

УДК 628.221

© А. Я. Фескова, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: alinafeskova@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-108-114

© A. Ya. Feskova, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: alinafeskova@gmail.com

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ СИСТЕМ ОТВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

ACTUAL PROBLEMS OF HYDRAULIC CALCULATIONS OF TRANSPORT FACILITIES FOR SURFACE RUNOFF DRAINAGE SYSTEMS

Проблемы гидравлических расчетов транспортных сооружений включают ряд принятых допущений в методике, разработанной в прошлом веке, и влияющих на достоверность получаемых результатов. Несмотря на многочисленность публикаций по этой проблематике, практически отсутствуют исследования по оценке степени влияния этих допущений на достоверность гидравлических расчетов сетей и резервуаров систем отведения поверхностного стока. Результаты исследования расходов на конечном участке коллектора, полученные с применением метода предельных интенсивностей и по гидравлической модели, показали их сходимость при условии непрерывного равномерного нарастания площадей поверхностного стока. В результате исследования было выявлено, что при равномерном дискретном нарастании площадей стока применение метода предельных интенсивностей приводит к занижению расчетных расходов на 15–20 %. При неравномерном дискретном нарастании погрешность расчетов может значительно увеличиться. Полученные результаты вносят вклад в решение вопросов об актуализации методики гидравлических расчетов транспортных сооружений систем водоотведения поверхностного стока.

Ключевые слова: рациональный метод гидравлического расчета, метод предельных интенсивностей, система водоотведения; поверхностный сток.

The problems of hydraulic calculations of transport facilities include a number of accepted assumptions in the methodology developed in the last century and affecting the reliability of the results obtained. Despite the large number of publications on this subject, there are virtually no studies to assess the degree of influence of these assumptions on the reliability of hydraulic calculations of networks and reservoirs of surface runoff disposal systems. The results of the study of the flow rates in the final section of the collector, obtained using the method of limiting intensities and according to the hydraulic model, show their convergence under the condition of a continuous uniform increase in the surface runoff areas. Consequently, it was found out that in case of uniform discrete growth of runoff areas, application of the method of limiting intensities leads to underestimation of calculated discharges by 15-20%. In the case of non-uniform discrete growth, the calculation error can increase significantly. With an uneven discrete growth, the calculation error can increase significantly. The obtained results contribute to the issues of updating the methodology of hydraulic calculations of transport facilities of surface runoff drainage systems.

Keywords: rational method of hydraulic calculation, limiting rate method, drainage system, surface runoff.

Введение

Для гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностных сточных вод и регулирующих резервуаров в нашей стране до настоящего времени применяется методологический аппарат, основы теории которого [1–9] разработаны в прошлом веке с учетом ряда допущений.

Их можно назвать как вынужденными в силу ограниченных вычислительных возможностей того периода истории, когда основным расчетным инструментом являлась логарифмическая линейка, так и соответствующими времени разработки, характеризующемуся более мягкими требованиями к охране окружающей среды.

Основными допущениями являются: 1) равномерное нарастание площадей стока по длинам рассчитываемых коллекторов; 2) ход расчетного дождя может быть любым при выполнении определенных условий; 3) любой возможный гидрограф стока.

Основное допущение применяемого метода «предельных интенсивностей» для гидравлического расчета сетей поверхностного стока заключается в том, что нарастание площадей стока по длинам рассчитываемых коллекторов осуществляется равномерно [2]. Под ним понимается, что равномерным является нарастание произведения коэффициентов стока на площади, а скорости течения воды одинаковы на всех участках коллектора [1–11]. Однако в технической литературе термин «равномерное нарастание» принят условно, без уточнения степени неравномерности: непрерывное или дискретное с учетом среднего расстояния между дождеприемниками.

Ход расчетного дождя может быть любым при условии, что его максимальная средняя интенсивность за расчетный период времени t_c добегания стока будет равна нормативной, определяемой с учетом значений климатических параметров¹. Несмотря на то что возможные ходы дождей, под которыми понимается изменение во времени их интенсивностей, достаточно подробно изучены [4, 5, 7–9], вопрос о том, какой из них принят в методе «предельных интенсивностей», остается открытым [12]. По сути результаты всех исследований по изучению ходов дождей в нашей стране носят информативный характер, поскольку в гидравлических расчетах сетей никак не учитываются.

