

WSPARCIE DLA ROBOTÓW ŚPIĄCYCH O OGRODZENIACH DWUSTRONNYCH W PRZYPADKU REGULACJI SPŁYWU POWIERZCHNIOWEGO

Alexander Tkachuk

*Doktor habilitowany nauk technicznych, profesor,
kierownik Katedry Budownictwa Miejskiego i Ekonomii
Narodowego Uniwersytetu Zasobów Wodnych
i Zarządzania Środowiskiem (Równe, Ukraina)
e-mail: o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3036-0010>*

Yana Yaruta

*Studentka studiów podyplomowych
Wydziału Budownictwa Miejskiego i Ekonomii
Narodowego Uniwersytetu Gospodarki Wodnej
i Zarządzania Środowiskiem (Równe, Ukraina)
e-mail: ia.v.yaruta@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-9291-7710>*

Streszczenie. W ostatnich latach systemy odprowadzania wody deszczowej nie były w stanie poradzić sobie z ilościami spływów powierzchniowych, które powstają w osadach. Prowadzi to do znacznych powodzi i zalewania terenów zurbanizowanych. Skutecznym rozwiązaniem może być włączenie struktur kontroli wody deszczowej do systemu odwadniającego. Ale to rozwiązanie wymaga wyjaśnienia w obliczeniach hydraulicznych. W celu zmniejszenia szczytowych obciążeń istniejącej konstrukcji kanalizacji deszczowej, wyeliminowania przyczyn zalewania i zalewania terenów oraz oczyszczenia wód opadowych proponuje się czasowe ich zatrzymywanie w miejscach opadu za pomocą niecek infiltracyjnych. Określono warunki regulacji odpływu opadów na terenach zurbanizowanych w czasie ich częściowego przejścia z czasową retencją i oczyszczania ich w nieckach infiltracyjnych. Do obliczeń hydraulicznych i optymalizacyjnych, zarówno ciśnieniowych, jak i beciśnieniowych rurociągów odwadniających, proponuje się udoskonalony wzór wykładniczy ze współczynnikiem uwzględniającym wypełnienie kolektora, do obliczania pracy sieci odwadniających w trybie ciśnieniowym i beciśnieniowym oraz do identyfikacji ewentualnych stref zalewowych i zalewowych oraz na ich podstawie do umieszczania niecek infiltracyjnych. Proponuje się wykonanie obliczeń hydraulicznych wspólnej pracy połączonych hydraulicznie konstrukcji kanalizacji deszczowej: wszystkich odcinków sieci kanalizacyjnej, obiektów magazynowych (zbiorniki, niecki infiltracyjne itp.), zbiorników.

Słowa kluczowe: niecki infiltracyjne, spływy deszczowe, zalewanie terenów miejskich, konstrukcje kanalizacji deszczowej.

TAKING INTO ACCOUNT THE JOINT OPERATION OF STORMWATER DRAINAGE SYSTEMS WHEN REGULATING SURFACE RUNOFF

Alexander Tkachuk

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of urban planning and development
of the National University of Water Resources
and Environmental Management (Rivne, Ukraine)
e-mail: o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3036-0010>*

Yana Yaruta

*Postgraduate student
of the Department of urban planning and development
of the National University of Water Management
and Environmental Management (Rivne, Ukraine)
e-mail: ia.v.yaruta@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-9291-7710>*

Abstract. In recent years, stormwater drainage systems have not been able to cope with the volumes of surface runoff that are formed in settlements. This leads to significant flooding of urbanized areas. An effective solution can be the inclusion of rainwater control structures in the stormwater drainage systems. But this solution requires clarification in hydraulic calculations. The method of temporary interception stormwater at places of their precipitation with infiltration basins is reviewed. Infiltration basins are used to reduce the peak load on existing stormwater sewerage facilities, prevent the causes of flooding by stormwater. Conditions for the regulation of stormwater on urban areas with its partial flow and temporary interception on infiltration basins are determined. A refined exponent formula with a coefficient taking into account the filling of the pipeline for hydraulic and optimization calculations of pressure and non-pressure sewerage pipelines are proposed. The application of this formula for calculations of the compatible work of the pipelines and joint operation with the stormwater regulating construction to calculate the work of sewerage networks in the pressure and non-pressure conditions and identify possible areas of flooding with location of infiltration basins there. It is proposed to carry out hydraulic calculations of the joint operation of hydraulically connected structures of the stormwater drainage systems: all sections of the drainage network, storage structures (reservoirs, infiltration basins, etc.), reservoirs.

Key words: infiltration basins, rain runoff, flooding of urban areas, rainwater drainage structures.

УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СЕТЕЙ ДОЖДЕВОГО ВОДООТВЕДЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Александр Ткачук

*Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Городского строительства и хозяйства
Национального университета водного хозяйства
и природопользования (Ровно, Украина)
e-mail: o.a.tkachuk@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3036-0010>*

Яна Ярута

*аспирантка кафедры
Городского строительства и хозяйства
Национального университета водного хозяйства
и природопользования (Ровно, Украина)
e-mail: ia.v.yaruta@nuwm.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-9291-7710>*

