

УДК 628.221

© С. Ю. Игнатчик, д-р техн. наук, профессор

© А. Я. Феськова, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ign0304@yandex.ru, alinafeskova@gmail.com

© В. С. Игнатчик, д-р техн. наук, профессор

(Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ign73@yandex.ru

© Н. В. Кузнецова, канд. техн. наук, глав. специалист

(ООО «АВИВ», Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: natalyakuznetsova.aviv@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-92-102

© S. Yu. Ignatchik, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. Ya. Feskova, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: ign0304@yandex.ru, alinafeskova@gmail.com

© V. S. Ignatchik, Dr. Sci. Tech., Professor

(Military Engineering Institute of the Military Logistics Academy, St. Petersburg, Russia)

E-mail: ign73@yandex.ru

© N. V. Kuznetsova, PhD in Sci. Tech., leading specialist

(Ltd. «AW&W», St. Petersburg, Russia)

E-mail: natalyakuznetsova.aviv@yandex.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПЛОЩАДЯМ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ДОЖДЕЙ

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF DISTRIBUTION IRREGULARITY OF RAIN DENSITY AREAS

Целью исследования является повышение эффективности работы систем водоотведения поверхностного стока для предотвращения подтоплений урбанизированных территорий из-за изменяющегося климата в условиях увеличивающегося количества и интенсивности ливневых дождей с учетом неравномерностей их распределения по площадям. Многочисленные исследования по неравномерности распределения ливневых дождей по площади неоднородны и противоречивы, что свидетельствует о недостаточной изученности вопроса. Таким образом, возникает необходимость проведения экспериментально-теоретических исследований для уточнения коэффициента K , учитывающего неравномерность выпадения дождя по площади. В результате исследования значения поправочного коэффициента K к расчетным расходам в сетях водоотведения представлены рекомендации для актуализации поправочного коэффициента в СП 32.13330.2018 в соответствии с результатами настоящих исследований.

Ключевые слова: система водоотведения, поверхностный сток, коэффициент неравномерности, ARF, метод предельных интенсивностей.

The aim of the study is increasing the efficiency of surface runoff drainage systems' performance in order to prevent flooding of urban areas due to the climate change in conditions of increasing number and intensity of heavy rains taking into account the uneven distribution of rainfall over areas. Numerous studies on the uneven distribution of heavy rains over the area are heterogeneous and contradictory, which indicates insufficient knowledge of the issue. Thus, there arises a need for experimental and theoretical research to refine the coefficient K , which takes into account the unevenness of rainfall over the area. As a result of the study of the value of the correction factor K to the estimated costs in sewerage networks, recommendations are presented for updating the correction factor in SP 32.13330.2018 in accordance with the results of these studies.

Keywords: drainage system, surface runoff, irregularity coefficient, ARF, method of limiting intensities.

Введение

В Российской Федерации системы водоотведения поверхностного стока в соответствии с заложенной в нормативном документе (СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения»¹) методикой рассчитываются на отведение дождей, которые характеризуются интенсивностью по слою i , мм/мин, или по объему q , л/(с·га), продолжительностью t , мин, и периодом однократного превышения p , год, расчетной интенсивности дождей [1]. При этом для определения расчетных расходов (л/с) в сетях водоотведения применяется следующая зависимость:

$$Q_r = Z_{mid} A^{1,2} \frac{F_r}{t_r^{1,2n-0,1}}, \quad (1)$$

где Z_{mid} — среднее значение коэффициента покрова; A , n — параметры, характеризующие соответственно интенсивность и продолжительность дождя для конкретной местности; F_r — расчетная площадь стока, га; t_r — расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания дождевых вод по поверхности и трубам до расчетного участка, мин.

Параметры A и n определяются по результатам обработки многолетних (не менее 15 лет) записей самопишущих дождемеров местных метеорологических станций или по данным территориальных управлений Росгидромета. При отсутствии обработанных данных параметр допускается определять по формуле

$$A = q_{20} 20^n \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r} \right)^y, \quad (2)$$

где q_{20} — интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин при $P = 1$ год; n — показатель степени; m_r — среднее количество дождей за год; P — период однократного превышения расчетной интенсивности дождя, годы; y — показатель степени.

¹ Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения (с Изменениями № 1, 2) (2018).

Параметры дождей q_{20} , m , n , y в терминологии СП 32.13330.2018¹, а также исследователей П. Ф. Горбачева, Г. Л. Зака, Н. Н. Белова, М. В. Молокова, Г. Г. Шигорина определены [2–9] по результатам многолетних наблюдений в XX веке и индивидуальны для каждой местности, т. е. для каждого населенного пункта. Например, для Санкт-Петербурга интенсивность q_{20} равна 7,2 мм за 20 минут (60 л/(с·га), в Москве — 9,59 мм (80 л/(с·га), во Владивостоке — 12 мм (100 л/(с·га). При этом период P ее однократного превышения зависит от условий расположения участков сетей и для разных районов города может различаться.

В то же время, в соответствии с п. Ж.4 СП 32.13330.2018, «если площадь стока коллектора составляет 500 га и более, то в формулу (1.1) следует вводить поправочный коэффициент K , учитывающий неравномерность выпадения дождя по площади», $K < 1$.

Значения этого поправочного коэффициента K вызывают большие сомнения (см. таблицу).

Особенностью данной таблицы является то, что значения коэффициента K для площадей стока до 4000 га включительно обоснованы результатами экспериментальных исследований [6] и широко обсуждались в печати. В то же время происхождение значений этого коэффициента для площадей более 4000 га для науки неизвестно и проти-

Значения поправочного коэффициента K , учитывающего неравномерность выпадения дождя по площади (таблица Ж.5 СП 32.13330.2018¹)

№ п/п	Площадь стока, га	Коэффициент K
1	500	0,95
2	1000	0,90
3	2000	0,85
4	4000	0,8
5	6000	0,7
6	8000	0,6
7	10000	0,55

воречит результатам исследований многих зарубежных ученых и сложившейся теории динамического масштабирования распределения дождей по территории.