Гидрограф стока при гидравлическом расчете сетей, под которым понимается изменение во времени расхода воды, может быть любым. Важным является только его максимальное значение, которое используется для выбора диаметра, наполнения и уклона труб.

Гидрограф стока при гидравлическом расчете регулирующих резервуаров [4, 6, 8] не может быть любым, а принимается из расчета хода

дождя² с максимумом в начале. Гидрограф от такого дождя принят типовым [13], несмотря на то что имеются результаты исследований для разных типов дождей [4, 6, 8].

Для гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностных сточных вод и регулирующих резервуаров в Европе и Соединенных Штатах Америки применяется методологический аппарат, основу которого составляет рациональный метод^{3,4} [13–20], разработанный 130 лет назад. При его разработке приняты все указанные выше допущения.

Целью настоящей статьи является оценка степени влияния принятых допущений на достоверность гидравлических расчетов сетей и резервуаров систем отведения поверхностного стока.

Методы

Для достижения поставленной цели в настоящей статье приведены результаты численного эксперимента на условном бассейне водоотведения, сформированном с учетом допущения о равномерном нарастании площадей стока по длине сети (рис. 1):

- расстояния между всеми колодцами одинаковы и равны 50 м;
 - все площади водосбора, обслуживаемые каждым дождеприемником, одинаковы и равны 0,2 га, а коэффициенты покрова подобраны таким образом, чтобы постоянные коэффициенты стока были примерно одинаковы и приблизительно равны 0,5;
 - время поверхностной концентрации для всех площадей водосбора одинаково и равно 8 мин;
 - климатические параметры приняты для Санкт-Петербурга, а период однократного превышения расчетной интенсивности дождя $p = 1$.
- Результаты гидравлического расчета по СП 32.13330.2018⁵ приведены в таблице.

² Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. Дополнение к СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения» (актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85). М.: ОАО «НИИ ВОДГЕО», 2014. 89 с.

³ Suomen Kuntaliitto. Hulevesiopas. Helsinki. 2012.

⁴ British Standards Institution (BSI). BS EN 752: 2017. Drain and Sewer Systems Outside Buildings. BSI, London, 2017, 90 p.

⁵ Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (2018). СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения». М., ФГУП Стандартинформ, 75 с.

¹ Министерство регионального развития Российской Федерации (Минрегион России). СП 32.13330.2012 Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85 (с Изменениями N 1, 2). М., 2011. 91 с.

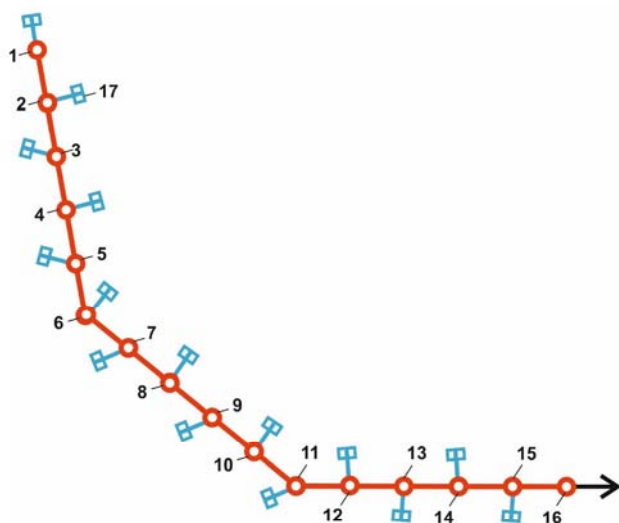


Рис. 1. Схема сети условного бассейна водоотведения:
1–16 — колодцы; 17 — дождеприемники

В дополнение к гидравлическому расчету для условного бассейна водоотведения разработана гидравлическая модель на программном комплексе Mike Urban. Для иллюстрации приведен результат моделирования в виде профиля сети (рис. 2).

Кроме того, расчет сети дополнительно проведен численным методом. Сводные результаты расчетов и моделирования приведены графически (рис. 3 и 4).

Методикой численного экспериментального исследования предусматривалось сравнение результатов прямого гидравлического расчета сетей экспериментального района водоотведения с результатами гидравлического моделирования.

