



Расчет безнапорных систем канализации с учетом неравномерности поступления сточных вод от абонентов

В.Р. Чупин^{1✉}, М.В. Мороз²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Системы водоотведения рассчитываются из условия их работы в режиме установившегося равномерного движения сточных вод. Однако такой режим возможен в том случае, когда поступающие от абонентов сточные воды в течении суток будут иметь постоянный расход. Это возможно, если каждый абонент будет иметь регулируемую емкость, обеспечивающую средний расход. Но, к сожалению, таких емкостей нигде не предусмотрено и, очевидно, это будет очень дорого. Поэтому поступающие в систему водоотведения сточные воды, имеющие неравномерный характер, вызывают неравномерный режим их движения по трубопроводам и самотечным коллекторам. В работе предлагается моделировать такие режимы на основе метода частиц. В основе метода частиц лежит графическое решение уравнения неразрывности потока (сохранения материи) и уравнения сохранения импульса (движения). Численные эксперименты, проведенные на основе метода частиц, показали, что расход, скорость и глубина изменяются по мере движения сточных вод и имеют волновой характер. Знание таких режимов важно для эффективной организации эксплуатации самотечных коллекторов, приемных резервуаров насосных станций и очистных сооружений. На основе предлагаемых моделей можно исследовать перенос взвешенных веществ и изменение биохимического состава сточных вод, а также рассчитывать аккумулирующую способность самотечных коллекторов.

Ключевые слова: неравномерное движение сточных вод в самотечных коллекторах, расчет и моделирование изменения расхода, скорости и глубины, метод частиц

Для цитирования: Чупин В.Р., Мороз М.В. Расчет безнапорных систем канализации с учетом неравномерности поступления сточных вод от абонентов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 1. С. 133–148. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-133-148>. EDN: OUJSQO.

Original article

Calculation for non-pressure sewage systems taking into account the irregularity of wastewater inflow from subscribers

Victor R. Chupin^{1✉}, Maria V. Moroz²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Sewerage systems are calculated according to the conditions of their operation in the mode of steady uniform wastewater flow. However, this mode is only likely to occur when the wastewater received from subscribers has a constant flow rate during the day. This, in turn, is possible if each subscriber has a regulating tank that ensures an average flow rate. Unfortunately, the established standards do not provide for such containers and, obviously, they are very expensive. Therefore, the wastewater nonuniformly enters the sewerage and nonuniformly flows through pipelines and gravity sewers. The presented work aims to model such modes of flow motion based on the particle method. The particle method is based on a graphical solution of the continuity equation (matter conservation) and the momentum conservation equation (motion). Numerical experiments performed using the particle method showed that flow rate, speed, and depth vary as wastewater moves, and they have a wave character. Knowledge of such modes is important to effectively organize the operation of gravity sew-

ers, receiver tanks of pumping stations and treatment plants. Based on the proposed models, one can study the transfer of suspended solids and changes in the biochemical composition of wastewater. Moreover, the models can be used to calculate the storage capacity of gravity sewers.

Keywords: uneven movement of wastewater in gravity collectors, calculation and modeling of flow rate, velocity and depth changes, particle method

For citation: Chupin V.R., Moroz M.V. Calculation for non-pressure sewage systems taking into account the irregularity of wastewater inflow from subscribers. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(1): 133-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-133-148> EDN: OUJSQO.

ВВЕДЕНИЕ

В СП 32.13330.2018¹ рекомендуется определять расчетные максимальные и минимальные расходы сточных вод по результатам инструментальных измерений либо в результате компьютерного моделирования систем водоотведения, учитывающих графики притока сточных вод от зданий, жилых массивов, промышленных предприятий, протяженность и конфигурацию сетей, наличие насосных станций и другие факторы.

Что касается фактического потребления и отведения сточных вод, то такая статистика накапливается в каждом населенном пункте и городе, и ее можно использовать при расчете существующих сетей и сооружений канали-

зации, а также для решения задач их развития и реконструкции.

В г. Иркутске, с населением в 630 тыс. чел., имеются два очистных канализационных сооружений (КОС).

В отношении р. Ангара – это правобережные и левобережные. Для правобережным КОС гистограмма поступления сточных вод от населения в количестве 194 тыс. чел. представлена в табл. 1, а на рис.1 показан наиболее вероятный график поступления сточных вод.

При этом средний расход составляет 0,36 м³/с., коэффициенты неравномерности, соответственно, равны: $K_{max} = 1,25$, $K_{min} = 0,58$, и они отличаются от предлагаемых в СП 32.13330.2018¹ значений.

Таблица 1. Гистограмма поступления сточных вод на правобережные канализационные очистные сооружения г. Иркутска
Table 1. Histogram of wastewater inflow to the right-bank WWTP of Irkutsk

М³/С	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0,48	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	15	13	12	12	1	2	1	2	1	–	–	2	–	–
0,45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6	51	57	54	62	6	8	8	7	8	–	–	9	–	–
0,44	–	–	–	–	–	–	–	–	–	12	14	12	12	12	18	11	10	13	16	2	1	10	2	1
0,42	–	–	–	–	–	–	–	–	1	61	9	8	9	6	51	58	62	56	50	8	7	58	9	8
0,40	–	–	–	–	–	–	–	–	7	13	1	1	2	1	17	11	10	13	16	10	11	10	11	15
0,38	–	–	–	–	–	–	–	1	14	6	–	–	–	–	6	8	8	7	8	61	62	9	55	51
0,36	1	–	–	–	–	–	–	9	56	1	–	–	–	–	1	2	1	2	1	9	11	2	11	16
0,34	3	–	–	–	–	–	–	16	14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8	7	–	9	8
0,32	5	–	–	–	–	–	–	47	7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	1	–	2	1
0,30	14	1	–	–	–	2	1	17	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,28	56	6	1	1	2	8	6	9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,26	14	8	9	6	9	16	10	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,24	5	11	18	17	20	48	66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,22	3	48	44	52	39	16	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,20	1	11	18	17	19	8	6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,18	–	8	9	6	9	2	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,16	–	6	1	1	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

¹СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Стандартинформ, 2018. 70 с.

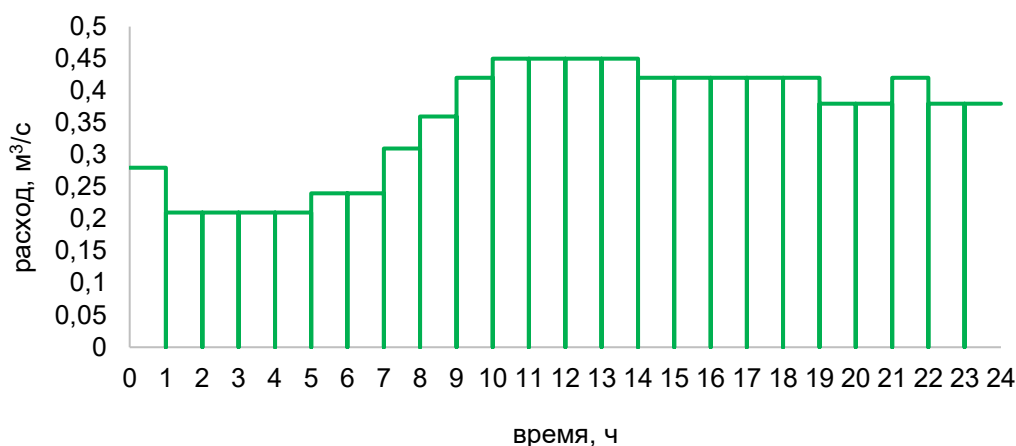


Рис. 1. Наиболее вероятный график поступления сточных вод на правобережные канализационные очистные сооружения г. Иркутска
Fig. 1. The most likely schedule for the flow of wastewater to the right-bank sewage treatment plants of Irkutsk

Такие показатели указывают на то, что даже на магистральных коллекторах водоотведения наблюдается значительная неравномерность движения сточных вод. И для обоснования параметров приемных резервуаров КОС, а также для оценки аккумулирующей способности самотечных коллекторов требуется рассчитывать их с учетом неравномерности поступления сточных вод как в систему водоотведения, так и при транспортировке ее по трубопроводам и коллекторам.

