УДК 628.394

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент
© А. М. Телятникова, аспирант, ст. преподаватель
© М. И. Алексеев, д-р техн. наук, профессор
© М. А. Гильмутдинова, студентка
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru,
kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-128-134

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. M. Telyatnikova, post-graduate student, senior teacher
© M. I. Alekseev, Dr. Sci. Tech., Professor
© M. A. Gilmudtinova, student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru,
kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

СНИЖЕНИЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ РАССЕИВАЮЩЕГО ВЫПУСКА

REDUCING THE INFLUENCE ZONE OF THE DISPERSION DISCHARGE

На основании нормативно-технической документации выявлена необходимость поиска путей для снижения размеров зоны загрязнения от выпусков очищенных сточных вод. Снижение степени влияния позволит создать более благоприятную экологическую обстановку. Для интенсификации процесса смешения предложено использовать соударение струйного потока с диктующим течением за счет расположения выпускающего оголовка перпендикулярно направлению реки. В работе с помощью моделирования подтверждена эффективность данного метода и проведено сравнение с рассеивающим выпуском, работающим сонаправленно с речным потоком. Результаты моделирования подтвердили значительное увеличение кратности разбавления.

Ключевые слова: рассеивающий выпуск очищенных сточных вод, зона загрязнения, экологическая безопасность, контрольный створ, компьютерное моделирование, кратность разбавления.

Based on the regulatory and technical documentation, there has been identified a need to find ways of reducing the pollution impact zone formed as a result of treated wastewater discharge. Reducing the influence degree will allow creating a more favorable environmental condition. To intensify the mixing process, it is proposed to use the jet flow collision with the dictating flow by placing the discharging outlet head perpendicular to the river flow direction. In this study, the effectiveness of this method was confirmed using simulation and making a comparison with dispersion discharge operating co-directionally with the river flow. The simulation results have verified a significant increase in the dilution multiplicity.

Keywords: dispersion discharge of treated wastewater, pollution zone, environmental safety, control point, computer modeling, dilution multiplicity.

В современной городской среде необходимо стремиться к улучшению экологической обстановки. Важную роль в этом вопросе играют водные объекты, которые являются источниками водоснабжения и вместе с тем приемниками очищенных сточных вод [1, 2]. Кроме этого, водные объекты имеют рыбохозяйственную и рекреационную значимость. Поэтому в соответствии с действующими нормативными документами^{1,2}

¹ СанПиН 2.1.3684–21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. М., 2021. 75 с.

основным условием очистки сточных вод является обеспечение требуемых показателей качества (ПДК) воды в контрольном створе водного объекта на расстоянии не более 500 м от точки сброса.

После выпуска очищенных сточных вод загрязненная струя перемешивается с окружающей водной средой. В результате процессов начального и основного разбавления [3, 4] происходит снижение концентрации загрязняющих веществ. В ходе расширения струи в водном

² Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (утв. Приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 г. № 1118 в ред. Приказа Минприроды России от 17 мая 2021 г. № 333). М., 2020. 32 с.

объекте можно выделить несколько зон (рис. 1). Когда концентрация в струе все еще превышает ПДК, то следует говорить о зоне загрязнения [5]. Если концентрация стала ниже ПДК, но при этом превышает фоновую концентрацию в водном объекте, то следует говорить о зоне влияния. Также присутствует зона чистой воды, когда часть окружающей водной среды не вступила в контакт с загрязненным потоком вплоть до контрольного створа. При наступлении момента перемешивания с загрязненной струей всей чистой воды реки следует говорить о наступлении створа полного перемешивания [6]. Для повышения экологической безопасности следует стремиться к уменьшению протяженности зоны загрязнения, поскольку именно она оказывает прямое воздействие на водные экосистемы и их биоценоз [7, 8]. Кроме того, сброс сточных вод оказывает прямое воздействие на качество воды в водном объекте ниже по течению и определяет возможность дальнейшего водопотребления [9].