Результаты и обсуждение

1. Исследование расходов поверхностного стока

В качестве хода моделируемого дождя принято изменение во времени интенсивности расчетного дождя для Санкт-Петербурга с максимумом в начале и периодом однократного превышения $p = 1$ год, для наглядности исследования проведены в том числе и для дождя с максимумом в конце. Результаты приведены на рис. 3.

2. Исследование баланса поверхностного стока

В дополнение к расходным характеристикам получены балансовые зависимости в виде объемов поверхностного стока (рис. 4).

Результаты гидравлического расчета

Номер участка	Длина участка, м	Скорость протока, м/с	Время протока, мин		Площади стока, га			Удельный расход, л/с	Расчетный расход, л/с	Диаметр	Уклон	Наполнение в долях d
			по участку	от начала коллектора	собственные	вышележащие	расчетные					
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14
1-2	50	0,78	9,09	9,09	0,2	0	0,2	53,143	10,629	200	0,007	0,447
2-3	50	0,91	0,93	10,02	0,2	0,2	0,4	49,387	19,755	250	0,007	0,453
3-4	50	0,90	0,95	10,97	0,2	0,4	0,6	46,15	27,69	250	0,0055	0,597
4-5	50	0,90	0,94	11,91	0,2	0,6	0,8	43,371	34,697	250	0,003	0,697
5-6	50	0,88	0,97	12,88	0,2	0,8	1	40,899	40,899	300	0,004	0,624
6-7	50	0,90	0,94	13,82	0,2	1	1,2	38,782	46,538	300	0,004	0,678
7-8	50	0,92	0,93	14,75	0,2	1,2	1,4	36,934	51,708	300	0,004	0,742
8-9	50	1,02	0,83	15,58	0,2	1,4	1,6	35,439	56,702	300	0,005	0,73
9-10	50	0,82	1,04	16,62	0,2	1,6	1,8	33,764	60,775	400	0,0025	0,571
10-11	50	0,82	1,04	17,66	0,2	1,8	2	32,262	64,524	400	0,0025	0,594
11-12	50	0,84	1,02	18,67	0,2	2	2,2	30,932	68,05	400	0,0025	0,615
12-13	50	0,84	1,01	19,68	0,2	2,2	2,4	29,734	71,361	400	0,0025	0,635
13-14	50	0,85	1,00	20,68	0,2	2,4	2,6	28,646	74,48	400	0,0025	0,654
14-15	50	0,86	0,99	21,67	0,2	2,6	2,8	27,657	77,439	400	0,0025	0,672
15-16	50	0,87	0,98	22,65	0,2	2,8	3	26,751	80,252	400	0,0025	0,69

