

УДК 556.166

Е.Д.Гопченко, д.г.н., В.А.Овчарук, к.г.н, Бин Салим Фуад Фараг Салем, асп.,
О.М. Дорошенко, асп.

Одесский государственный экологический университет

ТРАНСФОРМАЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ РАСПЛАСТЫВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СТОКА РЕК В ФОРМУЛАХ ПРЕДЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Рассмотрен один из основных параметров формулы предельной интенсивности - трансформационная функция. Предложен новый метод определения продолжительности склонового притока, основанный на одномодальной форме склонового гидрографа, который апробирован на данных о максимальном стоке половодья рек левобережья Днестра.

Ключевые слова: максимальный сток, время руслового добега, продолжительность склонового притока.

Введение. В качестве базовой для определения характеристик максимального стока весеннего половодья рек авторами рекомендуется формула, которую можно отнести к типу предельной интенсивности. От известных структур подобного типа она отличается тем, что в ней реализуется не модель своего рода «черного ящика» - «осадки – русловой сток», а операторная природная схема трансформации «склоновый приток – русловой сток»[3]. Предлагаемая структура предельной интенсивности имеет расчетный вид

$$q_p = 0.28 \tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) Y_{1\%} \cdot \varepsilon_F \cdot r \cdot \lambda_p, \quad (1)$$

где q_p - расчетный модуль максимального стока весеннего половодья ($\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$) обеспеченностью $P\%$; $Y_{1\%}$ - слой стока за период половодья опорной обеспеченности $P=1\%$, в мм; ε_F - коэффициент русло – пойменного водообмена; r - коэффициент зарегулирования максимального стока водоемами руслового типа (озерами, водохранилищами, прудами); λ_p - переходный коэффициент от опорной обеспеченности $P\%=1\%$ к другим; $\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)$ - трансформационная функция распластывания (в размерности 1/час) волн половодья под влиянием времени руслового добега, причем:

а) при $\frac{t_p}{T_0} = 0$

$$\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}; \quad (2)$$

б) при $0 < \frac{t_p}{T_0} < 1.0$

$$\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} \left[1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right]; \quad (3)$$

в) при $\frac{t_p}{T_0} > 1.0$

$$\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{1}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m \right]; \quad (4)$$

г) при $t_p \gg T_0$

$$\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0, \quad (5)$$

$\frac{n+1}{n}$ - коэффициент временной неравномерности склонового притока воды в русловую сеть; T_0 - продолжительность склонового притока в период половодья, в час; m - показатель степени в уравнении кривых изохрон.

Объекты исследования. Для обоснования расчетных характеристик максимального стока использовались данные по 37 водосборам левобережья Днестра с диапазоном площадей от 70 до 3170 км² и с периодами наблюдений от 9 до 69 лет (по 2000г включительно).

Обоснование расчетных параметров. По своей структуре трансформационная функция $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ является довольно сложным комплексным параметром, включающим как характеристики склонового стокоформирования, так и руслового стока. Среди них следует в первую очередь назвать *время руслового добега*, которое представляет собой отношение

$$t_p = \frac{L}{V_\partial}, \quad (6)$$

где t_p - время руслового добега волны половодья; L - длина реки от наиболее удаленной точки на водосборе; V_∂ - скорость руслового добега волны половодья.

Из (6) очевидно, что расчет времени руслового добега t_p сводится к определению скорости V_∂ . Она представляет собой по существу характеристику перемещения вниз по течению волн паводков, осредненную во времени и в пространстве. Учитывая сложность строения речных систем и характер боковой приточности, решение проблемы неустановившегося движения речных потоков с помощью теоретических уравнений практически невозможно, за исключением некоторых частных случаев. В связи с этим в гидрологической литературе получили широкое распространение эмпирические зависимости, базирующиеся на фактическом материале о перемещении волн паводков или скоростей течения в замыкающих створах с учетом основных факторов.

