

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ МАЛЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ БАССЕЙНОВ СТОКА НА ГИДРОГРАФЫ ПРИТОКА ДОЖДЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Владимир Жук

Национальный университет "Львовская политехника"

Адрес: Украина, г. Львов, ул. Карпинского, 6

E-mail: zhuk_vm@ukr.net

Аннотация. Представлены результаты теоретических исследований влияния формы в плане малых урбанизированных бассейнов стока на гидрографы притока дождевых сточных вод, полученные с использованием секторного метода расчета поверхностного стока. Результаты работы могут быть применены для усовершенствования методов гидравлического расчета емкостных регулирующих сооружений дождевого стока при обустройстве точечных схем поверхностного водоотведения на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: гидрограф притока, дождевой сток, урбанизированная территория, бассейн стока.

ВВЕДЕНИЕ

Существенное изменение климатических характеристик, связанное с глобальным потеплением, вместе с интенсивной урбанизацией территорий обуславливают возрастание нагрузок на системы дождевого водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий. Надежность и устойчивость работы систем дождевого водоотведения являются важными составляющими обеспечения нормальной жизнедеятельности, влияя на экологическое состояние окружающей среды [1, 18, 20, 21, 22]. Основным путем защиты урбанизированных территорий от подтоплений является комплексное регулирование дождевого стока со всей территории бассейна. Анализ известных эксплуатационных практик показывает, что наиболее высокими технико-экономическими показателями характеризуется рассредоточенное регулирование стока с помощью комплекса специальных сооружений, использующих принципы локального накопления поверхностного стока, его задержания во времени, а также инфильтрации в грунт [1, 20, 21].

Основной количественной характеристикой дождевого стока, необходимой для гидравлического расчета емкостных регулирующих сооружений систем дождевого водоотведения, является гидрограф дождевого стока [1, 18, 20, 21]. В общем случае гидрограф стока зависит от климатических условий местности, топогеодезических параметров бассейна стока, гидрогеологических характеристик притока дождевых сточных вод обычно используют площадки и от проектно-конструктивных решений так называемую линейную модель концентрации по организации отведения поверхностного стока стока [18, 20]. Эта модель основана на методе [2, 3, 4, 5, 9, 21].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Строгий теоретический подход к построению скорости поверхностного течения постоянна, а гидрографов дождевого стока с урбанизированных нарастание во времени площади, формирующей территорий основан на решении дифференциальных стоков в контрольном сечении, изменяется по уравнений нестационарного безнапорного течения слинейному закону. В работах [14, 15] показано

переменным расходом (уравнений Сен-Венана). Приближенными аналитическими решениями уравнений Сен-Венана являются уравнения кинематической и динамической волн [6, 11].

Учитывая многофакторность зависимости гидрографов притока дождевых сточных вод с урбанизированных территорий от значений входных параметров, при разработке соответствующих методов гидравлического расчета часто используют упрощенные математические модели, учитывающие лишь общие интегральные характеристики стока, например, расчетный максимальный расход и время концентрации стока [8, 18].

Одним из наиболее распространенных подходов к построению гидрографов стока является метод единичного гидрографа (Unit hydrograph method) [3, 8, 9]. Концепция этого метода была разработана Шерманом [7]. Единичный гидрограф – это гидрограф, образованный единичным объемом дождевого стока, вызванного дождем определенной продолжительности. Вместе с тем, использование метода единичного гидрографа имеет ряд ограничений: бассейн стока должен быть линейным в плане, а интенсивность выпадения дождя – одинаковой по всей площади бассейна стока; высота слоя стока принимается одинаковой на протяжении периода выпадения дождя. Таким образом, протяженность гидрографа стока во времени зависит от продолжительности выпадения дождя, но никак не связана с его интенсивностью.

В Украине для построения гидрографов притока дождевых сточных вод обычно используют площадки и от проектно-конструктивных решений так называемую линейную модель концентрации по организации отведения поверхностного стока стока [18, 20]. Эта модель основана на методе граничных интенсивностей, а также на следующих допущениях и предположениях: бассейн стока принимается в виде вытянутого прямоугольника, интенсивность выпадения дождя меняется во времени по степенному нисходящему закону,

существенное влияние формы бассейна стока в плане при всех других допущениях, указанных выше. В работах [10, 16] получены аналитические решения для параметров дождевого стока при переменной скорости течения поверхностного стока для линейных в плане бассейнов, а в [17, 19] – аналогичные результаты для радиальных в плане бассейнов.