Из гидравлики и гидромеханики известно, что в случае изменения давления в источнике или изменения напора на насосной станции, открытия или закрытия водоразборной арматуры в напорных трубопроводных системах изменение расхода транспортируемой жидкости в любом из сечений происходит практически мгновенно (со скоростью звука в воде). В безнапорных трубопроводных системах расход изменяется за время движения стоков от узла сброса до исследуемого сечения или от начального узла до конечного узла расчетного участка сети. Для протяженных коллекторов это время может быть значительным, а в условиях больших городов может исчисляться часами. Для ливневой канализации время формирования поверхностного водостока и его движение по лоткам и коллекторам является определяющим при обосновании параметров и мощности транспортирующих сооружений.

Очевидно, что разные объемы сточных вод, поступающие в коллекторы круглого сечения в различные временные интервалы, будут перемещаться с различными скоростями

и будут наталкиваться друг на друга, деформировать друг друга и формировать волновой характер движения сточной жидкости.

В теории расчета систем водоснабжения и водоотведения принято неравномерные значения поступления стоков или потребления воды моделировать ступенчатым графиком, в котором, например, часовые расходы принимают средние постоянные значения. Поэтому можно принять, что некоторые порции стоков неизменны во времени и перемещаются независимо друг от друга. Следовательно, значения расходов сточных вод в конце расчетного участка или через определенный интервал времени можно определить через время протекания каждой такой порции. Время протекания вычисляется как длина участка, деленная на скорость.

При определении параметров безнапорного коллектора используются формулы для расчета расхода и скорости движения сточных вод при равномерном установившемся движении сточных вод, в основе которых лежит определение расхода стоков при их транспортировании полным сечением. Величина этого расхода определяется из формулы Антуана Шези² [1]:

$$q_i = \omega \cdot c \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (1)$$

где ω – площадь живого сечения, м², равная

для полного сечения $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$; c – коэффициент Шези, который определяется как

$$c = \frac{R^y}{n};$$

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{R} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1),$$

²Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

или приближенно $y = 1/6$,
 здесь R – гидравлический радиус, равный ω/χ ,
 где χ – смоченный периметр. Для полного сечения $R = d/4$, следовательно, расход для полного сечения будет равен

$$q_n = \frac{0,314}{n} \cdot d^{2,667} \cdot i^{0,5}, \quad (2)$$

где d, i – диаметр и уклон участка сети.

Для транспортировки сточных вод неполным сечением скорость движения потока вычисляется из формулы

$$v = c \cdot \sqrt{R \cdot i} = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}. \quad (3)$$

Гидравлический радиус определяется по формуле³

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{d(\alpha - \sin \alpha)}{4\alpha}, \quad (4)$$

где $\alpha = 2 \arccos(1 - 2k)$,

где $k = \frac{\frac{q}{q_n} + 0,22}{1,34}$.

Пример.

Дано: $q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$; $n = 0,015$; $d = 2 \text{ м}$; $i = 0,001$.

Найти: k, v, h .

Решение:

$$q_n = \frac{0,314}{0,015} \cdot 2^{2,667} \cdot 0,001^{0,5} = 4,2 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$k = \frac{\frac{2}{4,2} + 0,22}{1,34} = 0,519;$$

$$h = k \cdot d = 0,519 \cdot 2 = 1,04 \text{ м};$$

$$\alpha = 2 \arccos(1 - 2 \cdot 0,519) = 3,217 \text{ (рад)};$$

$$R = \frac{2(3,217 - \sin 3,217)}{4 \cdot 3,217} = 0,512;$$

$$v = \frac{1}{0,015} \cdot 0,512^{2/3} \cdot 0,001^{1/2} = 1,35 \text{ м/с};$$

$$\omega = q_i / v = 2 / 1,35 = 1,48 \text{ м}^2.$$

Основываясь на (1)–(4), нетрудно рассчитать скорость движения каждой частицы, время, за которое она переместится на расстояние четного участка или до контролируемого створа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для моделирования неравномерности поступления сточной жидкости в коллектор и ее перемещения в зависимости от времени и длины предлагается использовать «метод частиц», который в нашей стране развивается под руководством профессора С.В. Богомолва [2–8], а также другими авторами, применяющих этот метод в различных сферах деятельности [9–27]. Этот метод уже давно применяется при моделировании волновых процессов в неглубоких каналах при различного рода возмущениях. Например, прикрытие или открытие затворов шлюзовых камер и заполнение их водой, при прорыве платин и дамб, и т.д. В основе этого метода лежит графическое решение уравнения неразрывности потока (сохранения материи) и уравнения сохранения импульса (движения). Поскольку функция потока, входящего в канал или трубопровод, не всегда является гладкой (и даже имеет разрывы), целесообразно ее представлять в виде аппроксимирующего графика, состоящего из прямоугольников. При этом каждый прямоугольник является неделимой частицей и обладает определенной массой и скоростью движения. В начальный момент все частицы соприкасаются друг с другом, образуя единое целое. Затем, по мере движения частиц за счет сил гравитации, они либо разлетаются, либо наползают друг на друга.

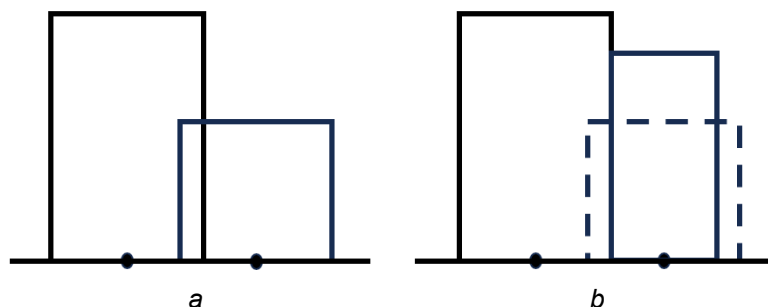


Рис. 2. При столкновении частиц (а) будет перестраиваться частица с меньшим расходом относительно своего центра массы (b)

Fig. 2. When particles collide (a), the particle will rearrange with less flow relative to its center of mass (b)

³Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Курганов А.М. Гидравлический расчет сетей водоотведения: справ. пособие. Л.: СПИСУ, 1997. 128 с.

Это приводит к нарушению принципа неразрывности потока, т.е. уменьшается суммарная площадь прямоугольников, моделирующую объемы переносимой массы вещества (в нашем случае, расхода сточной жидкости). Для восстановления этой площади в методе частиц применяется процедура их перестройки по схеме, показанной на рис. 2–7. Перестройка осуществляется относительно центров частиц, которые на рисунках показаны жирными точками. На рис. 8 и 9 представлены этапы переформирования трех частиц для

случаев, когда скорость частиц уменьшается, и для случая, когда их скорость возрастает, т.е. расход первой частицы больше, чем второй и третьей, и наоборот. Как видно на рис. 8, с, в результате движения частиц с уменьшающимися скоростями происходит их наползание друг на друга. Если в результате сжатия частиц после их перестройки ширина какой-либо из частиц будет незначительной, например, превратится в вертикальную линию, то она должна слиться с частицей, приведшей к такой деформации.

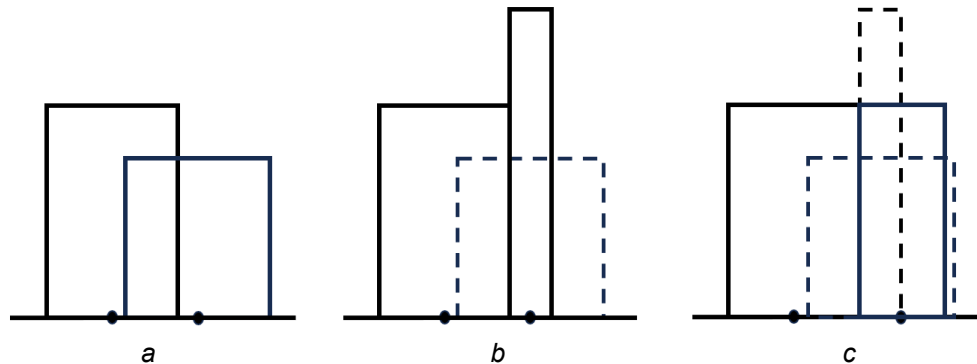


Рис. 3. При столкновении частиц (а) будет перестраиваться частица с меньшим расходом (b) с условием, что перестроенная частица не должна превышать высоту высокой частицы (с)

Fig. 3. When particles collide (a), a particle with a lower flow rate will be rearranged (b) with the condition that the rearranged particle should not exceed the height of the tall particle (c)