Одним из эффективных способов по воздействию на структуру потока в водном объекте является применение различных конструкций выпусков, позволяющих интенсифицировать процесс перемешивания [10]. Наиболее часто в практике встречаются сосредоточенные выпуски берегового и руслового типов, поскольку они отличаются простотой конструкции. В технической литературе³ было найдено оригинальное решение сосредоточенного выпуска, позво-

ляющее интенсифицировать разбавление потока сточных вод. Данное сооружение предполагает строительство поперек водного потока буны, за которой устраивается трубопровод для сброса (рис. 2, а). В случаях, когда расход очищенных сточных вод значителен, для снижения антропогенного воздействия применяются рассеивающие конструкции. На рис. 2, б представлена классическая конструкция рассеивающего выпуска, которая предполагает устройство нескольких выпускающих оголовков на распределительном трубопроводе [11]. Для интенсификации перемешивания струйного потока от рассеивающего выпуска встречаются решения, предполагающие устройство эжектирующей камеры, в которую струйный поток попадает из оголовка (рис. 2, в). За счет такого движения происходит увлечение окружающей водной среды в камеру и повышение кратности начального разбавления. Также особый интерес представляет конструкция рассеивающего выпуска, в которой в качестве распределительных оголовков применяются гибкие резиновые патрубки (рис. 2, г), позволяющие изменять направление струи в зависимости от направления диктующего течения. Кроме представленных конструкций, в практике встречаются и другие варианты, которые отличаются отсутствием распределительных оголовков, устройством дополнительных отверстий для эжектирования окружающей среды, направлением выпускающих оголовков для обеспечения соударения выпускаемых потоков и др. [12, 13].

Рис. 1. Зоны распространения загрязнений в водном объекте при выпуске сточных вод: C_0 — концентрация загрязняющего вещества в очищенной сточной воде; C_ϕ — фоновая концентрация загрязняющего вещества в воде водного объекта; ПДК — предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества; C_n — концентрации загрязняющего вещества в различных зонах с учетом процесса разбавления исходной сточной воды в воде водного объекта

Данные конструкции имеют определенные недостатки. В случае сосредоточенного выпуска с устройством буны загрязненный сток все равно будет накапливаться за ней в области циркуляции потока и распространяться вдоль берега. В конечном счете это приведет к формированию большой зоны загрязнения. Конструкции с эжекционными камерами и резиновыми насадками малонадежны в эксплуатации. В ходе функционирования выпуска эжекционная камера может обрастать и засоряться, а резиновые насадки могут быть повреждены и утрачены. Классические конструкции сосредоточенного и рассеивающего выпуска более надежны, но имеют большие

зоны загрязнения. Данное исследование выполнено с целью улучшения функционирования классических конструкций выпуска. В качестве основного фактора, повышающего эффективность перемешивания в точке сброса, было выбрано направление движения струи по отношению к диктующему течению в водном объекте. Принципиально могут быть рассмотрены три варианта распространения струи: сонаправленно с потоком реки; навстречу потоку; поперек потоку под углом 90° .

Наиболее эффективным из перечисленных вариантов сброса является ориентация оголовка навстречу реке [14]. В данном случае соударение струи с диктующим течением вызывает максимальное снижение концентрации загрязняющих веществ до значений ПДК. Однако такое расположение неоптимально с точки зрения

эксплуатации, потому что может приводить к засорению выпускающего оголовка. Кроме того, в случае равенства скоростей или превалирования скорости реки над скоростью выпускаемого потока могут возникнуть проблемы с работой сооружения. На рис. 3 представлены результаты распространения примеси в случае направления выпускаемой струи навстречу речному потоку.

Для оценки работы других вариантов выпуска применялся метод компьютерного моделирования, который достаточно эффективно используется для решения подобных задач [15, 16]. С целью верификации модели на первом этапе рассматривался вариант выпуска с направлением струйного потока вдоль диктующего течения, после чего результаты моделирования сравнивались с расчетными значениями по методике В. А. Фролова, И. Д. Родзиллера [3]. На втором этапе проводилось моделирование предложенного авторами решения с ориентацией выпускающих оголовков перпендикулярно диктующему течению.

На рис. 4 представлены расчетные области и граничные условия разработанных моделей. Конструируемая расчетная область представляла собой прямоугольный канал длиной 2 м, шириной 1 м и высотой 1 м. В зависимости от решаемой задачи на одной из граней канала предусматривалось наличие трех отверстий, имитирующих оголовки рассеивающего выпуска сточных вод. Далее выполнялась генерация расчетной сетки из гексаэдрических элементов. Оценка основных

Рис. 2. Конструкции выпусков сточных вод в водные объекты: а — одиночный сосредоточенный выпуск с затопленной русловой дамбой; б — классический рассеивающий выпуск; в — рассеивающий выпуск с эжекторными камерами встроенного типа; з — рассеивающий выпуск с гибкими трубчатыми насадками

Рис. 3. Распространение примеси в случае ориентации оголовка выпуска навстречу реке:
 V — средняя скорость движения воды в водном объекте; H — высотная отметка относительно
 дна водного объекта

