

УДК 630\*37.625.745.1

**А. Ю. Виноградов**, кандидат технических наук,  
генеральный директор (ООО «НПО Гидротехпроект», Российская Федерация);  
**Э. О. Салминен**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
(Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Российская Федерация);  
**П. С. Куцанов**, аспирант (Санкт-Петербургский государственный  
лесотехнический университет, Российская Федерация)

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ МАЛЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

Статья посвящена проблеме гидротехнических расчетов малых водопропускных сооружений лесных дорог с учетом местных гидрологических, почвенно-грунтовых условий и рельефа местности. Площадь водосбора разделяется на выдела – стокоформирующие комплексы. В каждом выделе рассматривается вертикальная почвенно-грунтовая колонка с растительным покровом, морфологическими, тепло- и гидрофизическими характеристиками почвенного покрова, глубиной залегания грунтовых вод и водоупорных горизонтов. Эти сведения позволяют рассчитать объем воды, задерживаемый в каждом выделе, и уточнить объем воды, поступающей к расчетному створу за расчетный период.

The article is devoted to the problem of hydraulic calculations of small culverts forest roads, taking into account the local hydrological, soil and terrain. The area of the catchment is divided into stand - drain forming complexes. In each partition it is considered vertical soil-a soil column, with the forest valuation information on vegetation cover, morphometric, heat- and hydro physical characteristics of soil cover, depth of groundwater occurrence and water-gauge horizons. These data make it possible to calculate the volume of water, the detainee in each partition and specify the volume of water supplied to the settlement falls for the settlement period.

**Введение.** При проектировании поперечного и продольного водоотвода лесовозных дорог основной лимитирующей характеристикой является максимальный расчетный расход заданной обеспеченности, бассейн которых составляет 0,5–5 км<sup>2</sup>. Анализ, проведенный в работе [8], показал, что результаты расчетов по существующим методикам в 5 и более раз превышают измеренные расходы соответствующей обеспеченности, что приводит к многократному удорожанию проектов.

Для решения этих задач [9] предлагается использовать математическую модель, описывающую трансформацию осадков от момента выпадения до момента протекания через створ перепада проектируемой автодороги и учитывающую природные факторы конкретного водосбора.

**Основная часть.** Представим речной бассейн с набором так называемых стокоформирующих комплексов (СФК) [4], расположенных в пределах водораздельного контура. Предполагается, что в пределах каждого СФК такие характеристики, как уклон, экспозиция, полнота и состав растительности, водно- и теплофизические свойства почвы, принимаются неизменными.

Рассмотрим последовательно температурный и водный режимы почвы.

*Температурный режим.* Предположим, что расчетный слой почвы (РСЛ) в течение времени  $dt$  сверху и снизу контактирует со средой, имеющей постоянную температуру, тогда удельный поток тепла  $Q$ , переносимый за расчетную

единицу времени через толщу почвенного горизонта  $z$ , пропорционален градиенту температуры [6]:

$$\frac{dQ}{dt} = L \frac{dT}{dz},$$

где  $L$  – коэффициент теплопроводности расчетного слоя, Вт/м<sup>2</sup>·град.

Введя обозначения:

$$A = \frac{1}{2} z(L_{N-1} + L_N)T_{N-1};$$

$$B = \frac{L_{N-1} + 2L_N + L_{N+1}}{2z^2 \cdot C_N};$$

$$C = \frac{1}{2} z(L_N + L_{N+1})T_{N+1},$$

где  $L_N$ ,  $C_N$  и  $T_N$  – соответственно теплопроводность, теплоемкость и температура  $N$  слоя почвы. Интегрируя данное уравнение для каждого расчетного слоя почвы

$$\int_{Q_0}^{Q_k} dQ / (A - B \cdot Q + C) = \int_{t_0}^{t_k} dt,$$

получаем следующую зависимость:

$$Q_k = \frac{A + C - \exp(-Bt)}{B}.$$

Удельный поток холода, попадающий в почву, будет равен:

$$Q_X = \frac{L_{\text{снега}}}{z_{\text{снега}}}(T_B - T_T),$$

где  $T_B$  – температура воздуха;  $T_T$  – температура верхнего почвенного слоя.

Зная количество холода, проникшее в почву за сутки, объем влаги в каждом почвенном слое и учитывая удельную теплоту плавления, можно рассчитать скорость промерзания почвенных слоев.

$$H_B^* = \frac{Q_X}{M^*},$$

где  $H_B^*$  – слой замерзшей за сутки воды;  $M^*$  – удельная теплота льдообразования.