Вариант расчетной формулы скоростей руслового добега для паводков или половодий редкой вероятности превышения можно представить в виде

$$V_\partial = cF^\alpha I_p^\beta, \quad (7)$$

где $\alpha = \alpha_0 \alpha_1 - \gamma$, а $c = a_m b_0^{\alpha_1}$.

Параметры формулы (7) определялись различными авторами и для разных регионов Украины. Наиболее полно результаты, обобщающие всю территорию Украины, представлены в статье [5]. В частности, β принят единым для всех рек

страны и равен $\frac{1}{3}$. Что касается c и α , то они заданы таблицей для отдельных районов [5].

На основании этой таблицы расчетную формулу скорости добегаания для рек левобережья Днестра запишем в виде

$$V_{\partial} = 1.19F^{0.14}I_p^{0.33}, \quad (8)$$

где V_{∂} - скорость добегаания волн половодья, км/час; F - площадь водосборов, км²; I_p - средневзвешенный уклон рек, в ‰.

Составляющая трансформационной функции T_0 (*продолжительность притока воды со склонов в русловую сеть*) является одним из обязательных базовых параметров в большинстве методов расчета максимального стока рек. Исключение составляют, пожалуй, лишь эмпирические редуцированные формулы и объемные структуры, в которых продолжительность притока T_0 входит составной частью в продолжительность паводка или половодья T_n . Способ численного нахождения T_0 , разработанный Е.Д.Гопченко [2], довольно подробно описан в работе [4]. Там же приведены и результаты обобщения продолжительности притока воды со склонов в русловую сеть в период весеннего половодья в пределах левобережья Днестра и обоснование параметра временной неравномерности склонового притока воды в русловую сеть $\frac{n+1}{n}$.

Методика исследования. Несмотря на то, что численный метод определения T_0 [2] прошел всестороннюю апробацию и получил широкое распространение, в принципе, возможны и другие подходы его установления. В свое время оригинальное решение подобной задачи было предложено А.Н.Бефани [1]. Приняв для дождевых паводков линейную схематизацию гидрографов склонового притока, он для условий $T_0 > t_p$ предложил соотношение

$$q_m/q'_m = 1 - \frac{t_p}{2T_0}, \quad (9)$$

Из (9) легко выразить T_0

$$T_0 = t_p / \left[2 \left(1 - \frac{q_m}{q'_m} \right) \right]. \quad (10)$$

Чтобы воспользоваться (10) для определения T_0 , можно обратиться к редуцированной структуре

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}. \quad (11)$$

Откуда

$$q_m/q'_m = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (12)$$

Если (12) подставить в (10), то получим вполне реализуемую структуру

$$T_0 = t_p / \left[2 \left(1 - \frac{1}{(F+1)^{n_1}} \right) \right]. \quad (13)$$

Предложенная А.Н.Бефани [1] схема имеет определенные ограничения.

1. Она предполагает наличие только линейных гидрографов склонового притока.
2. Распространяется исключительно на условия $T_0 > t_p$.

3. Использование (11), а затем и (13) предусматривает, что T_0 является осредненной по территории величиной.

Но методический подход, предложенный А.Н.Бефани, можно расширить.

С этой целью рассмотрим нелинейную модель склонового гидрографа и не один, а два случая трансформации его в русловой, т.е. при $T_0 > t_p$ и $T_0 < t_p$. Гидрограф склонового притока запишем в следующей редакции

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right]. \quad (14)$$

Для случая $t_p < T_0$ максимальный модуль руслового стока q_m равен

$$q_m = \bar{q}'_{t_p} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} q'_t dt = q'_m \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^{n+1} \right], \quad (15)$$

где \bar{q}'_{t_p} - среднее значение склонового модуля в интервале времени добегания t_p .

