

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В УСЛОВИЯХ
СМЕЩАЮЩИХСЯ ДОЖДЕЙ

В известных работах по теории формирования дождевого стока [1 - 5], а также в основанных на них методах расчета (изохрон, приливных площадей, единичного гидрографа, предельных интенсивностей) принимают, что смена фаз дождя, т.е. уменьшение или увеличение его интенсивности, происходит одновременно на всей орошаемой дождем территории водосбора. Как известно [6 - 10], процессы формирования облачных систем и образования осадков весьма разнообразны. В частности, наблюдаются смещающиеся дожди, для которых характерно не только изменение интенсивности выпадения осадков во времени, но и в пространстве.

Произведенный нами анализ данных наблюдений на Прибалтийской стоковой станции [11], оборудованной двенадцатью плювиографами, показал смещение максимумов интенсивности выпадения осадков по территории со скоростью $3 \div 5$ м/с. Смещение дождей отмечается также в [12].

В настоящей работе рассматривается формирование расходов воды в условиях смещающихся дождей с постоянными скоростью и направлением.

Согласно существующим теориям формирования стока, которые не учитывают возможного смещения дождя по территории водосбора, расход воды Q_k в замыкающем створе Б (рис. 1) в момент T_k может быть вычислен по формуле

$$Q_k = \Delta \omega_1 i_1 \Psi_1 + \Delta \omega_2 i_2 \Psi_2 + \dots + \Delta \omega_n i_n \Psi_n, \quad (1)$$

где $\Delta \omega_n$ - площадь элементарной n -ой площади водосбора; i_n - интенсивность дождя по графику хода дождя в момент $T_k - t_n$; t_n - продолжительность протекания воды от n -ой элементарной площадки до замыкающего створа; Ψ_n - коэффициент стока для n -ой элементарной площадки и $(T - t_n)$ - го момента времени.

При расчете расходов воды по методу "предельных интенсивностей", который принят в нашей стране в качестве нормативного для обоснования дождевой канализации населенных мест, промпредприятий и других застроенных территорий, приведенную выше формулу упрощают и приводят к виду

$$Q_k = F i_{\text{ср}} \Psi, \quad (2)$$

где F – площадь бассейна канализования, принимающая участие в формировании расхода воды в расчетном сечении водостока (при небольших размерах бассейна принимают, как правило, всю его площадь); Ψ – коэффициент стока; $i_{\text{ср}}$ – средняя интенсивность дождя за время протекания воды от элементарной площадки, наиболее удаленной от расчетного сечения водостока и участвующей в формировании расхода воды в этом сечении в момент T_k , до расчетного сечения.

При пользовании формулой (2) допускается, что если в какой-либо момент на какой-либо из элементарных площадок произошло уменьшение или увеличение интенсивности дождя, то же самое и в тот же момент происходит на всех других элементарных площадках бассейна канализования, т.е. фазы дождя сменяются одновременно на всей орошаемой им территории.

Площадь водосбора, которая участвует в формировании расхода воды в замыкающем створе (рассматривается случай, когда не весь водосбор участвует в формировании расхода воды) в момент T_k в случае неподвижного дождя, охватывающего всю территорию водосбора, можно определить на основе следующих рассуждений и расчетов. В окрестности замыкающего створа (точка Б, рис. 1) сток формируется и поступает в него при интенсивности дождя i_k , соответствующей моменту T_k по графику хода дождя (см. рис. 1, а). Наиболее уда-