Аннотация. В последние годы системы дождевого водоотведения не справляются с теми объемами поверхностного стока, которые формируются в населенных пунктах. Это приводит к значительным подтоплениям и затоплениям урбанизированных территорий. Эффективным решением может быть включение в систему водоотведения сооружений регулирования дождевого стока. Но такое решение требует уточнения при гидравлических расчетах. С целью снижения пиковых нагрузок на существующие сооружения дождевого водоотведения, устранения причин подтопления и затопления территорий и очистки дождевых вод предложено временно их задерживать в местах выпадения с помощью инфильтрационных бассейнов. Определены условия регулирования дождевого стока на урбанизированных территориях при его частичном прохождении с временным задержанием и очисткой их в этих бассейнах. Для гидравлических и оптимизационных расчетов, как напорных, так и безнапорных водоотводящих трубопроводов предложено уточненную степенную формулу с коэффициентом, учитывающим наполнения коллекторов, что позволяет рассчитывать сети водоотведения, работающие в напорном и безнапорном режимах и выявлять возможные зоны затопления и подтопления, а на их основе располагать инфильтрационные бассейны. Предложено проводить гидравлические расчеты совместной работы гидравлически связанных сооружений системы дождевого водоотведения: всех участков водоотводящей сети, емкостных сооружений (резервуаров, инфильтрационных бассейнов и т.п.), водоемов.

Ключевые слова: инфильтрационные бассейны, дождевые стоки, подтопления городских территорий, сооружения дождевого водоотведения.

УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СЕТЕЙ ДОЖДЕВОГО ВОДООТВЕДЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Введение. В последние годы в населенных пунктах наблюдается значительное подтопление и затопление их территорий. Известно, что причинами этих явлений является не только изменения климата, которые способствуют выпадению дождей большой интенсивности, но и увеличение территорий с водонепроницаемыми покрытиями, нарушения в работе систем дождевого водоотведения и их несовершенство (Жук, 2011, ст. 26-31; ДЦИК УкрВОДГЕО, 2013; Ткачук, Сальчук, Олексиук, 2014, ст. 344-350). Затопление городских территорий, как правило, носит временный характер (как правило, не более 0,5-1 часа). Но убытки от него – значительные (затопление автомобилей, подвалов домов, размыв дорожных покрытий, разрушения зеленых насаждений, санитарное загрязнение территорий и т.д.). Подтопление же территорий наблюдается в течение более длительного времени, а на отдельных участках, даже – постоянно. Оно также приводит к затоплению подвалов домов, разрушению фундаментов зданий, инженерных коммуникаций, дорожных покрытий, зеленых насаждений и тому подобное.

Практика показывает, что затопление территорий могут возникать даже тогда, когда система дождевого водоотведения функционирует исправно, но городская территория имеет сложный рельеф (ДЦИК УкрВОДГЕО, 2013; Ткачук, Сальчук, Олексиук, 2014, ст. 344-350). Во многих случаях при дождях большой интенсивности, когда сети работают в напорном режиме, затопление территорий осуществляется через дождеприёмники и смотровые колодцы (Ткачук, Сальчук, Олексиук, 2014, ст. 344-350). Анализ таких условий затопления и подтопления городских территорий показал, что они обусловлены несовершенством городских систем дождевого водоотведения, вызванной допустимостью напорного режима в коллекторах (ДБН В.2.5-75: 2013), который недостаточно обоснован при их гидравлических расчетах. В частности, действующие методики расчетов дождевых сетей (ДБН В.2.5-75: 2013; Алексеев, Курганов, 2000; Константинов, Гижа, 2006; Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012) не предусматривают учета совместной работы всех участков по длине водоотводного коллектора.

Основная часть. Проблемами изучения условий формирования дождевого стока на городских территориях, работы систем дождевого водоотведения и их расчетов занимались такие ведущие ученые как Большаков В.О., Жук В.М. (Ткачук, Жук, 2012), Константинов Ю.М. (Константинов, Гижа, 2006), Пантелят Г.С., Абрамов Л.Т., Алексеев М.И. (Алексеев, Курганов, 2000), Белов Н.Н., Горбачев П.Ф., Дикаревский В.С., Курганов А.М. (Дикаревский, Курганов, Нечаев, Алексеев, 1990), Молоков М.В., Ferguson B. (Ferguson, 2005), Horton R., Królikowska J., Królikowski A. (Królikowska, Królikowski, 2012), Mays L.W. (Mays, 2001), Rossman L.A. (Rossman, 2007), Weitman D., Weinberg A., Goo R. (Weitman, Weinberg, Goo, 2008, p. 1-10) и др. Эти ученые внесли значительный вклад в исследование процессов формирования расчетных расходов дождевого стока различными методами, в частности, предельной интенсивности, исследования отдельных методов и режимов работы сооружений для регулирования дождевого стока. Однако, не решенными остаются вопросы оптимизации работы систем

дождевого водоотведения на основе системного подхода к регулированию (сбора и отвода) и очистки дождевого стока.

На сегодня большое значение приобретают методы регулирования дождевого стока, позволяющие аккумулировать дождевые осадки непосредственно в местах выпадения, поскольку больше способствуют поддержанию водного баланса, не допуская подтопления территорий, уменьшают максимальные нагрузки на существующие системы водоотведения и задерживают загрязнения. Одним из таких методов является устройство инфильтрационных бассейнов с последующим дренированием задержанных дождевых вод в трубопроводы системы водоотведения (Ткачук, Шевчук, 2016, ст. 38-41; Ткачук, Шевчук, 2016, ст.100-105).

Комплексное решение проблем регулирования дождевого стока на урбанизированных территориях предусматривает проведение исследований с целью усовершенствования методов расчетов и инженерных подходов к устройству отдельных сооружений городских систем дождевого водоотведения. Среди основных направлений таких исследований следует выделить:

- ✓ формирование расчетных расходов и объемов дождевых вод в местах их накоплений и отвода;
- ✓ расчеты совместной работы сооружений водоотведения для наиболее характерных режимов поступления дождевых вод;
- ✓ аккумулирования дождевых вод и очистки их от загрязнений.

