеты показали, что годовые максимумы Q_{mL}^1 при $P_r \leq 10\%$ на коротких склонах $L < 250$ м и при уклонах $I > 250\%$ (14) образуется исключительно при полном стоке, то есть за счет наибольшей ежегодной интенсивности водоотдачи за время склонового добегания $(\bar{a}_m)_\tau$. Это обстоятельство существенно упрощает расчеты максимальных расходов для небольших эрозионно опасных водосборов. В качестве расчетной для этих водосборов может служить известное выражение

$$Q = 0,0167(\bar{a}_m)_\tau \bar{B}L, \quad (14)$$

где Q – максимальный расход (л/с) ежегодной вероятностью превышения P_r ; $(\bar{a}_m)_\tau$ – максимальная интенсивность водоотдачи, мм/мин за время добегания τ (мин.) обеспеченностью P_r ; \bar{B} – средняя ширина склонов, м.

Расчеты модулей максимальных дождевых расходов различной обеспеченности P_r для склонов, не охватываемых формулой (8), показали, что получаемые по действующим нормам [1] результаты завышены при $P_r \geq 5\%$ на 10...62% для различных видов поверхности, из-за неучета реальной («действующей») длины склона, участвующей в формировании расчетного максимума.

Полученные моделированием кривые обеспеченности $P_r(H_{am})$ решают вопрос и о расчете максимального годового объема дождевого стока W_m (м³) обеспеченностью P_r

$$W_m = 10^{-2} H_{am} F,$$

где H_{am} – максимальный годовой слой водоотдачи обеспеченностью P_r , мм; F – площадь водосбора, га.

Выводы

В настоящей работе рассматривается классический случай формирования стока, вызванного превышением интенсивности дождя над интенсивностью потерь и происходящего поверхностным путем. На основании анализа экспериментальных данных по искусственному дождеванию была получена необходимая для расчета водоотдачи обобщенная модель интенсивности суммарных потерь при образовании поверхностного стока на склонах речного водосбора.

Библиографический список

1. Определение основных расчетных

гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 74с.

2. Прошляков И. В. Имитационная модель водоотдачи склонов для расчета поверхностного дождевого стока и водной эрозии // Эрозия почв, селевые потоки и методы борьбы с ними: сб. науч. трудов. Тбилиси, ГрузНИИГиМ. – Тбилиси.: ГрузНИИГиМ, 1985. – С. 134–146.

3. Бефани А. Н. Теория формирования дождевых паводков и методы их расчета / в кн.: Международный симпозиум по паводкам и их расчетам, т. I. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. – С. 273–294.

4. Виноградов Ю. Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана // Труды КазНИГМИ, вып. 28. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 262с.

5. Бефани А. Н. Основы теории ливневого стока. / Труды Одесского

гидромет. института. Вып. 4, ч. 1. – Одесса.: ОГМИ, 1949. – С. 39–175.

Материал поступил в редакцию 12.01.2016.

Сведения об авторах

Прошляков Игорь Валентинович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; тел. 8(499) 976-17-45; e-mail:iprosh@mail.ru

Исмайлов Габил Худушоглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; тел. 8(499) 976-23-68; e-mail: gabil-1937@mail.ru

I. V. PROSHLYAKOV, G. KH. ISMAIYLOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

CONCERNING THE THEORY OF FORMATION OF THE MAXIMAL RAIN SLOPE RUNOFF

The purpose of the work is the improvement of theoretical ideas about the formation of rain runoff from slopes and development on this basis of engineering methods for the determination of design characteristics of the maximum runoff when creating anti-erosion hydro technical structures on the slopes and in the primary channel network. Formation of slope runoff is considered as a result of deterministic-stochastic processes of rain events, infiltration of a part of the rainfall into the soil and runoff of the non-absorbed water along the slope. The technique of determining the statistical characteristics of potentially forming a drain of the rains (with a layer of more than 10 mm), such as the total layer, duration of falling, the intensity for various time periods. The method is based on the simulation of a non-stationary random process of the intensity of rainfall. It is implemented using actual realizations of dimensionless realizations of the layer increase of precipitation fallen during rain precipitation obtained from the data of the nearby weather stations. There is formulated a very probable qualitative picture of water absorption in the soil and process of water yield of slopes under surface runoff formation. The analytical expression of the slope infiltration capacity is given during the period of rain falling taking into account the initial (before the rain) moistening of the upper 10-cm soil layer. For the probabilistic assessment of the initial soil moisture content there is proposed a bilateral limited normal distribution. The upper and lower limits of fluctuations of a random variable of the initial moistening and other parameters of the distribution (mean and RMS) are defined by water-physical properties of the soil or according to the observations of humidity at the regional meteorological stations. On the basis of the model of the kinematic waves and curves of the distributions of the characteristics of the water yield there is proposed a technique of determination of sufficiency of maximum discharges of slope flow taking into account the assessment of the probability of the "current" slope length in the formation of the considered maximum. Comparison of modules maximum discharges obtained by the proposed scheme of their determination with the normative maxima showed that the latter are overrated by 20...40 % under provision of 5 % and 40 % respectively. At the provision of 1 % they are practically the same.

