
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК: 004.942

DOI: 10.30987/article_5c9b8b2b779301.35883796

А.В. Епифанов П.А., Гашин

ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СБРОСА СТОЧНЫХ ВОД ГУП «ЛЕНОБЛВОДОКАНАЛ Г. ТИХВИН» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящее время все предприятия сбрасывающие сточные воды в водные объекты должны рассчитывать нормативы допустимых сбросов. Расчет нормативов допустимых сбросов проводится на основе математического моделирования процессов конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ в водных объектах.

В данной статье предложена математическая модель переноса загрязняющих веществ в р.Тихвинка от ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин». На основе математического моделирования проведена оптимизация конструкции рассеивающего водовыпуска ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин» для минимизации антропогенной нагрузки на р.Тихвинка.

Ключевые слова: сброс сточных вод; водоканал; математическое моделирование переноса загрязняющих веществ.

A.V. Epifanov, P.A. Gashin

OPTIMIZING AND ADJUSTMENT OF PARAMETER OF THE DISCHARGE OF WASTEWATER SUE "LENOBLVODOKANAL TIKHVIN" ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING

At present, all enterprises that discharge waste water into water bodies should calculate the standards of permissible discharges. Calculation of permissible discharge standards is carried out on the basis of mathematical modeling of convective-diffusion transport and transformation of substances in water bodies.

In this article we propose a mathematical model of pollutants transport in the river Tikhvinka from sue "Lenoblmoloko Tikhvin". On the basis of mathematical modeling the optimization of the scattering design of a culvert sue "Lenoblmoloko Tikhvin town" to minimize anthropogenic impact on the Tikhvinka river.

Keywords: sewage disposal; water and wastewater treatment; mathematical modeling of transport of pollutants.

Каждое предприятие, осуществляющее сброс сточных вод в водные объекты, должно рассчитывать нормативы допустимых сбросов (НДС). Целью расчетов является определение допустимых концентраций загрязняющих веществ в сточных водах и допустимых масс сброса загрязняющих веществ с целью обеспечения заданных стандартов качества водных объектов.

Цель исследования – разработать математическую модель переноса загрязняющих веществ в р.Тихвинка и провести оптимизацию конструкции рассеивающего водовыпуска ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин».

Предмет исследования – конструкция рассеивающего водовыпуска ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин» и математическая модель переноса загрязняющих веществ в р.Тихвинка.

1. ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин»

ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин» обеспечивает город Тихвин чистой водой при помощи своих водоочистных сооружений (ВОС), которые находятся выше по течению от города, и принимает хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды от городской застройки и промышленных предприятий города Тихвин.

Водоочистные сооружения состоят из 2-х технологических линий:

В первой технологической линии очистка воды принята по 2-х ступенчатой схеме:

I ступень – осветлители – рециркуляторы со взвешенным осадком и горизонтальные отстойники;

II ступень – скорые фильтры.

Во второй технологической линии очистка воды осуществляется по одноступенчатой схеме на контактных осветлителях.

Технология очистки сточных вод на канализационно-очистных сооружениях состоит из четырех технологических линий:

- Механическая очистка – механические решетки-дробилки, цепные решетки ступенчатого типа, песколовки, жиросборники и первичные отстойники;
- Биологическая очистка – аэротенки и вторичные отстойники;
- Обеззараживание стоков – контактные резервуары;
- Обработка осадка сточных вод – илоуплотнители и иловые площадки.

На балансе предприятия имеются два водовыпуска: на ВОС сбрасываются промывочные воды через один прямой водовыпуск, на КОС сбрасываются очищенные сточные воды через один водовыпуск с рассеивателем, который состоит из семи оголовков диаметром 250 мм с промежутком 2,1 м и удален от берега на 8 метров.

Река Тихвинка относится к водным объектам высшей рыбохозяйственной категории водопользования, поэтому важно строгое соблюдение норм на сбросы загрязняющих веществ. Река входит в бассейн Ладожского озера.

2. Норматив допустимого сброса.

Норматив допустимого сброса – это масса ЗВ, которая может быть сброшена источником загрязнения в водный объект и не создаст с учетом процессов перемешивания и превращения веществ максимальной концентрации в контрольном створе, превышающей экологический норматив.