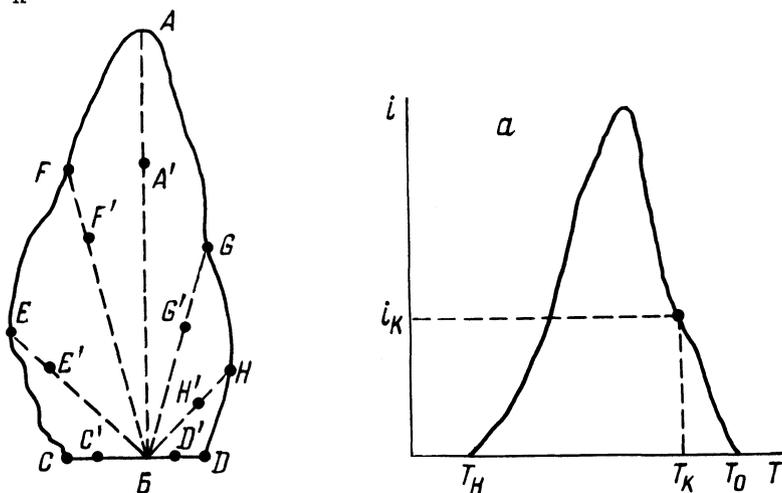


Рис. 1. Схема формирования стока на водосборе.

ленные от замыкающего створа элементарные площадки водосбора (площадки в окрестности точек A', C', D', E', H'), принимающие участие в формировании расхода воды в этом створе в момент T_k , находятся на расстояниях (измеряющихся по пути стекания воды)

$$L_k = (T_k - T_H) v_B,$$

где v_B - средняя взвешенная скорость стекания воды.

Причем на этих элементарных площадках сток будет формироваться при интенсивности i_H , соответствующей моменту начала дождя, на всех промежуточных элементарных площадках - при интенсивностях, соответствующих промежутку от T_H до T_k по графику хода дождя. Площадь водосбора, ограниченная точками $B, A', C', D', E', G', H'$ и является той площадью, которая участвует в формировании расхода воды в замыкающем створе в момент T_k .

Расстояние от замыкающего створа до наиболее удаленных элементарных площадок, принимающих участие в формировании расхода воды в момент окончания дождя, - длина линии стока - определится по уравнению

$$L_M = (T_O - T_H) v_B = t_D \cdot v_B. \quad (3)$$

Здесь t_D - продолжительность дождя.

В случае, когда продолжительность дождя больше продолжительности протекания воды от наиболее удаленной элементарной площадки водосбора до замыкающего створа, в формировании расхода воды участвует весь водосбор. Важным расчетным параметром в этих условиях является критическое время. При максимальной длине линии стекания воды L_O для данного водосбора в случае неподвижного дождя критическое время определяется по формуле

$$t_{кр} = L_O / v_B. \quad (4)$$

Изучение особенностей формирования стока в условиях смешивающихся дождей показывает, что при одинаковых интенсивности осадков на постах, форме, размерах и состоянии поверхности водосбора расходы воды, а также ход стока в целом в замыкающем створе при смешивающихся дождях могут существенно отличаться от этих же характеристик стока в условиях неподвижных дождей.

Причем в том случае, когда в формировании расхода воды в замыкающем створе участвует только часть водосбора (при незначительной продолжительности дождя по сравнению с раз-

мерами водосбора), разные расходы воды в створе могут наблюдаться вследствие того, что в формировании их участвуют разные площади водосбора. Средние интенсивности дождя, при которых происходит формирование расходов воды, а также объемы стока остаются при этом одинаковыми.

Если же в формировании расходов воды участвует весь водосбор, разные расходы воды в замыкающем створе возможны из-за формирования их при разных средних интенсивностях осадков. Объем стока остается при этом также постоянным.

Для сравнения расходов воды, определяемых расчетом при неодинаковом характере хода дождя (неподвижный или смещающийся), можно воспользоваться известной формулой $Q = F i_{\text{ср}} \Psi = BL i_{\text{ср}} \Psi$.

Здесь B и L — соответственно ширина и длина активной части водосбора. Отмеченные ранее недостатки этой формулы не мешают использовать ее для сравнения расходов. Так как площадь активной части водосбора зависит от ее длины, а от последней — в свою очередь длина линий стока на активной части водосбора, средняя интенсивность дождя $i_{\text{ср}}$, при которой происходит формирование расходов воды в замыкающем створе (при полном участии водосбора в формировании расходов воды), зависит от критического времени $t_{\text{кр}}$. Принимая во внимание зависимость расхода воды в замыкающем створе от указанных величин, в настоящей работе исследуем только L и $t_{\text{кр}}$. По полученным при этом попутно формулам можно также рассчитать и построить графики хода стока в замыкающем створе.