Распределение дождей по площади и неравномерность их выпадения исследовались многими отечественными учеными [10–17]. В частности, В. Л. Карагодин в пятидесятых годах прошлого века вывел значения коэффициентов в зависимости от величины площади и продолжительности дождей [6], которые вошли в нормативные документы НИТУ 132-55² и НИТУ 141-56³.

В ЛНИИ АКХ им. К. Д. Памфилова [6] продолжили изучение материалов, полученных В. Л. Карагодиным, но не смогли установить зависимость между коэффициентом неравномерности, интенсивностью и продолжительностью выпадения дождей. Однако на основании этих материалов ими была выведена формула нахождения коэффициента K , который в тот период времени обозначался как η :

$$\eta = \frac{1}{1 + 0,001 \cdot F_r^{2/3}}. \quad (3)$$

Актуализированные в ЛНИИ АКХ им. К. Д. Памфилова значения коэффициентов неравномерности вошли в нормативные документы СНиП I-Г.2-62⁴ и СНиП II-32-74⁵.

Таким образом, подводя итоги результатов исследований отечественных специалистов, можно выделить два направления. Первое направление предусматривало изучение влияния на значение коэффициента неравномерности площади стока и интенсивности дождей. К нему относятся работы М. Ф. Срибного [16] и А. В. Благонравова

[17]. Второе направление исследований посвящено изучению одновременного влияния площади и продолжительностей дождей. К нему относятся работы Е. В. Болдакова [15].

Однако сопоставление результатов этих исследований показывает их неоднородность и даже противоречивость, что свидетельствует о том, что этот вопрос недостаточно изучен.

В отличие от отечественных подходов в зарубежной практике в основном реализовано второе направление исследований, посвящённое изучению одновременного влияния площади и продолжительностей дождей.

Например, в США в вопросах оценки выпадения дождей по площади используется коэффициент уменьшения площади (ARF), представленный, как правило, в виде кривых, преобразующих точечные осадки за определенную продолжительность и частоту в осадки, распределенные по площади.

Национальная служба погоды [18] разработала ряд кривых, первоначально основанных на крупных штормах, зарегистрированных в точках семи плотных сетей в США. Несмотря на значительное расхождение при подгонке кривых к данным из других частей мира, результаты получили широкое распространение [19]. В качестве альтернативы было выведено множество эмпирических формул для выражения изменчивости ливневых осадков по площади. Эти формулы сильно зависят от конкретных географических и климатических условий, к которым они изначально применялись. С другой стороны, Роше [20] разработал теоретический подход к точечным и площадным осадкам, основанный на корреляционной структуре интенсивных штормов. Родригес-Итурбе и Мефия [21] расширили теорию, введя функцию дисперсии и коэффициенты уменьшения дисперсии. Используя другой метод, Бакки и Ранци [22] представили стохастический вывод ARF , основанный на свойствах

² СССР. Комитет по делам строительства. Нормы и технические условия проектирования наружной канализации промышленных предприятий и поселков при них: НИТУ 132-55 (1955).

³ СССР. Комитет по делам строительства. Нормы и технические условия проектирования канализации населенных мест: НИТУ 141-56 (1956).

⁴ СССР. Комитет по делам строительства. СНиП I-Г.2-62 Водоснабжение и канализация. Наружные сети и сооружения. Материалы, изделия и оборудование сетей (1962).

⁵ СССР. Комитет по делам строительства. СНиП II-32-74. Канализация. Наружные сети и сооружения (1974).

пересечения случайных полей. Асквит и Фамильетти [23], предполагая вероятностную эквивалентность между точечными и ареальными осадками, как в процедуре определения характерной длины корреляции Роше [21] и других, рассмотрели распределение осадков водосбора вокруг максимума годовых осадков.

Большой интерес представляет работа Саливана и Блеша [24], использующая пространственную корреляционную структуру осадков для вычисления *ARF*. Предполагается, что точечные исходные осадки распределены экспоненциально, а средние по площади исходные осадки имеют гамма-распределение.

Из проведенного анализа нормативного метода гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностного стока, применяемого на этапе проектирования, следует необходимость развития метода предельных интенсивностей для гидравлического расче-

та сетей водоотведения поверхностного стока с учетом неравномерности распределения интенсивности дождей путем проведения экспериментально-теоретических исследований для уточнения коэффициента *K*, учитывающего неравномерность выпадения дождя по площади в диапазоне от 4000 га.

Методы

Экспериментальные исследования проводились в Санкт-Петербурге, климат которого умеренный и влажный, переходный от континентального к морскому. Для данного региона характерна частая смена воздушных масс, обусловленная в значительной степени циклонической деятельностью. Летом преобладают западные и северо-западные ветры, зимой — западные и юго-западные.

В качестве базы данных для проведения экспериментальных исследований приняты накопленные в Санкт-Петербурге в течение 6 лет значения показаний 34 автоматизированных осадкомеров [25] (рис. 1).

Осадкомеры выполнены в виде датчиков атмосферных осадков *OTT Pluvio² 200 RH*, погрешность датчиков составляет $\pm 1,0\%$ [26].

Поправочный коэффициент K_r к расчетным расходам в сетях водоотведения при фиксированных значениях площадей F_r стока (420, 223, 196, 170, 65, 39, 118, 26 км²) и продолжительностей дождей t_r определялся по формуле [27]

$$K_r^*(t_r, F_r) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_j}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_{ij} \right)}, \quad (4)$$

где H_j — годовое максимальное количество осадков на площади для года j ; H_{ij} — годовое максимальное количество осадков в точке для года j на станции i ; k — количество осадкомеров в районе, $k = 32$ (два осадкомера, находящиеся за пределами города, не учитывались); n — количество лет, $n = 1, 6$.