Анализ показывает, что одним из общих недостатков большинства известных методов расчета гидрографов дождевого стока с урбанизированных территорий является пренебрежение влиянием на форму гидрографа реальной конфигурации в плане бассейна стока. Предложенный в работе [13] секторный метод позволяет рассчитать гидрограф дождевого стока с однородного бассейна произвольной конфигурации в плане.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящего исследования является теоретический анализ и усовершенствование метода расчета гидрографов притока дождевых сточных вод в системах точечного поверхностного водоотведения с урбанизированных территорий с учетом конфигурации бассейна стока в плане.

Задачи исследования предусматривают: математическое описание конфигурации типичных малых урбанизированных бассейнов стока для возможности применения к ним секторного метода расчета гидрографов притока; обобщение полученных гидрографов путем приведения их к безразмерному виду.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Для расчета гидрографов притока дождевых сточных вод с урбанизированных бассейнов стока произвольной формы в плане в работе [13] был предложен секторный метод, согласно которому бассейн стока разбивается на большое количество элементарных секторов с вершиной в точке расположения водоприемника. В таком случае с высокой степенью точности каждый сектор может рассматриваться как радиальный в плане бассейн стока (рис. 1).

Для i -го сектора бассейна стока время поверхностной концентрации согласно [17] может быть рассчитано по формуле:

$$t_{con,i} = \frac{1,415(r_{con,i} n_1)^{0,6}}{(\psi_{mid} q_0)^{0,4} i_o^{0,3}}, \text{ с}, \quad (1)$$

где: $r_{con,i}$ – радиус концентрации стока для i -го сектора, как функция геометрической формы бассейна стока в плане и значения угла φ ; n_1 – коэффициент шероховатости; ψ_{mid} – коэффициент стока; q_0 – интенсивность выпадения дождя, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; i_o – продольный уклон.

Согласно методу граничной интенсивности критическая продолжительность дождя, отвечающая максимальному расходу дождевого стока, равна времени концентрации стока ($t_0 = t_{con}$). Тогда интенсивность расчетного дождя q_0 , $\text{м}^3/\text{с}$:

$$q_0 = q_{20} (1200/t_{con})^n, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где: q_{20} – расчетная интенсивность выпадения дождя продолжительностью 20 мин с периодом одно-кратного превышения $P=1$ год, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; t_{con} – время концентрации для всей площади водостока; n – показатель степени в уравнении $q=A/t^n$, описывающем зависимость граничной интенсивности выпадения дождя q от его продолжительности t ; в Украине определяется по действующему нормативному документу [12].

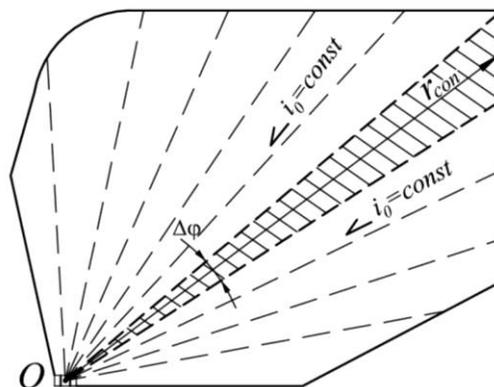


Рис. 1. Схема точечного водоотвода из однородного урбанизированного бассейна стока произвольной конфигурации в плане

Fig. 1. Point-type scheme of the stormwater drainage of uniform urbanized catchment of arbitrary configuration

Для прямоугольных бассейнов стока (рис. 2,а) радиус i -го сектора в зависимости от угла φ :

$$\text{при } 0 \leq \varphi < \arctg(b/L): \quad r_{con,i} = \frac{L}{\cos \varphi}, \quad (8)$$

$$\text{при } \arctg(b/L) \leq \varphi < \pi/2: \quad r_{con,i} = \frac{b}{\sin \varphi}. \quad (9)$$

Полный радиус концентрации стока для прямоугольного в плане бассейна: $R_{con} = \sqrt{L^2 + b^2}$, тогда как эффективный радиус концентрации, очерчивающий радиальную часть бассейна стока: при $L \geq b$: $R_{ef} = b$; при $L < b$: $R_{ef} = L$.

Радиус i -го сектора для треугольных в плане бассейнов стока секторного типа (рис. 2,б):

$$\text{при } 0 \leq \varphi \leq \arctg(a/L): \quad r_{con,i} = \frac{L}{\cos \varphi}, \quad (10)$$

полный радиус концентрации $R_{con} = \sqrt{L^2 + a^2}$, а эффективный радиус концентрации $R_{ef} = L$.