Рассмотрим зависимость длин линий стока активной части водосбора от определяющих ее факторов в условиях смещающихся дождей. Для этого достаточно установить связь между координатами точек водосбора, которые участвуют в формировании расходов воды, и указанными факторами.

Пусть смещение дождя происходит в направлении от A к B (см. рис. 1) со скоростью v_0 . Продолжительность дождя, наблюдаемая в неподвижных относительно поверхности водосбора точках (в каждой отдельно) составляет t_0 . Дождь начинается в точке A в момент T_0 . Стеkanie воды по поверхности водосбора происходит с некоторой средней взвешенной скоростью v . Найдем длину линий стока активной части водосбора (предполагается, что не весь водосбор участвует в формировании расхода воды в замыкающем створе).

При указанных условиях моменты начала и окончания дождя на элементарных площадках, находящихся на расстояниях X от точки А в сторону Б, будут соответственно равны $T_n + \frac{X_{AB}}{v_0}$ и $T_n + \frac{X}{v_0} + t_d$. Промежуточные моменты хода дождя на этих элементарных площадках составляют $T_n + \frac{X}{v_0} + \Delta t$, где $0 < \Delta t < t_d$.

Для того чтобы вода из створа X поступила в створ Б, она должна пройти путь, равный $X_{AB} - X$ (стекание воды строго по прямой АБ; X_{AB} - расстояние между точками А и Б). На прохождение водой пути $X_{AB} - X$ потребуется время, равное $\frac{X_{AB} - X}{v_0}$.

Расстояние X от створа А в направлении Б до элементарных площадок, принимающих участие в формировании расхода воды в створе Б в момент T_k , определяется из уравнения

$$T_k = T_n + \frac{X}{v_0} + \frac{X_{AB} - X}{v_B} + \Delta t.$$

Решая это уравнение относительно X , получаем

$$X = (T_k - T_n - \frac{X_{AB}}{v_B} - \Delta t) : (\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_B}).$$

Последнее уравнение действительно для $0 < X \leq X_{AB}$. Если в интервале значений $0 \leq \Delta t \leq t_d$ получается $X > X_{AB}$ или $X < 0$, это означает, что в момент T_k в створе Б сток отсутствует.

Принимая конкретное значение T_k и переменные Δt в пределах от 0 до t_d , можно найти координату X всех точек на линии АБ, участвующих в формировании расхода воды в замыкающем створе в момент T_k .

В случае $v_0 > v_B$ расстояние от створа А до ближайшей от него элементарной площадки, принимающей участие в формировании расхода воды в створе Б в момент T_k , определится из уравнения

$$X_{\text{мин}} = (T_k - T_n - \frac{X_{AB}}{v_B} - \Delta t_{\text{мин}}) : (\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_B}),$$

расстояние от створа А в сторону Б до наиболее удаленной от А элементарной площадки - из уравнения

$$X_{\text{макс}} = (T_{\text{к}} - T_{\text{н}} - \frac{X_{\text{АБ}}}{v_{\text{в}}} - \Delta t_{\text{макс}}) : (\frac{1}{v_{\text{о}}} - \frac{1}{v_{\text{в}}}).$$

При $v_{\text{о}} < v_{\text{в}}$ эти уравнения принимают вид

$$X_{\text{мин}} = (T_{\text{к}} - T_{\text{н}} - \frac{X_{\text{АБ}}}{v_{\text{в}}} - \Delta t_{\text{макс}}) : (\frac{1}{v_{\text{о}}} - \frac{1}{v_{\text{в}}});$$

$$X_{\text{макс}} = (T_{\text{к}} - T_{\text{н}} - \frac{X_{\text{АБ}}}{v_{\text{в}}} - \Delta t_{\text{мин}}) : (\frac{1}{v_{\text{о}}} - \frac{1}{v_{\text{в}}}).$$

