

УДК 556.166

Е.Д. Гопченко, д.г.н.,

Одесский государственный экологический университет,

Романчук О.К.

Одесское областное производственное управление водного хозяйства

О НЕКОТОРЫХ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМУЛ ПРЕДЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В статье рассмотрены теоретические аспекты формул предельной интенсивности.

Ключевые слова: предельная интенсивность, максимальный сток, русловые изохроны.

О современном состоянии проблемы. Формулы предельной интенсивности нашли широкое распространение в мировой практике при расчетах максимальных расходов воды с небольших водосборов (обычно меньше 200 км²). В послевоенный период в бывшем союзе нормативным документом СН 435-72 [1] был предложен ее расчетный вариант, который в общей постановке можно представить уравнением:

$$q_m = 16.67 \cdot \bar{\psi}(\tau) H_c \cdot \eta, \quad (1)$$

где q_m – максимальный модуль паводочного стока (м³/с·км²);
 $\bar{\psi}(\tau)$ – ординаты редуцированной кривой средней интенсивности осадков во времени (1/мин.); H_c – суточный максимум осадков (мм); η – коэффициент стока.

Аналогичная (1) структура была использована и при подготовке нового (вместо СН 435-72) нормативного документа СНиП 2.01.14-83 [2]. В обоих вариантах суточный максимум H_c опорной обеспеченности $P=1\%$ картирован, функция $16.67 \cdot \bar{\psi}(\tau)$ представлена в табличной форме и зависит в региональном плане от величины расчетного времени τ (мин.), причем:

$$\tau = 1.2 \cdot t_p^{1.1} + t_{ск}, \quad (2)$$

где t_p – время руслового добега;

$t_{ск}$ – время склонового добега.

Сборный коэффициент паводочного стока η в СН 435-72 был задан в табличной форме в зависимости от типа подстилающей поверхности и величины суточного максимума осадков. Его рекомендуется определять по формуле:

$$\eta = \frac{C_2 \eta_0}{(F+1)^{n_2}} \left(\frac{I_g}{50} \right)^{n_3}, \quad (3)$$

где C_2 – эмпирический коэффициент, который, например, для условий степной зоны составляет 1.3;

η_0 – коэффициент стока, приведенный к площади $F=10$ км² и среднему уклону водосбора $I_g=50$ ‰.

Как и степенные показатели n_2 и n_3 , параметр η_0 задан в табличном виде. Отмененный в России СНиП 2.01.14-83 фактически оставил без существенных структурных изменений формулу предельной интенсивности (1) в новом нормативном документе СП 101-33-2003 [3]. В ряде работ Е.Д. Гопченко [4, 5, 6] отмечались принципиальные недостатки этого типа формул. Основные из них сводились к следующему:

1. В самой исходной модели трансформации осадков в русловой гидрограф пренебрегается, причем безосновательно, наличие склонового оператора «осадки – склоновый сток».

2. Редукционная кривая средней интенсивности осадков во времени $\bar{\psi}(\tau)$ фактически используется вместо функций распластывания паводочных волн при их движении по руслам и русло-пойменного регулирования.

В статье [4] показано, что в зависимости от соотношения между t_p и T_0 , редукционная кривая $\bar{\psi}(\tau)$ выполняет физическую нагрузку функции трансформации $\tilde{\varphi}(t_p/T_0)$. Действительно.:

а) при $t_p < T_0$

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

б) при $t_p \geq T_0$

$$\bar{\psi}(\tau) = \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{1}{t_p}; \quad (5)$$

в) при $t_p/T_0 = 0$ (случай склонового стока)

$$\bar{\psi}(\tau) = \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}, \quad (6)$$

что является верхним предельным значением для коэффициента трансформации. В (4) – (6): $\frac{n+1}{n}$ – коэффициент неравномерности склонового стока, T_0 – продолжительность притока воды со склонов в русловую сеть.

3. Расчетная продолжительность осадков τ не только связана с временем руслового добега t_p , но и продолжительностью притока воды со склонов в русловую сеть T_0 . Действительно, согласно [4]:

а) при $\frac{t_p}{T_0} < 1.0$

$$\tau = T_0 / \left\{ \frac{n+1}{n} \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n \right] \right\}; \quad (7)$$

б) при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1.0$

$$\tau = t_p. \quad (8)$$

Как видно из (7), верхнее предельное значение τ , которое имеет место при $\frac{t_p}{T_0} \rightarrow 0$, будет равно:

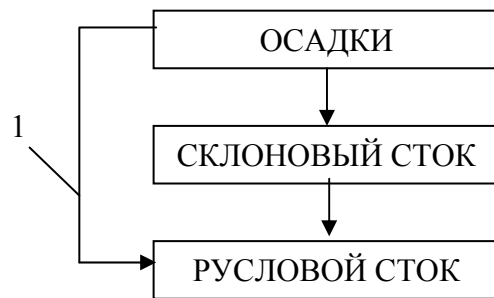
$$\tau = T_0 / \frac{n+1}{n}. \quad (9)$$

Если принять во внимание, что в степной зоне Украины $T_0=2.5$ час., а $\frac{n+1}{n}=3.0$, то $\tau=0.83$ час.=50 мин. При этих же допущениях, исходя из (2) и [1, 2], $\tau=t_{ck}=30$ мин. Последнее в 1.67 раза больше, чем это предусматривается нормативными документами. Что касается нижнего предельного значения τ , то оно, начиная с $\frac{t_p}{T_0}=1.0$, будет соответствовать времени руслового добегания t_p .

Исходные теоретические положения. С целью усовершенствования научно-методической базы в области нормирования характеристик максимального стока автомаи в основу положена теория русловых изохрон. При этом рассматривается два случая:

- а) формирование стока с элементарных водосборов;
- б) формирование стока по разветвленным русловым системам.

Схематически модель трансформации осадков в русловой сток хорошо иллюстрируется рис.1.



1 – модель «предельной интенсивности»

Рис.1 Принципиальная блок-схема формирования руслового стока

При реализации модели русловых изохрон относительно максимальных расходов воды паводков и половодий функции склонового притока q'_t , изохрон f_t и руслопойменного регулирования ε_t принимались в редуционном виде, т.е.

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right]; \quad (10)$$

$$f_t = f_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right]; \quad (11)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^l \right]. \quad (12)$$

Реализуя представленную на рис. 1 схему,

- а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = \sum_{t_p} q'_t f_t \varepsilon_t ; \quad (13)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = \sum_{T_0} q'_t f_t \varepsilon_t . \quad (14)$$

Произведем некоторые преобразования (13) и (14) с учетом (10) и (11). Имея в виду, что

$$f_t = B_t \cdot V \cdot \Delta t , \quad (15)$$

где B_t – ширина водосбора по изохронам руслового добегания;

V – скорость руслового добегания;

Δt – шаг по времени.

Если (15) подставить в (11), то получим уравнение относительно ширин водосборов, т.е.

$$B_t = B_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] . \quad (16)$$

Случай элементарных водосборов. Они моделируются в виде прямоугольников, прорезаемых по середине водотоком. Площадь такого водосбора равна

$$F = B \cdot V \cdot t_p = B \cdot L , \quad (17)$$

где L – длина водотока.

Отметим также, что размер межизохронных площадок l_i будет одинаковым, т.е.

$$f_1 = f_2 = \dots = f_n = V \cdot B \cdot \Delta t . \quad (18)$$

Подставляя (18) в (13) и (14), и, устремляя Δt к нулю, получим:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = B \cdot V \int_0^{t_p} q'_t \varepsilon_t dt ; \quad (19)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = B \cdot V \int_0^{T_0} q'_t \varepsilon_t dt . \quad (20)$$

Произведем в (19) и (20) осреднение функций ε_t , соответственно по t_p и T_0 , тогда:

а) при $t_p < T_0$

$$(Q_m)_{np} = \bar{\varepsilon}_{t_p} B V \int_0^{t_p} q'_t dt ; \quad (21)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$(Q_m)_{np} = \bar{\varepsilon}_{T_0} B V \int_0^{T_0} q'_t dt . \quad (22)$$

Отношение $Q_m / (Q_m)_{np}$ представляет собой переходный коэффициент от (21) и (22) к (19) и (20). Следовательно, (19) и (20) можно записать в редакции:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = BV \bar{\varepsilon}_{t_p} k_\varepsilon \int_0^{t_p} q'_t dt; \quad (23)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = BV \bar{\varepsilon}_{t_p} k'_\varepsilon \int_0^{T_0} q'_t dt. \quad (24)$$

Интегрирование (23) и (24) выполним, подставляя в них (10), причем:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = BV \bar{\varepsilon}_{t_p} k_\varepsilon q'_m t_p \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right]; \quad (25)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = BV \bar{\varepsilon}_{t_p} k'_\varepsilon q'_m \frac{n}{n+1} T_0. \quad (26)$$

Соответственно, максимальные модули q_m , с учетом (17), равны:

а) при $t_p < T_0$

$$q_m = q'_m \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right] \varepsilon_F; \quad (27)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$q_m = q'_m \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \varepsilon_F, \quad (28)$$