Процесс формирования дождевого стока зависит от многих природных (интенсивность и продолжительность дождя и междождевых периодов, рельеф местности, гидрологические режимы водоемов) и технических факторов (состояние дождевой сети, характеристики покрытий и грунтов на городских территориях, условия выпуска дождевых вод в водоемы и т.п.). По отечественным нормативам (ДБН В.2.5-75:2013; ДСТУ-Н Б В.2.5-61:2012) расчетные расходы дождевых вод определяют по методу предельных интенсивностей, а изменения их величин во времени – на основании гидрографов стока в контрольных точках (Алексеев, Курганов, 2000; Дикаревский, Курганов, Нечаев, Алексеев, 1990). Научные основы построения гидрографов стока дождевых вод с городской территории предусматривают построение модели стока с определением зависимостей выпадения дождей и формирования стока, ограничений к их применению и принятия обоснованных допущений и упрощений, без которых модель будет сложной, или вообще невозможной (Матлай, 2013; Ткачук, Жук, 2012; (Weitman, Weinberg, Goo, 2008, p. 1-10).

В основу модели стока положен метод предельных интенсивностей, по которому расчетную продолжительность дождя, как правило, принимают равной длительности протекания поверхностных вод с отдаленной точки бассейна стока к расчетной контрольной точке системы, а приток дождевых вод – пропорциональным площади стока. При этом для водоотводных коллекторов приток дождевых вод по их длине принимают равномерным, а территорию стока – равномерно расположенной вдоль коллектора (Алексеев, Курганов, 2000; Дикаревский, Курганов, Нечаев, Алексеев, 1990; Ткачук, Ярута, 2018, ст. 432-439).

Для установления зависимости **объемов дождевых вод**, которые должны быть задержаны в инфильтрационных бассейнах $W'_{рег}$, от величин снижения фактических расходов $q'_{ф}$ проведено численное моделирование изменения гидрографов стока дождевых вод при $q'_{ф} = 0,1 - 1,0$ в диапазоне рабочих значений

продолжительности протекания по поверхности $t'_{нов} = 0,2 \div 0,3$ и по трубопроводу $t'_{мп} = 0,7 \div 0,8$. По результатам моделирования (Ткачук, Ярута, 2018, ст. 432-439) получена формула для определения относительных регулирующих объемов $W'_{рег}$ от относительных фактических расходов $q'_{ф}$, адекватность которой подтверждено высокими корреляционными связями с числовыми данными ($R^2 > 0.998$)

$$W'_{рег} = t'_{мп} \cdot (q'_{ф} - 1)^2 - t'_{нов} \cdot (q'_{ф} - 1). \quad (1)$$

Данные моделирования показали, что результаты расчетов по формуле (1) практически совпадают с соответствующими величинами численного моделирования (Ткачук, Ярута, 2018, ст. 63-74). Для практических расчетов необходимо определить пропускную способность коллектора (относительно максимального расхода гидрографа стока в его расчетной точке) и продолжительности поверхностной концентрации и прохождения воды по коллектору расчетной точки (относительно расчетной продолжительности дождя).

Для определения пропускной способности коллектора при построении гидрографов стока важным является нахождение значений объема дождевого стока, формирующегося в каждой зоне площадей сбора дождевых вод, определения фактической пропускной способности коллектора без затопления территорий и регулирующих объемов, которые необходимо задерживать в инфильтрационных бассейнах (Ткачук, Ярута, 2018, С. 63 - 74).

Но **основной целью** при регулировании дождевого стока остается проведения гидравлического расчета совместной работы комплекса сооружений дождевого водоотведения с включением в их работу сооружений регулирования дождевого стока, в частности инфильтрационных бассейнов.

Пропускную способность существующего или проектного коллектора системы дождевого водоотведения нужно оценивать на основе **расчетов совместной работы** всех взаимодействующих водоотводных сооружений для наиболее характерных режимов поступления дождевых вод. При этом отдельные коллекторы могут работать, как в безнапорном, так и напорном режимах (ДБН В.2.5-75: 2013; Алексеев, Курганов, 2000; (Дикаревский, Курганов, Нечаев, Алексеев, 1990; Ткачук, Сальчук, Олексюк, 2014, ст. 344-350; Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012), а при их гидравлических расчетах важно определение не только расходов и скоростей воды в зависимости от уклонов коллекторов, но и пьезометрических отметок в узлах, как при безнапорном, так и, особенно, при напорном движении воды. Это необходимо не только для высотного размещения и соединения коллекторов, но и для анализа совместной работы участков сети, оптимизации отдельных ее параметров, определение возможных зон затопления городских территорий и тому подобное. Учитывая, что большинство сетей водоотведения современных городов является трубопроводами, для их гидравлических расчетов рекомендуется зависимость (Ткачук, Ярута, 2017, ст. 165-172; Ткачук, Ярута, Шуминский, 2016, ст. 259-267)

$$I = k \cdot \frac{q^\beta}{d^m} \cdot k_{h/d} \quad (2)$$

где k , β та m – коэффициент и показатели степени, которые зависят от шероховатости внутренней поверхности труб, которая в свою очередь зависит от материала труб, количества и типа отложений на стенках и т.д.; q – расчетные расходы воды, м³/с, або л/с; d – расчетный внутренний диаметр или другая

величина размера коллектора, м, или мм; $k_{h/d}$ – коэффициент, зависящий от наполнения трубопровода и определяется по формуле

$$k_{h/d} = a + b \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{\gamma} \quad (3)$$

Численные значения коэффициентов и показателей степени в формулах (2) и (3) зависят от величин шероховатости внутренней поверхности труб и рабочего диапазона гидравлических режимов (Константинов, Гижа, 2006; Лукиных, Лукиных, 1987; Ткачук, Ярута, 2017, ст. 165- 172) Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012). Коэффициент $k_{h/d}$ также зависит от размерности параметров q и V . Однако по структуре формула (2) аналогична распространенным в мировой практике формулам для расчетов напорных трубопроводов (Константинов, Гижа, 2006; Mays, 2001; Rossman, 2007; Tkachuk, Pilipaka, Azizova, 2018, p. 680-685; Weitman, Weinberg, Goo, 2008, p. 1-10).