Длина линии стока $L_{\text{к}}$ на активной части водосбора в момент $T_{\text{к}}$ по направлению АБ получает следующее выражение:

$$L_{\text{к}} = X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}},$$

Принимая $\Delta t_{\text{мин}} = 0$, $\Delta t_{\text{макс}} = t_{\text{д}}$, можно найти максимальное возможное для $t_{\text{д}}$, $v_{\text{о}}$, $v_{\text{в}}$ значение длины $L_{\text{м}}$ линии стока, которое будет иметь место в некоторые моменты. В случае $v_{\text{о}} > v_{\text{в}}$

$$L_{\text{м}} = X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{v_{\text{о}} - v_{\text{в}}}. \quad (5)$$

Когда $v_{\text{о}} < v_{\text{в}}$,

$$L_{\text{м}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{v_{\text{в}} - v_{\text{о}}}. \quad (6)$$

Считая переменные $X_{\text{мин}}$, $X_{\text{макс}} = X_{\text{мин}} + L_{\text{м}}$, $\Delta t_{\text{мин}} = 0$, $\Delta t_{\text{макс}} = t_{\text{д}}$, можно найти всю область значений $T_{\text{к}}$, в пределах которой водосбор принимает максимально возможное в данных условиях участие в формировании расхода воды в замыкающем створе.

При смещении дождя под углом к вектору стекания воды в пределах $0 < \alpha < 90^\circ$ формулы (5) и (6) принимают вид:

$$L_{\text{м}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{v_{\text{о}} - v_{\text{в}} \cos \alpha}; \quad (5')$$

$$L_{\text{м}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{|v_{\text{в}} \cos \alpha - v_{\text{о}}|}; \quad (6')$$

в случае $\alpha = 90^\circ$ (5') и (6') преобразуются в $L_M = t_D \cdot v_D$.

Когда смещение дождя происходит в направлении, противоположном течению воды по поверхности водосбора (т.е. от Б к А, рис. 1), момент начала дождя в створах, находящихся между створами А и Б на расстоянии X от створа Б, получает выражение $T_H + \frac{X}{v_D}$, где T_H - начало дождя в створе Б. Момент окончания дождя в тех же створах: $T_H + \frac{X}{v_D} + t_D$; промежуточные моменты хода дождя: $T_H + \frac{X}{v_D} + \Delta t$. Поступление воды из окрестности створов, расположенных на расстоянии X от створа Б, в створ Б:

$$\text{начало } T_H + \frac{X}{v_D} + \frac{X}{v_B};$$

$$\text{окончание } T_H + \frac{X}{v_D} + \frac{X}{v_B} + t_D;$$

$$\text{промежуточные моменты } T_H + \frac{X}{v_D} + \frac{X}{v_B} + \Delta t.$$

В формировании расхода воды в створе Б в момент T_K принимают участие только те элементарные площадки, которые удовлетворяют уравнению $T_K = T_H + \frac{X}{v_D} + \frac{X}{v_B} + \Delta t$ при следующих ограничениях: $0 \leq \Delta t \leq t_D$ и $0 \leq X \leq X_{AB}$. Решая это уравнение относительно X , получаем

$$X = (T_K - T_H - \Delta t) : \left(\frac{1}{v_D} + \frac{1}{v_B} \right). \quad (7)$$

Принимая такое наименьшее значение Δt , после подстановки которого в (7) соблюдается неравенство $0 \leq X \leq X_{AB}$, можно найти расстояние X_{\max} до наиболее удаленной элементарной площадки водосбора, принимающей участие в формировании расхода воды в створе Б в момент T_K .

При наибольшем значении Δt , когда после подстановки его в уравнение (7) соблюдалось неравенство $0 \leq X \leq X_{AB}$, можно найти расстояние до ближайшей от створа Б элементарной площадки водосбора, принимающей участие в формировании воды в створе Б в момент T_K . Разность расстояний X_{\max} и X_{\min} равна длине линии стока активной части водосбора по направлению АБ для момента T_K .