Из (15) следует, что

$$\frac{q_m}{q'_m} = 1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^{n+1}. \quad (16)$$

При $t_p > T_0$ уравнение (15) принимает вид

$$q_m = \bar{q}'_{t_p} = \frac{1}{t_p} \int_0^{T_0} q'_t dt = q'_m \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p}. \quad (17)$$

Таким образом, при $t_p < T_0$

$$T_0 = t_p / \left[(n+1) \left(1 - \frac{q_m}{q'_m} \right) \right]^{1/n}. \quad (18)$$

Когда $t_p > T_0$

$$T_0 = \frac{n+1}{n} t_p \frac{q_m}{q'_m}. \quad (19)$$

С учетом (12) получаем:

а) при $t_p < T_0$

$$T_0 = t_p / \left\{ (n+1) \left[1 - 1/(F+1)^{n1} \right] \right\}^{1/n}; \quad (20)$$

б) при $t_p > T_0$

$$T_0 = \frac{n+1}{n} t_p / (F+1)^{n1}. \quad (21)$$

Предложенные уравнения (18), (19), а также (20) и (21) позволяют алгебраически довольно просто решить задачу установления T_0 , но лишь при условии, что

графический метод определения q'_m и n_1 на основе (11) является достаточно надежным, имея, в первую очередь, в виду экстраполяцию в область малых водосборов эмпирическую зависимость $lg q_m = f[lg(F+1)]$.

Бесспорным преимуществом такой методики определения T_0 является то, что, несмотря на приближенность схемы трансформации склонового притока в русловой сток, она, благодаря использованию эмпирически устанавливаемого комплекса q_m/q'_m , дает возможность избежать необходимости учета еще одного трудноопределяемого параметра распластывания паводочных волн – коэффициента русло – пойменного регулирования ε_F . Он, как и время руслового добегания t_p , интегрально отображается показателем степени n_1 в формуле (11).

Возможно установление T_0 в структуре и других расчетных схем. Остановимся, в частности, на формуле предельной интенсивности (1).

Подставляя (3) и (4) в (1), запишем их относительно искомых величин T_0 :

а) при $t_p/T_0 < 1.0$

$$T_0 = \left\{ \frac{Y_m \varepsilon_F}{n q_m} \left[(n+1) T_0^n - \frac{m_1+1}{m_1+n+1} t_p^n \right] \right\}^{\frac{1}{n+1}}; \quad (22)$$

б) при $t_p/T_0 \geq 1.0$

$$T_0 = t_p \left[\frac{m_1(m_1+n+1)}{n+1} \left(\frac{m_1+1}{m_1} - \frac{q_m}{Y_m \varepsilon_F} t_p \right) \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (23)$$

Оба уравнения включают по два неизвестных параметра (T_0 и ε_F), не образуя системы. Более того, (22), вследствие $n < 1.0$, является трансцендентным и может решаться только с привлечением численных методов.

Подытоживая изложение методических подходов при обосновании T_0 , можно прийти к выводам, что наиболее научно обоснованными являются два из них, основанные на решении уравнений (20) и (21) или (22) и (23).

Результаты исследования. Более подробно остановимся на установлении расчетных значений T_0 путем решения (20) и (21). При этом показатель степени n_1 при F получен на основе зависимости $lg q_{1\%} = f[lg(F+1)]$.

Для рек левобережья Днестра уравнение связи имеет вид

$$q_{1\%} = \frac{11.5}{(F+1)^{0.67}}. \quad (24)$$

Обращает внимание очень высокое значение для весеннего половодья $q'_{1\%} = 11.5 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$. С другой стороны, показатель степени n_1 в уравнении (24) является более типичным для дождевых паводков (да и то в условиях степной зоны), чем для весенних половодий. Согласно нормативного документа СНиП 2.01.14-83 [6], для рассматриваемой территории рекомендуется $n_1 = 0.25$. Поскольку в нормативе при определении показателя степени рассматривались зависимости не $lg q_{1\%} = f(F)$, а

$\lg \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}} = f(F)$, то нами был реализован и этот вариант. Уравнение новой зависимости имеет вид

$$q_{1\%} = \frac{0.037Y_{1\%}}{(F+1)^{0.47}} \quad (25)$$

Как видно, в (24) и (25) показатели степени n_1 различаются весьма существенно.

