

**А.М. Жихарев**

### **Расчет плоскостного поверхностного стока дождевых вод с урбанизированных территорий центральной части г. Ярославля (Часть I)**

Сделана попытка оптимизации методики количественной оценки запасов дождевых и талых снеговых вод территории города с учетом его особенностей как стокообразующей поверхности.

**Ключевые слова:** фактор стока, сток, стокообразующая поверхность, расход, водосбор, урбанизированная территория, коэффициент стока.

**A.M. Zhikharev**

### **Calculation of a Plane Superficial Drain of Rain Waters from the Urbanized Central Territories of Yaroslavl (Part I)**

Is made an attempt to optimize quantitative estimation techniques of rain and thawed snow waters' reserve of the city territory taking into consideration its features as a surface forming a drain.

**Key words:** a factor of a drain, drain, a surface forming a drain, charge, a reservoir, a urbanized territory, a coefficient of drain

Направления и задачи исследований зачастую обусловлены не только необходимостью разрешения конкретной ситуации в теоретическом либо в прикладном плане, но и всем ходом развития науки, а вернее особенностями современного ее этапа. Последнее как раз нередко и определяет значимость исследования, его востребованность и актуальность.

Если на первых этапах становления географии она отвечала на вопросы «где?» (описательный, или инвентаризационный, этап – время накопления знаний о мире, создание своего рода базы данных) и «что?» (то есть проникновение в суть объектов и явлений и обретение возможности их объяснения), то на современном этапе, который можно назвать прикладным, наука находится перед необходимостью организации пространства, управления природными системами на основе ответов на вопрос «как?» и выходит, таким образом, на уровень управления человеческой деятельностью в рамках природных ограничений, то есть в настоящее время географическое исследование особенно значимо, когда оно решает практические вопросы.

Иными словами, назрела необходимость реорганизации территории и деятельности, с ней связанной, на базе изучения ее в большом и разнообразном комплексе ресурсов, условий и огра-

ничений и составления прогнозов ее развития. Последние очень важны как для определения приоритетов регионального развития, так и для оценки возможностей, предпосылок и проблем их реализации.

Одним из направлений практического решения вышеуказанных проблем является моделирование вариантов регионального природопользования, включая и его отдельные компоненты. К таковым, например, относится и изучение закономерностей формирования поверхностного стока, знание которых необходимо для целей грамотной организации территории, как интегральной географической системы.

Понимание этих закономерностей поможет в частности обеспечить эффективность управления системой поверхностного стока, которая особенно актуальна для урбанизированных территорий, поскольку именно там назрел целый ряд проблем, требующих порой безотлагательного решения. Это, в первую очередь, комплекс собственно экологических проблем (например, проблема воздействия городской среды на речной сток, качество и режим подземных вод, накопление загрязняющих веществ в грунте), более частные хозяйственно-экологические вопросы (суффозионные просадки грунта, подтопление, эрозия городских почвогрунтов) и задачи хозяй-

ственного характера (организация ливневой канализации, управление интенсивностью и концентрацией стока, устройство бассейнов-накопителей).

Необходимо также учесть и происходящую в последнее время переоценку земель для целей перепланировки и реорганизации городских территорий, грамотное осуществление которой предполагает информацию о целом ряде различных параметров этих территорий и, в том числе, поверхностного стока.

Таким образом, изучение возможностей количественной оценки особенностей формирования поверхностного плоскостного стока с урбанизированных территорий является достаточно интересной исследовательской задачей, в процессе решения которой надо иметь в виду два таких взаимосвязанных аспекта, как своеобразие города как стокообразующей поверхности, во-первых, и обусловленные этим требования к методикам расчета величины стока, во-вторых.

Город представляет собой сложную специфическую антропогенно-измененную систему, где проявление, направленность, интенсивность физико-географических явлений и процессов в значительной степени отличаются как от собственно природных, так и от сельских экосистем.

В частности, в городе несколько видоизменен режим осадков, а также их количество, это и изменение температурного режима и иной характер накопления и перераспределения влаги. В городской черте наблюдается значительно большее разнообразие стокообразующих факторов (например, тип подстилающей поверхности или рельеф, особенно если к нему относить объекты городской застройки), многие из которых представляют собой исключительно элементы урбосистем, еще одним значимым отличием которых является более высокая мозаичность в их распределении. А потому ни сам подход к изучению стока, ни расчетные показатели, ни рабочие формулы, используемые для расчета стока с речных водосборов или сельских территорий, в существующем виде не могут считаться в полной мере пригодными в расчетах городского стока.