где ε_F - обобщенный коэффициент русло-пойменного регулирования. Введем обозначения:

а) при $t_p < T_0$

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

б) при $t_p \geq T_0$

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n}{n+1} \frac{1}{t_p}. \quad (30)$$

При $\frac{t_p}{T_0} = 0$, очевидно:

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = 1.0 \quad (31)$$

и представляет собой верхнее предельное значение для коэффициента распластывания. Нижнее предельное значение $\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right)$ имеет место тогда, когда $t_p \gg T_0$, т.е. согласно (30),

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (32)$$

Объединяя уравнения (29) – (32), получим:

$$q_m = q'_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F. \quad (33)$$

Запишем в параметрическом виде выражение для максимального модуля склонового притока q'_m . С этой целью проинтегрируем (10) по T_0 :

$$Y_m = \int_0^{T_0} q'_t dt = \frac{n}{n+1} T_0 q'_m. \quad (34)$$

Отсюда

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m. \quad (35)$$

Подставим (35) в (33), тогда

$$q_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F. \quad (36)$$

Обратимся теперь к (1), упуская коэффициент размерности 16.67. С другой стороны, в [4] показано, что $H_c \cdot \eta$ есть слой паводочного стока. Следовательно, выражение (36) можно записать в виде:

$$q_m = \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) Y_m \varepsilon_F, \quad (37)$$

где $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ - новая трансформационная функция

$$\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right). \quad (38)$$

Обобщая (1) и (37), запишем новый вариант формулы предельной интенсивности:

- для дождевых паводков

$$q_m = \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) H_c \eta \varepsilon_F, \quad (39)$$

- для весеннего половодья

$$q_m = \tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \eta (S_m + x) \varepsilon_F, \quad (40)$$

где S_m – максимальные снегозапасы к началу половодья;

x – количество осадков от даты S_m до окончания половодья.

Случай разветвленных речных систем. В качестве базовых используются также уравнения (13) и (14), но с учетом (15), т.е.:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = V \sum_{t_p} q'_t B_t \varepsilon_t \Delta t; \quad (41)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = V \sum_{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t \Delta t. \quad (42)$$

Осуществим осреднение функции ε_t по t_p и T_0 , а q'_t и B_t подставим в (41) и (42) с учетом (10) и (16), тогда:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = V \bar{\varepsilon}_{t_p} k_\varepsilon q'_m B_m \sum_{t_p} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] \Delta t; \quad (43)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = V \bar{\varepsilon}_{T_0} k_\varepsilon q'_m B_m \sum_{T_0} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] \Delta t. \quad (44)$$

При устремлении Δt к нулю вместо (43) и (44) можно записать интегрального вида уравнения для установления Q_m :

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = V \bar{\varepsilon}_{t_p} k_\varepsilon q'_m B_m \int_0^{t_p} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m + \frac{t^{m+n}}{t_p^m T_0^n} \right] dt; \quad (45)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = V \bar{\varepsilon}_{T_0} k_\varepsilon q'_m B_m \int_0^{T_0} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m + \frac{t^{m+n}}{t_p^m T_0^n} \right] dt. \quad (46)$$

После интегрирования (44) и (45), а затем делением Q_m на F получим расчетные выражения относительно максимальных модулей паводков или половодий:

$$q_m = \tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) Y_m \varepsilon_F, \quad (46)$$

где $\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)$ - трансформационная функция, причем:

а) при $t_p < T_0$

$$\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} \left[1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right]; \quad (47)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{1}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^m \right]; \quad (48)$$

в) при $t_p/T=0$

$$\tilde{\varphi} \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}. \quad (49)$$

Анализируя расчетные уравнения, выведенные для элементарных водосборов и русловых систем, можно видеть, что верхним предельным значением трансформацион-

ная функция $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ имеет отношения $\frac{n+1}{n} \cdot \frac{1}{T_0}$. С другой стороны, выражения (47) –

(49) совпадают с теми, которые приводятся в [6], но обоснованы, исходя из решения дифференциального уравнения, предложенного А. Н. Бефани. Путь исследования, изложенный в данной статье, по мнению авторов, является более строгим, особенно с точки зрения понимания роли русло-пойменного регулирования паводков и половодий.

Краткое обсуждение результатов. Безусловно, теоретические аспекты формул предельной интенсивности весьма важны, так как позволяют понять особенности их структуры и, что не менее существенно, вскрыть природу параметров, на которые опирается этот тип формул. В первую очередь это касается параметра $\bar{\psi}(\tau)$, который в нашей интерпретации тождественен $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$. На рис.2 приводятся зависимости $\bar{\psi}(\tau)$

и $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ от соотношения $\frac{t_p}{T_0}$, при этом, следуя СНиП 2.01.14-83, коэффициент

русло-пойменного регулирования ε_F при вычислении $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ не учитывается.