показателей сеточного поля подтвердила его соответствие всем требуемым значениям. В качестве граничных условий задавался поток чистой воды, который заходил в канал с торцевой грани (*Inlet_1*) со скоростью 1,5 м/с. Условие выхода потока (*Outlet*) задавалось на противоположной торцевой грани с помощью определения избыточного давления ($P_{изб}$), равного нулю. Для боковых стенок канала и дна задавалось условие непроницаемой стенки с шероховатостью (*Wall*), а верхняя граница канала задавалась также непроницаемой стенкой, но с условием проскальзывания потока (*Smooth Wall*) для имитации свободной поверхности. На торцевых границах оголовков задавалось условие входа потока индикаторного вещества (*Inlet_2*) со скоростью 1,5 м/с. В начальный момент времени в расчетной области задавалось присутствие воды, движущейся с той же скоростью, что и входящий поток. Модельные расчеты выполнялись в условиях нестационарной задачи, полное время расчета составляло 10 с, шаг по времени равен 0,01 с, что позволило достичь сходимости задачи.

По результатам расчетов были получены значения объемной доли индикаторного вещества в потоке и с их помощью оценена кратность разбавления сточных вод. На рис. 5, а представлено отображение результатов, полученных для первой модели. В ходе распространения потока индикаторного вещества наблюдалось незначительное снижение его концентрации. Сравнение объемной доли индикаторного вещества

на границе выпускающего отверстия и выходе из канала позволило получить кратность, равную 1,001. Для верификации была использована методика В. А. Фролова, И. Д. Родзиллера. Для расчета применялись значения: коэффициент турбулентной диффузии потока $D = 0,0015 \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент смешения $\gamma = 0,021$, на основании чего расчетная кратность разбавления составила 1,47, что незначительно отличается от модельного результата. Также отметим, что полученные при моделировании данные хорошо согласуются с ожидаемыми результатами. Зафиксированная незначительная кратность разбавления обусловлена отсутствием начального смешения и малой протяженностью расчетной области.

На рис. 5, б представлены результаты расчета в случае поперечного ввода струй выпуска в поток реки. По сравнению с первой моделью во втором опыте сразу наблюдается интенсивное снижение объемной доли индикаторного вещества за счет соударения потоков. Сравнение объемных долей на выпуске и границе выхода потока из расчетной области позволило получить кратность разбавления, равную 12.

Результаты моделирования демонстрируют эффективность применения подхода соударения потоков при выпуске очищенных сточных вод. Даже при отсутствии начального разбавления, в случае равенства скоростей речного и струйного потока сточных вод, можно достичь значительного снижения зоны загрязнения. При этом данный подход не усложняет конструкцию вы-

Рис. 4. Расчетные области и граничные условия:
а — первой модели с направлением струйного потока
вдоль диктующего течения; б — второй модели
с ориентацией выпускающих оголовков перпендикулярно
диктующему течению

Рис. 5. Распределение объемной доли индикаторного
вещества по результатам расчета: а — первой модели;
б — второй модели

пуска и сохраняет его надежность в эксплуатации. В случае применения рассеивающих выпусков предложенное расположение распределительного коллектора позволяет более компактно разместить сооружение с учетом зоны судоходства и сократить стоимость строительства. Однако данное моделирование проведено в идеализированных условиях и требует дальнейшей оценки с учетом меняющейся морфологии русла. Безусловно, для обеспечения эффективности работы следует избегать расположения выпуска на мелководье и в застойных, малопроточных зонах. Для улучшения эффекта разбавления следует выбирать области створа реки с высокими скоростями.

Полученные в ходе исследования результаты можно применять в проектной и строительной деятельности при определении схемы функционирования выпуска. Использование математического моделирования позволит оценить обеспечение экологической безопасности в рамках раздела «Мероприятия по охране окружающей среды».

Библиографический список

1. Гагарина О. В., Куртеева А. Г. Исследование разбавления сточных вод в городских реках, попадающих под воздействие организованных источников загрязнения в условиях повышенного гидрохимического фона (на примере реки Карлутка в пределах города Ижевска) // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о земле. 2017. Т. 27, № 4. С. 427–436.
2. Минигазимов Н. С., Батанов Б. Н., Мустафин Р. Ф., Сакаев Р. А. Влияние сбросов сточных вод на качество воды рек Республики Башкортостан // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2019. Т. 31, № 2 (94). С. 35–45.
3. Палагин Е. Д., Быкова П. Г., Гриднева М. А. Определение кратности разбавления при нормировании сброса сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 12. С. 47–53.
4. Давыдов Ю. Ф. Экологические аспекты работы выпусков сточных вод // Вестник Казахстанско-Американского свободного университета. 2013. № 6. С. 33–39.
5. Дундукова С. С. Оценка уровня загрязнения реки Волга в районе выпуска сточных вод ОАО «Марийский целлюлозно-бумажный комбинат» // Мониторинг, прогноз состояния окружающей среды и технологии природопользования: сб. науч.-исслед. работ студентов. Вып. 3. Казань: КФУ, 2019. С. 36–40.