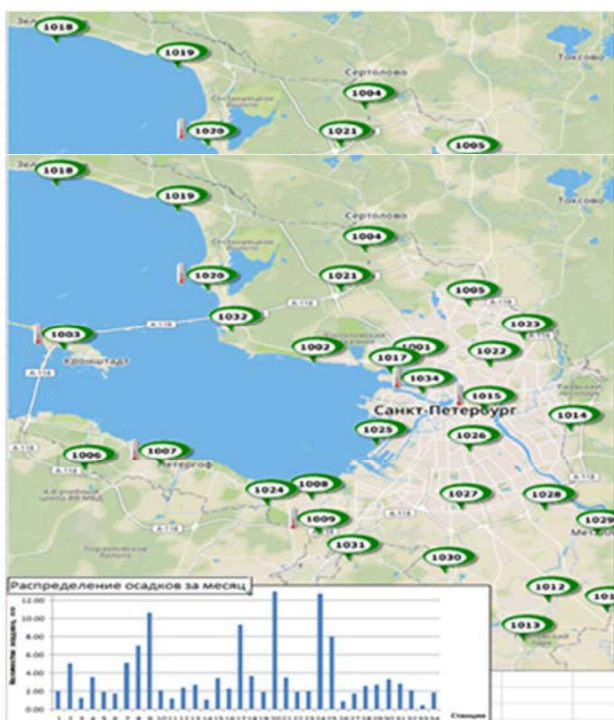


Рис. 1. Визуализация системы учета атмосферных осадков Санкт-Петербурга

Результаты

В работе [28] проведена оценка достоверности использования для оценки значения поправочного коэффициента K_r следующей зависимости:

$$K_r(t_r, F_r) = \left[1 + \omega \left(\frac{F^z}{t} \right)^b \right]^{-v/b}, \quad (5)$$

где F_r — площадь водосбора, км²; t_r — продолжительность дождя, час; z , ω , b и v — параметры.

На первом этапе произведена оценка параметра v путем определения параметров степенной функции между средними годовыми максимумами показаний осадкомеров H для каждой из семи выбранных продолжительностей (рис. 2). Аппроксимирующая функция со значениями параметров $a = 5,43$ [мм/мин] (множитель из степенной функции) и $v = 0,716$ сопоставима с экспериментальными значениями при $R^2 = 0,9981$ (коэффициент детерминации) и среднеквадратическом отклонении 3,026 %.

На втором этапе произведена оценка оставшихся трех параметров (b , ω и z). В ка-

честве критерия оценки принято среднеквадратическое отклонение σ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_f} \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_t} (K_r(t_r, F_r) - K_r(t_r, F_r))^2, \quad (6)$$

где N_f и N_t — соответственно количество вариантов площадей водосбора и продолжительностей дождей, $N_f = 13$, $N_t = 7$. В качестве метода оценки параметров принят метод направленного перебора с шагом 0,001. В результате установлено, что со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,068$ (6,8 %) значения параметров b , ω и z соответственно равны 0,398, 0,017 и 1,54. Итоговые результаты этого этапа исследований в графическом виде приведены на рис. 3.

Обсуждение

Для оценки пределов изменений коэффициента уменьшения площади при проектировании и сопоставления с результатами ранее выполненных исследований предположим, что если средняя скорость течения равна 1 м/с, а длина коллектора $L = F_r^{0,5}$, то t_r , мин:

$$t_r = (10^6 \cdot F_r)^{0,5} / 3600 = F_r^{0,5} / 3,6. \quad (7)$$

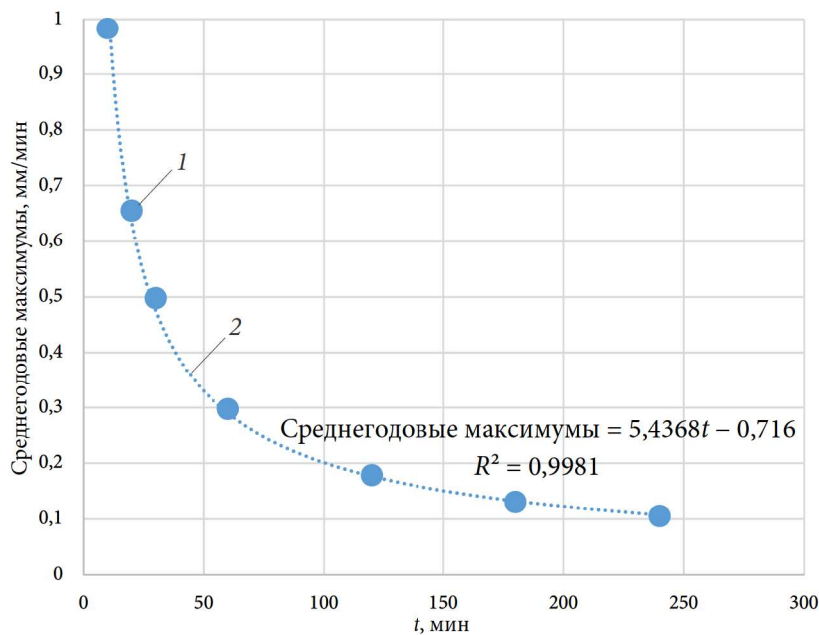


Рис. 2. Результаты оценки параметра v для $p = 6$ лет:
1 — экспериментальные значения; 2 — аппроксимирующая функция