Для практического применения значения коэффициентов и показателей степени в формулах (2) и (3) определяли путем аппроксимации числовых данных массива гидравлических уклонов I , рассчитанных по рекомендованным действующим нормативам (ДБН В.2.5-75:2013; ДСТУ-Н Б В.2.5- 61:2012) формулами в пределах заданных диапазонов параметров: скорости $V = 0,5-4,0$ м/с; диаметров $d = 0,15-2,5$ м; кинематической вязкости воды $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, которая характерна для сточной воды с температурой $t = 11-12$ °С при количестве взвешенных веществ до 400 мг/л; шероховатости внутренней поверхности труб $\Delta e = 0,002$ м ($n = 0,014$; $a_2 = 100$), наиболее распространена в коллекторах водоотведения, в том числе из бетонных и железобетонных труб (ДБН В.2.5-75: 2013; Алексеев, Курганов, 2000; Дикаревский, Курганов, Нечаев, Алексеев, 1990; Лукиных, Лукиных, 1987; Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012). Кроме того, для определения параметров a , β и γ было учтено (Ткачук, Ярута, 2017, ст. 165-172; Ткачук, Ярута, Шуминский, 2016, ст. 259-267) не только зависимость гидравлических показателей (гидравлический радиус, смоченный периметр и т.д.) от величин наполнения трубопроводов h/d , но и влияние гидродинамических характеристик потока на величины расхода воды в трубопроводах при их частичном наполнении (Константинов, Гижа, 2006). На рис. 1 приведены расчетные значения коэффициента $k_{h/d}$, учитывающий величину наполнения трубопровода h/d . В результате были получены следующие значения поисковых параметров: $k = 0,002087$; $\beta = 1,96$; $m = 5,23$; $a = 0,74$; $b = 0,74$; $\gamma = -3,92$ (Ткачук, Ярута, 2017, ст. 165-172; Ткачук, Ярута, Шуминский, 2016, ст. 259-267).

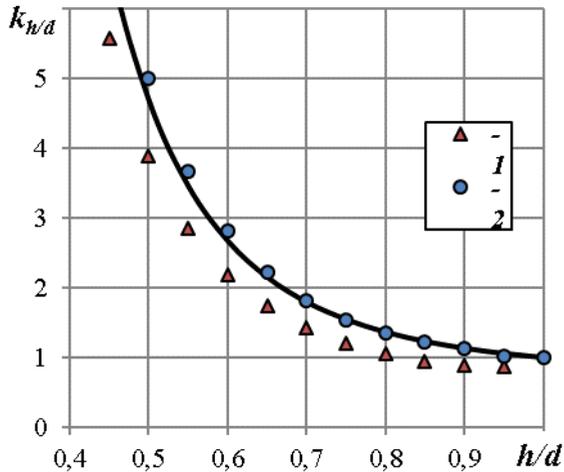


Рис. 1. Зависимость коэффициентов $k_{h/d}$ от наполнения трубопровода h/d и влияния гидродинамических характеристик потока:

1 – точки численного моделирования без учета влияния гидродинамики потока; 2 – тоже, с учетом этого влияния; 3 – расчетные значения $k_{h/d}$, полученные по формуле (3)

Учитывая, что действующие практические рекомендации для гидравлических расчетов канализационных сетей (ДБН В.2.5-75: 2013, ДСТУ-Н Б В.2.5-61: 2012; Константинов, Гижса, 2006; Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012) базируются на несколько отличных между собой условиях работы трубопроводов водоотведения, что очевидно связано с различными исходными условиями исследований, применение в степенной формуле принятых числовых значений параметров, соответствующих наиболее распространенным условиям работы трубопроводов дождевого водоотведения, вполне целесообразно.

Полученные зависимости (2) и (3) позволяют достаточно просто учитывать совместную работу не только различных участков одного коллектора или разветвленной сети из нескольких коллекторов, но и подключенных к ним регулирующих сооружений или водоемов. Для этого при известных гидрографах стока каждого участка следует определить расчетный максимальный расход воды, который он должен пропустить. Учитывая, что в принятой модели формирования дождевого стока расчетные расходы дождевых вод q_i , л/с, определены согласно нормативу (ДБН В.2.5-75: 2013), для дальнейших расчетов может быть пригодна формула (4). При этом продолжительность дождя $t_{d,i}$ целесообразно принимать равной ее среднему значению для данной местности. Обычно, для условий Украины эта величина составляет 30-90 мин.

$$q_i = z_{mid} \cdot \frac{A^{1.2}}{t_{d,i}^{1.2n-0.1}} \cdot F_i = q_0 \cdot F_i, \quad (4)$$

где z_{mid} – среднее значение коэффициента стока, зависит от видов покрытий отдельных частей территории стока и их долей в площади бассейна стока;

A и n – параметры, учитывающие географическое положение города и период P , года, однократного превышения расчетной интенсивности дождя;

q_0 – удельная интенсивность дождя, л/с/га.