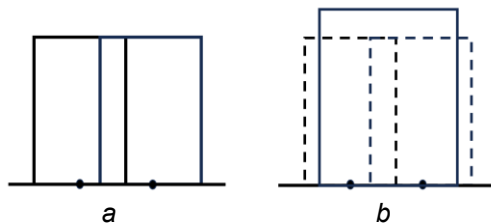


Рис. 4. При столкновении частиц с одинаковым расходом (а) будут перестраиваться обе частицы относительно своих центров масс (b)

Fig. 4. When particles collide with the same flow rate (a), both particles will rearrange relative to their centers of mass (b)

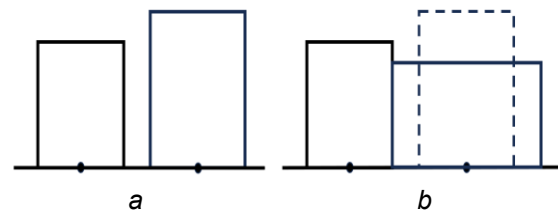


Рис. 5. При разлете частиц (а) перестраиваться будет частица с большим расходом (b)

Fig. 5. When particles fly apart, a particle (a) with a higher height will rearrange (b)

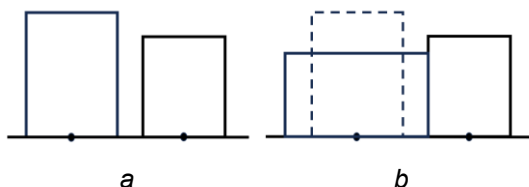


Рис. 6. При разлете частиц (а) перестраиваться будет частица с большим расходом (b)

Fig. 6. When particles fly apart, a particle (a) with a higher height will rearrange (b)

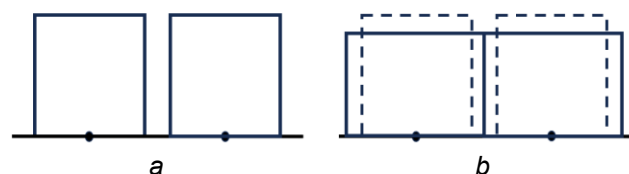


Рис. 7. При разлете частиц с одинаковым расходом (а) перестраиваться будут обе частицы относительно своих центров масс (b)

Fig. 7. When particles fly apart with the same height (a), both particles will rearrange (b)

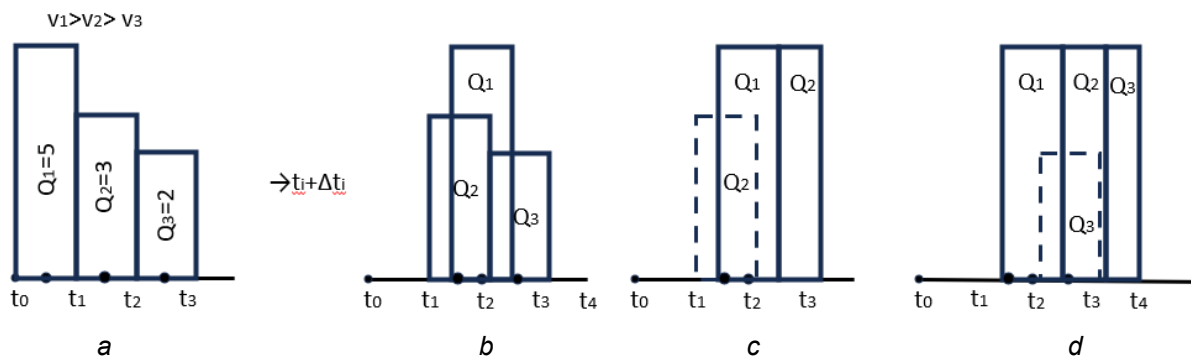


Рис. 8. Иллюстрация перестройки трех частиц (а) при уменьшающемся графике поступления сточных вод в самотечный коллектор (b–d)
Fig. 8. Illustration of the restructuring of three particles (a) with a decreasing schedule for the flow of wastewater into a gravity collector (b–d)

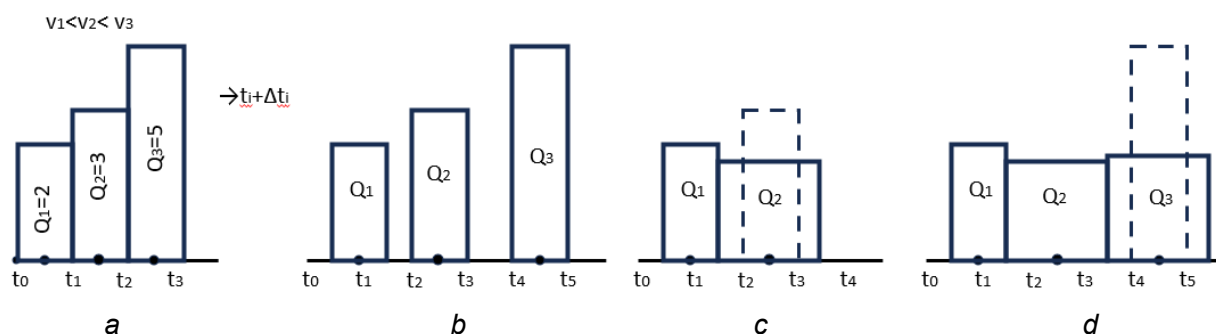


Рис. 9. Иллюстрация перестройки трех частиц (а) при возрастающем графике поступления сточных вод в самотечный коллектор (b–d)
Fig. 9. Illustration of the restructuring of three particles (a) with an increasing schedule of wastewater inflow into a gravity collector (b–d)

Если в результате разлета частиц и после их перестройки окажется, что одна из частиц будет оторвана от других, то пустоту между частицами необходимо заполнить новой частицей с расходом, изъятый у частицы с большим значением расхода.

Если рассматривается график поступления сточных вод от абонентов в безнапорную систему водоотведения (см., например, рис. 1), то таких частиц будет не менее 24. За счет взаимного влияния процесс их перестройки будет более сложным и потребует итеративного процесса коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве иллюстрации работы метода частиц рассмотрим безнапорную систему водоотведения (рис. 10), состоящую из 8 самотечных коллекторов одинаковой протяженности и восьми абонентов, сточные воды от ко-

торых поступают согласно графику, представленному на рис. 1.

Рассмотрим коллектор 7-6, начальный график движения сточных вод для которого будет соответствовать значениям, представленным на рис. 1. Пусть каждая частица начального графика переместилась на расстояние в 4 км со скоростью, вычисленной согласно формулам (1)–(3). В итоге получим график, представленный на рис. 11.

На этом графике (рис. 11) вторая, третья и двадцатая частицы разлетятся, а шестая, седьмая, восьмая – наплзут друг на друга. Для восстановления принципа неразрывности потока осуществим перестройки частиц согласно положениям, представленным на рис. 2–7.

В итоге получим график движения сточных вод, представленный на рис. 12.