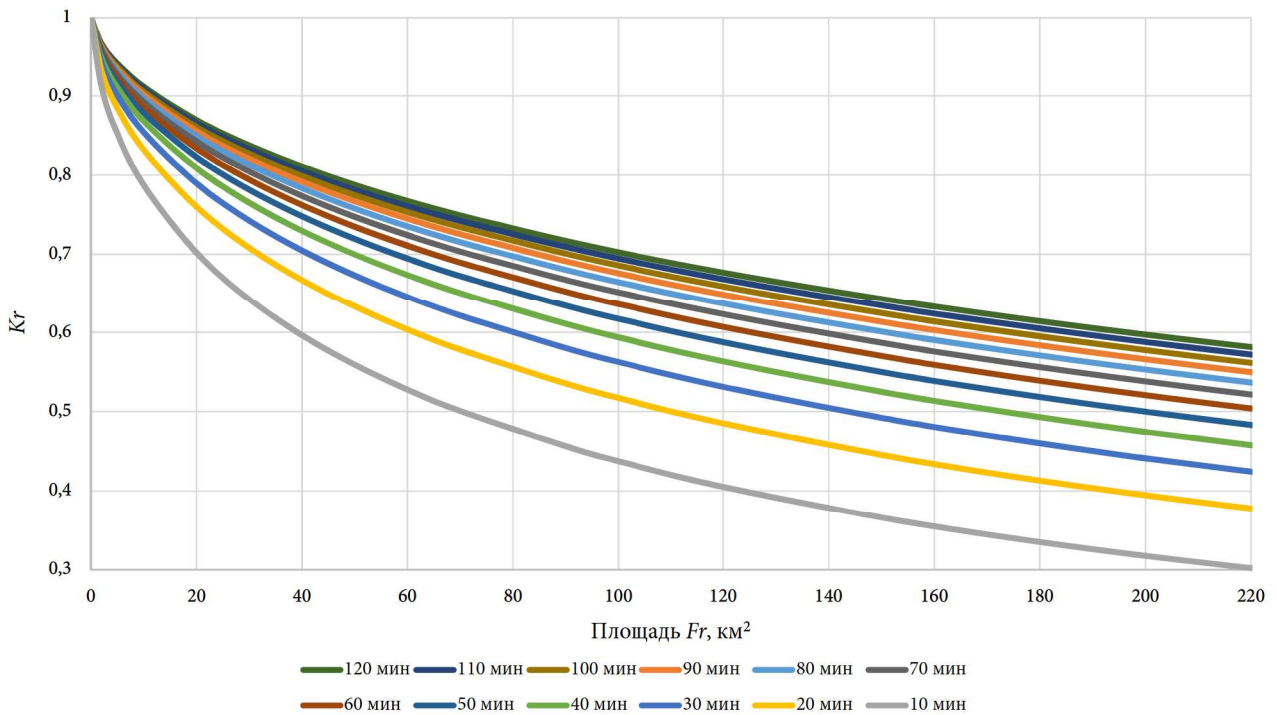


Рис. 3. Зависимость коэффициента уменьшения площади от площади стока и продолжительности дождя по результатам исследований (уравнению (5)) для $p = 6$ лет

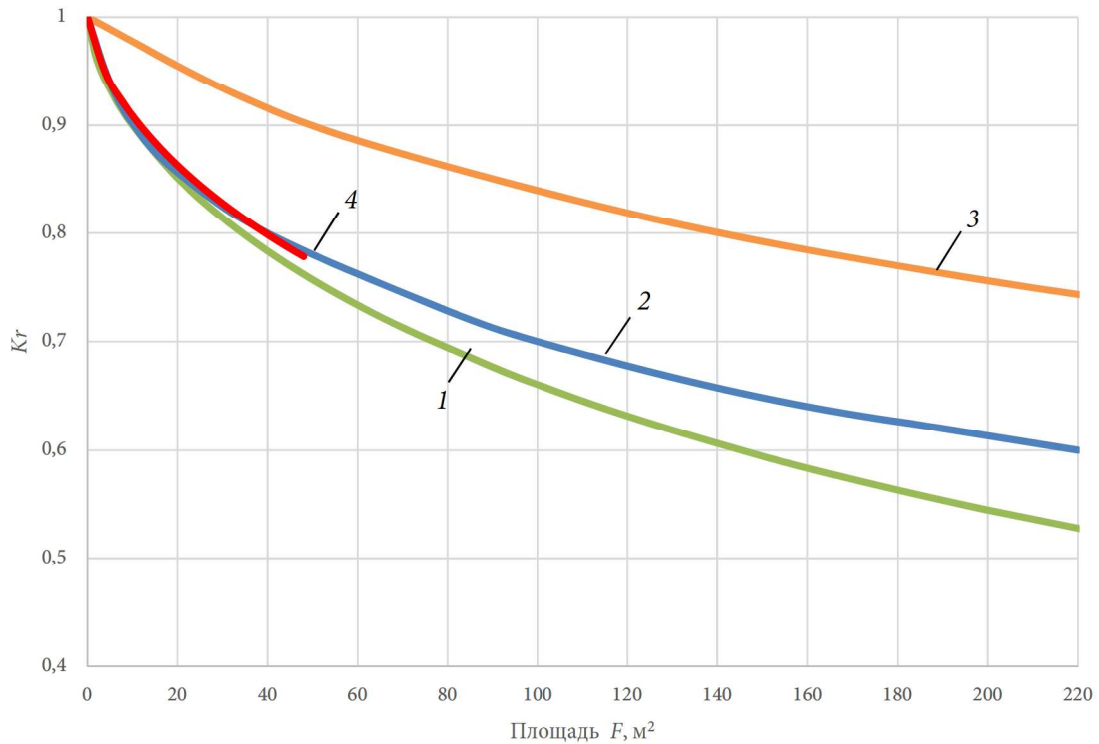


Рис. 4. Зависимости проектных коэффициентов уменьшения площади от площади водосбора при продолжительности дождей $t = 60$ мин: 1 — по результатам исследований авторов (г. Санкт-Петербург, $p = 1$); 2 — по результатам исследований К. Минео, Э. Ридольфи, Ф. Наполитано и Ф. Руссо (Италия, регион Лацио); 3 — по результатам исследований в бюро погоды США (США, Долина Огайо); 4 — по результатам исследований В. Л. Карагодина и М. В. Молокова (Москва)