При анализе редуционных связей $\lg q_{1\%} = f(F)$ и $\lg \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}} = f(F)$ возникает важный вопрос относительно природы n_1 . Дело в том, что n_1 интегрально может отображать не только распластывание под влиянием времени добегаания t_p и русло – пойменного регулирования, но и косвенно зависеть от географического положения объектов. Сказанное хорошо иллюстрируется рис.1, а описывается эта зависимость уравнением

$$q_{1\%} = Y_{1\%} [0.0018 - 0.48(\varphi^o - 49)] \quad (26)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0.81$.

В результате анализа исходных данных по максимальному стоку весеннего половодья рек левобережья Днестра установлено, что редуционная составляющая $q_{1\%}/q'_{1\%}$ находится на уровне только 0.20, а не 0.67 и даже – не 0.47.

При значениях $n = 0.11$ и $n_1 = 0.20$ в работе выполнены обратные расчеты (для установления T_0) в рамках предложенной впервые авторами структуре (20). Расчетные значения T_0 изменяется в пределах от 246 (р. Серет – Б. Березовица) до 46 (р. Марковка – сл. Подлесовская) час. Среднее значение T_0 в пределах левобережья Днестра составляет 104 час.

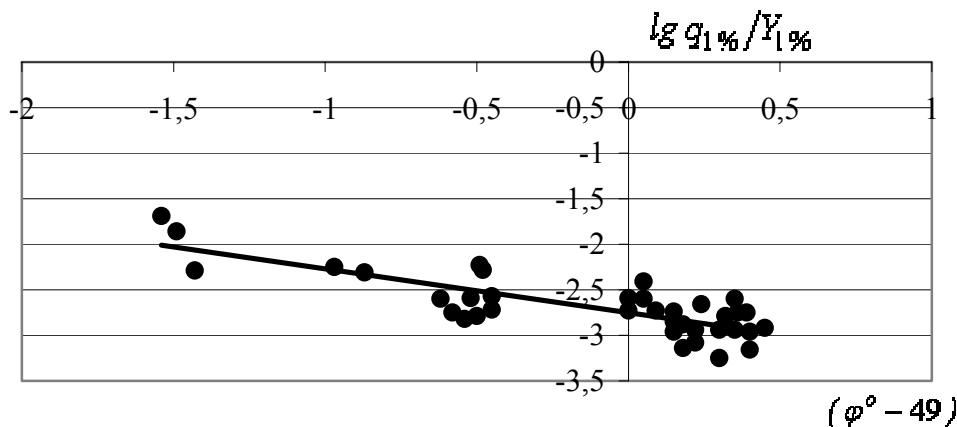


Рис. 1 - Зависимость отношения $\lg(q_{1\%}/Y_{1\%})$ от географического положения объектов, в бассейнах левобережья притоков р. Днестр.

Если сравнить T_0 , полученные численным путем в структуре (22) и на основе редуционных эмпирических зависимостей, то можно прийти к выводам об их удовлетворительной согласованности. В частности, по средним величинам T_0 они различаются в пределах $\pm 15.4\%$, что в полной мере соответствует качеству исходных материалов по максимальному стоку весеннего половодья рек левобережья Днестра.

Лучшие результаты можно ожидать в тех случаях, когда T_0 подлежит осреднению по территории, условием чего является устойчивость n_1 , получаемых на основе региональных зависимостей $lg \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}} = f(F)$. Таким образом, при определении

T_0 на основе (20), обязательным является исследование зависимости $\frac{q_m}{Y_m}$ от географического положения объектов.

Что же касается самой трансформационной функции, то она описывается в общем виде уравнениями (2) – (5), причем (2) и (5) относятся к верхнему и нижнему предельным значениям $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$. На реках левобережья Днестра повсеместно

соотношение $\frac{t_p}{T_0} < 1.0$, т. е. все расчеты функции $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ будут производиться по

уравнению (3). При вычислении $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ были приняты: T_0 - по индивидуальным значениям для каждого водосбора, $n = 0.11$, как показано в [4], и $m_1 = 1.0$.