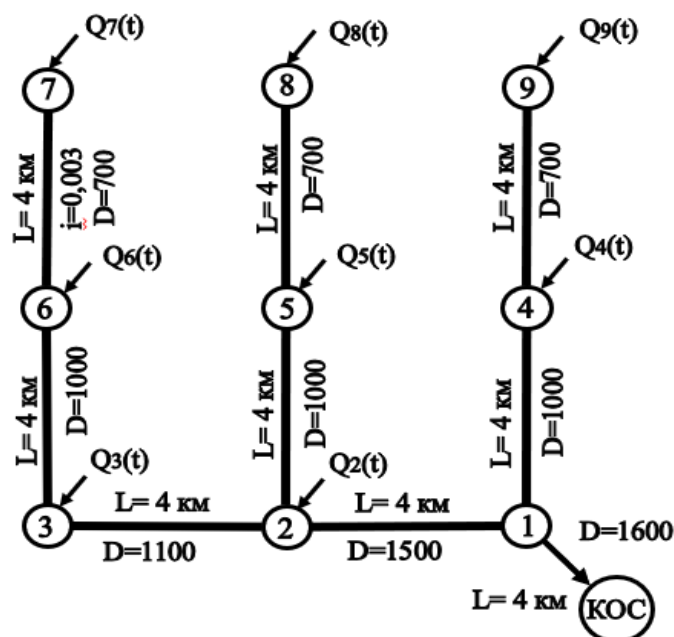


Рис. 10. Безнапорная система водоотведения
Fig. 10. Gravity drainage system

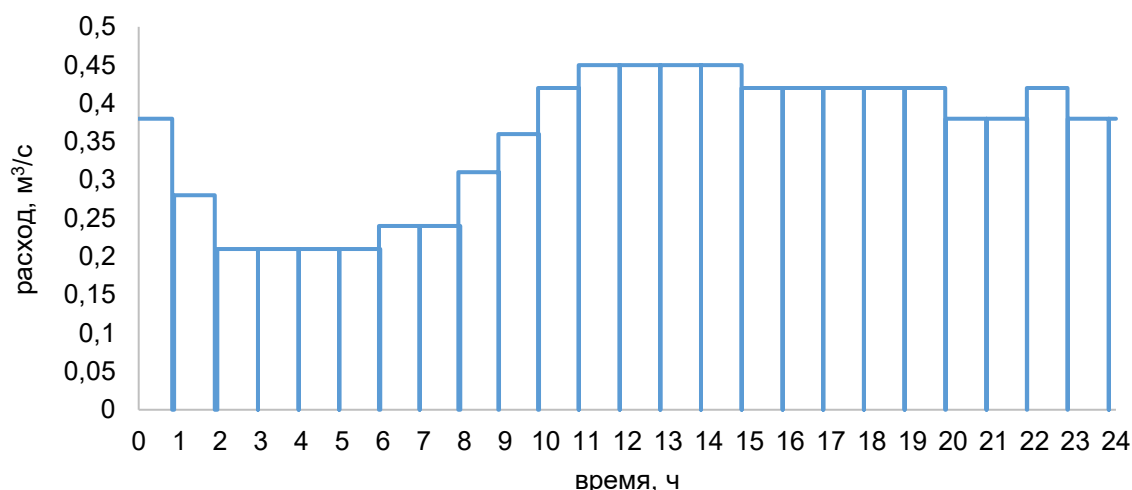


Рис. 11. График движения сточных вод в конце коллектора 7-6
Fig. 11. Graph of wastewater movement at the end of the collector 7-6

Рассмотрим коллектор 6-3, для которого график движения сточных вод в начале участка будет соответствовать рис. 12, плюс график поступления сточных вод от абонента в узел 6 (см. график на рис. 1).

В итоге график движения сточных вод в начале участка 6-3 будет соответствовать рис. 13. С учетом времени перемещения частиц график движения сточных вод в конце коллектора 6-3 будет соответствовать рис. 14, а после его перестройки – рис. 15.

По аналогии определим график движения сточных вод в начале участка 3-2 и вычислим

график движения сточных вод в конце участка 3-2 (см. рис. 16). Такие же вычисления произведем и для участка 1-2 (см. рис. 17).

Для стоков, поступающих на КОС, график будет соответствовать рис. 18. На рис. 19 представлены ступенчатые графики для случаев, если бы не учитывалось время движения сточных вод (зеленый цвет), и с учетом их движения и перестройки (красный цвет).

На рис. 20–24 показаны подобные сопоставления уже для сглаженных графиков (средних по каждому часу значений), начиная с участка 7-6.

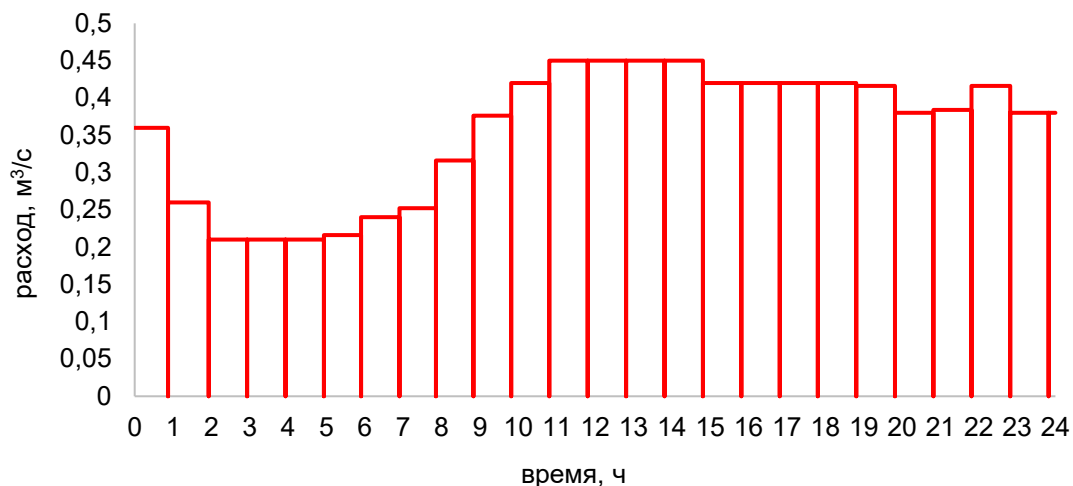


Рис. 12. Перестроенный график движения сточных вод в конце коллектора 7-6
Fig. 12. Rebuilt graph of wastewater movement at the end of the collector 7-6

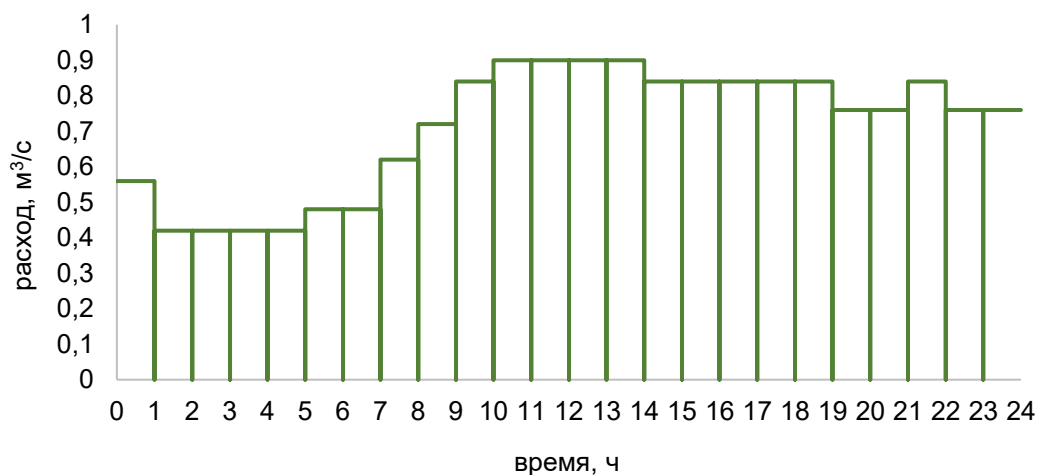


Рис. 13. График движения сточных вод в начале коллектора 6-3
Fig. 13. Graph of wastewater movement at the beginning of the collector 6-3

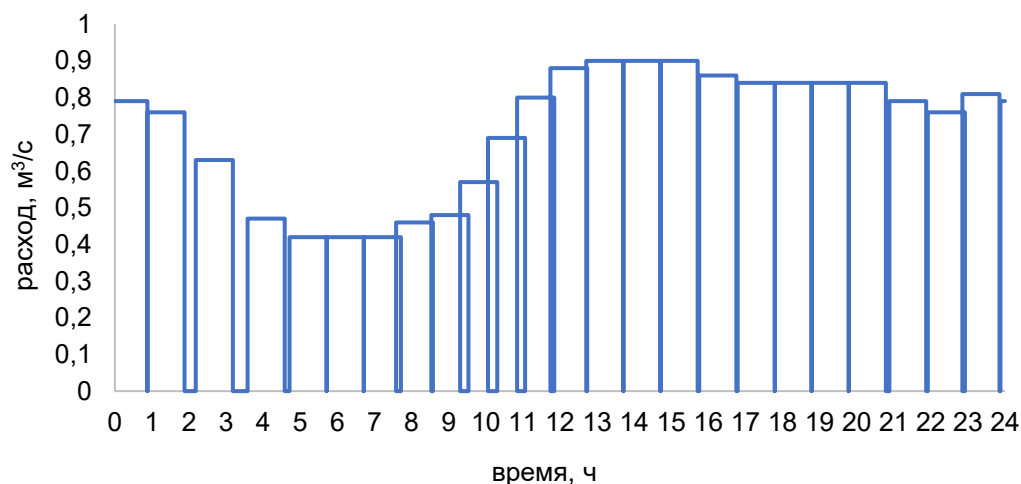


Рис. 14. График движения сточных вод в конце коллектора 6-3
Fig. 14. Sewage flow diagram at the end of the collector 6-3