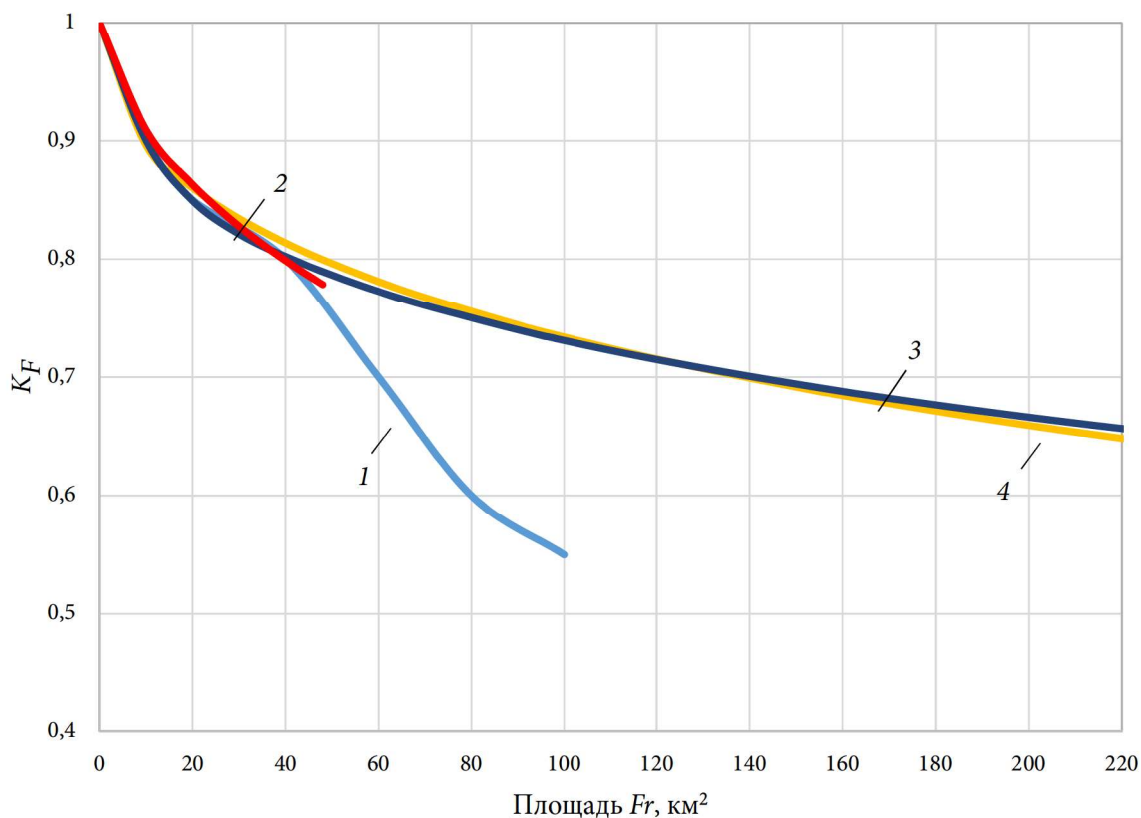


Рис. 5. Зависимости проектных коэффициентов уменьшения площади от площади водосбора: 1 — по СП 32.13330.2018; 2 — по результатам исследований В. Л. Карагодина и М. В. Молокова; 3 — по результатам исследований авторов для $p = 6$ лет; 4 — то же, для $p = 1$ год

При этом проектное значение этого коэффициента (рис. 4) будет равно:

$$\begin{aligned}
 K_r^{**}(Fr) &= \left[1 + \omega \left(\frac{F_r^z}{t_r} \right)^b \right]^{-\frac{v}{b}} = \\
 &= \left[1 + \omega \left(\frac{3,6 \cdot F_r^z}{F_r^{0,5}} \right)^b \right]^{-\frac{v}{b}} = \\
 &= \left[1 + \omega \left(3,6 \cdot F_r^{z-0,5} \right)^b \right]^{-\frac{v}{b}}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

В целом выполненный сравнительный анализ показывает, что закономерности изменений полученных значений коэффициентов K_r расчетным расходам в сетях водоотведения, учитывающих неравномерность выпадения дождей по площади, идентичны аналогичным изменениям, полученным в бюро погоды США [27], К. Минео, Э. Ридоль-

фи, Ф. Наполитано и Ф. Руссо (Италия, регион Лацио) [29], В. Л. Карагодиным (результаты представлены в работе [6]), М. В. Молоковым [6] (см. рис. 4), М. Ф. Срибным [16], Е. В. Болдаковым [15] и другими исследователями.

Разница в количественных значениях объясняется изменениями, происшедшими в климате, незначительным количеством данных в работах М. Ф. Срибного [16], Е. В. Болдакова [15] и В. Л. Карагодина, а также разными климатическими характеристиками районов исследований. Например, в Долине Огайо (США) дожди преимущественно ураганные и фронтальные, а в Санкт-Петербурге и регионе Лацио (Италия) — преимущественно конвективные.

Значения нормативного поправочного коэффициента K , учитывающего неравномер-

ность выпадения дождя по площади, приведенные в таблице Ж.5 СП 32.13330.2018¹, при F_r более 40 км² (4000 га) не соответствуют закономерностям, полученным в бюро погоды США, исследователями К. Минео, Э. Ридольфи, Ф. Наполитано и Ф. Руссо (Италия, регион Лацио), В. Л. Карагодиным и М. В. Молоковым, а также нами в настоящем исследовании (рис. 5).

Выводы

1. В настоящей работе исследовались значения поправочного коэффициента K_r к расчетным расходам в сетях водоотведения в зависимости от двух аргументов: площади водосбора и продолжительности дождя. Предпочтение параметру «продолжительность дождя» по сравнению с «интенсивность дождя» отдано ввиду комплексности «продолжительности», характеризующей одновременно продолжительность дождя и продолжительность добега воды до расчетного участка сети.