Прежде всего, это связано с тем, что необходимость учета внутригородских различий величины поверхностного стока, особенно важная в условиях пространственной пестроты стокообразующих факторов, предполагает такой подход к его расчету, при котором городская территория рассматривается не иначе как сеть элементарных стокообразующих поверхностей, размеры кото-

рых обеспечивают однородность (близость) хотя бы основных стокообразующих показателей. Это предполагает большие серии расчетов, для которых существующие формулы слишком неудобны, так как весьма громоздки, их переменные требуют сложных длительных расчетов, часто со вспомогательными геометрическими построениями, в связи с чем их очень сложно использовать на практике.

Кроме того, часто не всегда удается найти требующиеся для расчетов ряды данных (некоторые коэффициенты для городских территорий либо не рассчитаны, либо весьма приблизительны) или величины необходимых показателей, которые к тому же могут часто изменяться, что естественным образом требует корректировки переменных без изменения структуры расчетных формул. Существующие же формулы в своем большинстве не могут быть быстро оптимизированы при уточнении или поступлении новых данных (например, при пересчете какого-либо параметра для конкретной территории), а вместе с тем, не учитывают одновременно все параметры тех факторов, от которых зависит сток. Надо отметить и то, что в связи с ведомственной разрозненностью способы расчета отдельных стокообразующих параметров, отражающие определенные узкопрофильные аспекты стокообразования, не приведены к единым теоретическим основаниям и не исходят из общей фактологической базы.

Таким образом, существует объективная потребность в обеспечении точной оценки поверхностного стока с возможностью учета через переменные всех его важнейших параметров, способствующей удобству и скорости расчета, и возможностью независимой корректировки переменных без изменения структуры самой формулы.

Главным параметром стока в гидрологии является расход – количество воды, которое протекает через сечение площадью  $S$  ежесекундно. Именно его расчет и позволяет получить количественные характеристики стока дождевых и талых снеговых вод.

До настоящего времени использовалось множество формул для расчета расхода дождевых вод, наиболее адаптированными из которых являются формулы, используемые для проектирования городских водоотводящих систем. Наиболее удобной из них является формула итальянского инженера Мальвани, которую он предложил еще в 1851 году:

$$Q_{max} = \psi F_c Q_k,$$

где  $Q_{\max}$  – расход (л/с),  $\psi$  – коэффициент стока,  $F_c$  – площадь бассейна стока ( $m^2$ ),  $q_k$  – средняя интенсивность дождя (л/с).

Однако ее использование предполагает большое количество параметров, которые в определенных случаях не могут быть найдены при тех или иных условиях, либо их расчет весьма трудоемок. Таким образом, возникла необходимость разработки оптимизированной методики расчета количественных показателей поверхностного стока для городских территорий, не только включающей математическое моделирование, но и предполагающей возможность учета географических особенностей конкретной территории.

Коэффициент стока  $\psi$  – это отношение максимального расхода стока определенной повторяемости к общему количеству воды, выпавшей на ту же площадь в единицу времени при средней интенсивности осадков той же повторяемости. Конечная формула расчета коэффициента стока выглядит следующим образом:

$$\psi = A^{0,2} z / t^{0,2n-0,1}.$$

Расчет  $\psi$  по формуле представляется нерациональным из-за неудобства некоторых переменных, слишком чувствительных к другим параметрам. Например, параметр  $A$  чрезвычайно заметно реагирует на незначительные изменения периодов превышения интенсивности дождя (степень  $n$ ) и интервала времени  $t$ , поэтому невозможно делать какие-либо обобщения о распределении этого параметра по территории.

Более рациональным представляется использование табличных значений  $\psi$ . В результате исследований, проведенных в 1932–34 гг. под руководством И.Н. Белова и в 1939–40 гг. и 1946 г. Л.Т. Абрамовым, были практически установлены средние значения коэффициентов стока для разных видов поверхностей вне зависимости от характера дождя.

Дожди, выпавшие даже в одной местности, различаются по количеству осадков, продолжительности и интенсивности, поэтому при рассмотрении комплекса дождей, выпадающих на данной местности, необходимо характеризовать дождь и с точки зрения вероятности выпадения. Зная, по данным многолетних наблюдений, для соответствующего пункта высоту слоя суточных осадков заданной обеспеченности  $H_p$ , с помощью районных расчетных кривых средней интенсивности дождя  $q(\tau)$  может быть определена расчетная интенсивность выпадения дождей  $q$  заданной обеспеченности  $q_p$  за любой интервал времени  $\tau$ :

$$q = H_p q(\tau).$$

В СССР и впоследствии в России для расчетов была принята длительность дождя, равная 20 минутам. Предел применения по обеспеченности был выбран  $25 \leq P_{об} \leq 50$ , так как именно в этом пределе согласно теории вероятностей наиболее возможны максимальные и близкие к таковым осадки.