6. Шелудков А. Д., Вешкурцева Т. М. Расчет зоны полного перемешивания сточных вод (на примере рек Ишим и Ук) // Бассейновые территории: проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Ишим, 21 мая 2013 г.). Ишим: ТюмГУ, 2013. С. 16–19.

7. Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82.

8. Bai Y., Qi W., Jinsong L., Qu J. Using high-throughput sequencing to assess the impacts of treated and untreated wastewater discharge on prokaryotic communities in an urban river // Applied microbiology and biotechnology. 2014. № 4 (98). Pp. 1841–1851.

9. Wang Zh., Shao D., Westerhoff P. Wastewater discharge impact on drinking water sources along the Yangtze River (China) // Science of The Total Environment. Vol. 599–600. Pp. 1399–1407.

10. Богомолов А. В., Лепихин А. П., Тиунов А. А., Любимова Т. П., Паршакова Я. Н. Особенности организации рассеивающих водовыпусков для отведения избыточных рассолов в водные объекты // Водное хозяйство России. 2016. № 2. С. 72–86.

11. Епифанов А. В., Гашин П. А. Оптимизации параметров сброса сточных вод ГУП «Леноблводоканал г. Тихвин» на основе математического моделирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2019. № 1 (3). С. 4–9.

12. Патент на полезную модель RU153079U1, Российская Федерация. Канализационный выпуск / Е. В. Грищенко, Н. В. Земляная. № 2014151699/13; заявл. 19.12.2014, опубл. 10.07.2015.

13. Патент на полезную модель RU103821U1, Российская Федерация. Устройство для выпуска очищенных сточных вод в водоемы / С. И. Федорова, В. А. Бондаренко, А. Г. Кутц. № 2010148170/21; заявл. 25.11.2010, опубл. 27.04.2011.

14. Nguyen Ph. Q. A., Gourbesville Ph., Audra Ph., Vo N. D., Vo D. N. Kh. Methodology for Wastewater Discharge Modeling — Application to Danang Bay, Vietnam // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. (Hanoi, Vietnam, 24–26 February 2020). 2020. Vol. 505. Pp. 1–9.

15. Любимова Т. П., Лепихин А. П., Паршакова Я. Н. Численное моделирование отведения высокоминерализованных сточных вод в водные объекты с целью усовершенствования конструкций выпускных устройств // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12, № 4. С. 427–434.

16. Hamza S. B., Saïd N. M., Bournot H., Le Palec G. CFD Modeling of Wastewater Discharges in a Sewer System

// In: Haddar M., Chaari F., Benamara A., Chouchane M., Karra C., Aifaoui N. (eds.). Design and Modeling of Mechanical Systems—III. CMSM 2017. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_14.

References

1. Gagarina O. V., Kurteeva A. G. Issledovanie razbavleniya stochnykh vod v gorodskikh rekakh, popadayushchikh pod vozdeystviye organizovannykh istochnikov zagryazneniya v usloviyakh povyshennogo gidrokhimicheskogo fona (na primere reki Karlutka v predelakh goroda Izhevsk) [Investigation of wastewater dilution in urban rivers affected by organized sources of pollution under the condition of increased hydro-chemical background (on the example of the Karlutka river in the town of Izhevsk)]. Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o zemle – Bulletin of the Udmurtian University. Series Biology. Earth Sciences, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 427–436.

2. Minigazimov N. S., Batanov B. N., Mustafin R. F., Sakaev R. A. Vliyanie sbrosov stochnykh vod na kachestvo vody rek Respubliki Bashkortostan [The impact of wastewater discharge on water quality of the rivers of the Republic of Bashkortostan]. Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan – Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, 2019, vol. 31, no. 2 (94), pp. 35–45.

3. Palagin E. D., Bykova P. G., Gridneva M. A. Opreделение kratnosti razbavleniya pri normirovanii sbrosa stochnykh vod [Determination of the dilution ratio in rationing wastewater discharges]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering, 2016, no. 12, pp. 47–53.