Величина НДС определяется как произведение максимального часового расхода сточных вод – q , м³/с на допустимую концентрацию загрязняющего вещества – $C_{ст}^{доп.}$, г/м³:

$$НДС = q \cdot C_{ст}^{доп.}, \quad (1)$$

$$C_{ст}^{доп.} = n \cdot (C_{пдк} - C_{ф}) + C_{ф}, \quad (2)$$

где $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воде водотока, г/м³; $C_{ф}$ – фоновая концентрация загрязняющего вещества в водотоке (г/м³) выше выпуска сточных вод, определяемая в соответствии с действующими методическими документами по проведению расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков; n – кратность общего разбавления сточных вод в водотоке, равная произведению кратности начального разбавления n_n на кратность основного разбавления n_0 :

$$n = n_n \cdot n_0 \quad (3)$$

В соответствии с водоохранным законодательством РФ контроль загрязняющих веществ производится на расстоянии, не превышающем 500 метров от водовыпуска. Тихвинские КОС имеют возможность изменить параметры рассеивающего водовыпуска для увеличения степени смешивания сточной и природной вод. Выбор оптимального варианта

позволит сократить плату за негативное воздействие на окружающую среду и уменьшит негативное влияние сбросов на р.Тихвинка [1 - 3].

3. Методика расчета.

На основе математического моделирования может проводиться разработка природоохранных мероприятий[4,5]. Перенос загрязняющих веществ описывается дифференциальными уравнениями турбулентной диффузии:

$$\frac{dC}{dt} + V_x \frac{dC}{dx} + V_y \frac{dC}{dy} + V_z \frac{dC}{dz} = \frac{d}{dx} \left(D_x \frac{dC}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(D_y \frac{dC}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(D_z \frac{dC}{dz} \right) - KC \quad (4)$$

где C – мгновенное значение концентрации рассматриваемого компонента в водном потоке ($\text{г}/\text{м}^3$); x, y, z – координаты по соответствующим осям; t – временной параметр; V_x, V_y, V_z – компоненты скорости течения по соответствующим осям; D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии (конвективно-диффузионного переноса) по соответствующим направлениям ($\text{м}^2/\text{с}$);

K – коэффициент осаждения, $K=f(w, H, V_x)$.

w - гидравлическая крупность $\text{м}/\text{с}$

H - глубина реки

Для расчёта нормативов допустимых сбросов для ГУП «ЛенОблВодоканал г.Тихвин» выбираем двухмерную математическую модель, это обусловлено тем, что попытка учесть реальную морфологию в рамках трёхмерной модели до сих пор наталкивается на большие вычислительные трудности, что в первую очередь, связано с отсутствием достаточного ряда данных натурных наблюдений. Анализ реального трёхмерного потока показывает, что поток можно рассматривать в рамках двухмерной задачи, если размеры его малы по сравнению с главными радиусами свободной поверхности и дна[6]. При ширине реки значительно превышающей глубину, выравнивание концентраций осуществляется под воздействием горизонтального КДП и ПВ.

Выбираем стационарную модель. Это обусловлено тем, что параметры водной системы можно считать постоянными.

Выбираем изотропную модель, при которой осреднённая скорость потока постоянна по всей области течения. Поэтому выбирается одна ось координат так чтобы её направление совпало с направлением основного течения в нашем случае $v_x = v_{\text{ср}}$.

Коэффициентом продольной диффузии не учитываем, так как скорость воды в р.Тихвинка значительна и конвективная составляющая переноса взвешенных веществ в направлении основного течения значительно превышает диффузионный перенос.

Из приведенной типизации получаем двумерную стационарную математическую модель прогноза качества воды для неконсервативных примесей в соответствии с уравнением [5]:

$$V_x \frac{dC}{dx} = D_y \frac{d^2C}{dy^2} - K_1 C \quad (5)$$

Для решения этого уравнения были заданы начальные и граничные условия.

Начальные условия представляют собой заданное распределение исследуемого загрязняющего вещества по всему водному объекту в заданный начальный момент времени $t = 0$. В начальный момент времени концентрация загрязняющих веществ была приравнена фоновой концентрации.

В качестве граничных условий были выбраны граничные условия второго рода (задача Неймана), в которой задается распределение концентраций на границе области в виде нормальной производной (градиент) исходной функции. Перенос вещества через берега, ограничивающие водный объект, предполагается равным нулю, т.е. ложе водотока совершенно непроницаемо для загрязняющего вещества, тогда имеем:

$d_c / d_n = 0$, где n – внутренняя нормаль к границам водного объекта.