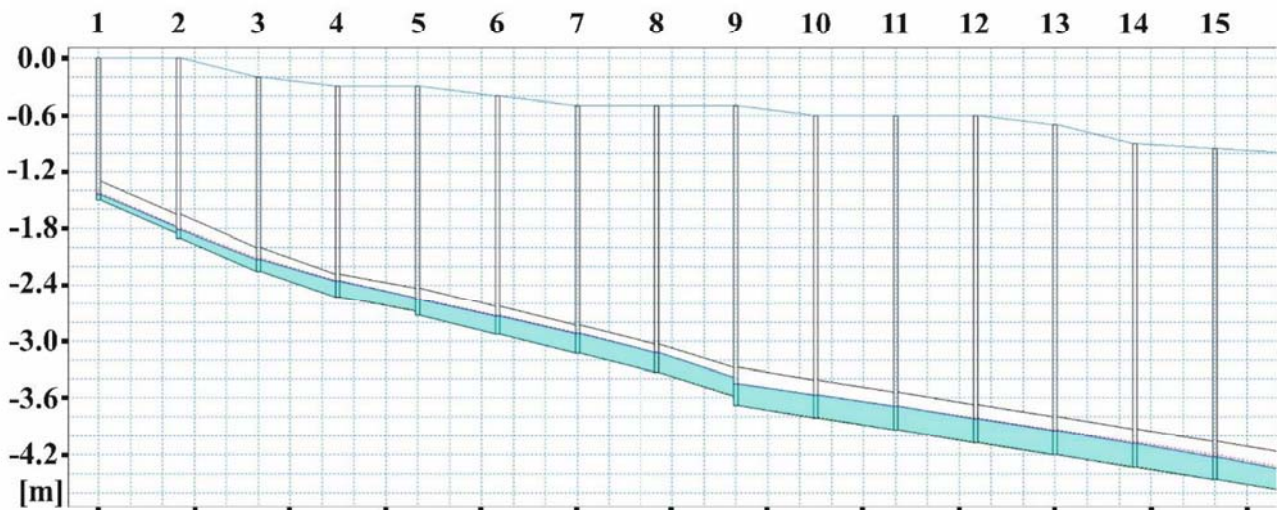


Рис. 2. Профиль сети

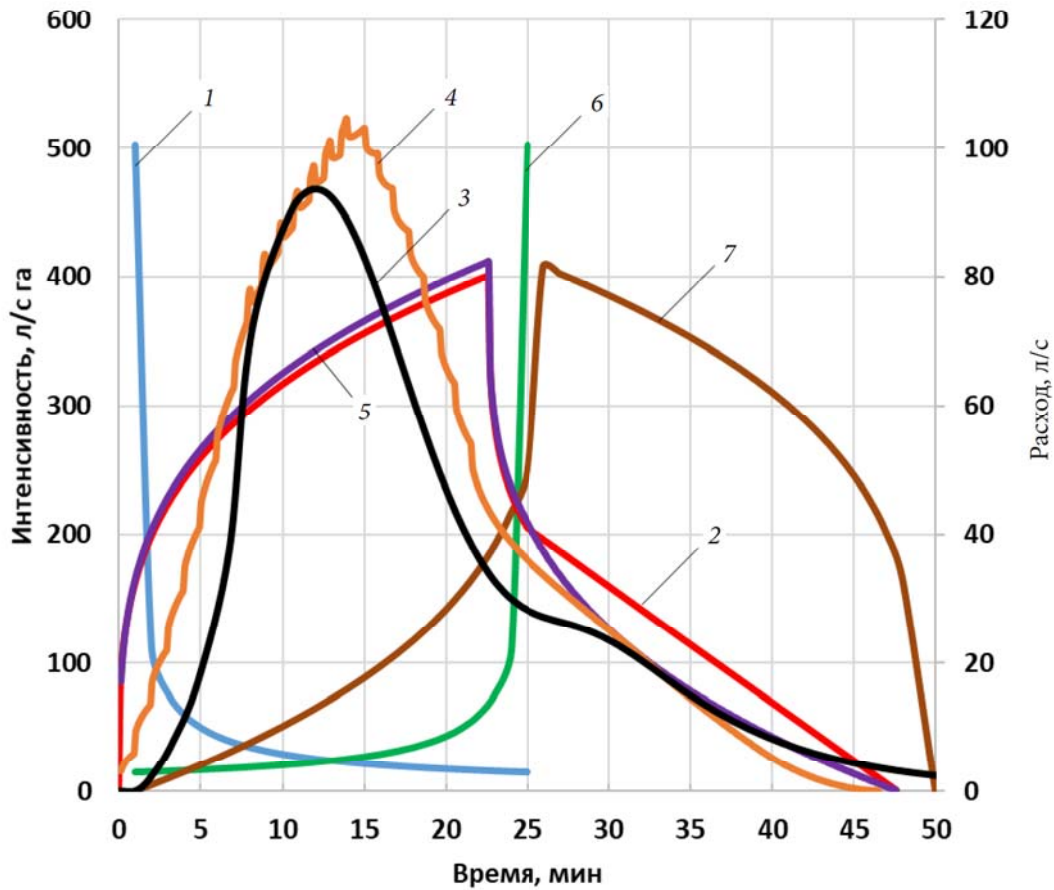


Рис. 3. Результаты оценки гидрографов стока с бассейна водоотведения: 1 — ход расчетного дождя с максимумом в начале; 2 — аналитический гидрограф стока для расчетного дождя с максимумом в начале; 3 — то же, гидрограф по модели Mike Urban; 4 — то же, гидрограф по численному эксперименту с дискретной равномерностью нарастания площадей стока; 5 — то же, с непрерывной равномерностью нарастания площадей стока; 6 — ход расчетного дождя с максимумом в конце; 7 — гидрограф по численному эксперименту с непрерывной равномерностью нарастания площадей стока