Такой подход позволяет получить расчетную нагрузку сразу на всю сеть водоотведения и ее гидравлические расчеты проводить, начиная не от начальных точек сети, как это имеет место в действующих методиках (ДБН В.2.5-75: 2013; Алексеев, Курганов, 2000; (Дикаревский, курганов, Нечаев, Алексеев, 1990; Яковлев, Карелин, Жуков, Колобанов, 2012), а с ее конечных точек, то есть от мест выпуска дождевых вод в очистные сооружения, резервуары или водоемы. Это позволяет расчеты начинать от известных, независимых от результатов гидравлических расчетов сети, значений отметок воды в этих сооружениях и выявить участки коллекторов с напорными и безнапорными режимами работы, а также потенциальные зоны подтопления и затопления. Для этого на основе гидравлических расчетов достаточно получить расчетные значения гидравлических уклонов I на каждом участке сети и пьезометрические отметки в ее расчетных точках (рис. 2). В расчетах каждого участка коллектора в первую очередь принимают, что гидравлический уклон I в коллекторе равен уклону его лотка I_l . Тогда из формулы (2) при $I = I_l$ определяют значение коэффициента $k_{h/d}$. Учитывая, что по своей сути коэффициент наполнения коллектора находится в диапазоне $k_{h/d} \geq 1.0$ (рис. 1), полученное значение $k_{h/d}$ меньше 1.0, указывает на то, что трубопровод работает в напорном режиме, а гидравлический уклон в нем при данном расходе будет больше уклона лотка коллектора $I > I_l$. Расчетное значение гидравлического уклона определяют по формуле (2) при $k_{h/d} = 1.0$, что соответствует полному наполнению коллектора, то есть $h/d = 1.0$. Если же при $I = I_l$ было получено, что $k_{h/d} \geq 1.0$, то значение h/d определяют с формулы (3).

Значение пьезометрических отметок в начале каждой (i -той) участка коллектора рассчитывается по формуле

$$P_{n,i} = P_{к,i} + I_i \cdot l_i, \quad (5)$$

где $P_{к,i}$ – пьезометрическая отметка в конце i -того участка;

I_i – гидравлический уклон на i -том участке;

l_i – геометрическая длина i -того участка.

Значение пьезометрической отметки в конце предыдущей за движением дождевого стока участка принимают равным полученной величине $P_{к,i}$. На рис. 2 приведена схема коллектора с 3-х участков. Расчеты начинают с последнего за движением воды по коллектору участка (3-й), принимая значение пьезометрической отметки в его конце равной отметке уровня воды в сооружении или водоеме, в которые направляют дождевой сток ($P_{к,3} = Z_6$).

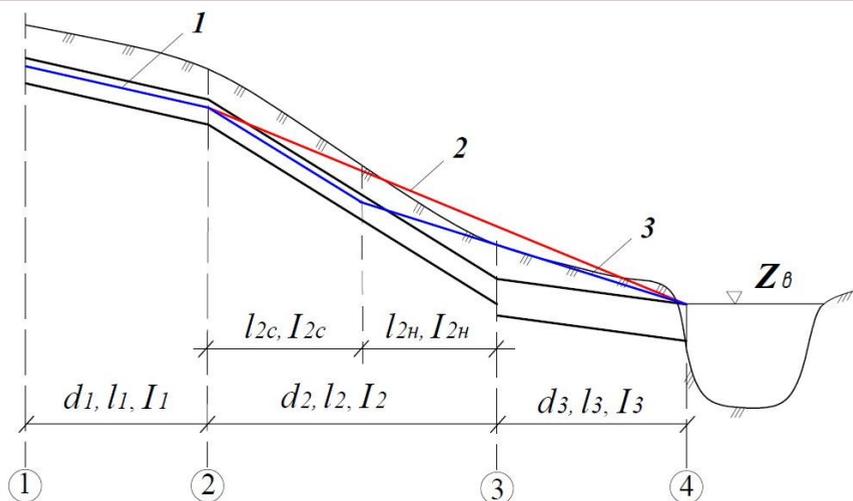


Рис. 2. Расчетная схема напорно-самотечного режима работы коллектора дождевой сети

1 – расчетный уровень воды на самотечном участке коллектора; 2 – пьезометрическая линия напорного режима движения дождевых вод при затоплении территории; 3 – тоже, без затопления территории; 1, 2, 3, 4 (в кружках) – расчетные точки участков коллектора

Расчеты по схеме коллектора, приведенной на рис. 2, показывают, что при увеличении в процессе эксплуатации расходов на участке 3 (например, через уплотнения застройки и увеличения площадей городской территории с водонепроницаемыми покрытиями) он будет работать в напорном режиме. При увеличенных расходах воды вокруг расчетной точки 3 может возникнуть зона затопления, так как пьезометрическая отметка в этой точке (линия 2) будет выше поверхности земли. Для устранения затопления территории необходимо уменьшить расход на участке 3 таким образом, чтобы пьезометрическая линия (на рис. 2 линия 3) по всей трассе коллектора проходила ниже поверхности земли. При этом отдельные участки (на рис. 2 участок 2) будут работать в самотечном и напорном режимах.

Полученные новые значения расхода воды на отдельных участках коллектора будут отвечать предельным расходам пропускной способности соответствующего участка коллектора. При этом избыточные расходы воды необходимо направить в инфильтрационные бассейны. Их объемы рассчитывают по формуле (1) (Ткачук, Ярута, 2019, ст. 112-126), а места расположения определяют выше возможного затопления территорий. На рис. 3 приведен пример определения возможных мест расположения инфильтрационных бассейнов на территории жилого массива. Для определения конкретного места их расположения необходимо выяснить возможность проведения необходимых земляных работ на нужную глубину и отвода воды из них самотеком в существующие водоотводные сети.