В итоге формула для расчета суточных осадков различной обеспеченности выглядит следующим образом:

$$H_p = H(1 + C_v \Phi),$$

где  $H$  – средний слой осадков в мм,  $C_v$  – коэффициент вариации,  $C_s$  – коэффициент асимметрии. Коэффициент  $\Phi$  зависит от предыдущих двух коэффициентов.

Все значения коэффициентов можно найти по таблицам, зная предел их применения по обеспеченности  $p$  в процентах. Для нахождения слоя суточных осадков различной обеспеченности в интервале  $25 \leq P_{об} \leq 50$ , например, в настоящем исследовании принимается значение  $p$  в 39% как усредненное в вышеуказанном интервале.

Таким образом, при выражении исходной формулы через принятые второстепенные переменные можно получить конечную формулу вида:

$$Q_{\max} = \psi F_c (H(1 + C_v \Phi) q(\tau)).$$

При практическом ее использовании некоторые переменные становятся возможным заменить числовыми значениями, общими для всей исследуемой территории, что ведет к существенной оптимизации процесса расчета. Например, при использовании формулы для расчета стока с территории исторической части города Ярославля для всех типов подстилающих поверхностей и для любых площадей при известных переменных  $H=33,6$  мм,  $C_v=0,38$ ,  $\Phi=0,06$ ,  $q_{(20)}=3,15$  она будет иметь следующий вид:

$$Q_{\max} = \psi F_c (33,6(1 + 0,38 \cdot 0,06) 3,15).$$

А при перемножении известных значений формула получает конечный вид применимо для города Ярославля:

$$Q_{\max} = \psi F_c 108,25.$$

Существенную роль в формировании поверхностного стока играют и твердые осадки, причем расход талых вод, в определенном смысле, рассчитать проще, так как он не зависит от суточных осадков различной обеспеченности и от интенсивности выпадения снега, будучи единовременным процессом таяния всего снега, который был аккумулярован за определенный период.

Средний расход (л/с) из максимальных стоков при весеннем снеготаянии с застроенных территорий площадью  $F$  (га) может быть определен по

формуле, предложенной М.И. Алексеевым и А.М. Кургановым:

$$Q=2,8i_{сн}Fk_y\psi_T\varphi,$$

где  $i_{сн}$  – максимальная интенсивность снеготаяния средней обеспеченности (мм/ч),  $\psi_T$  – коэффициент стока снеготаяния,  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий неравномерность снеготаяния и зависящий от площади водосбора,  $k_y$  – площадь, очищаемая от снега (включая площадь кровель, оборудованную внутренними водотоками (га)).

Однако в таком виде формула имеет некоторые недостатки, поскольку предложена для крупных водосборов (площадью более 100 км<sup>2</sup>), а потому не позволяет детализировать ситуацию по отдельным районам или более мелким фрагментам города, так как «нечувствительна» к дисперсности и мозаичности городской среды. В частности, формула не учитывает характер подстилающей поверхности (коэффициент стока), вместо него предложен коэффициент стока снеготаяния ( $\psi_T$ ), значения которого слишком унифицированы и принимаются для всех подстилающих поверхностей в пределах значений 0,5–0,8. Но так как именно коэффициент стока наиболее значительно влияет на расход, целесообразнее использовать именно его, поскольку именно этот коэффициент уточняет расчеты по разным типам поверхностей и дает, тем самым, более достоверные данные.

Кроме того, формула заведомо предполагает неточность сведений по коэффициенту  $k_y$ , поскольку площадь очищаемых от снега территорий весьма трудно подчиняется учету, а очищенный снег с улиц вывозится не весь и не всегда.

Использование для расчета среднего, а не максимального расхода тоже не повышает точность, поскольку для малых водосборов ( $F=1-10$  км<sup>2</sup>) решающим будет не весь запас воды в снеге, который постепенно поступает на водосбор в течение 3–10 суток, а один наибольший из каждодневных расходов в середине периода снеготаяния. Если считать, что интенсивное снеготаяние начинается в 10 ч утра и заканчивается в 8 ч вечера, то есть весь интенсивный процесс стока продолжается около 10 ч, а наибольшая интенсивность снеготаяния наступает в 2 ч дня, то исходя из треугольного гидрографа стока получается следующая формула для максимального расхода (л/с) талых вод:

$$Q=(5,5/10+T_T)Fk_y\psi_T h_T,$$

где  $T_T$  – время запаздывания пика гидрографа стока от двух часов дня в часах,  $F$  – площадь бассейна снеготаяния,  $k_y$  – площадь, очищаемая от снега (включая площадь кровель, оборудованную внут-

ренними водотоками (га)),  $\psi_T$  – коэффициент стока снеготаяния,  $h_T$  – слой талого стока (мм).