После того как вся вода в расчетном слое замерзла, расчет переходит на нижележащий слой до тех пор, пока на поверхности среднесуточные температуры имеют отрицательные значения.

Весной картина меняется на обратную.

*Водный режим.* Поверхностное задержание, перехват осадков растительностью, аккумуляция воды в верховых болотах и мелких озерах учитываются следующим образом

$$D = (D_M - H_p) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{H_q}{D_M}\right) \right],$$

где  $D_M$  – максимальный объем емкости, мм;  $H_q$  – количество воды в аккумулирующих емкостях к моменту начала стока, мм, слой поверхностного стокообразования  $H_p$ , мм, в условиях лесной зоны равен нулю.

Расчет испарения ведется по формуле

$$E = h_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kE_0}{h_m}\right) \right],$$

где  $h_0$  – начальное значение количества влаги в почве, мм;  $k$  – доля вклада данного почвенного яруса в испарение (зависит от типа и состояния почвы и глубины распространения корневой системы растений), б/р;  $E$  и  $E_0$  – слои испарения и испаряемости за данный интервал времени, мм;  $h_m$  – максимальная водоудерживающая способность почвы, т. е. минимальное количество влаги, при котором в процессе испарения полностью реализуются потенциальные возможности испаряемости [3].

Испаряемость

$$E_0 = \frac{k\Delta t d}{\cos\alpha},$$

где  $k$  – коэффициент испаряемости, м/(мб·с), в зависимости от типа испаряющей поверхности;

$d$  – дефицит влажности воздуха, мб, за расчетный период времени  $\Delta t$ , с;  $\alpha$  – угол наклона площадки, град.

Скорость притока в нижележащие почвенные слои регламентируется величиной коэффициента фильтрации, который отвечает своему определению при влажности почвы, близкой к полной влагоемкости.

$$S = K_{\text{он.г.}} t,$$

где  $t$  – время, за которое слой влаги, превышающий максимальную водоудерживающую способность, покинет горизонт;  $K_{\text{он.г.}}$  – коэффициент фильтрации нижележащего почвенного горизонта. В случаях, когда  $K_{\text{он.г.}}$  мал (свободная влага не успевает за расчетное время стечь в нижележащий горизонт), вода стекает по расчетному слою по нормали в сторону понижения рельефа. Скорость стекания

$$S^1 = K_{\text{ор.г.}} \sin\alpha,$$

где  $K_{\text{ор.г.}}$  – коэффициент фильтрации расчетного горизонта;  $\alpha$  – уклон, град.

$K_0$ , мм/с, рассчитывается по формуле С. А. Лаврова:

$$K_0 = \frac{k(\Pi - \text{МВС} - 0,04)^2}{\text{МВС}},$$

где  $k = 3,63 \cdot 10^{-5}$  м/с = 2,18 мм/мин; 0,04 – доля заземленного воздуха;  $\Pi$  – пористость слоя почвы, доли ед.; МВС – максимальная водоудерживающая способность, мм.

Высота капиллярного подъема зависит от гранулометрического состава почвы; в первом приближении  $H_{\text{п}} = 0,12X^{-0,81}$ , где  $X$  – размер основной фракции мелкозема, мм.

Капиллярная влажность [7], мм, рассчитывается по формуле

$$W_{\text{кап.}} = \frac{\text{ПВ} - \text{МВС}}{N} + i\text{МВС},$$

где  $N$  – число слоев почвы от уровня грунтовых вод до высоты капиллярного поднятия;  $i$  – порядковый номер расчетного слоя почвы; ПВ – полная влагоемкость, мм.

Влагосодержание каждого РСР, при отсутствии влияния капиллярной влажности, согласно уравнению водного баланса, равна:

$$W_1 = W_0 + P - E - S,$$

где  $W_0$ ,  $W_1$  – влажность, мм, на начало и конец расчетного периода;  $P$  – приход влаги с осадками, мм;  $E$  – испарение;  $S$  – сток в нижележащий почвенный горизонт, мм.

Во второй части выполняется расчет перераспределения грунтового стока в бассейне и

обеспеченного расхода в замыкающем створе. Эта часть отвечает определению модели с определенными параметрами.