Коэффициент турбулентной диффузии был рассчитан Методом Банзала:

$$\lg(D_y/V_x \cdot H) = -3.547 + 1,378 \cdot \lg(B/H) \quad (6)$$

Уравнение (5) было решено методом конечных разностей:

$$V_x \frac{C_{i+1,j} - C_{i,j}}{2hx} = D_y \frac{C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1}}{hy^2}$$

Из данного уравнения выражаем $C_{i+1,j}$ и получаем уравнение вида [7]:

$$C_{i+1,j} = \frac{2D_y V_x (C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1})}{hy^2 V_x} + C_{i,j} \quad (7)$$

Для его решения было построено поле концентраций, содержащее 50 ячеек по длине и 10 ячеек по ширине реки. Протяженность ячейки по длине реки составила 10м, а по ширине реки 5 м.

Для расчета модели необходимо задаться начальными и граничными условиями.

В месте сброса $C_{ЗВ} = C_{нр}$.

Концентрация начального разбавления была найдена по формуле[8]:

$$C_{нр} = \frac{C_{ср} \cdot N_y - C_{ф} \cdot (N_y - N_z)}{N_z}, \quad (8)$$

где $C_{ср}$ – средняя концентрация, мг/л;

N_y – количество ячеек по ширине, шт;

N_z – количество загрязненных ячеек, шт.

Средняя концентрация находится по формуле[9]:

$$C_{ср} = \frac{C_{ф} \cdot Q_p + C_{ст} \cdot Q_{ст}}{Q_p + Q_{ст}}, \quad (9)$$

где $C_{ст}$ – концентрация сточных вод, мг/л;

Q_p – расход воды в реке, м³/с;

$Q_{ст}$ – сброс ЗВ, м³/с.

3. Параметры расчетного участка.

Исходные данные для расчетов:

- Средняя ширина реки – B – 50 м.
- Средняя глубина реки – h – 1,5 м.
- Средняя скорость течения реки – v – 0,4 м/с.
- Коэффициент поперечной диффузии – D_y – 0,02 м²/с.
- Расход сточных вод – 0,315 м³/с.
- Рассеивающий водовыпуск – 7 оголовков диаметром 250мм через каждые 2,1м.

В таблице 1 приведены гидрохимические показатели очищенных сточных вод на КОС г.Тихвин, взятые для численного эксперимента.

Таблица 1 - Гидрохимические показатели очищенных сточных вод.

Название вещества	Группа ЛПВ	ПДК, мг/л	$C_{ф}$, мг/л	$C_{ст}$, мг/л
Взвешенные вещества	общ.	8,09	7,84	3,18
БПК полн.	общ.	3	2	3,3
ХПК	общ.	30	48,1429	28,7
Фосфор общ.	общ.	1,5	0,0609	1,41
Сухой остаток	общ.	1000	365,857	410,4
Аммоний-ион	токс.	0,5	1,3043	1,52
Фосфор фосфатов	с. - т.	0,2	0,0372	0,332
Нитрит-ион	токс.	0,08	0,034	0,65
Нитрат-ион	токс.	40	1,25	16,62

На основе исходных данных было проведено сравнение трек конструкций рассеивающего водовыпуска. Первый вариант включает 7 выпускных патрубков диаметром

250 мм, второй вариант 7 выпускных патрубков диаметром 200 мм, третий вариант 4 выпускных патрубка диаметром 250 мм. Критерием сравнения является максимальная концентрация загрязняющего вещества в контрольном створе (C_{\max}) и степень перемешивания (p^*). Расчеты проведены для четырех загрязняющих веществ: аммоний-ион, нитрит-ион, нитрат-ион, фосфор общий.

На (рис 1,2) представлены значения максимальных концентраций загрязняющих веществ и степени перемешивания, полученные по результатам математического моделирования.