В практическом применении время запаздывания гидрографа стока очень незначительно влияет на расход, причем существующие данные для России указаны только для больших территорий, поэтому поправку на время запаздывания можно исключить, как и использование коэффициента  $k_y$ , практически не имеющего значения по вышеуказанным причинам. Кроме того, для точности расчетов по характеру подстилающей поверхности нужно заменить маловариативный коэффициент стока снеготаяния на более гибкий коэффициент стока ( $\psi$ ), значения которого приводятся И.Н. Беловым и Л.Т. Абрамовым в удобном табличном виде. В итоге преобразований формула получает конечный вид:

$$Q=0,429F\psi h_T,$$

где  $F$  – площадь бассейна снеготаяния,  $\psi$  – коэффициент стока,  $h_T$  – слой талого стока (мм).

В таком виде формула позволяет более оперативно рассчитать сток талых вод для большого числа водосборов (все переменные в формуле опираются на коэффициенты, которые при поступлении новых данных легко могут быть скорректированы без изменения их содержания и использованы в расчетах) и не содержит малозначимые переменные, значительно усложняющие расчеты.

Таким образом, правильная оценка поверхностного стока с освоенных территорий возможна лишь при четком понимании сути процесса его формирования и знании всех влияющих на него факторов. Кроме того, нужно учитывать необходимость увязки собственно гидрологических факторов и параметров с метеорологическим расчетом, то есть можно утверждать, что точный гидрометрический расчет, базирующийся на грубых метеорологических допущениях, как и точный метеорасчет, без учета гидрологических закономерностей теряет всякий смысл. На ряду с этим, как сам неустойчивый характер выпадения осадков, так и неустановившийся характер движения дождевых и талых вод по поверхности водосбора являются с математической точки зрения случайными процессами, а потому количественное изучение должно обязательно включать методы статистической обработки и анализа данных.

Площадь водосбора является одним из важнейших факторов, определяющих особенности водного режима в его пределах, а следовательно, грамотное изучение поверхностного стока невозможно без количественного учета ряда клю-

чевых параметров водосборной поверхности, и, в первую очередь, таких, как площадь и уклон.

Формирование стока в пределах малых водосборов, с одной стороны, в значительной степени подвергается влиянию азональных факторов, что вместе с большим многообразием природных условий (и неоднородностью природных компонентов) сильно ограничивает методы аналогий и экстраполяций, с другой стороны, на каждом отдельном малом водосборе разнообразие факторов несколько уменьшается, и их влияние выступает более четко и однозначно, что требует дифференцированной оценки и позволяет развивать методы математического и физического моделирования.

Таким образом, малые водосборы требуют специального изучения особенностей гидрологического режима и разработки принципов и методов его учета в соответствии с направлениями человеческой деятельности, а создание методики количественного учета поверхностного стока дождевых и талых снеговых вод с урбанизованных территорий представляется довольно интересной и актуальной задачей.

Имеющиеся в настоящее время способы количественного выражения параметров поверхностного стока и факторов, определяющих водный режим водосборных поверхностей, прошли длительный процесс становления и развития, а потому достаточно разнообразны, точны и часто проработаны до такой степени, что существуют в виде типовых методик. В то же время их нельзя считать в полной мере совершенными в силу ряда причин. С одной стороны, сложность природных систем и высокая степень инвариантности процессов, в них развивающихся, не дают возможности полного математического учета всей совокупности факторов и изменчивости условий формирования стока на конкретной территории. С другой стороны, ведомственная разрозненность усилий в деле изучения единых по своей природе водных ресурсов отразилась и в методологическом аппарате, который, при всем многообразии методик и способов расчета, нельзя считать приведенным к одному теоретическому знаменателю и общей фактологической базе.