Для треугольных в плане бассейнов стока обратного типа (рис. 2,в) радиус i -го сектора:

$$\text{при } 0 \leq \varphi \leq \pi/2: \quad r_{con,i} = \frac{cL}{(L \sin \varphi + c \cos \varphi)}, \quad (11)$$

полный радиус концентрации $R_{con} = L$ при $c \leq L$; $R_{con} = c$ при $c > L$; а эффективный радиус:

$$R_{ef} = c (1 + c^2 / L^2)^{-1/2}. \quad (12)$$

Расчет гидрографов стока выполнен для таких диапазонов значений исходных параметров: $F=100-2000 \text{ м}^2$; $q_{20}=90-110 \text{ л/(с·га)}$; $n_1=0,013-0,02$; $i_o=0,005-0,03$; $\psi_{mid}=0,5-1$; $n=0,71$.

Погрешность расчета контролировали по относительному расхождению теоретических и численных значений объема дождевого стока, которое не превышало 0,01%.

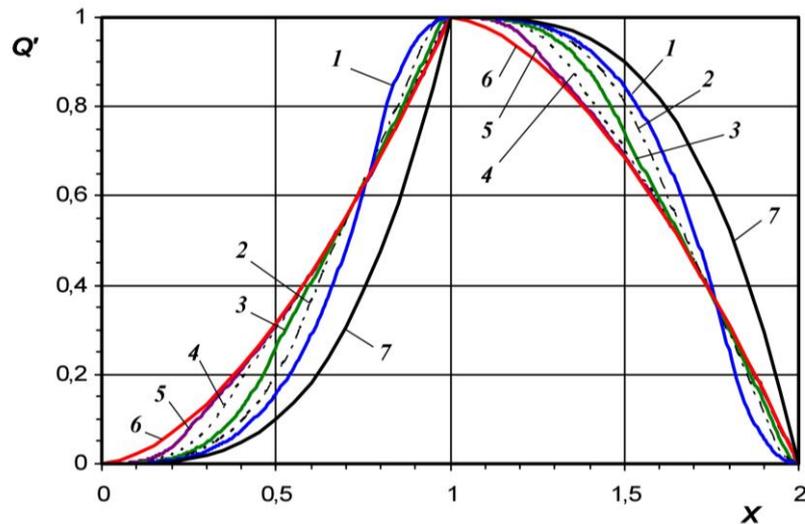
Для бассейнов всех описанных выше простейших конфигураций получено, что время концентрации стока для сектора наибольшей протяженности является также временем концентрации для всего бассейна стока:

$$t_{con} = \left[\frac{1,41 \cdot (R_{con} \cdot n_1)^{0,6}}{(1200^n \psi_{mid} q_{20})^{0,4} i_o^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}. \quad (13)$$

Полученные размерные гидрографы стока были приведены к безразмерному виду. В качестве масштаба времени выбрано время концентрации для всего бассейна стока, определяемое по (13), а в качестве масштаба расхода – максимальный секундный расход Q_r , соответствующий t_{con} :

$$Q_r = (\psi_{mid} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{848 \cdot i_o^{0,3}}{n_1^{0,6} R_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F. \quad (14)$$

Получено, что безразмерные гидрографы стока для всех трех конфигураций в плане не зависят от численных значений площади бассейна стока F , коэффициента стока ψ_{mid} , интенсивности q_{20} , продольного уклона i_o и коэффициента шероховатости n_1 . Безразмерные гидрографы являются лишь функцией показателя степени n и геометрического симплекса, описывающего соотношение сторон однородного бассейна стока L/b , L/a или L/c (рис. 3–5). Безразмерное время обозначено как $X=t/t_{con}$, а безразмерный расход – Q' .



1 – $L/b=1$; 2 – $L/b=2$; 3 – $L/b=3$; 4 – $L/b=5$; 5 – $L/b=10$;
6 – линейные в плане бассейны стока; 7 – радиальные в плане бассейны стока

Рис. 3. Безразмерные гидрографы притока дождевых сточных вод из прямоугольных в плане бассейнов стока ($n=0,71$)

Fig. 3. Dimensionless stormwater hydrographs from rectangular catchments ($n=0.71$)

В отличие от гидрографов, полученных для линейных и радиальных бассейнов стока, гидрографы притока с прямоугольных и треугольных в плане бассейнов характеризуются плавностью переходов между первым и вторым этапами (рис. 3–5).