2. Введение в данную работу нового обозначения поправочного коэффициента к расчетным расходам в сетях водоотведения, учитывающего неравномерность выпадения дождя по площади, в виде K_r , обусловлено тем, что в отечественной практике он имеет три варианта обозначений (η в НиТУ 132–55², НиТУ 141–56³, СНиП I-Г.2–62⁴), (r в СНиП II-32–74⁵), (K в СНиП 2.04.03–85⁶, СП 32.13330.2012⁷, СП 32.13330.2018¹), а в иностранной литературе — один (ARF — *areal reduction factors*).

3. Экспериментальные исследования проводились в Санкт-Петербурге. Выбор района исследований не случаен, так как в этом городе внедрена и успешно эксплуатируется в течение 7 лет (первый год — наладка) первая в Российской Федерации сеть из 34 автоматизированных осадкомеров, осуществляющих записи каждые 5 мин.

4. Результаты экспериментальных исследований [28] подтвердили достоверность использования для оценки значения поправочного коэффициента зависимости (5) со среднеквадратическим отклонением 6,7–6,8 %. Определены параметры этой зависимости для Санкт-Петербурга.

5. Сопоставление результатов экспериментальных исследований для периодов однократного превышения расчетной интенсивности дождей $p = 6$ лет и $p = 1$ год показывают, что при увеличении периода однократного превышения расчетной интенсивности дождей значения коэффициента K_r уменьшаются. Но при увеличении продолжительностей дождей разница между K_r для периода $p = 6$ лет и $p = 1$ год сокращается. Например, при $p = 6$ лет $K_r(t_r, F_r) = K_r(10 \text{ мин}, 100 \text{ км}^2) = 0,44$, а при $p = 1$ год $K_r(t_r, F_r) = K_r(10 \text{ мин}, 100 \text{ км}^2) = 0,51$, т. е. разница составляет 14 %. В то же время при $p = 6$ лет $K_r(t_r, F_r) = K_r(10 \text{ мин}, 100 \text{ км}^2) = 0,69$, а при $p = 1$ год $K_r(t_r, F_r) = K_r(10 \text{ мин}, 100 \text{ км}^2) = 0,70$, т. е. разница составляет 2 %. Учитывая, что расчетная продолжительность дождя при $F_r = 100 \text{ км}^2$ превысит 200 мин, можно сделать вывод о том, что в этом случае разница между проектными значениями коэффициентов $K_r^{**}(F_r)$ будет находиться в пределах погрешности определения $K_r(t_r, F_r)$, которая равна 6,7 %. Таким образом, проектные значения коэффициентов $K_r^{**}(F_r)$ не зависят от периодов повторяемости расчетных интенсивностей дождей. Поэтому объема выполненных исследований достаточно для их определения.

6. Сопоставление результатов экспериментальных исследований с результатами исследований других авторов показывает, что:

– закономерности изменений полученных значений коэффициентов K_r к расчетным расходам в сетях водоотведения, учитывающих неравномерность выпадения дождей по площади, идентичны аналогичным изме-

⁶ СССР. Комитет по делам строительства. СНиП 2-04-03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения (1986).

⁷ РФ. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации СП 32.13330.2012 Канализация. Наружные сети и сооружения. (2012).

нениям, полученным в бюро погоды США, К. Минео, Э. Ридольфи, Ф. Наполитано и Ф. Руссо (Италия, регион Лацио), В. Л. Карагодиным и М. В. Молоковым (см. рис. 4), М. Ф. Срибным, Е. В. Болдаковым и другими исследователями. Разница в количественных значениях объясняется разными климатическими характеристиками районов исследований, изменениями, происшедшими в климате и незначительным количеством данных в работах М. Ф. Срибного, Е. В. Болдакова и В. Л. Карагодина, полученными по результатам исследований в Москве и включенными в НиТУ 132–55² (1955);

– значения нормативного поправочного коэффициента K , учитывающего неравномерность выпадения дождя по площади, приведенные в таблице Ж.5 СП 32.13330.2018¹, при F_r более 40 км² (4000 га), не соответствуют закономерностям, полученным в бюро погоды США, К. Минео, Э. Ридольфи, Ф. Наполитано, Ф. Руссо (Италия, регион Лацио) и другими иностранными специалистами, а также В. Л. Карагодиным и М. В. Молоковым и в настоящем исследовании (см. рис. 5);

– необходимо отредактировать положения п. Ж4 в изменениях № 2 к СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85»¹ и внести в таблицу Ж5 значения поправочного коэффициента K в соответствии с результатами настоящих исследований.