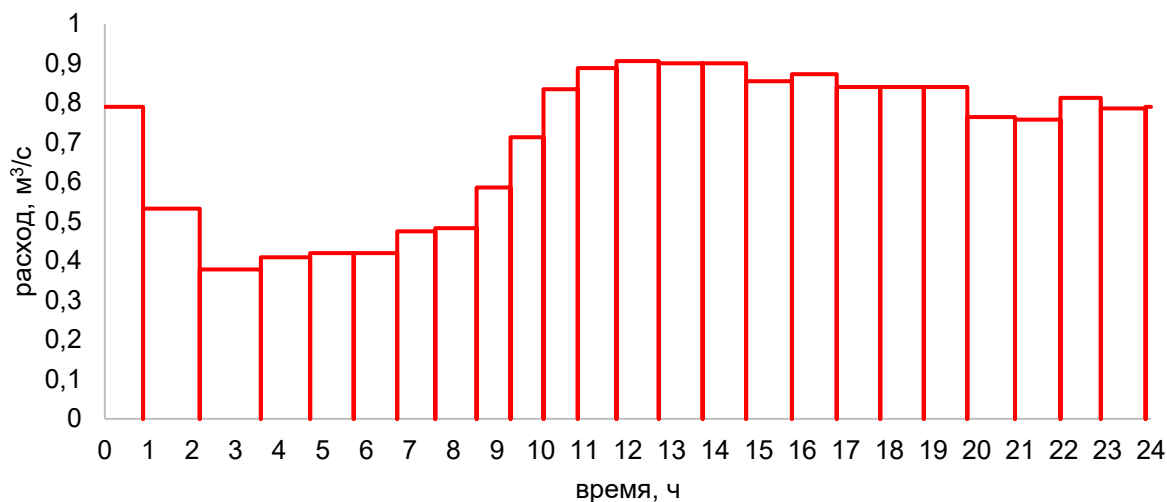


Рис. 15. Перестроенный график движения сточных вод в конце коллектора 6-3
Fig. 15. Rebuilt graph of wastewater movement at the end of the collector 6-3

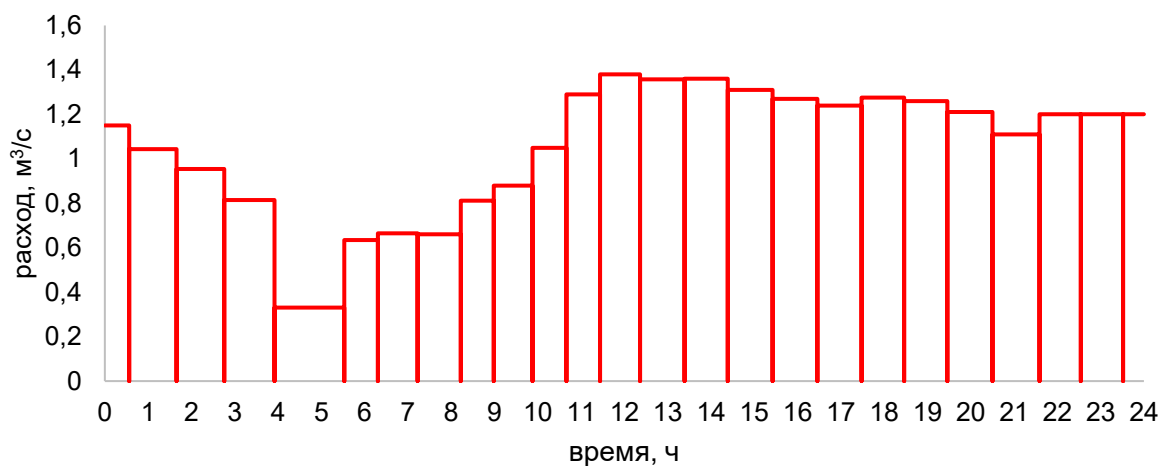


Рис. 16. Перестроенный график движения сточных вод в конце коллектора 3-2
Fig. 16. Rebuilt graph of wastewater movement at the end of the collector 3-2

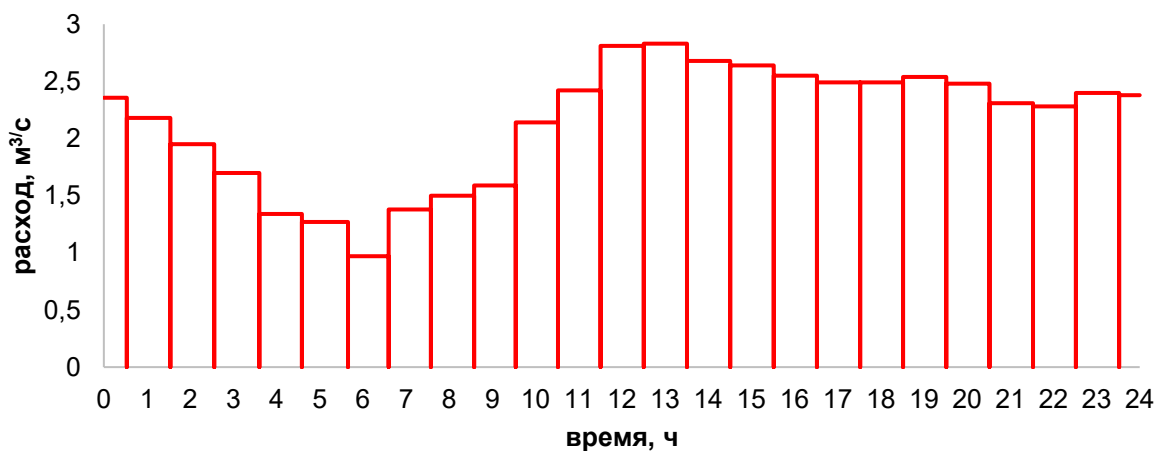


Рис. 17. Перестроенный график движения сточных вод в конце коллектора 2-1
Fig. 17. Rebuilt graph of wastewater movement at the end of collector 2-1

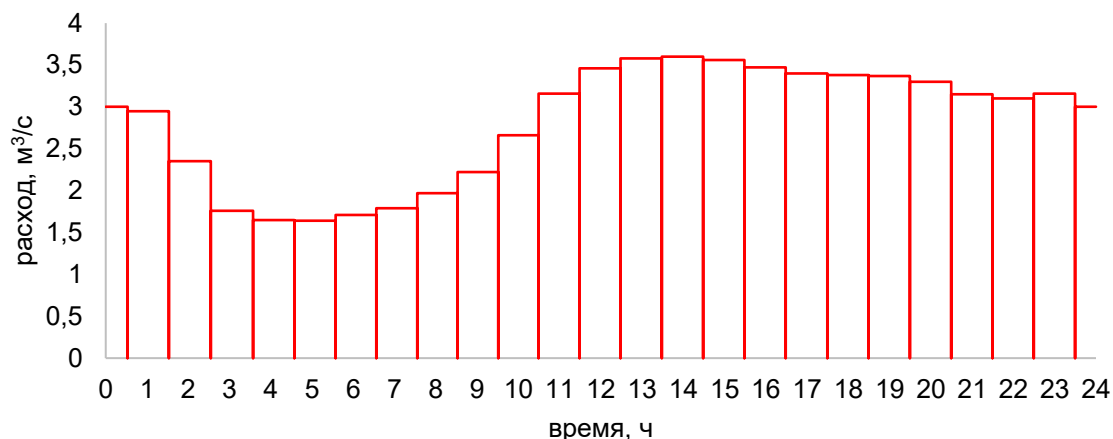


Рис. 18. Перестроенный график движения сточных вод в конце 1-КОС
Fig. 18. Rebuilt graph of wastewater movement at the end of the 1-STP collector

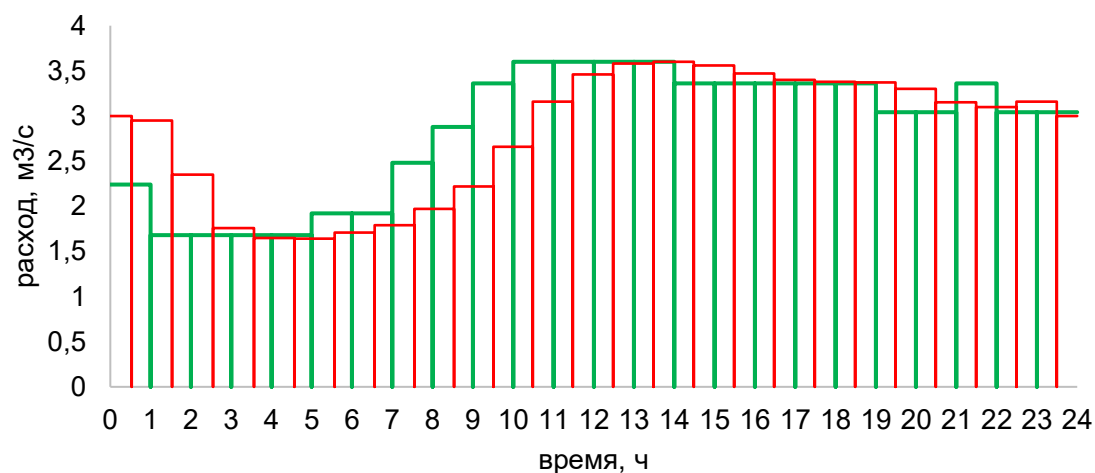


Рис. 19. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 1-КОС (красный цвет) с суммарным графиком поступления сточных вод от всех абонентов в систему водоотведения (зеленым цветом), т.е. без учета времени добегания.