Обобщенные безразмерные гидрографы притока с прямоугольных в плане бассейнов стока, представленные на рис. 3, показывают существенную зависимость формы гидрографа от соотношения длин сторон L/b .

К гидрографу радиальной модели (кривая 7) более всего приближается безразмерный гидрограф притока при соотношении $L/b=1$, так как в этом случае отношение эффективного радиуса концентрации R_{ef} к длине пути концентрации R_{con} является максимальным. При увеличении или уменьшении соотношения L/b относительно значения $L/b=1$ имеет место постепенное приближение безразмерного гидрографа к теоретическому гидрографу для линейной модели. Очевидно, что имеет место симметрия результатов относительно центрального отношения $L/b=1$. Например, идентичными являются безразмерные гидрографы притока для бассейнов с соотношениями $L/b=2$ и $0,5$; $L/b=4$ и $0,25$ и т.д.

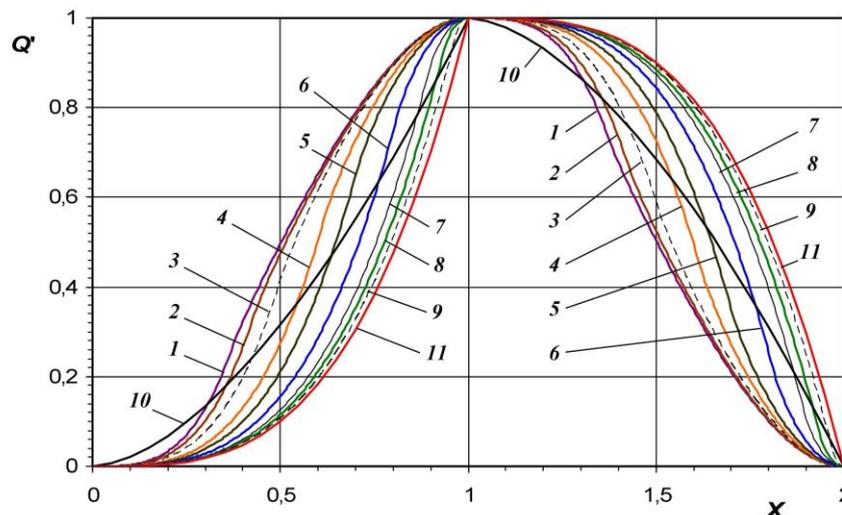
При $L/b \geq 10$ и $L/b \leq 0,1$ безразмерные гидрографы притока практически совпадают с гидрографом для линейных бассейнов стока (рис. 3).

Безразмерные обобщенные гидрографы притока с треугольных в плане бассейнов стока секторного типа представлены на рис. 4.

Получено, что при соотношениях длин сторон $L/a \geq 3$ безразмерные гидрографы притока из треугольных в плане бассейнов стока секторного типа практически накладываются на теоретический гидрограф для радиального в плане бассейна (рис. 4). При меньших значениях соотношения L/a первые этапы гидрографов притока (при $t \leq t_0$) приобретают вид S-образных кривых, которые существенно отличаются от соответствующих степенных кривых для линейной и радиальной моделей. При $L/a \rightarrow 0$ гидрографы притока с треугольных в плане бассейнов стока секторного типа стремятся к некоторой асимптоте, которая приближенно описывается кривой 1 на рис. 4.

Для треугольных в плане бассейнов обратного типа получена симметрия безразмерных гидрографов притока относительно центрального соотношения $L/c=1$, то есть идентичными является гидрографы для соотношений $L/c=2$ и $0,5$, $L/c=10$ и $0,1$ и т.д. Все безразмерные гидрографы имеют вид S-образных кривых (рис. 5).