Уравнение (3) при этих параметрах запишется в расчетном виде

$$\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{10}{T_0} \left[1 - 0.854 \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^{0.11} \right] \quad (27)$$

Для рек рассматриваемой территории $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ изменяется в довольно широких пределах – от 0.011 до 0.107, т. е. почти в 10 раз, находясь в зависимости от соотношения $\frac{t_p}{T_0}$ и самой величины T_0 .

На рис. 2 показана зависимость трансформационной функции распластывания под влиянием времени руслового добега от размеров водосборов. Выражена она нечетко, но на графике можно провести линию раздела данных с $T_0 > 100$ час и $T < 100$ час. Разброс точек как раз и объясняется различием в продолжительностях склонового притока.

Значения $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$, которые находятся в верхней части разделяющей линии на графике связи $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = f \lg(F + 1)$, будут тем больше отклоняться в верхней части, чем меньше T_0 . И, наоборот, в нижней части зависимости наиболее низкие величины трансформационной функции распластывания будут относиться к продолжительностям T_0 , имеющим самые высокие абсолютные значения. Поскольку T_0 изменяются от водосбора к водосбору, то фактически на рис.2 следовало бы произвести своего рода семейство кривых, аналогичных разделяющей линии.

Что касается верхнего предельного значения функции $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$, то оно рассчитано при $T_0 = 100$ час на основании уравнения (2). Совершенно по-иному выглядит эта функция, будучи нормированной по T_0 и, являясь поэтому безразмерной, в зависимости от соотношения $\frac{t_p}{T_0}$ (рис. 3).

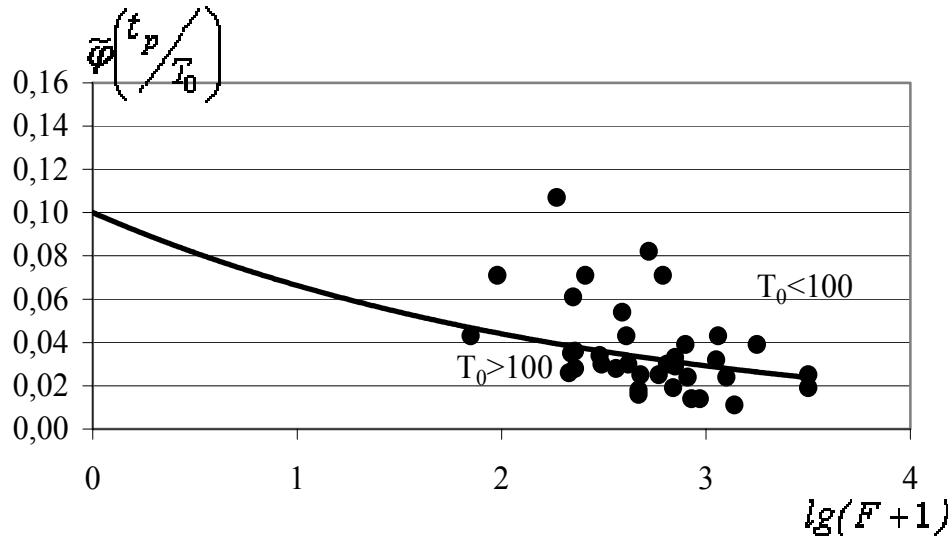


Рис. 2 - Зависимость трансформационной функции от размеров водосборов.