Fig. 19. Comparison of the rebuilt schedule for the movement of wastewater at the end of the 1-STP collector (red) with the total schedule for the flow of wastewater from all subscribers into the drainage system (green), i.e. excluding travel time

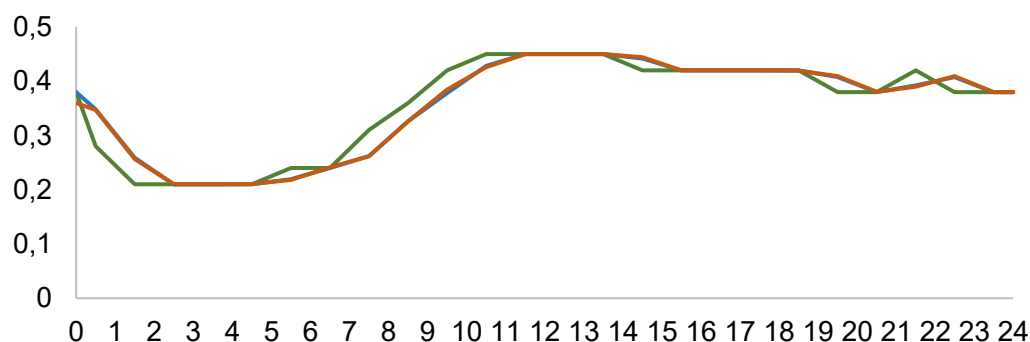


Рис. 20. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 7-6 (красным цветом) с графиком поступления сточных вод в узел 7 (зеленым цветом)

Fig. 20. Comparison of the rebuilt schedule of wastewater movement at the end of collector 7-6 (red) with the schedule for the flow of wastewater into node 7 (green)

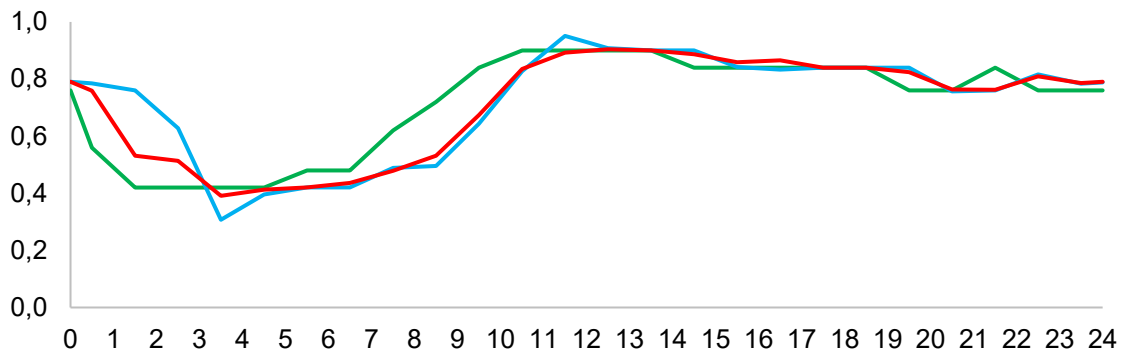


Рис. 21. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 6-3 (красным цветом) с суммарным графиком поступления сточных вод от узлов 7 и 6 (зеленым цветом), голубой цвет – не перестроенный график добегания
Fig. 21. Comparison of the rebuilt graph of wastewater movement at the end of collector 6-3 (red) with the total graph of wastewater flow from nodes 7 and 6 (green), blue color – not rebuilt graph of reaching

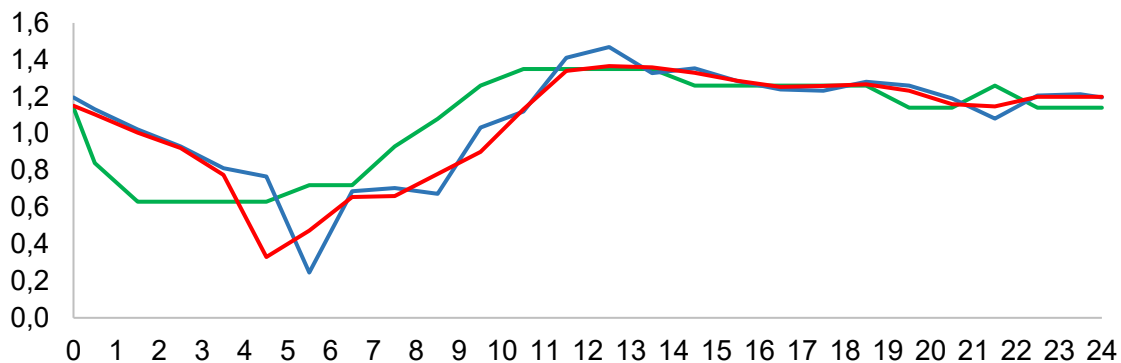


Рис. 22. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 3-2 (красный) с суммарным графиком поступления сточных вод от всех абонентов от узлов 7, 6, 3 в систему водоотведения (зеленый), синий цвет – не перестроенный график добегания
Fig. 22. Comparison of the rebuilt schedule of movement of wastewater at the end of collector 3-2 (in red) with the total schedule of wastewater receipt from all subscribers from nodes 7, 6, 3 into the drainage system (in green), blue – not rebuilt schedule of reaching

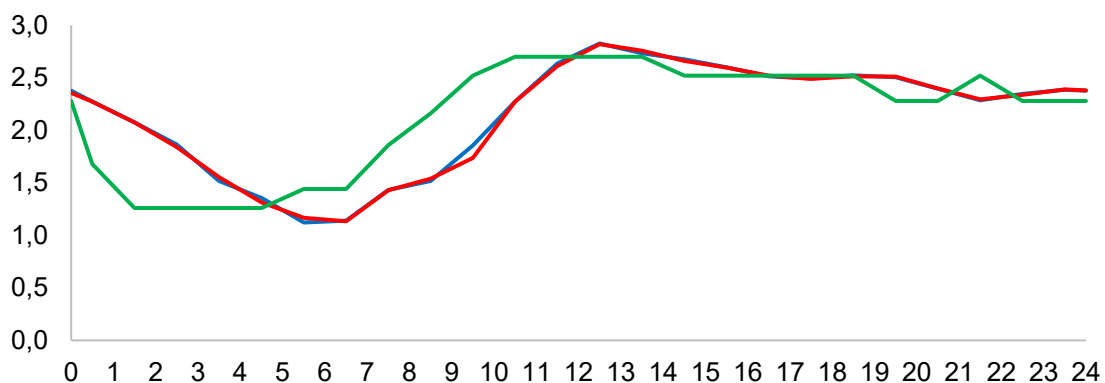


Рис. 23. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 2-1 (красный) с суммарным графиком поступления сточных вод от всех абонентов: 7, 6, 3, 8, 5, 2 в систему водоотведения (зеленый)
Fig. 23. Comparison of the rebuilt schedule for the movement of wastewater at the end of collector 2-1 (red) with the total schedule for the flow of wastewater from all subscribers: 7, 6, 3, 8, 5, 2 into the drainage system (green)