В случае $\Delta t_{\text{мин}} = 0$, $\Delta t_{\text{макс}} = t_{\text{д}}$ можно найти максимально возможное для данных $t_{\text{д}}$, $v_{\text{о}}$, $v_{\text{в}}$ значение длины линии стока $L_{\text{м}}$, которое имеет место в некоторые моменты, по формуле

$$L_{\text{м}} = X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{v_{\text{о}} + v_{\text{в}}} \quad (8)$$

Если смещение дождя происходит под углом α в промежутке от $\alpha > 90^\circ$ до $\alpha \leq 180^\circ$ к вектору стекания воды, формула (8) принимает вид

$$L_{\text{м}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{v_{\text{о}} - v_{\text{в}} \cos \alpha} \quad (8')$$

Общей формулой, заменяющей (3 - 6, 6', 5', 8, 8'), является

$$L_{\text{м}} = \frac{t_{\text{д}} v_{\text{о}} v_{\text{в}}}{|v_{\text{о}} - v_{\text{в}} \cos \alpha|} \quad (9)$$

Средняя интенсивность дождя, при которой происходит формирование расхода воды в замыкающем створе (в случае смещающегося дождя) в произвольный момент времени, определится из уравнения

$$i_{\text{ср}} = \frac{1}{\Delta t_{\text{макс}} - \Delta t_{\text{мин}}} \int_{T_{\text{н}} + \Delta t_{\text{мин}}}^{T_{\text{н}} + \Delta t_{\text{макс}}} i(T) dT,$$

в моменты максимального (но не полного) участия водосбора - из уравнения

$$i_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{д}}} \int_{T_{\text{н}}}^{T_{\text{н}}} i(T) dT. \quad (10)$$

* Формула (10) выражает среднюю интенсивность дождя за время от его начала до окончания.

В случае полного участия водосбора в формировании расхода воды в замыкающем створе одним из наиболее важных параметров является критическое время. Рассмотрим зависимость этого параметра от определяющих его факторов.

При смешении дождя по направлению стекания воды по поверхности водосбора (например, от А в сторону Б, рис. 1) начало, максимум интенсивности и другие фазы дождя в створе Б будут смещены относительно фаз дождя в створе А на величину X_{AB}/v_0 . Так, если в створе Б в момент T_k наблюдается дождь, соответствующий фазе T_k (рис. 1, а), в створе А в тот же момент - дождь в фазе

$$T_k + \frac{X}{v_0}.$$

Формирование расхода воды в момент T_k в створе Б будет происходить при интенсивности дождя в его окрестности, соответствующей фазе T_k . В то же время в створ Б поступает сток из окрестности точки А, формирование которого происходило в момент $T_k - \frac{X_{AB}}{v_B}$. В этот момент в окрестности точки А шел дождь, соответствующий фазе $T_k - \frac{X_{AB}}{v_B} + \frac{X_{AB}}{v_0}$. От про-

межуточных между А и Б элементарных площадок в момент T_k в створ Б будет поступать сток, формирование которого происходило в интервале фаз дождя от T_k до $T_k - \frac{X_{AB}}{v_B} + \frac{X_{AB}}{v_0}$.

Максимальная разность фаз дождя, в пределах которой происходит формирование расхода воды в замыкающем створе Б в момент T_k по направлению АБ:

$$t_{кр} = T_k - \left(T_k - \frac{X_{AB}}{v_B} + \frac{X_{AB}}{v_0} \right) = L_0 \left| \frac{1}{v_B} - \frac{1}{v_0} \right|. \quad (11)$$

Величина $t_{кр}$ - условное (только для одного направления)

критическое время в случае смещающегося дождя, когда угол между векторами смещения дождя и стекания воды по поверхности водосбора равен нулю. При других углах между этими векторами в интервале $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ формула (11) принимает вид

$$t_{кр} = L_0 \left| \frac{\cos \alpha}{v_0} - \frac{1}{v_B} \right|. \quad (11')$$