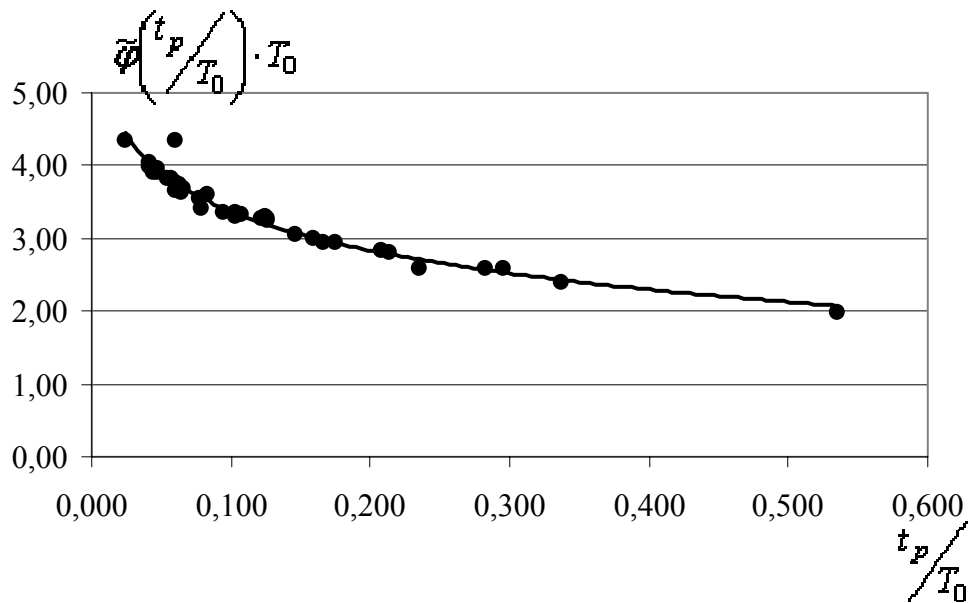


Рис. 3 - Редукционная кривая $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) T_0$ для рек левобережья Днестра.

Из-за масштаба на рис. 3 не показана та часть кривой, которая в верхней части выходит на свое предельное значение, равное $\frac{n+1}{n} = 10,0$. Более наглядное

представление о степени трансформации волн половодья можно получить, если нормированную функцию $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \cdot T_0$ представить в относительных величинах.

Для этого достаточно кривую, показанную на рис. 3, выразить в следующем виде:

а) при $\frac{t_p}{T_0} = 0$

$$\frac{n}{n+1} T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1.0; \quad (28)$$

б) при $0 < \frac{t_p}{T_0} < 1.0$

$$\frac{n}{n+1} \cdot T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - \frac{m_1 + 1}{(n+1)(m_1 + n + 1)} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n; \quad (29)$$

в) при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1.0$

$$\frac{n}{n+1} \cdot T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{m_1 + 1}{m_1} - \frac{n + 1}{m_1(m_1 + n + 1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^{m_1}; \quad (30)$$

г) при $t_p \gg T_0$

$$\frac{n}{n+1} T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (31)$$

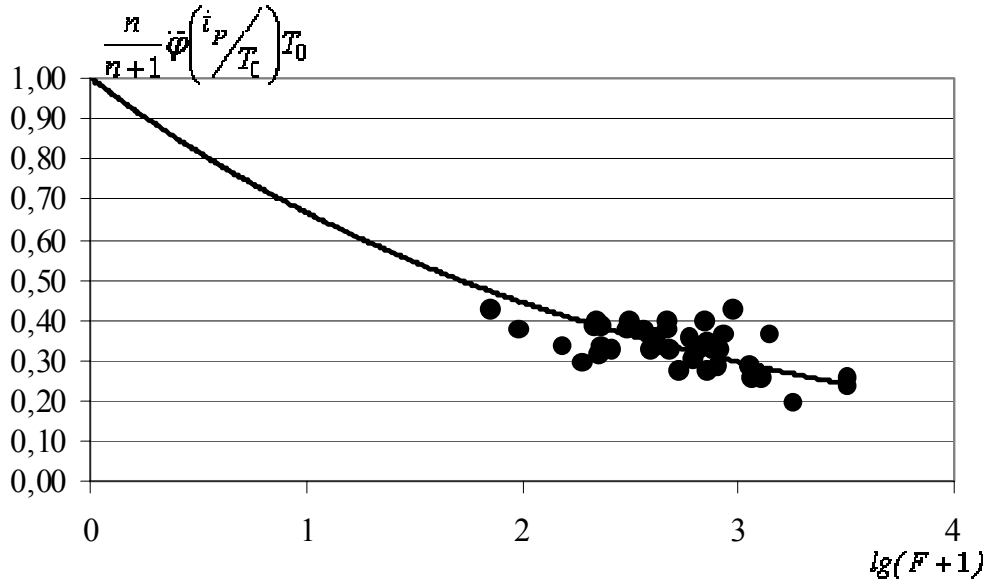


Рис. 4 - Редукционная кривая $\frac{n}{n+1} T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ для рек левобережья Днестра.