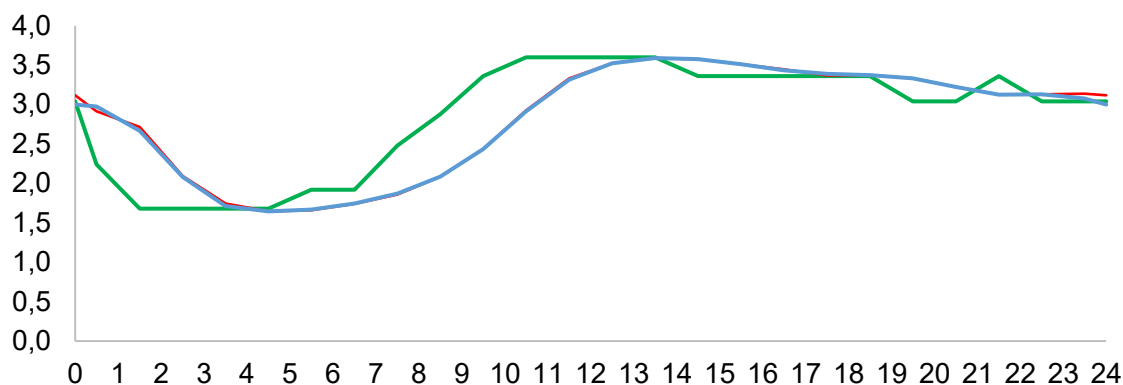


Рис. 24. Сопоставление перестроенного графика движения сточных вод в конце коллектора 1-КОС (синий) с суммарным графиком поступления сточных вод от всех абонентов в систему водоотведения (зеленый)

Fig. 24. Comparison of the rebuilt schedule for the movement of wastewater at the end of the 1-STP collector (blue) with the total schedule for the flow of wastewater from all subscribers into the drainage system (green)

С изменением расхода сточной жидкости по каждому часу будет меняться глубина в самотечном коллекторе. Учитывая время перемещения стоков по каждому часу, расходы в начале и в конце расчетного участка будут различными, следовательно, глубина в начале и в конце участка так же

будет различной. Для коллектора диаметром 1,6 м (участок 1-КОС) эти глубины за сутки будут соответствовать показанным на рис. 25.

Таким образом, по всей длине коллектора будет наблюдаться волновой характер движения сточных вод.

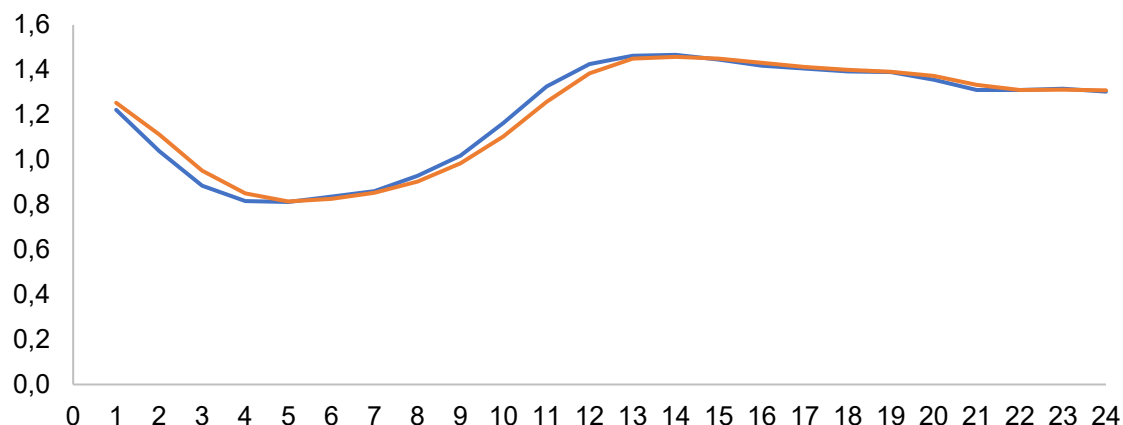


Рис. 25. Сопоставление глубин в коллекторе 1-КОС в начале участка (синий) с глубинами в конце (коричневый)

Fig. 25. Comparison of depths in the 1-KOS reservoir at the beginning of the section (in blue) with depths at the end (in brown)

Для формирования точной картины волнового движения потока расчетный участок сети необходимо разбивать на подучастки либо, как только происходит процесс разделения или сжатия частиц, осуществлять их перестройку. График поступления сточных вод от абонентов можно рассматривать детально, например, по секундам.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные численные эксперименты подтверждают, что в самотечных коллекторах

при неравномерном поступлении сточных вод от абонентов наблюдается волновой режим их движения от начальных участков сети водоотведения до конечных. При этом в самотечных трубопроводах, которые проектируются на режим установившегося равномерного движения сточных вод, такого режима не будет наблюдаться, или действия его по времени не будут значительными.

2. Расчеты также подтвердили, что расход в сети за счет трансформации частиц

и различных скоростей их движения будет иметь волновой, но за счет трансформации частиц, затухающий характер, и его максимальные значения не превысят расходы, полученные путем сложения графиков поступления сточных вод в систему водоотведения.

3. Учесть неравномерность поступления сточных вод на уровне проектирования и при обосновании параметров самотечных трубопроводов затруднительно и нет в этом необходимости. Системы водоотведения следует проектировать на установившейся равномерный режим движения сточных вод исходя из прогнозных значений поступления сточных вод от абонентов в систему и, как показали расчеты, фактические наполнения не превысят их допустимые значения.

4. При эксплуатации систем водоотведения, оценки их надежности и пропускной способности, при управлении насосными

станциями и аварийно-регулирующими резервуарами расчеты и моделирование надо производить на основе неравномерных графиков поступления сточных вод и их движения по самотечной сети водоотведения.

5. В условиях автоматизированной системы контроля и учета поступления сточных вод в систему водоотведения можно производить подобные расчеты и прогнозировать время и количество сточных вод, поступающих в приемные резервуары КНС или КОС.

6. На основании данных расчетов можно анализировать изменение скоростей движения сточных вод по длине расчетного участка и прогнозировать процесс отложения осадка и его размыв.

7. В случае закупорки или отключения трубопровода данный расчет позволит определить аккумулирующую способность самотечной сети и рассчитать допустимое время ликвидации аварийной ситуации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2015. 417 с. EDN: UOATQZ.
2. Богомолов С.В., Замараева А.А., Кузнецов К.В., Карабелли Х. Консервативный метод частиц для квазилинейного уравнения переноса // Журнал вычислительная математика и математической физики. 1998. Т. 38. № 9. С. 1602–1610.
3. Богомолов С.В. Метод частиц. Несжимаемая жидкость // Математическое моделирование. 2003. Т.15. № 1. С. 46–58.
4. Богомолов С.В., Кувшинников А.Е. Разрывный метод частиц на газодинамических примерах // Математическое моделирование. 2019. Т. 31. № 2. С. 63–77. <https://doi.org/10.1134/S0234087919020059>. EDN: MNNTZN.
5. Богомолов С.В. Метод частиц для уравнения Бюргерса // Математическое моделирование. 1991. Т. 3. № 12. С. 115–119.
6. Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В. Моделирование волн на мелкой воде методом частиц // Математическое моделирование. 2002. Т.14. № 3. С.103–116.
7. Bogomolov S.V., Kuvshinnikov A.E. A discontinuous shapeless particle method for the quasi-linear transport // Marchuk Scientific Readings: International Conference (Novosibirsk, 04–08 October 2021). Novosibirsk, 2021. Vol. 2099. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2099/1/012009>. EDN: WPTHVD.
8. Bondarev A.E. On the estimation of the accuracy of numerical solutions in CFD problems // Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11540. P. 325–333. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22750-0_26.
9. Alekseev A., Bondarev A., Galaktionov V., Kuvshinnikov A., Shapiro L. On applying of generalized computational experiment to numerical methods verification // GraphiCon 2020: Proceedings of the 30th International conference on computer graphics and machine vision (Saint Petersburg, 22–25 September 2020). Saint Petersburg, 2020. EDN: KNJJPP.
10. Bondarev A.E. Processing of Visual Results of a Generalized Computational Experiment for the Problem of Supersonic Flow Around a Cone at an Angle of Attack // Scientific Visualization. 2021. Vol. 13. P. 104–116. <https://doi.org/10.26583/sv.13.2.08>.
11. Bondarev A., Kuvshinnikov A. Parametric study of the accuracy of OpenFOAM solvers for the oblique shock wave problem // Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS-2019). Proceedings-2019 (Moscow, 05–06 December 2019.). Moscow, 2019. P. 106–112. <https://doi.org/10.1109/ISPRAS47671.2019.00023>. EDN: ZQRKUJ.
12. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры: монография. 2-е изд. М.: Физматлит, 2005. 320 с.
13. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 640 с.