Если смещение дождя происходит против стекания воды (например, от Б в сторону А), начало, окончание и другие фазы дождя в створе А наступают позже по сравнению со створом Б на величину X_{AB}/v_0 . Так, если в створе Б в момент T_k идет дождь в фазе T_k^k , то в тот же момент в створе А будет идти дождь в фазе $T_k^k - X_{AB}/v_0$. В момент T_k в створ Б будет поступать сток из окрестности створа А, формирование которого происходит в фазе $T_k - X_{AB}/v_0 - X_{AB}/v_B$. Максимальная разность фаз, т.е. критическое время, в пределах которого формируется сток в створе Б по направлению АБ, будет

$$t_{кр} = L_0 \left(\frac{1}{v_B} + \frac{1}{v_0} \right). \quad (11'')$$

При углах между векторами смещения дождя и стекания воды в пределах $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ формула (11'') преобразуется в

$$t_{кр} = L_0 \left(\frac{1}{v_B} - \frac{\cos \alpha}{v_0} \right). \quad (11''')$$

Общей формулой, заменяющей (11, 11', 11'', 11'''), является

$$t_{кр} = L_0 \left| \frac{1}{v_B} - \frac{1}{v_0} \right|. \quad (12)$$

Из сказанного следует, что формирование стока в условиях смещающихся дождей существенно отличается от формирования стока в условиях неподвижных дождей. Такие параметры, как активная часть водосбора, критическое время и расход воды в замыкающем створе, в значительной мере зависят от величины и направления скорости смещения дождя относительно направления стекания воды по поверхности водосбора.

Так, по результатам анализа дождя, наблюдавшегося на Прибалтийской стокowej станции 26 июня 1966 г., максимум его смещался в юго-западном направлении со скоростью приблизительно 2 м/с. Если принять, что в том же направлении происходит стекание воды со скоростью 1 м/с и длина водостока, равная длине линии стекания, составляет 1200 м, то критическое время составит 10 мин. При стекании воды с той же скоростью в обратном направлении оно составит 30 мин. Если не учитывать фактор смещения дождя, то $t_{кр} = 20$ мин. При определении расчетной интенсивности дождя по известной

формуле $i = A/t^n$ получим соответственно: $i = 154, 67, 91,5$ л/с·га (при этом принято: $A = 863, n = 0,75$). Соотношение между определяемыми расходами (при неизменности коэффициента стока) составит 2,33:1:1,37.

Таким образом, учет эффекта от смещения дождя в некоторых климатических районах может привести к существенному уточнению расходов воды и размеров сечения дождевой канализации. Однако для этого предварительно необходимо изучить закономерности смещения дождей и разработать новую методику расчета стока.

Л и т е р а т у р а

1. Зброжек Ф.Г. Сток атмосферных осадков. - Журнал министерства путей сообщения. Кн. 8 и 9. - С-Пб., 1901.
2. Долгов Н.Е. Основные положения теории стока ливневых вод. - Гидрологический вестник. - Петроград, 1916, №1.
3. Костяков А.Н. Основы мелиорации. - М. - Л., 1933.
4. Великанов М.А. Гидрология суши. - М., 1932.
5. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока. - Тр. Одесск. гидрометеоролог. ин-та, вып. 14, ч. 2, 1958.
6. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л., 1965.
7. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. - Л., 1948.
8. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. - Л., 1957.
9. Кричок О.Г. Синоптическая метеорология. - Л., 1956.
10. Кирюхин Б.В., Красиков П.Н. Облака, дождь и снег. - Л., 1953.
11. Материалы наблюдений Прибалтийской стоковой станции. - Латв. УГМС, 1964, 1966, 1968.
12. Hershfield David M. Some small. Scalle characteristics of extreme storm rainfalls in Small bosins. - Hydrol. sei Ball. 1975, 20 N1, 77 - 85.

УДК 628.143.001.2

В.П.Старинский, докт. техн. наук, доц. (БПИ)

ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КОЛЬЦЕВЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Известно, что в процессе проектирования и гидравлического расчета кольцевых водопроводных сетей постоянно приходится решать задачи, в которых число искомых неизвестных в два раза превышает число возможных к использованию расчетных уравнений [1]. Например, чтобы произвести гидравличес-