Расчеты совместной работы сооружений дождевого водоотведения показывают, что опорожнение инфильтрационных бассейнов после окончания дождя не приводит к подтоплению или затоплений городских территорий, так как

расходы, поступающие от любого инфильтрационного бассейна всегда меньше, чем те, которые поступают к нему для временного задержания (Ткачук, Шевчук, 2016, ст. 100-105).

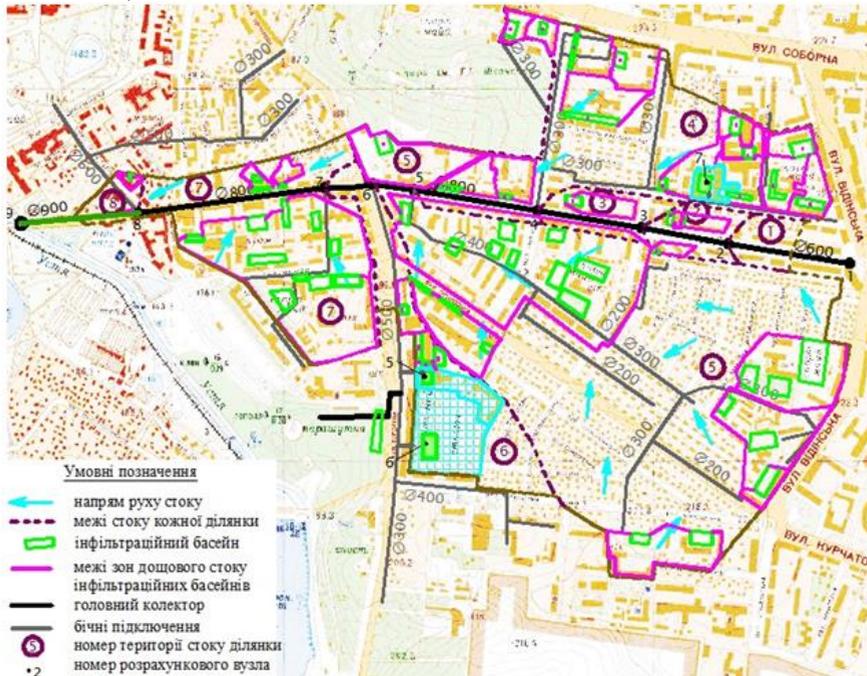


Рис. 3. Территория бассейна стока уличного коллектора с размещением инфильтрационных бассейнов и зон притока дождевых вод к ним

По украинским нормативам **гидравлические расчеты** проводят на пропуск сетью максимальных расходов воды, которые рассчитывают отдельно для каждого участка сети. При этом не учитывают совместную работу участков сети водоотведения и сооружений, с которыми они взаимодействуют, а напорные режимы рассматривают только в пределах отдельного участка с возможным поднятием уровня воды в ее верхнем колодце не выше поверхности земли.

Для **оценки совместной работы** комплекса сооружений дождевого водоотведения, в состав которого входит сеть водоотведения с n участков и p узлов и b инфильтрационных бассейнов, в пределах каждого бассейна стока территории города необходимо рассмотреть три взаимосвязанных системы уравнений: а) формирование расчетных расходов воды на участках водоотводной сети бассейна стока; б) гидравлического расчета сети водоотведения; в) регулировочной способности инфильтрационных бассейнов.

С учетом совместной работы комплекса сооружений дождевого водоотведения разработан программный модуль в среде Microsoft Excel, который ориентирован на проведение гидравлических расчетов взаимодействия существующих или ранее запроектированных, водоотводных коллекторов и сооружений. Гидравлические расчеты являются итерационными. Их начинают с конечной точки коллектора – точки выпуска стоков в водоем, регулирующее сооружение, или узла-соединение участка сети с ранее рассчитанного коллектора, а продолжительность дождя для определения расчетных расходов, предварительно – за минимально допустимыми скоростями движения сточных вод на выше

расположенных участках коллектора (ДБН В.2.5-75: 2013, п. 8.4.1, табл. б). На следующих итерациях скорости движения воды, продолжительность их протекания в коллекторах, а значит, и расчетная продолжительность дождя, подлежат уточнению. На рис. 4 приведен пример гидравлического расчета коллектора дождевого водоотведения на одной из улиц г. Ровно (с программного модуля).

К гидравлическому расчету включают: номера узлов U и участков сети в соответствии с ее расчетной схемы (рис. 3); длину L , диаметры d и уклоны труб I ; отметки поверхности земли, лотков труб в начале и в конце каждого участка; площади сбора воды F участков и их коэффициенты покрова Z_{mid} ; начальное значение продолжительности дождя t_d , которое на следующих итерациях уточняют в зависимости от расчетных величин продолжительности протекания воды в трубах t_{mp} ; коэффициенты снижения расчетных расходов дождевых вод за счет их регулирования k_q или k_{ϕ} ; расчетные расходы дождевых вод на участках: а) общие (без регулирования) $q_{r,i}$, уточнены (с учетом их регулирования) $q_{r,рег.i}$ и фактические q_{ϕ} , определяемых пропускной способностью коллектора сети; б) рабочие параметры участков сети: перепады высот, наполнение h/d , средние скорости V ; в) уклоны пьезометрических линий, значение пьезометрических отметок в узлах и их превышения над отметками поверхности земли.

Итерационные расчеты продолжают до тех пор пока не будет достигнуто условия: $q_{r,рег.i} \approx q_{\phi}$ при $k_q = 1$. Результаты расчета приведены в сводной таблице на рис. 4.