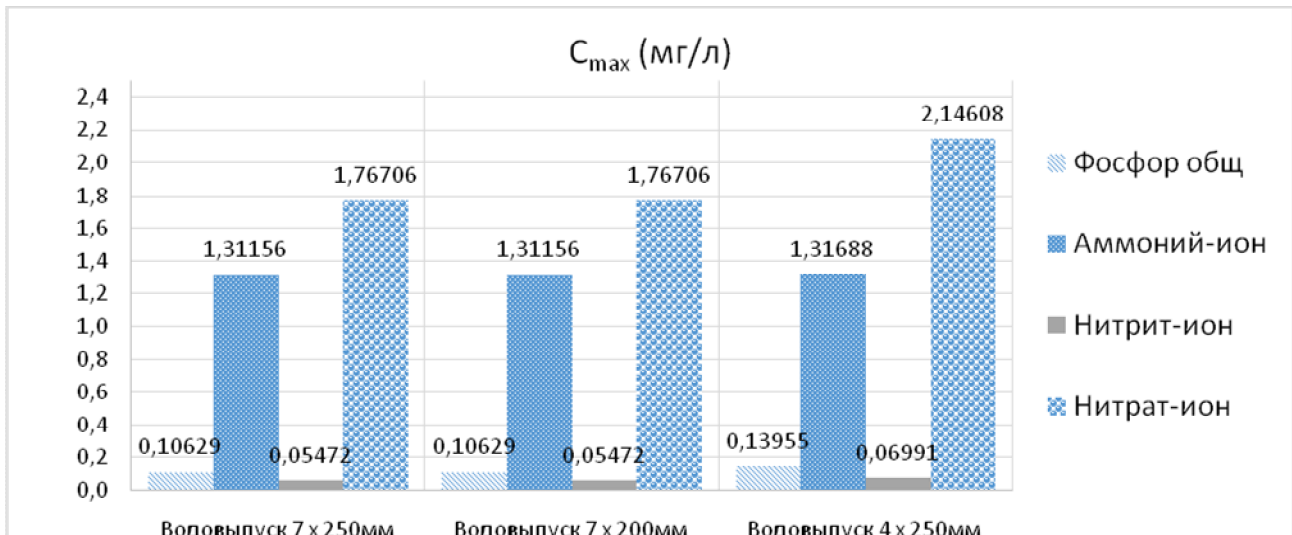


Рис. 1. Сравнение максимальных концентраций загрязняющих веществ в контрольном створе.

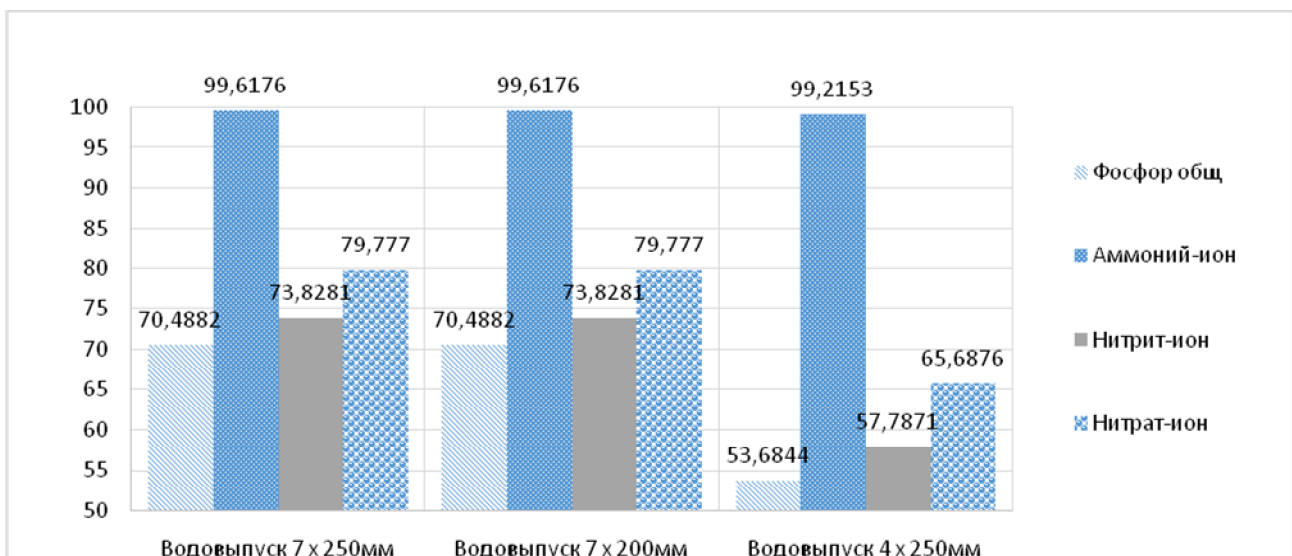


Рис. 2. Степень перемешивания сточных вод.