Кривая $\frac{n}{n+1} T_0 \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = f(F)$ для водосборов левобережья Днестра иллюстрируется на рис. 4.

К сожалению, как и другие подобные зависимости, рассматриваемая построена по данным левобережья р.Днестр, относящихся к площадям водосборов $F > 70 \text{ км}^2$ и

поэтому левая часть графиков оказывается не освещенной измерениями, что, по существу, делает расчеты в области $F < 70 \text{ км}^2$ весьма проблематичными. Но, учитывая, что $\frac{n}{n+1} \tilde{\varphi}(t_p/T_0) T_0$ верхним пределом имеет единицу при $F = 0$, то имеются объективные предпосылки для экстраполяции этой кривой в области малых площадей.

Выводы.

- Одним из главных факторов трансформации волн паводков и половодий является время руслового добегания, которое, в рамках формулы предельной интенсивности учитывается с помощью трансформационной функции $\tilde{\varphi}(t_p/T_0)$.
- Для расчета продолжительности притока воды со склонов в русловую сеть предложена новая методика, которая, благодаря использованию эмпирически устанавливаемого комплекса q_m/q'_m , дает возможность избежать необходимости учета коэффициента русло – пойменного регулирования ε_F .
- При сравнении T_0 , полученных численным путем и на основе редукционных эмпирических зависимостей, можно прийти к выводам об их удовлетворительном согласовании.
- Обязательным условием, которое необходимо иметь ввиду, когда определение T_0 осуществляется на основе (20), является исследование зависимости q_m/Y_m от географического положения объектов.
- Для рек левобережья Днестра значения трансформационной функции установлены и обобщены в виде зависимостей от соотношения t_p/T_0 и F .

Перспективы дальнейших исследований. Полученные значения трансформационной функции будут использованы в дальнейшем при нормировании максимального стока весеннего половодья рек левобережья Днестра, а методика, предложенная для обоснования параметра T_0 , будет апробирована для рек других регионов.

Список литературы

1. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ, 1958. – Ч. II. – Вып. XIV. – 305с.
2. Гопченко Е.Д. О редукции максимальных модулей дождевого стока по площади // Метеорология и гидрология. 1975. - №2. – С.66-71.
3. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е., Романчук О.К. Теоретические аспекты формул предельной интенсивности // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. 2005. – Вип.49. – С. 414-423.
4. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Бін Салім Фуад Фараг Салем. Обоснование характеристик склонового притока в период весеннего половодья на реках Подольской возвышенности// Вісник Одеського державного екологічного університету. 2009. - Вип.8.- С.193-200.
5. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А. Методика расчета скорости руслового добегания на реках Украины// Причорноморський екологічний бюлетень. 2007р - №2(24). – С.53-55.
6. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат. - 1984. – 447 с.

Трансформаційна функція розпластування максимальних модулів стоку річок в формулах граничної інтенсивності. Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Бін Салім Фуад Фараг Салем, Дорошенко О.М.

Розглянутий один з основних параметрів формули граничної інтенсивності - трансформаційна функція. Запропоновано новий метод визначення тривалості схилового припливу, заснований на одномодальній формі схилового гідрографу, та апробовано його на даних про максимальний стік водопілля річок лівобережжя Дністра.
Ключові слова: максимальний стік, час руслового добегання, тривалість схилового припливу, трансформаційна функція.

Transformation function of spreading of the maximal modules of flow of the rivers on formula of maximum intensity. Gopchenko E., Ovcharuk V., Ben Salim Fuad Farag Salem, Doroshenko O.M.

One of basic parameters of formula of maximum intensity is considered -transformation function. The new method of determination of duration of slope influx, based on onemodal form of slope hydrograph which is approved on the rivers of left-bankness of Dnestr given about a maximal flow, is offered.

Keywords: maximal runoff, time of the river-bed running to , duration of slope influx, transformation function .