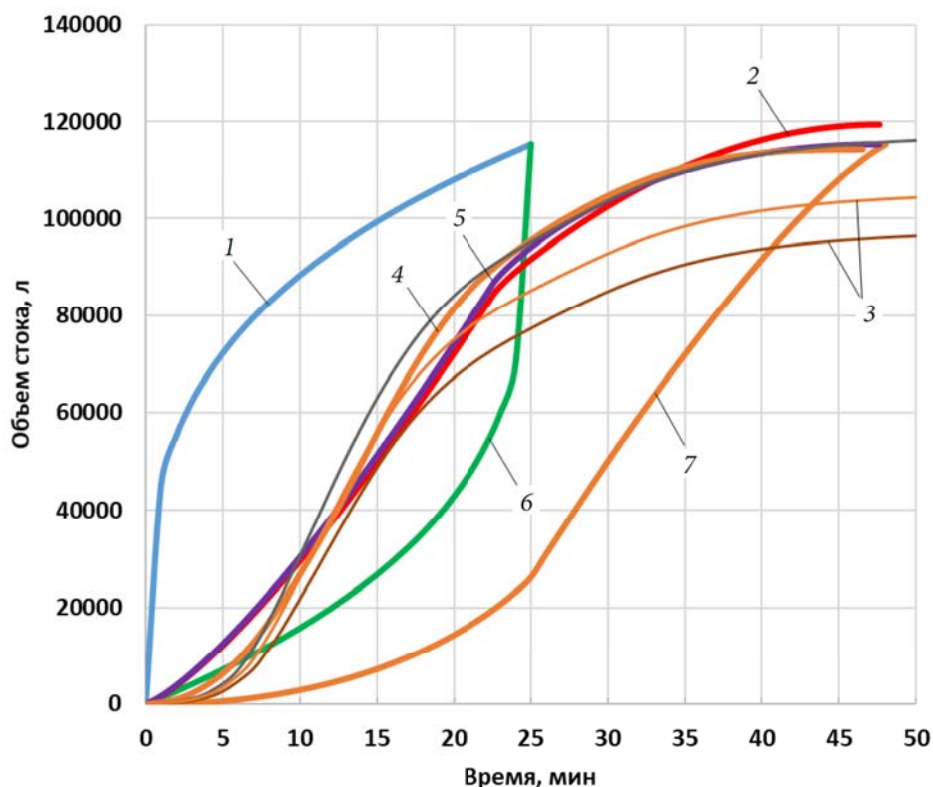


Рис. 4. Результаты оценки объемов стока с бассейна водоотведения: 1 — выпадение расчетного дождя с максимумом в начале; 2 — отведение стока от дождя с аналитическим гидрографом с максимумом в начале; 3 — то же, гидрограф по модели Mike Urban; 4 — то же, гидрограф по численному эксперименту с дискретной равномерностью нарастания площадей стока; 5 — то же, с непрерывной равномерностью нарастания площадей стока; 6 — выпадение расчетного дождя с максимумом в конце; 7 — отведение стока от дождя по численному эксперименту с непрерывной равномерностью нарастания площадей стока

Выводы

1. Наиболее распространенным в мировой практике является рациональный метод гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностного стока. Он применяется в Европе, США и других странах. В Российской Федерации в качестве нормативного метода предусмотрен метод предельных интенсивностей, являющийся наиболее развитой ветвью развития рационального метода. При этом допущения, принятые при их разработке, не отличаются между собой. Основной причиной их принятия явились ограниченные вычислительные возможности того исторического времени, когда они были разработаны. Очевидно, что в силу принятых допущений два метода имеют погрешности, которые глубоко не исследованы.

2. С целью определения степени погрешностей известных методов гидравлических расчетов сетей водоотведения поверхностного стока проведен численный эксперимент на представительном бассейне водоотведения, созданном с соблюдением условия равномерного дискретного нарастания площадей стока по длине коллектора.

3. Результаты исследования расходов на конечном участке коллектора, полученные с применением метода предельных интенсивностей и по гидравлической модели, показали их сходимость при условии непрерывного равномерного нарастания площадей поверхностного стока.