Заключение.

На основе проведенных численных экспериментов показано, что при сбросе сточных вод через 7 выпускных патрубков диаметром 200 и 250 мм максимальные концентрации загрязняющих веществ в контрольном створе практически не меняются. А при сбросе сточных вод через 4 выпускных патрубка диаметром 250 мм, загрязняющие вещества значительно хуже перемешиваются с природной водой. Соответственно для водоканала г.Тихвина осуществлять сброс сточных вод через рассеивающий водовыпуск с 7 патрубками является оптимальным решением.

Список литературы:

1. И. В. Антонов, Шишкин А.И., Алгоритм обоснования НДС для предприятий целлюлозно-бумажной промышленности применением геоинформационных технологий // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, СПб, ФГБОУ ВПО СПГУТД., 2017. №3. с. 41-47
2. Жильникова Н.А., Шишкин А.И., Епифанов А.В., Епифанова М.А. Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки для территориальных природно-технических комплексов на основе геоинформационных систем // Информационно-управляющие системы. 2017. №1:93-101
3. Сорокина Ю.В. Нормирование допустимого воздействия на водные объекты как способ обеспечения экологической безопасности //Евразийский юридический журнал. 2018. № 3 (118). С. 382-385.
4. Беляев С.Д. Планирование водоохраных мероприятий в речном бассейне в условиях техногенного нормирования //Вода Magazine №1 2018, с. 40-44
5. Косолапов А.Е., Косолапова Н.А., Калиманов Т.А.СКИОВО как инструмент обеспечения комплексного использования водных объектов и принятия решений в области управления водными объектами //Водные ресурсы России:Срвременное состояние и управление, Сочи, 08-14 октября 2018 г. с.126-129
6. Shishkin A., Chusov A., Epifanova M., Silka D. (2018) Functional Model That Evaluates the Impact of Hydrotechnical Works and Facilities on a Water Object. //International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. pp 921-935

References:

1. V. Antonov, I. Shishkin, algorithm of substantiation of the VAT for the enterprises of pulp and paper application of geoinformation technologies // Vestnik of the St. Petersburg state University of technology and design, St. Petersburg, fsbei VPO SPG., 2017. No. 3. p. 41-47
2. Zhilnikova N. Ah. Shishkin, A. I., Epifanov, A.V., Epifanova, M. A., algorithm for control of redistribution of the technogenic load for the territorial natural-technical complexes on the basis of geoinformational systems.//Information management systems. 2017. №1: 93-101
3. Sorokin Yu. V. Regulation of permissible impact on water objects as a way of ensuring environmental safety //Eurasian law journal. 2018. № 3 (118). P. 382-385.
4. Belyaev S. D. Planning of water protection measures in the river basin under technogenic regulation // Water Magazine №1 2018, p. 40-44
5. Kosolapov, A. E., Kosolapova, N. Ah. Kalimanov T. SKIOVO as a tool to ensure the integrated use of water bodies and decision-making in the field of water bodies management // Water resources of Russia: state of the Art and management, Sochi, 08-14 October 2018, pp. 126-129
6. Shishkin, A., Chusov, A., Epifanova, M., the Silk, D., (2018) the Functional Model That Evaluates the Impact of Hydraulic Works and Facilities on a water Object. //International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. pp 921-935

Статья поступила в редколлегию 19.03.19.

*Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного технического университета
Аверченков А.В.*

Статья принята к публикации 15.03.19.

Сведения об авторах

Епифанов Андрей Валерьевич

Доцент, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
тел.: +7 (921)-575-47-42
E-mail: epifandr@yandex.ru

Гашин Павел Андреевич

Магистр
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна – Высшая
школа технологии и энергетики
тел.: +7 (921) 44 59 740
E-mail: gashinpa@mail.ru

Information about authors:

Epifanov Andrey Valerievich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
Saint Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation
tel.: +7 (921)-575-47-42
E-mail: epifandr@yandex.ru

Gashin Pavel Andreevich

Postgraduate Student
Saint-Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design - Higher School of Technology
and Energy
tel.: +7 (921) 44 59 740
E-mail: gashinpa@mail.ru