4. Davydov Yu. F. Ekologicheskie aspekty raboty vypuskov stochnykh vod [Environmental aspects of wastewater outlets' operation]. Vestnik Kazakhstansko-Amerikanskogo svobodnogo universiteta – Bulletin of the Kazakhstan-American Free University, 2013, no. 6, pp. 33–39.

5. Dundukova S. S. Otsenka urovnya zagryazneniya reki Volga v rayone vypuska stochnykh vod OAO «Mariyskiy tsellyulozno-bumazhnyi kombinat» [Assessment of the pollution level of the Volga River in the area of wastewater discharge of OJSC “Mari Pulp and Paper Mill”]. Sb. nauch.-issled. rabot studentov «Monitoring, prognoz sostoyaniya okruzhayushchey sredy i tekhnologii prirodopol'zovaniya» [Collection of scientific-research works of students “Monitoring, forecasting of environment and technologies of nature management”]. Issue 3. Kazan, KFU Publ., 2019, pp. 36–40.

6. Sheludkov A. D., Veshkurtseva T. M. Raschet zony polnogo peremeshivaniya stochnykh vod (na primere rek Ishim i Uk) [Calculation of the zone of complete mixing of wastewater (on the example of the rivers Ishim and Uk)]. Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Ishim,

21 мая 2013 г.) «Basseynovye territorii: problemy i puti ikh resheniya» [Proceedings of the International scientific-practical conf. (Ishim, May 21, 2013) "Water basin territories: problems and ways of their solutions"]. Ishim, TyumGU Publ., 2013, pp. 16–19.

7. Timakova T. M., et al. *Izmenenie biotsenozov Kondopozhskoy guby Onezhskogo ozera pod vliyaniem stochnykh vod tsellyulozno-bumazhnogo kombinata* [Changes in the biocenoses of the Kondopoga Bay of Lake Onega under the impact of wastewater discharge of the pulp and paper mill]. *Vodnye resursy – Water resources*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 74–82.

8. Bai Y., Qi W., Jinsong L., Qu J. Using high-throughput sequencing to assess the impacts of treated and untreated wastewater discharge on prokaryotic communities in an urban river. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, no. 4 (98), pp. 1841–1851.

9. Wang Zh., Shao D., Westerhoff P. Wastewater discharge impact on drinking water sources along the Yangtze River (China). *Science of the Total Environment*, vol. 599–600, pp. 1399–1407.

10. Bogomolov A. V., et al. *Osobennosti organizatsii rasseivayushchikh vodovypuskov dlya otvedeniya izbytochnykh rassolov v vodnye ob'ekty* [Organization features of dispersing outlets for disposal of excessive brines in water bodies]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii – Water Management of Russia*, 2016, no. 2, pp. 72–86.

11. Epifanov A. V., Gashin P. A. *Optimizatsii parametrov sbrosa stochnykh vod GUP «Lenoblvodokanal g. Tikhvin» na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Optimization of parameters of wastewater discharge of GUP "Lenoblvodokanal of Tikhvin" on the basis of

mathematical modeling]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii – Automation and modeling in design and management*, 2019, no. 1 (3), pp. 4–9.

12. Grishchenko E. V., Zemlyanaya N. V. *Kanalizatsionniy vypusk* [Sewage outlet]. Patent RF for useful model RU153079U1, no. 2014151699/13, 2015.

13. Fedorova S. I., Bondarenko V. A., Kutts A. G. *Ustroystvo dlya vypuska ochishchennykh stochnykh vod v vodoemy* [Device for discharging treated wastewater into water bodies]. Patent RF for useful model RU103821U1, no. 2010148170/21, 2011.

14. Nguyen Ph. Q. A., et al. *Methodology for wastewater discharge modeling — Application to Danang Bay, Vietnam*. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. (Hanoi, Vietnam, 24–26 February 2020). 2020, vol. 505, pp. 1–9.

15. Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N. *Chislennoe modelirovanie otvedeniya vysokomineralizovannykh stochnykh vod v vodnye ob'ekty s tsel'yu usovershenstvovaniya konstruktsiy vypusknykh ustroystv* [Numerical simulation of the removal of highly mineralized sewage into water bodies in order to improve the designs of outlet devices]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred – Computational mechanics of continuous media*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 427–434.

16. Hamza S. B., Saïd N. M., Bournot H., Le Palec G. CFD modeling of wastewater discharges in a sewer system. In: Haddar M., et al. (eds.). *Design and modeling of mechanical systems—III*. CMSM 2017. Lecture notes in mechanical engineering. Springer, Cham. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_14.