Последовательно рассчитываются:

- скорость, м/с, стекания к русловой сети:

$$V = C_c K_0 \sin \alpha;$$

- расстояние, м, которое единичный объем влаги пройдет за расчетный период  $T$ :

$$L = VT,$$

где  $T$  – расчетный интервал времени, с;  $C_c$  – коэффициент сопротивления, б/р;

- потенциально возможный слой избыточной влаги в слое почвы, который будет двигаться в сторону понижения рельефа под влиянием гравитации за расчетный период:

$$H_{i,t} = H_{i-1,t} - D_i - K_{0i+1}T > 0,$$

где  $H_{i-1,t}$  – слой влаги, пришедший сверху за расчетный период  $t$ ,  $D_i$  – дефицит влажности  $i$ -го РСП, мм, равный разности влажности  $i$ -го слоя на начало расчетного периода и МВС;  $K_{0i+1}$  – коэффициент фильтрации нижележащего  $i + 1$  слоя;

- необходимое количество расчетных периодов  $\Gamma$ , за которые весь объем излишней влаги с СФК стечет в русловую сеть:

$$\frac{L_{\text{сфк}}}{L} = \Gamma,$$

где  $L_{\text{сфк}}$  – длина СФК по линии нормали к руслу, м;

- суммарный сток  $q_{\text{сфк},t}$ , м<sup>3</sup>, с СФК за расчетный интервал времени  $T$ :

$$q_{\text{сфк},t} = 10^{-3} H_{it} \frac{F_{\text{сфк}}}{\Gamma},$$

где  $10^{-3}$  – размерностный коэффициент;  $F_{\text{сфк}}$  – площадь СФК, м<sup>2</sup>;

$$Q_{\text{общ},t} = \sum Q_{\text{сфк},t},$$

- русловая трансформация стока:

$$t_p = \frac{S_p}{V_p},$$

где  $t_p$  – время руслового добега, с;  $S_p$  – длина русловой сети, м;  $V_p$  – средняя скорость течения, м<sup>2</sup>/с;

- переход к расходу, м<sup>3</sup>/с, в замыкающем створе:

$$Q_{\text{сфк},t} = \frac{q_{\text{сфк},t}}{t_p};$$

- сумма общего притока, м<sup>3</sup>/с, в русловую сеть за расчетный интервал времени со всех СФК.

Оценка адекватности предложенной модели проверена на восьми водосборах с рядами наблюдений не менее 15 лет.

**Выводы.** 1. Предложенная методика может быть использована при расчетах обеспеченных расходов при проектировании поперечных дождевых водоотводов. 2. Оценка расчетных параметров на отдельном водосборе предваряется выделением на его территории стокоформирующих комплексов. В качестве отдельных СФК выделяются основные типы подстилающей поверхности. Физико-географическими факторами, отражаемыми в описываемой модели, являются рельеф, климат, почвенно-растительный покров. 3. Численные эксперименты выявили адекватную чувствительность алгоритмов расчета к спектру физико-географических характеристик и природных условий.

### Литература

1. Виноградов, А. Ю. Воздействие линейных сооружений на водно-тепловой режим почво-грунтов лесного массива / А. Ю. Виноградов // Сухопутный транспорт леса. – 2007. – С. 159–165.
2. Виноградов, А. Ю. Метод расчета гидрологических характеристик при проектировании автомобильных дорог / А. Ю. Виноградов // Сухопутный транспорт леса: материалы науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – С. 165–174.
3. Виноградов, А. Ю. Влияние изменения хозяйственной деятельности на плодородие почв лесной зоны РФ / А. Ю. Виноградов // Сухопутный транспорт леса: материалы науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – С. 179–184.
4. Виноградов, Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Критический анализ / Ю. Б. Виноградов. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 312 с.
5. Водогрецкий, В. Е. Экспедиционные гидрологические исследования / В. Е. Водогрецкий, О. М. Крестовский, Б. Л. Соколов. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 231 с.
6. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1983. – С. 157, 205.
7. Роде, А. А. Основы учения о почвенной влаге: 2 т. / А. А. Роде. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – Т. 1. – С. 78–269.
8. Салминен, Э. О. Сравнительная оценка результатов расчетов по модели «водный переход» и СП 33-101-2003. / Э. О. Салминен, А. Ю. Виноградов // Сухопутный транспорт леса: материалы науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – С. 175–179.
9. Салминен, Э. О. Альтернативный метод расчетов максимальных расходов для проектирования водопропускных сооружений автодорог / Э. О. Салминен, А. Ю. Виноградов // Сухопутный транспорт леса: материалы науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – С. 129–135.

Поступила 14.03.2012