Существующие сейчас методики являются узкопрофильными по своей направленности, ориентированы, главным образом, на обоснование гидротехнических систем или сельскохозяйственных (ирригация, мелиорация) нужд и не могут обеспечить всех современных пользовательских запросов, в том числе, и в сфере реор-

ганизации городских территорий. В отличие от методик расчета руслового или для некоторых случаев подземного стока фактологическая, теоретическая и методологическая базы не столь совершенны и ориентированы исключительно на расчет параметров ливневой канализации крупных городов, рассматриваемых как единые водосборные территории. Если еще отметить достаточно высокую трудоемкость имеющихся методик, практически исключаящую возможность систематических общетов большого числа территориальных единиц, то становится понятной необходимость совершенствования теоретического аппарата количественной характеристики именно поверхностного плоскостного стока, в том числе, и с урбанизованных территорий.

Городские территории, будучи сильно трансформированными в плане первичности (типичности) природных компонентов, выступают очагами мощного воздействия на окружающую их среду, порождая широкий спектр аномалий характеристик природных условий. К таковым можно отнести и изменение фоновых (зональных) значений показателей элементов климата: количества осадков, температуры, влажности, а также их режима.

В то же время сама городская территория, являясь и более разнообразной по образующим ее компонентам и более мозаичной по их рисунку в сравнении с аналогичной природной, предполагает дифференцированный подход к ее изучению. Другими словами, необходим учет как общего «искажения» природных показателей городами, так и внутригородской мозаики их значений.

Количественная оценка поверхностного стока с городских территорий, потенциально являясь важным элементом работ по грамотной их реорганизации, не только имеет теоретическую значимость, но и должна обеспечивать решение ряда конкретных прикладных задач, а потому предполагает соответствие определенным требованиям, при этом их выполнение не представляет собой исключительно математическую проблему, а при математической форме выражения требует осмысления физической сущности используемых показателей и их сочетаний. В целом, таковыми требованиями является возможно более полный охват математической моделью комплекса факторов, определяющих водный режим водосбора с условием сохранения точности исходных показателей и, таким образом, конечных результатов, а также снижение трудоемкости (связанной с необходимостью расчета промежу-

точных величин и выполнения дополнительных графических и аналитических обработок данных), ориентированное на возможность выполнения больших серий типовых расчетов для физически различных территорий и возможность быстрого уточнения отдельных переменных (коэффициентов, степенных значений и т. д.) в случае поступления новых данных без изменения самого алгоритма или структуры уравнений.

Обязательным условием, обуславливающим достоверность результатов, является дифференциация территории до уровня, обеспечивающего

однородность ее основных стокообразующих параметров, то есть выделение элементарных водосборов.

Именно выделение первичных ячеек стока (задача достаточно легко и быстро решаемая посредством использования соответствующего программного обеспечения) позволит не только существенно повысить качество расчетов, но и провести интегральное зонирование городских территорий с последующим его учетом в планировании городского пространства.

### Библиографический список

1. Алексеев, А.Г. Схема расчета максимальных дождевых расходов воды по формуле предельной интенсивности стока с помощью кривых редуций осадков и стоков [Текст] / А.Г. Алексеев. – М. : Тр. ГГИ, 1966. – С. 55–71.
2. Алексеев, М.И., Курганов, А.М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий [Текст] : учеб. пособие / М.И. Алексеев, А.М. Курганов. – М. : АСВ ; СПб. : СПбГАСУ, 2000. – 352 с.
3. Алексеев, М.И., Курганов, А.М., Карамзинов, Ф.В. Гидравлический расчет сетей водоотведения [Текст]. Ч. 2. Расчетные таблицы / М.И. Алексеев, А.М. Курганов, Ф.В. Карамзинов. – СПб. : СПбГАСУ. – 1997.
4. Дикаревский, В.С. Отведение и очистка поверхностных сточных вод / В.С. Дикаревский. – Л. : Стройиздат, 1986. – 224 с.
5. Железняков, Г.В. Гидрология и гидрометрия [Текст] / Г.В. Железняков. – М. : Высшая школа, 1981.
6. Карагодин, В.Л., Молоков, М.В. Отвод поверхностных вод с городской территории [Текст] / В.Л. Карагодин, М.В. Молоков. – М. : Стройиздат, 1994. – 219 с.
7. Курганов, А.М. Таблицы параметров предельной интенсивности для определения расходов в системах водоотведения [Текст] / А.М. Курганов. – М. : Стройиздат, 1984. – 106 с.
8. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга [Текст] / под ред. Ф.М. Карамзинова. – СПб. : Стройиздат, 1999.
9. Официальный сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. URL : [www.meteorf.ru](http://www.meteorf.ru) (дата обращения 14.01.2011).
10. Таблицы удельных расчетных расходов дождевых стоков с урбанизированных территорий [Текст] / ЦНИИП градостроительства. – М. : Стройиздат, 2000. – 137 с.