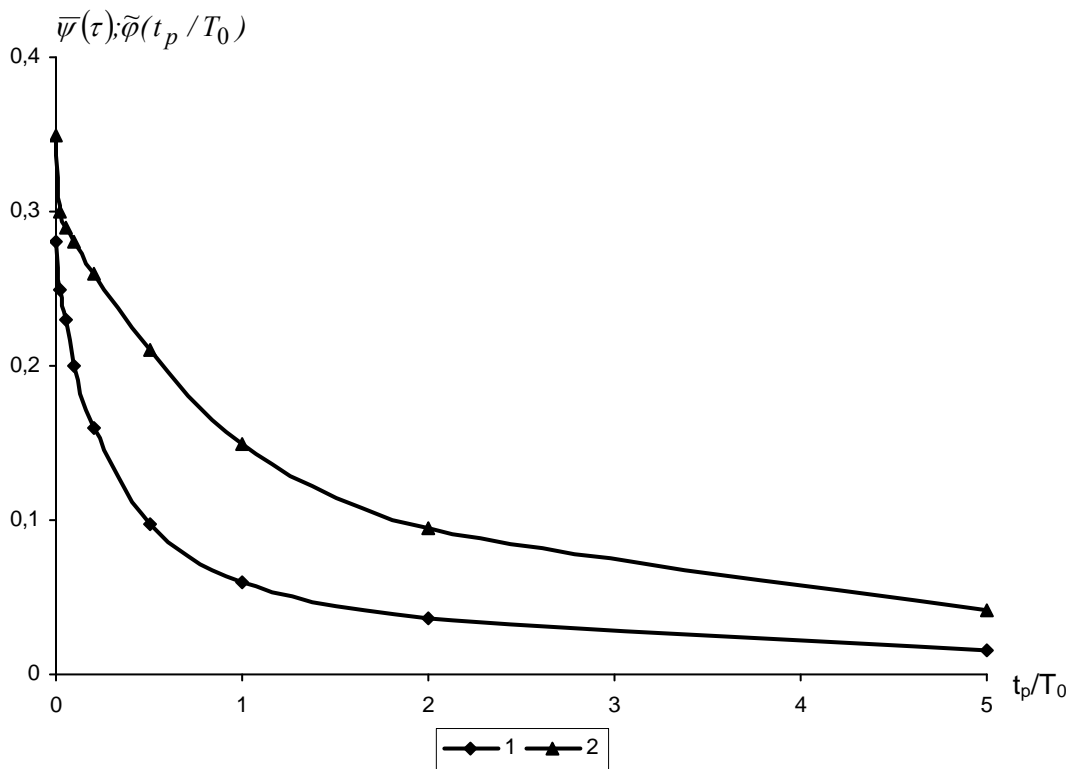


Рис.2 - Зависимость коэффициентов редукции $\bar{\psi}(\tau)$ и $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ в формуле предельной интенсивности, вычисленных согласно СНиП 2.01.14-83 (1) и по методике авторов (2)

Из рис.2 видно, что во всем диапазоне $\frac{t_p}{T_0}$ трансформационная функция $\bar{\psi}(\tau)$ занимает более низкое положение по сравнению с $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$.

Однако, обоснованная нами структура (46) включает в себя еще и русло-пойменное регулирование. С учетом этого обстоятельства была построена зависимость $\bar{\psi}(\tau)$ и $\tilde{\varphi}\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \cdot \varepsilon_F$ от соотношения $\frac{t_p}{T_0}$, показанная на рис.3.