14. Oñate E., Idelsohn S.R., Del Pin F., Aubry R. The particle finite element method – an overview // *International Journal of Computational Methods*. 2004. Vol. 01. Iss. 02. P. 267–307. <https://doi.org/10.1142/S0219876204000204>.
15. Harlow F.H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics // *Methods in computational physics*. 1964. Vol. 3. P. 319–343.
16. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Нестационарный метод «крупных частиц» для газодинамических расчетов // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1971. Vol. 11. Iss. 1. P. 182–207.
17. Ardelyan N.V., Bisnovaty-Kogan G.S., Moiseenko S.G. Simulation of magnetorotational astrophysical processes by implicit operator-difference scheme // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2017. Vol. 38. № 5. P. 874–879.
18. Idelsohn S., Nigro N., Limache A., Oñate E. Large time-step explicit integration method for solving problems with dominant convection // *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2012. Vol. 217–220. P. 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.12.008>.
19. Teleaga D., Struckmeier J. A finite-volume particle method for conservation laws on moving domains // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2008. T. 58. № 9. C. 945–967. <https://doi.org/10.1002/fld.1778>.
20. Баев А.Ж., Богомолов С.В. Об устойчивости разрывного метода частиц для уравнения переноса // *Математическое моделирование*. 2017. Т. 29. № 9. С. 3–18. EDN: ZFWYWL.
21. Jiang Ch., Schroeder C., Teran J. An angular momentum conserving affine-particle-in-cell method // *Journal of Computational Physics*. 2017. T. 338. C. 137–164. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.02.050>.
22. Fu Ch., Guo Q., Gast Th., Jiang Ch., Teran J. A Polynomial Particle-In-Cell Method // *ACM Transactions on Graphics*. 2017. Vol. 36. Iss. 6. P. 222:1–222:12. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130878>.
23. Lucy L.B. A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis // *Astronomical Journal*. 1977. Vol. 82. P. 1013–1024. <https://doi.org/10.1086/112164>.
24. Idelsohn S.R., Oñate E., Del Pin F. The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004. Vol. 61. Iss. 7. P. 964–989. <https://doi.org/10.1002/nme.1096>.
25. Воробьев А.П., Кривенцев В.И., Qian Lin, Xuewu Cao. Моделирование фрагментации в жидких средах методом сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics) // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2008. № 1. С. 85–94. EDN KBBBOR.
26. Солбаков В.В., Юрезанская Ю.С. Сравнение метода SPH и стохастического метода дискретных частиц при решении уравнений мелкой воды // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 24. С. 1690–1696. EDN: ICQPAI.

REFERENCES

1. Chupin R.V. Optimization of developing wastewater disposal systems. Irkutsk: Irkutsk national research technical university; 2015. 417 p. (In Russ.). EDN: UOATQZ.
2. Bogomolov C.V., Zamaraeva A.A., Kuznetsov K.V. Karabelli Kh. A conservative particle method for a quasi-linear transport equation. *Zhurnal vychislitel'naya matematika i matematicheskoi fiziki*. 1998;38(9):1602-1610. (In Russ.).
3. Bogomolov S.V. The particle method. Incompressible liquid. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2003;15(1):46-58. (In Russ.).
4. Bogomolov S.V., Kuvshinnikov A.E. Discontinuous particles method on gas dynamic examples. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2019;31(2):63-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0234087919020059>. EDN: MNNTZN.
5. Bogomolov S.V. The particle method for the Burgers equation. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1991;3(12):115-119. (In Russ.).
6. Bogomolov S.V., Zakharov E.V., Zerkal S.V. Modeling of waves on shallow water by the particle method. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2002;14(3):103-116. (In Russ.).
7. Bogomolov S.V., Kuvshinnikov A.E. A discontinuous shapeless particle method for the quasi-linear transport. In: *Marchuk Scientific Readings: International Conference*. 04-08 October 2021, Novosibirsk. Novosibirsk, 2021. Vol. 2099. p. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2099/1/012009>. EDN: WPTHVD.
8. Bondarev A.E. On the estimation of the accuracy of numerical solutions in CFD problems. *Lecture Notes in Computer Science*. 2019;11540:325-333. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22750-0_26.
9. Alekseev A., Bondarev A., Galaktionov V., Kuvshinnikov A., Shapiro L. On applying of generalized computational experiment to numerical methods verification. In: *GraphiCon 2020: Proceedings of the*

30th International conference on computer graphics and machine vision. 22-25 September 2020, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2020. EDN: KNJJPP.

10. Bondarev A.E. Processing of Visual Results of a Generalized Computational Experiment for the Problem of Supersonic Flow Around a Cone at an Angle of Attack. *Scientific Visualization*. 2021;13:104-116. <https://doi.org/10.26583/sv.13.2.08>.

11. Bondarev A., Kuvshinnikov A. Parametric study of the accuracy of OpenFOAM solvers for the oblique shock wave problem. In: *Ivannikov Ispras Open Conference. Proceedings-2019*. 05-06 December 2019, Moscow. Moscow; 2019. p. 106–112. <https://doi.org/10.1109/ISPRAS47671.2019.00023>. EDN: ZQRKU.

12. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples. 2nd Ed. Moscow: Fizmatlit; 2005. 320 p. (In Russ.).

13. Hockney R., Eastwood J. Numerical modeling by the particle method. Moscow: Mir; 1987. 640 p. (In Russ.).

14. Oñate E., Idelsohn S.R., Del Pin F., Aubry R. The particle finite element method – an overview. *International Journal of Computational Methods*. 2004;01(02):267-307. <https://doi.org/10.1142/S0219876204000204>.

15. Harlow F.H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics. *Methods in computational physics*. 1964;3:319-343.

16. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. The nonstationary method of "large particles" for gas dynamic calculations. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1971;11(1):241-271. (In Russ.).

17. Ardelyan N.V., Bisnovaty-Kogan G.S., Moiseenko S.G. Simulation of magnetorotational astrophysical processes by implicit operator-difference scheme. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2017;38(5):874-879. (In Russ.).

18. Idelsohn S., Nigro N., Limache A., Oñate E. Large time-step explicit integration method for solving problems with dominant convection. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2012;217220:168-185. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.12.008>.

19. Teleaga D., Struckmeier J. A finite-volume particle method for conservation laws on moving domains. *International journal for numerical methods in fluids*. 2008;58(9):945-967. <https://doi.org/10.1002/fld.1778>.

20. Baev A.Zh., Bogomolov S.V. On a stability of discontinuous particle method for transfer equation. *Matematicheskoe modelirovaniye*. 2017;29(9):3-18. (In Russ.). EDN: ZFWYWL.

21. Jiang Ch., Schroeder C., Teran J. An angular momentum conserving affine-particle-in-cell method. *Journal of Computational Physics*. 2017;338:137-164. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.02.050>.

22. Fu Ch., Guo Q., Gast Th., Jiang Ch., Teran J. A Polynomial Particle-In-Cell Method. *ACM Transactions on Graphics*. 2017;36(6):222:1-222:12. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130878>.

23. Lucy L.B. A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis. *Astronomical Journal*. 1977;82:1013-1024. <https://doi.org/10.1086/112164>.

24. Idelsohn S.R., Oñate E., Del Pin F. The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004. Vol. 61. Iss. 7. P. 964–989. <https://doi.org/10.1002/nme.1096>.

25. Vorobev A.P., Kriventsev V.I., Qian Lin, Xuwu Cao. Numerical modeling of fragmentation in liquid media with smoothed particle hydrodynamics (sph) method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika =* 2008;1:85-94. (In Russ.). EDN KBBBOR.

26. Solbakov V.V., Yurezanskaya Yu.S. Comparison of the SPH method and the stochastic discrete particle method in solving shallow water equations. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2020;24:1690-1696. (In Russ.). EDN: ICQPAI.

Информация об авторах

Чупин Виктор Романович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Autor ID: 475565

Information about the authors

Victor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Urban
Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Autor ID: 475565

Мороз Мария Викторовна,

к.т.н., доцент кафедры инженерных
коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: morozmv@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-4255-619X>
Autor ID: 475565

Maria V. Moroz,

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor
of the Department of Engineering Communications
and Life Support Systems,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: morozmv@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-4255-619X>
Autor ID: 475565

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в
подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-
тересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regard-
ing the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончатель-
ный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and ap-proved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.11.2023.
Одобрена после рецензирования 19.12.2023.
Принята к публикации 27.12.2023.

Information about the article

The article was submitted 23.11.2023.
Approved after reviewing 19.12.2023.
Accepted for publication 27.12.2023.