Библиографический список

1. Волков С. Н., Житенев А. И., Курганов Ю. А., Костенко И. Г., Игнатчик В. С., Игнатчик С. Ю., Кузнецова Н. В., Сенюкович М. А. Обоснование метода оценки климатических параметров ливневых дождей по данным комплекса осадкомеров (в порядке обсуждения) // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 7. С. 50–56.
2. Горбачев П. Ф. Методы расчета ливневого стока. М.: Изд-во «Власть Советов» при Президиуме ВЦИК, 1937. 167 с.
3. Сурин А. А. Учет емкости сети при расчете дождевой канализации // Коммунальное дело. 1930. № 5. С. 37–44.
4. Зак Г. Л. Гидравлические основы расчета канализационных сетей. М.; Л.: Главная редакция строительной литературы, 1935. 173 с.
5. Белов Н. Н. Расчет дождевой канализационной сети. М.: Изд-во НКВД, 1931. 64 с.
6. Молоков М. В., Шигорин Г. Г. Дождевая и общесплавная канализация. М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1954. 241 с.
7. Курганов А. М. Закономерности формирования и движения дождевых стоков в безнапорных трубопроводах: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1980. 433 с.
8. Алексеев М. И., Курганов А. М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. М.: Изд-во АСВ, СПб: СПбГАСУ, 2000. 352 с.
9. Курганов А. М. Закономерности движения воды в дождевой и общесплавной канализации. М.: Стройиздат, 1982. 72 с.
10. Долгов Н. Е. О нормах Кестлина и несоответствии этих норм результатам наблюдений над ливнями на Екатерининской железной дороге. Вып. 1. Екатеринбург: тип. А.Х. Хайтова, 1914. 184 с.
11. Долгов Н. Е. О нормах Кестлина и несоответствии этих норм результатам наблюдений над ливнями на Екатерининской железной дороге. Вып. 2. Екатеринбург: тип. А.Х. Хайтова, 1914. 405 с.
12. Долгов Н. Е. О нормах Кестлина и несоответствии этих норм результатам наблюдений над ливнями на Екатерининской железной дороге. Вып. 3. Екатеринбург: тип. А.Х. Хайтова, 1915. 424 с.
13. Долгов Н. Е. Основные положения теории стока ливневых вод и зависимость величины отверстий искусственных сооружений на железных дорогах Юга Европейской России от максимальной напряженности стока, определенной непрерывными наблюдениями Пологовской дождемерной сети на Екатерининской жел. дор. Петроград: тип. М. И. Акинфиева, 1916. 26 с.
14. Близняк Е. В., Поляков Б. В. Инженерная гидрология. М.; Л.: Госстройиздат, 1939. 212 с.
15. Болдаков Е. В. Сток ливневых вод с малых бассейнов. М.: Дориздат, 1951. 108 с.
16. Срибный М. Ф. Максимальный сток с малых бассейнов. М.: Трансжелдориздат, 1940. 384 с.
17. Благодравов А. В. Особенности расчета системы «сеть–регулирующая емкость» при неустановившемся движении дождевых вод: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1986. 151 с.
18. National Weather Service, Rainfall intensity-frequency regime, Tech. Pap. 29, Silver Spring, Md., 1958.

19. World Meteorological Organization (WMO), Manual for estimation of probable maximum precipitation, Oper. Hydrol. Rep., 1, WMO Pap. 332, Geneva, Switzerland, 1986.

20. Roche M. Hydrologie de Surface // Paris, Gauthier-Villars, 1966. 431 p.

21. Rodriguez-Iturbe I., and J. M. Mejia. On the transformation of point rainfall to areal rainfall // Water Resour. Res., 10 (4), 1974. Pp. 729–735.

22. Bacchi B., and R. Ranzi. On the derivation of the areal reduction factor of storms // Atmos. Res., 42, 1996. Pp. 123–135.

23. Asquith W. H., and J. S. Famiglietti. Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach // J. Hydrol., 230, 2000. Pp. 55–69.

24. Sivapalan M., and G. Blösch. Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves // J. Hydrol., 204 (1-4), 1998. Pp. 150–167.

25. Костенко И. Г., Синкевич Т. А., Михайлов Д. М. Опыт внедрения автоматизированной информационной системы учета атмосферных осадков в Санкт-Петербурге // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2019. № 6. С. 26–33.

26. Руководство по эксплуатации «Датчик атмосферных осадков OTT Pluvio² 200 RH в комплекте с защитой от ветра и шкафом управления». KNTP project. Санкт-Петербург, 2014. 38 с.

27. U.S. Weather Bureau Rainfall intensity-frequency regime. Pt. 1. // The Ohio Valley, TP-29, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1957. 44 p.

28. Алексеев М. И., Игнатчик В. С., Игнатчик С. Ю. и др. Разработка методов адаптации систем водоотведения поверхностного стока к условиям изменяющегося климата. Часть 2. Развитие метода предельных интенсивностей для гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностного стока с учетом неравномерности распределения интенсивности дождей: отчет о НИР / ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России». СПб., 2022. 67 с. № ГР 122060200041-4.

29. C. Mineo, E. Ridolfi, F. Napolitano, F. Russo. Journal of Hydrology. Vol. 560. May 2018. Pp. 471–479.

References

1. Volkov S. N., et al. *Obosnovanie metoda otsenki klimaticheskikh parametrov livnevyykh dozhdey po dannym kompleksa osadkomerov (v poryadke obsuzhdeniya)* [Substantiation of the calculation method of climatic parameters of storm rainfall from the data of a complex of precipitation gauges (in order of discussion)]. *Vodospobzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2020, no. 7, pp. 50–56.

2. Gorbachev P. F. *Metody rascheta livneвого stoka* [Methods of calculation of storm water runoff]. Moscow,

Izd-vo “Vlast’ Sovetov pri Prezidiume VTsIK” Publ., 1937, 167 p.

3. Surin A. A. *Uchet emkosti seti pri raschete dozhdey kanalizatsii* [The account of network capacity during calculation of rainwater sewerage]. *Kommunal’noe delo – Municipal Services*, 1930, no. 5, pp. 37–44.

4. Zak G. L. *Gidravlicheskie osnovy rascheta kanalizatsionnykh setey* [Hydraulic bases of calculation of sewerage networks]. Moscow–Leningrad, Glavnaya redaktsiya stroitel’noy literatury, 1935, 173 p.

5. Belov N. N. *Raschet dozhdey kanalizatsionnoy seti* [Calculation of rainwater sewerage network]. Moscow, Izd-vo NKVD Publ., 1931, 64 p.

6. Molokov M. V., Shigorin G. G. *Dozhdevaya i obshcheplavnaya kanalizatsiya* [Rainwater and general drainage system]. Moscow, Izdatel’sтво Ministerstva kommunal’nogo khozyaystva RSFSR Publ., 1954, 241 p.

7. Kurganov A. M. *Zakonomernosti formirovaniya i dvizheniya dozhdevykh stokov v beznapornykh truboprovodakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Laws of formation and movement of rainwater runoff in unpressurized pipelines. Dr. Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1980, 433 p.

8. Alekseev M. I., Kurganov A. M. *Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhdeyego i talogo) stoka s urbanizirovannykh territoriy* [Organization of drainage of surface (rainfall and meltwater) runoff from urbanized areas]. Moscow, Izd-vo ASV, St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2000, 352 p.