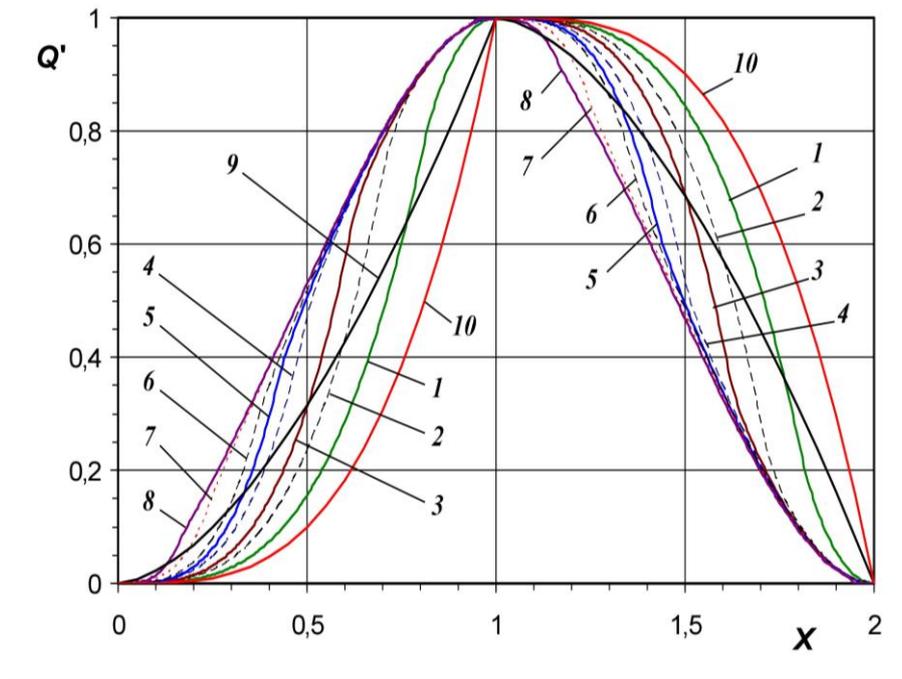
Гидрограф притока из обратного треугольного в плане бассейна стока с соотношением сторон $L/c=1$ занимает промежуточное положение между гидрографом для линейной и радиальной моделей (рис. 5). При больших ($L/c \geq 10$) и соответственно малых ($L/c \leq 0,1$) значениях геометрического соотношения L/c гидрографы притока приближаются к некоторой асимптоте, которая представлена на рис. 5 кривой 8.



1 – $L/a=0,2$; 2 – $L/a=0,25$; 3 – $L/a=1/3$; 4 – $L/a=0,5$; 5 – $L/a=2/3$; 6 – $L/a=1$; 7 – $L/a=1,5$; 8 – $L/a=2$; 9 – $L/a=3$;
10 – линейные в плане бассейны стока; 11 – радиальные в плане бассейны стока

Рис. 4. Безразмерные гидрографы притока дождевых сточных вод из треугольных в плане бассейнов стока секторного типа ($n=0,71$)

Fig. 4. Dimensionless stormwater hydrographs from sector-type triangular catchments ($n=0.71$)



1 – $L/c=1$; 2 – $L/c=1,5$; 3 – $L/c=2$; 4 – $L/c=3$; 5 – $L/c=4$; 6 – $L/c=5$; 7 – $L/c=10$; 8 – $L/c=20$;
9 – линейные в плане бассейны стока; 10 – радиальные в плане бассейны стока

Рис. 5. Безразмерные гидрографы притока дождевых сточных вод из треугольных в плане бассейнов стока обратного типа ($n=0,71$)

Fig. 5. Dimensionless stormwater hydrographs from reverse triangular catchments ($n=0.71$)

Сравнение безразмерных гидрографов притока для треугольных бассейнов секторного и обратного типа при одинаковых малых соотношениях длины и ширины ($L/a=L/c \leq 0,2$) показывает, что они очень несущественно отличаются друг от друга, что отображает факт постепенного сближения этих форм при малых значениях соотношений L/a и L/c .

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты теоретических исследований влияния формы в плане малых урбанизированных бассейнов стока на гидрографы притока дождевых сточных вод, полученные с использованием секторного метода расчета гидрографов поверхностного стока.

Получены обобщенные гидрографы в безразмерных координатах для бассейнов трех простейших типичных конфигураций в плане: прямоугольной, треугольной формы секторного типа и треугольной формы обратного типа. Бассейны стока более сложной конфигурации с достаточной точностью можно представить как сумму двух или более типичных бассейнов.

Показано, что безразмерные гидрографы с малых урбанизированных бассейнов типичных

конфигураций являются автомодельными по площади бассейна стока F , коэффициенту стока Ψ_{mid} , интенсивности q_{20} , продольному уклону i_0 и по коэффициенту шероховатости n_1 . Форма безразмерных гидрографов стока определяется формой бассейна стока в плане, соотношением длин его сторон, а также показателем степени n в степенном законе, описывающем зависимость граничной интенсивности выпадения дождя от его продолжительности.