4. При равномерном дискретном нарастании площадей стока применение метода предельных интенсивностей приводит к занижению расчетных расходов на 15–20 %. При неравномерном

дискретном нарастании погрешность расчетов может значительно увеличиться.

Библиографический список

1. Белов Н. Н. Расчет дождевой канализационной сети. М.: Изд-во Наркомвнудела, 1931. 64 с.
2. Горбачев П. Ф. Методы расчета ливневого стока. М.: Изд-во «Власть Советов» при Президиуме ВЦИК, 1937. 167 с.
3. Зак Г. Л. Гидравлические основы расчета канализационных сетей. М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1935. 173 с.
4. Молоков М. В., Шигорин Г. Г. Дождевая и общесплавная канализация. М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1954. 332 с.
5. Сурин А. А. Учет емкости сети при расчете дождевой канализации // Коммунальное дело. 1930. № 5. С. 67–78.
6. Алексеев М. И., Курганов А. М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2000. 352 с.
7. Курганов А. М. Закономерности формирования и движения дождевых стоков в безнапорных трубопроводах: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1980. 433 с.
8. Молоков М. В. Дождевая канализация площадок промышленных предприятий. Л.: Стройиздат, 1964. 184 с.
9. Смирнов С. А. Измерение количества жидких осадков на сгущенной осадкомерной сети // Труды ГГО. 1966. Вып. № 195. С. 133–137.
10. Богомазова З. П., Петрова З. П. Исследование выдающихся дождей Северо-Западного района Европейской территории СССР и их зависимости от площади распространения // Труды ГГИ. 1947. Вып. № 1(55). С. 106–143.
11. Белов Н. Н., Молоков М. В. Вывод формул интенсивностей дождей для расчета дождевых канализаций // Труды ЛНИИКХ. Санитарная техника и коммунальное благоустройство. Л.: ЛНИИКХ, 1938. 184 с.
12. 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. № 6. С. 50–56.
13. Kotowski A., Kaźmierczak B. Zalecenia metodyczne do ćwiczeń projektowych i prac dyplomowych z kanalizacji rozdzielczej dla kierunku Inżynieria Środowiska (IŚ) // Rynek Instalacyjny. 2019. № 10. 80 p.

14. Kondratenko J., Kotoviča N., Reča M. Regional and national policy recommendations for implementing the integrated stormwater management in the Baltic Sea Region // Deliverable 4.4 of the BSR WATER project, co-funded by the European Development Fund. Riga City Council, 2021. 64 p.

15. Carlsson K. Svenskt Vatten påtar sig inget ansvar för eventuella felaktigheter, tryckfel eller felaktig användning av denna publikation // Svenskt Vatten AB. Mars, 2004. 28 p.

16. Holland D. J. Rain Intensity Frequency Relationships in Britain. British Rainfall 1961 // Hydrological Memorandum 33. 1967. Part III. Pp. 43–51.

17. Watkins L. H. The Design of urban sewer systems // Road Research Tech. Paper No.55. London.: Dept. of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory, 1962. 61 p.

18. Braine C. D. C. The effect of storage on sewerage design // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1955. Pt. III, vol. 4. No. 2. Pp. 446–468.

19. Lewis R. P. W. Rainfall investigations at Cardington and Winchcombe 1954–67. // Meteorol. Mag. 1986. No. 115. Pp. 86–94.

20. Arnell V., Melin H. Rainfall data for the design of sewer detention basins // Goteborg: Chalmers tekniska högskola Geohydrologiska forskningsgruppen, 1984. 96 p.