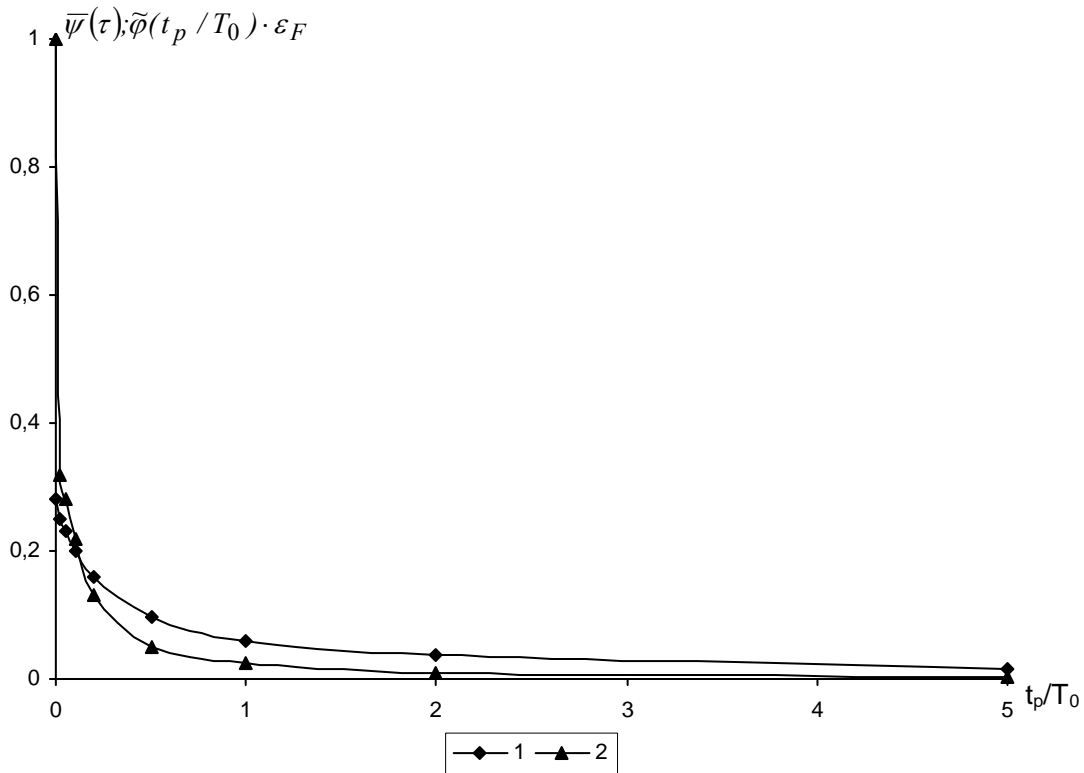


Рис.3 - Зависимость коэффициентов редукции в формуле предельной интенсивности, вычисленных согласно СНиП 2.01.14-83 (1) - $\bar{\psi}(\tau)$ и по методике авторов (2) - $\tilde{\varphi}(t_p/T_0) \cdot \varepsilon_F$

В этом варианте по-прежнему функция $\tilde{\varphi}(t_p/T_0) \cdot \varepsilon_F$ занимает более высокое положение, но только в диапазоне $\frac{t_p}{T_0} \leq 0.2$. В дальнейшем, т.е. при $\frac{t_p}{T_0} > 0.2$ имеет место систематическое завышение результатов уже по методике СНиП 2.01.14-83.

Выводы. Авторами, опираясь на модель русловых изохрон, осуществлено дальнейшее развитие теоретических исследований в области формирования максимального стока паводков и половодий. Доказывается результатами моделирования, что практически во всем диапазоне площадей (за исключением только мельчайших водосборов), действующий в Украине СНиП 2.01.14-83 ведет к значительным завышениям расчетных максимумов паводочного стока. Важнейшим же не только теоретическим, но и практическим выводом является то, что формула нормативного документа необоснованно получила широкое распространение в инженерной гидрологии. С другой стороны, предложенные авторами структуры, обладают рядом преимуществ, главными из которых являются следующие:

- методическая база универсальна с точки зрения ее применимости как для паводков, так и для половодий;

- она распространяется на водосборы любых размеров (от отдельных склонов до разветвленных речных систем).

Список литературы

1. *Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.* – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
2. *Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.* – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 111 с.
3. *Определение основных расчетных гидрологических характеристик.* СП 33-101-2003. – М., 2004. – 72 с.
4. Гопченко Е.Д. О перспективах дальнейшего использования формул предельной интенсивности для расчетов максимального стока с малых водосборов // *Метеорология и гидрология*, 1997 – Вып.9. – С.400-407.
5. Гопченко Е.Д., Родюшкина Е.А. Об особенностях формул предельной интенсивности // *Метеорология, климатология та гідрологія*, 2002. – Вып.46. – С. 104-111.
6. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е., Романчук О.К. Теоретические аспекты формул предельной интенсивности // *Метеорология, климатология та гідрологія*, 2005. – Вып.49. – С. 414-423.

О деяких структурних особливостях формул граничної інтенсивності.

Гопченко Е.Д., Романчук О.К.

В статті розглядаються теоретичні аспекти формул граничної інтенсивності.

Ключові слова: гранична інтенсивність, максимальний стік, руслові ізохронні.

About some structural features of formulas limiting intensity.

Gopchenko E.D., Romanchuk O.K.

The theoretical aspects of formulas of limiting intensity are considered in the article.

Keywords: limiting intensity, maximal runoff a river-bed isochronous.