The maximum rainwater runoff, soil moisture, statistical characteristics of streamflow formation precipitation, rain intensity, absorption, slope runoff.

References

1. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh hydrologicheskikh harakteristik. SP 33-101-2003. – M.: FGUP TSPP, 2004. – 74с.
2. Proshlyakov I.V. Imitatsionnaya model vodootdachi sklonov dlya rascheta poverhstnogo dozhddevogo stoka I vodnoj erozii // Eroziya pochv, selevyje potoki i metody borjby s nimi: sb. Nauch. Trudov. Tbilisi, GruzNIIGiM. – Tbilisi: GruzNIIGiM, 1985. – S. 134–146.
3. Befani A.N. Teoriya formirovaniya dozhddevykh pavodkov I metody ih rascheta / v kn.: Mezhdunarodny symposium po pavodkam I ih raschetam, t. I. – M.: Izd-vo literatury po stroiteljstvu, 1969. – S. 273–294.
4. Vinogradov Yu. B. Voprosy gidrologii dozdevyh pavodkov na malyh vodosborah Srednej Azii I Yuzhnogo Kazahstana // Trudy KazNIGMI, vyp. 28. – L.: Hydrometeoizdat, 1967. – 262s.
5. Befani A.N. Osnovy teorii livneвого stoka / Trudy Odesskogo hydromet. Institute. Vyp. 4, ch.1. – Odessa: OGMI, 1949. – S. 39–175.

Received on 12.01.2016.

Information about the authors

Proshlyakov Igor Valentinovich, candidate of technical sciences, professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C. A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova.19; tel. 8(499) 976-17-45; e-mail:iprosh@mail.ru

Ismailylov Gabil Khudushogly, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C. A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova.19; tel. 8(499) 976-23-68; e-mail:gabil-1937@mail.ru

УДК 502/504:624.131:627.8

В. И. СМЕТАНИН, В. Н. АВЕРЬЯНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

С целью повышения надежности грунтовых гидротехнических сооружений выполнены исследования влияния уплотнения на формирование структуры глинистого грунта. В лабораторных и производственных условиях изучена возможность уплотнения глинистых грунтов природной влажности до состояния, характеризуемого коэффициентом водонасыщения $S_r \geq 0,9$, при котором формируется устойчивая дисперсионная структура, стабильные физико-механические свойства и наименьшая водопроницаемость глинистого грунта. Ориентация на оптимальную влажность, стандартную максимальную плотность и пределы отклонения от этих величин согласно действующих в России нормативных документов не всегда позволяет достигнуть такого же состояния грунта. На основе изучения процесса изменения структуры глинистых грунтов при уплотнении сформулированы новые технологические параметры: консистенция и коэффициент водонасыщения. По консистенции грунта природной влажности выбираются грунтоуплотняющие механизмы, а по значению коэффициента водонасыщения $S_r \geq 0,9$ определяются значения плотности ρ_d в зависимости от природной влажности уплотняемого грунта. Уплотнение глинистых грунтов природной влажности при возведении гидротехнических сооружений позволяет избежать необходимости выполнения трудоемких операций по доведению грунтов до оптимальной влажности, что сокращает сроки строительства и стоимость строительных работ. Предлагаемая технология организации уплотнения глинистых грунтов, усовершенствованная новыми технологическими параметрами, может быть использована при возведении земляных сооружений в дорожном строительстве и в других отраслях народного хозяйства.

Гидротехническое сооружение, противофильтрационное устройство, глинистый грунт, технология уплотнения, плотность сухого грунта, влажность грунта, структура глинистого грунта, технологические параметры уплотнения, грунтоуплотняющие механизмы, консистенция, коэффициент водонасыщения, водопроницаемость, коэффициент фильтрации, физико-механические характеристики грунта.