Бутик		Длина		Тривалість дощу, хв.		Площа збору води F, м²		Коефіцієнт покрову Zmid		Коефіцієнт kq або kφ		Розрахунок витрати води, л/с			Уклоны d, мм		Уклоны 1000к		Перепад висот iL, м		Позначки, м			Позначка рівня води в кінці колектора: H, м	Допустиме затоплення, 0,1			
U	L	t _{mp,i}	t _{d,i}	F _г	F _д	q _{r,i}	q _{r,рег,i}	q _{φ,i}	d _{труб}	d _{лотка}	I	h _{наповнення}	h _{вільного}	h _{всього}	h _{швидкості}	Пов. землі	Лотка	Пьезометр	Висота	Поч.	Кін.	Висота						
Ітерація 1 (можливе затоплення територій)																												
1	1-2	330	4,9	21,7	2,2	0,142	1,00	112,9	112,9	112,9	600	5,0	5,0	0,38	1,650	1,650	1,13	222,70	220,60	218,950	220,830	-1,87						
2	2-3	240	1,4	36,8	5,4	0,134	1,00	169,9	169,9	169,9	600	50,0	50,0	0,26	12,000	12,000	2,94	221,60	218,950	206,950	219,180	-2,42	- задані;					
3	3-4	285	1,5	36,8	8,9	0,144	1,00	304,9	304,9	304,9	600	40,0	40,0	0,37	11,400	11,400	3,21	209,00	206,872	195,472	207,180	-1,82	- визначенні;					
4	4-5	340	1,5	36,8	39,2	0,124	1,00	1148,2	1148,2	1148,2	800	25,0	25,0	0,59	8,500	8,500	3,75	198,50	195,214	186,714	195,780	-2,72	- відкорегова					
5	5-6	115	0,9	36,8	117,1	0,105	1,00	2915,1	2915,1	1081,3	800	6,0	54,5	1,00	0,690	6,269	2,15	189,60	186,514	185,134	189,700	0,10	- розрахован					
6	6-7	130	1,0	36,8	130,7	0,105	1,00	3253,1	3253,1	1081,3	800	6,0	67,7	1,00	0,780	8,799	2,15	188,80	185,134	184,484	188,801	0,00						
7	7-8	510	4,0	36,8	152,5	0,107	1,00	3868,8	3868,8	1081,3	800	6,0	95,1	1,00	3,060	48,483	2,15	187,90	184,484	181,934	187,786	-0,11						
8	8-9	320	2,3	36,8	154,2	0,107	1,00	3923,8	3923,8	1480,6	900	5,0	52,8	1,00	1,600	16,891	2,33	187,60	181,934	180,334	183,800	-3,80						
9	-	t _d =	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181,30	182,20	-	-	181,300	-0,90	
Ітерація 4 (регулювання з уточненим фактичним витрат води на ділянках)																												
1	1-2	330	4,9	21,7	2,2	0,142	1,00	112,9	112,9	112,9	600	5,0	5,0	0,38	1,650	1,650	1,13	222,70	220,60	218,950	220,830	-1,87						
2	2-3	240	1,4	39,5	5,4	0,134	1,00	160,8	135,9	135,9	600	50,0	50,0	0,23	12,000	12,000	2,76	221,60	218,950	206,950	219,180	-2,42						
3	3-4	285	1,6	39,5	8,9	0,144	1,00	288,5	241,6	241,6	600	40,0	40,0	0,33	11,400	11,400	3,00	209,00	206,872	195,472	207,180	-1,82						
4	4-5	340	1,8	39,5	39,2	0,124	1,00	1086,5	555,1	555,1	800	25,0	25,0	0,38	8,500	8,500	3,12	198,50	195,214	186,714	195,780	-2,72						
5	5-6	115	0,9	39,5	117,1	0,105	1,00	2756,8	983,4	1081,3	800	6,0	6,5	1,00	0,690	0,746	2,15	189,60	186,514	185,134	189,700	0,10						
6	6-7	130	1,0	39,5	130,7	0,105	1,00	3078,5	1080,4	1081,3	800	6,0	7,8	1,00	0,780	1,014	2,15	188,80	185,134	184,484	188,801	0,00						
7	7-8	510	4,0	39,5	152,5	0,107	0,87	3661,2	1083,2	1081,3	800	6,0	7,8	1,00	3,060	3,999	2,15	187,90	184,484	181,934	187,786	-0,11						
8	8-9	320	2,3	39,5	154,2	0,107	1,00	3713,3	1291,1	1480,6	900	5,0	6,0	1,00	1,600	1,912	2,33	187,60	181,934	180,334	183,800	-3,80						
9	-	t _d =	39,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181,30	182,20	-	-	181,300	-0,90	

Рис. 4. Гидравлический расчет совместной работы комплекса сооружений дождевого водоотведения

Вывод

С целью снижения пиковых нагрузок на существующие сооружения дождевого водоотведения, устранения причин подтопления и затопления территорий и очистки дождевых вод предложено временно их задерживать в местах выпадения с помощью инфильтрационных бассейнов. Предложено гидравлические и оптимизационные расчеты совместной работы сетей

водоотведения проводить на основе уточненной степенной формулы с коэффициентом наполнения трубопровода. Формула позволяет одновременно рассчитывать как напорные, так и безнапорные коллекторы водоотведения.