References

1. Belov N. N. *Raschet dozhdevoy kanalizatsionnoy seti* [Calculation of rain sewerage network]. Moscow, Narkomvnudel Publ., 1931, 64 p.
2. Gorbachev P. F. *Metody rascheta livneвого stoka* [Methods of calculation of storm water runoff]. Moscow, "Vlast' Sovetov" pri Prezidiume VTsIK Publ., 1937, 167 p.
3. Zak G. L. *Gidravlicheskie osnovy rascheta kanalizatsionnykh setey* [The basics of hydraulic calculation of sewerage networks]. Moscow Leningrad, Glavnaya redaktsiya stroitel'noy literatury Publ., 1935, 173 p.
4. Molokov M. V., Shigorin G. G. *Dozhdevaya i obshchespavnaya kanalizatsiya* [Rainwater and general drainage system]. Moscow, Ministerstvo kommunal'nogo khozyaystva RSFSR Publ., 1954, 332 p.
5. Surin A. A. *Uchet emkosti seti pri raschete dozhdevoy kanalizatsii* [Taking into account the network capacity when calculating rainwater sewerage]. *Kommunal'noe delo –Municipal Economy*, 1930, no. 5, pp. 67–78.
6. Alekseev M. I., Kurganov A. M. *Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhdevogo i talogo) stoka s urbanizirovannykh territoriy* [Organization of drainage of surface (rainwater and meltwater) runoff from urbanized territories]. Moscow, ASV Publ., St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2000, 352 p.

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

8. Molokov M. V. *Dozhdevaya kanalizatsiya ploshchadok promyshlennykh predpriyatiy* [Rainwater drainage of industrial sites]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1964, 184 p.

9. Smirnov S. A. *Izmerenie kolichestva zhidkikh osadkov na sgushchennoy osadkomernoy seti* [Evaluating the amount of liquid precipitation using a fine precipitation network]. *Trudy GGO – Proceedings of the GGO*, 1966, no. 195, pp. 133–137.

10. Bogomazova 3. P., Petrova 3. P. *Issledovanie vydayushchikhnya dozhdey Severo-Zapadnogo rayona Evropeyskoy territorii SSSR i ikh zavisimosti ot ploshchadi rasprostraneniya* [Study of outstanding rains of the North-West region of the European territory of the USSR and their dependence on the distribution area]. *Trudy GGI – Proceedings of GGI*, 1947, no. 1(55), pp. 106–143.

11. Belov N. N., Molokov M. V. *Vyvod formul intensivnostey dozhdey dlya rascheta dozhdevykh kanalizatsiy* [Deriving of formulas of rainfall intensity rate to be used for rain sewers calculation]. *Trudy LNIKKh. Sanitarnaya tekhnika i kommunal'noe blagoustroystvo* [Proceedings of the LNIKKH. Sanitary engineering and municipal improvement]. Leningrad, LNIKKh Publ., 1938, 184 p.

12. Volkov S. N., et al. *Obosnovanie metoda otsenki klimaticheskikh parametrov livnevykh dozhdey po dannym kompleksa osadkomerov (v poryadke obsuzhdeniya)* [Rationale for the method of estimating climatic

parameters of heavy rainfall from the data of precipitation network complex (by way of discussion)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2020, no. 6, pp. 50–56.

13. Kotowski A., Kaźmierczak B. *Zalecenia metodyczne do ćwiczeń projektowych i prac dyplomowych z kanalizacji rozdzielczej dla kierunku Inżynieria Środowiska (IŚ). Rynek Instalacyjny*, 2019, no. 10, 80 p.

14. Kondratenko J., Kotoviča N., Reča M. *Regional and national policy recommendations for implementing the integrated stormwater management in the Baltic Sea Region*. Deliverable 4.4 of the BSR WATER project, co-funded by the European Development Fund. Riga City Council Publ., 2021, 64 p.

15. Carlsson K. *Svenskt Vatten påtar sig inget ansvar för eventuella felaktigheter, tryckfel eller felaktig användning av denna publication*. Svenskt Vatten AB, Mars, 2004, 28 p.

16. Holland D. J. *Rain Intensity Frequency Relationships in Britain*. British Rainfall 1961, *Hydrological Memorandum* 33, 1967, Pt. III, pp. 43–51.

17. *Watkins L. H.* The Design of urban sewer systems. *Road Research Tech. Paper*, no. 55. London, Dept. of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory Publ., 1962, 61 p.

18. *Braine C. D. C.* The effect of storage on sewerage design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1955, Pt. III, vol. 4, no. 2, pp. 446–468.

19. *Lewis R. P. W.* Rainfall investigations at Cardington and Winchcombe 1954–67. *Meteorol. Mag.*, 1986, no. 115, pp. 86–94.

20. *Arnell V., Melin H.* *Rainfall data for the design of sewer detention basins*. Goteborg, Chalmers tekniska högskola Geohydrologiska forskningsgruppen Publ., 1984, 96 p.