Получены и проанализированы безразмерные гидрографы для малых урбанизированных бассейнов типичных конфигураций (рис. 3–5) при $n=0,71$, подтверждающие важность учета формы бассейна стока в плане на динамику притока дождевых сточных вод во времени.

Результаты работы могут быть применены для усовершенствования методов гидравлического расчета емкостных регулирующих сооружений дождевого стока при обустройстве точечных схем поверхностного водоотведения с урбанизированных территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dziopak J., 1992. Analiza teoretyczna i modelowanie wielokomorowych zbiorników

- kanalizacyjnych / Kraków: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. Monografia 125 – 214.
2. Guo J., 2001. Rational hydrograph method for small urban watersheds / ASCE J. of Hydrologic Engineering – Vol. 6, N 4. - 352–356.
 3. Guo J., 2006. Storm-water predictions by dimensionless unit hydrograph / ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering. – Vol. 132, N 4. - 410–417.
 4. Kaźmierczak B., Kotowski A., 2012. Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym / Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. – Wrocław. – 143.
 5. Osmulka-Mróz B., Fidała-Szope M., Kierzenkowska M., 1984. Obliczeniowe a rzeczywiste natężenia przepływów w kanalizacji deszczowej / Ochrona Środowiska. – N 434/3–4 (20–21), 29–32.
 6. Overton D., Meadows M., 1976. Stormwater modeling / Academic Press. New York, NY. – 58–88.
 7. Sherman L., 1932. Streamflow from rainfall by the unit graph method. / Eng. News Rec. – V.108. - 501–505.
 8. Urban hydrology for small watersheds. 1986. / United States Department of Agriculture. Technical Release 55, 210-VI-TR-55, 2 ed. – 164.
 9. Yen B., Chow V., 1980. Design hydrographs for small drainage structures / ASCE J. of the Hydraulics Division – N106 (HY6).
 10. Zhuk V., Matlay I., Boshota V., 2009. Time of concentration for linear watersheds with various slope for the rains of constant intensity / Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Budownictwo i Inżynieria Środowiska" – Rzeszów. – z. 54. - 135–138.
 11. Zoppou C., 1999. Review of storm water models. CSIRO Land and Water, Canberra ACT, Australia / Technical Report 52/99. – 64.
 12. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України – 2013, 128.
 13. Жук В., Матлай І., 2012. Гідрографи притоку дощових стічних вод з прямокутних в плані урбанізованих басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності / Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник – К.: КНУБА – Вип. 19. - 31–38.
 14. Жук В., Вовк Л., 2004. Гідрографи притоку поверхневих стічних вод при різних моделях концентрації стоку / Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – Львів: В-во НУ "ЛП" – № 506. - 105–113.
 15. Жук В., Вовк Л., 2005. Радіальна модель концентрації дощових стічних вод / Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник – К.: КНУБА. – Вип. 4. - 84–96.
 16. Жук В., Матлай І., 2011. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом / Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". – Львів: В-во НУ "ЛП" – № 697. - 97–103.
 17. Жук В., 2010. Теоретичні гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності при змінній швидкості течії / Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. – К.: КНУБА. – Вип. 15. - 119–130.
 18. Калицун В., 1987. Водоотводящие сети и сооружения. – М.: Стройиздат. – 336.
 19. Матлай І., Жук В., Саницький М., 2012. Розрахункова витрата та час концентрації дощового стоку з радіальних у плані басейнів з постійним поздовжнім похилом / Науковий вісник Національного лісотехнічного унів. України – Львів: НЛТУ – Вип. 22.1. - 119–125.
 20. Отведение и очистка поверхностных сточных вод. 1990. Учеб. пособие для вузов / В. Дикаревский, А. Курганов, А. Нечаев, М. Алексеев. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние. – 224.
 21. Ткачук С., Жук В., 2012. Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія / Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 216.
 22. Эпоян С., Карагяур А., Паболков В., 2013. Выбор фильтрующей загрузки для многослойных фильтров с горизонтальным направлением фильтрации / Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Vol.15, No. 6. - 11–18.

INFLUENCE OF THE SMALL URBANIZED CATCHMENT'S CONFIGURATION ON THE STORMWATER HYDROGRAPHS

Summary. The results of theoretical studies of the influence of the configuration of small urbanized catchments on the stormwater hydrographs are obtained using the sectoral method of calculation of surface runoff. The results can be applied to improve the methods of calculating the storage volume of the stormwater regulating facilities for point schemes of the stormwater drainage in urbanized areas.

Key words: stormwater hydrograph, stormwater runoff, urbanized area, catchment.