На основе уточненной степенной формулы предложен новый подход к гидравлическим расчетам сетей дождевого водоотведения, который предусматривает расчеты их совместной работы вместе с взаимодействующими сооружениями. Это позволяет выявлять зоны возможного затопления и подтопления городских территорий и эффективно располагать на них инфильтрационные бассейны. Приведен пример гидравлического расчета совместной работы комплекса сооружений дождевого водоотведения.

References:

1. Ferguson B. K. (2005). *Porous Pavement: Integrative studies in water management and land development*. Boca Raton: CRC Press. 600 p.
2. Królikowska J., Królikowski A. (2012). *Wody opadowe. Odprowadzanie zagospodarowanie podczyszczanie. Piaseczno* : Wydawnictwo Seidel-Przywecki, 115 s.
3. Mays L.W. (2001). *Storm water collection systems design hand book*. McGraw-Hill Professional. Arizona: Arizona State University. 1008 p.
4. Olexander Tkachuk, Yana Yaruta, Olha Shevchuk, Anna Azizova (2018). Theoretical Bases of the Compatible Work of the Construction of Stormwater Drainage Systems in the Regulation of Stormwater Runoff. UAE: International Journal of Engineering & Technology. 7 (4.8). P. 432-439.
5. Rossman, L. A. (2007). *Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency*. Cincinnati: EPA/600/R 05/040. 265 p.
6. Tkachuk A., Pilipaka L., Azizova A. (2018). Optimization of City Water Supply Networks on Their Structural and Functional Analysis Base. UAE: International Journal of Engineering & Technology. № 7 (3.2). P.680-685.
7. Weitman D., Weinberg A., Goo R. (2008). Reducing Storm water Costs through LID Strategies and Practices. *Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*. Washington: American Society of Civil Engineers. P.1-10.
8. Алексеев М.И., Курганов А.М. (2000). Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. *Учебное пособие*. Москва : АСВ, Санкт-Петербург : СПбГАСУ. 352 с.
9. Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И. (1990). Отведение и очистка поверхностных сточных вод. *Учеб. пособие для вузов*. Ленинград : Стройиздат, 1990. 224 с.
10. Жук В.Н. (2011). Современные системы управления дождевым стоком на застроенных территориях. *Научно-технический сборник КНУСА. Проблемы водоснабжения, водоотведения и гидравлики*. Киев: КНУСА. Вып. 17. С. 26-31. [Укр.]
11. Канализация. Внешние сети и сооружения. Основные положения проектирования. ДБН В.2.5-75: 2013. [Введения 2014-01-01. Издание официальное]. Киев: Минрегион Украины, 211 с. [Укр.].
12. Константинов Ю.М., Гиза О.О. (2006). *Инженерная гидравлика*. Киев: Издательский дом «Слово». 432 с. [Укр.]
13. Лукиных А.А., Лукиных М.А. (1987). Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского. Москва : Стройиздат. 159 с.
14. Матлай И.И. (2013). Совершенствование методов расчета гидрографов притока дождевых сточных вод. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16*. Ровно: НУВХП. 20 с. [Укр.].

15. Руководство по устройству систем поверхностного водоотведения. ДСТУ-Н Б В.2.5-61: 2012. [Введения 2012-10-01. Издание официальное]. Киев: Минрегион Украины, 30 с. [Укр.].
16. Проведение исследований по пропускной способности систем поверхностного водоотведения в современных природных условиях (2013). *Отчет о НИР*. Харьков: ДЦИК УкрВОДГЕО. 60 с. [Укр.].
17. Ткачук А. А., Шевчук А. В. (2016). Условия формирования дренажных расходов, поступающих в систему дождевого водоотведения после инфильтрационных площадок. *Вестник НУВХП. Технические науки*. Ровно: НУВХП. Вып. 1 (73). С. 100-105. [Укр.].
18. Ткачук А. А., Ярута Я.В., Шуминский В.Д. (2016). Обоснование формул и их параметров для оптимизационных расчетов сетей дождевого водоотведения. *Вестник НУВХП. Технические науки*. Ровно: НУВХП. Вып. 4 (76). С. 259 - 267. [Укр.].
19. Ткачук А.А., Сальчук В.Л., Олексюк А.В. (2014). Оценка причин затопления канализованных городских территорий дождевыми водами. *Вестник НУВХП. Технические науки*. Ровно: НУВХП. Вып. 1 (65). С. 344 - 350. [Укр.].
20. Ткачук А.А., Шевчук А.В. (2016). Конструктивные особенности инфильтрационных площадок с водопроницаемыми покрытиями. *Наука и строительство*. Киев: КНУСА, Вып. 1. С. 38-41. [Укр.].
21. Ткачук А.А., Ярута Я.В. (2019). Инфильтрационные бассейны с щебеночным загрузкой и растительным верхним слоем в системах дождевого водоотведения. *Вестник НУВХП. Технические науки: сб. науч. трудов*. Ровно: НУВХП. Вып. 2 (86). С. 112-126. [Укр.].
22. Ткачук А.А., Ярута Я.В. (2017). Уточненные формулы для расчетов трубопроводов сетей водоотведения. *Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры*. Одесса: ОГАСА. Вып. 68. С. 165-172. [Укр.].
23. Ткачук А.А., Ярута Я.В. (2018). Особенности формирования дождевого стока на городских территориях. *Вестник НУВХП. Технические науки: сб. науч. трудов*. Ровно: НУВХП. Вып. 1 (81). С. 63 - 74. [Укр.].
24. Ткачук С., Жук В.Н. (2012). Регулирование дождевого стока в системах водоотведения. [Монография]. Львов Львовская политехника. 216 с. [Укр.].
25. Яковлев С.В., Карелин Я.А., Жуков А.И., Колобанов С.К. (2012). *Канализация*. Москва. 633 с.