9. Kurganov A. M. *Zakonomernosti dvizheniya vody v dozhdey i obshcheplavnoy kanalizatsii* [Laws of water movement in rainwater and general drainage system]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 72 p.

10. Dolgov N. E. *O normakh Kestlina i nesootvetstviy etikh norm rezul’tatam nablyudeniya nad livnyami na Ekaterininskoy zheleznoy doroge* [Regarding the Kestlin’s norms and the discrepancy between these norms and the results of observations of rainfalls at the Catherine railroad]. Issue 1. Ekaterinoslav, Tip. A. Kh. Khaytova Publ., 1914, 184 p.

11. Dolgov N. E. *O normakh Kestlina i nesootvetstviy etikh norm rezul’tatam nablyudeniya nad livnyami na Ekaterininskoy zheleznoy doroge* [Regarding the Kestlin’s norms and the discrepancy between these norms and the results of observations of rainfalls at the Catherine railroad]. Issue 2. Ekaterinoslav, Tip. A. Kh. Khaytova Publ., 1914, 405 p.

12. Dolgov N. E. *O normakh Kestlina i nesootvetstviy etikh norm rezul’tatam nablyudeniya nad livnyami na Ekaterininskoy zheleznoy doroge* [Regarding the Kestlin’s norms and the discrepancy between these norms and the results of observations of rainfalls at the Catherine railroad]. Issue 3. Ekaterinoslav, Tip. A. Kh. Khaytova Publ., 1915, 424 p.

13. Dolgov N. E. *Osnovnye polozeniya teorii stoka livnevykh vod i zavisimost' velichiny otverstiy iskusstvennykh sooruzheniy na zheleznykh dorogakh Yuga Evropeyskoy Rossii ot maksimal'noy napryazhennosti stoka, opredelennoy nepreryvnymi nablyudenyami Pologovskoy dozhdemernoy seti na Ekaterininskoy zheleznoy doroge* [Basic provisions of the theory of storm water runoff and the dependence of the size of apertures of technical facilities on the railroads in the South of European Russia on the maximum intensity of the runoff, determined by continuous observations of the Pologovsky rain gauge network on the Ekaterininskaya railroad]. Petrograd, Tip. M. I. Akinfiyeva Publ., 1916, 26 p.
14. Bliznyak E. V., Polyakov B. V. *Inzhenernaya gidrologiya* [Engineering hydrology]. Moscow-Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1939, 212 p.
15. Boldakov E. V. *Stok livnevykh vod s malykh basseynov* [Storm water runoff from small basins]. Moscow Dorizdat Publ., 1951, 108 p.
16. Sribniy M. F. *Maksimal'niy stok s malykh basseynov* [Maximum runoff from small basins]. Moscow Transzheldorizdat Publ., 1940, 384 p.
17. Blagonravov A. B. *Osobennosti rascheta sistemy «set'-reguliruyushchaya emkost'» pri neustanovivshemsya dvizhenii dozhdevykh vod. Diss. kand. tekhn. nauk* [Calculation features of the “network-regulating tank” system in case of unsteady movement of rain water. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1986, 151 p.
18. National Weather Service, Rainfall intensity-frequency regime, Tech. Pap. 29, Silver Spring, Md., 1958.
19. World Meteorological Organization (WMO), Manual for estimation of probable maximum precipitation, *Oper. Hydrol.*, Rep. 1, WMO Pap. 332, Geneva, Switzerland, 1986.
20. Roche M. *Hydrologie de Surface*. Paris, Gauthier-Villars, 1966, 431 p.
21. Rodriguez-Iturbe I., and J. M. Mejia. *On the transformation of point rainfall to areal rainfall. Water Resour. Res.*, 10 (4), 1974, pp. 729–735.
22. Bacchi B., Ranzi R. *On the derivation of the areal reduction factor of storms. Atmos. Res.*, 42, 1996, pp. 123–135.
23. Asquith W. H., Famiglietti J. S. *Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. J. Hydrol.*, 230, 2000, pp. 55–69.
24. Sivapalan M., Blösch G. *Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. J. Hydrol.*, 204 (1–4), 1998, pp. 150–167.
25. Kostenko I. G., Sinkevich T. A., Mikhaylov D. M. *Opyt vnedreniya avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy ucheta atmosferykh osadkov v Sankt-Peterburge* [Experience in implementing the automated information system for precipitation recording in St. Petersburg]. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya – The best available technologies of water supply and sanitation*, 2019, no. 6, pp. 26–33.
26. *Rukovodstvo po ekspluatatsii «Datchik atmosferykh osadkov OTT Pluvio² 200 RH v komplekte s zashchitoy ot vetra i shkafom upravleniya»* [Operation manual “OTT Pluvio² 200 RH precipitation sensor complete with wind protection and control cabinet”]. KNTF project. St. Petersburg, 2014, 38 p.
27. U.S. Weather Bureau Rainfall intensity-frequency regime. Pt. 1. The Ohio Valley, TP–29, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1957, 44 p.
28. Alekseev M. I., et al. *Razrabotka metodov adaptatsii sistem vodootvedeniya poverkhnostnogo stoka k usloviyam izmenyayushchegosya klimata* [Development of methods of adaptation of surface runoff drainage systems to the conditions of changing climate]. Part 2. *Razvitie metoda predel'nykh intensivnostey dlya gidravlicheskogo rascheta setey vodootvedeniya poverkhnostnogo stoka s uchetom neravnomernosti raspredeleniya intensivnosti dozhdey* [Development of the method of limiting intensities for hydraulic calculation of surface runoff drainage systems with account of uneven distribution of rainfall intensity]. FGBU «TsNIIP Minstroya Rossii» Publ., St. Petersburg, 2022, 67 p. No. GR 122060200041–4.
29. C. Mineo, E. Ridolfi, F. Napolitano, F. Russo. *Journal of Hydrology*, vol. 560, May 2018, pp. 471–479.