

УДК 628.39

В. Е. Левкевич¹, Г. И. Касперов², Я. В. Тризнюк²¹ Белорусский национальный технический университет² Белорусский государственный технологический университет**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА
ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

В статье приведены некоторые результаты научных исследований по теме «Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера».

В качестве источников чрезвычайных ситуаций рассматривались: аварии в канализационных системах с массовым выбросом загрязняющих веществ; аварии на очистных сооружениях сточных вод с массовым выбросом загрязняющих веществ; аварии на транспорте с выбросом сильнодействующих ядовитых веществ, а также аварии в местах хранения ядовитых веществ, используемых в сельском хозяйстве. Исходными данными исследований явились опубликованные материалы Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, данные мониторинга поверхностных вод Белгидрометеоцентра, а также результаты собственных полевых и лабораторных исследований.

В статье рассмотрены источники и основные причины химического загрязнения рек Республики Беларусь.

Приводятся результаты лабораторных исследований переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при различных сценариях возникновения и развития источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера (разливах, переливах, разрывах трубопроводов, продуктопроводов и т. д.).

В ходе исследований определены качественные показатели процесса переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах.

Ключевые слова: авария, водоем, загрязнение, перенос, сброс, чрезвычайные ситуации.

V. Ye. Levkevich¹, G. I. Kasperov², J. V. Triznyuk²¹ Belarusian National Technical University² Belarusian State Technological University**LABORATORY TESTS
OF CHEMICAL CONTAMINANTS TRANSFER IN WATER BODIES**

The article provides several research results on the subject “The Development of the Algorithm of Chemical Contaminants Transfer in Water Flows and Water Reservoirs in Man-Made Emergencies”.

The following sources of emergencies were considered: sewerage systems accidents with massive emission of contaminants; waste water treatment facilities accidents with massive emission of contaminants, transport accidents with emission of extremely toxic substances, accidents in storage sites of poisonous substances used in agriculture.

Analysis input data were the materials published by the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, monitoring data of Belarus Meteorological Centre, field and laboratory tests by the authors.

The article analyses the sources and main causes of chemical contamination of rivers in the Republic of Belarus.

The article provides the results of laboratory tests of chemical contaminants transfer in water flows and water reservoirs with regards to various scenarios of man-made emergencies beginning and development depending on a source (flooding, overflowing, pipes breaks, etc.).

As a part of the research, quality indicators for chemical contaminants transfer in water flows and water reservoirs were determined.

Key words: accident, water reservoirs, contamination, transfer, water discharge/removal, emergencies.

Введение. На территории Беларуси насчитывается 20 781 тыс. рек, более 150 водохранилищ и 1300 прудов. Площадь водосборов рек колеблется в больших пределах: от 50 км² до 12 000 км². Средняя плотность речной сети со-

ставляет 0,44 км/км². Максимальные значения плотности зафиксированы на севере республики, где на отдельных водосборах она достигает 0,60–0,80 км/км². Минимальные значения (0,23–0,30 км/км²) отмечаются на юге Беларуси [1].

Результаты наблюдений за состоянием рек и водоемов свидетельствуют о том, что качество поверхностных вод в последние годы остается стабильным. Это является следствием проводимой работы по сокращению сброса в водные объекты загрязненных сточных вод, объем которых за последние годы сократился почти в три раза. Однако, несмотря на предпринимаемые меры, содержание в воде загрязняющих веществ (азота аммонийного, азота нитритного, нефтепродуктов и цинка) все еще не отвечает нормативным требованиям [2].

Наряду с поступлением недостаточно очищенных сточных вод существенным источником химического загрязнения поверхностных вод являются аварийные ситуации. Среди главных причин возникновения аварий следует считать: устаревшее оборудование, исчерпанное ресурс эксплуатации; несвоевременный и некачественный его ремонт; нарушение технологической дисциплины; небрежность обслуживающего персонала и т. д. [3–5].

Для оценки влияния скорости течения и морфометрических характеристик водохранилища, а также свойств загрязнителя на процесс переноса загрязняющих веществ в водоемах были проведены лабораторные исследования.

Основная часть. Анализ многолетних данных показал, что на территории Беларуси официально зарегистрировано более ста техногенных аварий, приведших к химическому загрязнению поверхностных вод республики, в результате которых нанесен экологический и материальный ущерб. Среди рек наибольшую нагрузку, связанную со сбросом сточных вод, испытывают: р. Свислочь ниже Минска, р. Неман ниже Гродно, р. Березина ниже Бобруйска, р. Днепр ниже Могилева и Речицы, р. Западная Двина ниже Новополоцка, р. Припять ниже Мозыря, р. Ясельда ниже Березы, р. Уза ниже Гомеля [6, 7]. Имеющаяся информация показывает, что тенденция роста количества аварийных ситуаций зависит от ряда факторов и условий, что исключает возможность их детального прогнозирования. При этом установлено, что масштабы, в особенности при авариях вблизи водных объектов, имеют большие площади распространения вредных веществ, и, как следствие, наносится значительный ущерб экосистеме страны [8, 9]. Отмечается массовая гибель моллюсков, раков, рыбы, других водных организмов и водной растительности и т. д. Наряду со значительным материальным и экологическим ущербом следует оценивать и социальный ущерб, который включает в себя вред, нанесенный здоровью населения, и ухудшение условий обитания человека.

Наибольшее количество случаев (более 90% от общего числа), сопровождающихся массо-

вым выбросом загрязняющих веществ в водные объекты, приходится на аварии в канализационных системах и на очистных сооружениях сточных вод (рис. 1).



Рис. 1. Доля различных видов аварий, повлекших за собой химическое загрязнение водных объектов

К потенциально опасным источникам химического загрязнения водных объектов следует отнести также автомобильный и железнодорожный транспорт, который перевозит химически опасные вещества. По железным дорогам страны ежемесячно перевозится до 1500 вагонов с взрывоопасными и ядовитыми веществами. На многих предприятиях этот вид транспорта является важнейшим при внутризаводских перевозках. Используются как цистерны вместимостью 40–60 т, так и различные контейнеры и емкости до 0,8 м³. На территории республики осуществляют перевозку опасных грузов более трех тысяч транспортных предприятий, в том числе автомобильным, железнодорожным и водным транспортом.

Основными причинами аварий на железнодорожном транспорте являются неисправности путей, подвижного состава, средств сигнализации, централизации и блокировки, ошибки диспетчеров, невнимательность и халатность машинистов. Чаще всего происходит сход подвижного состава с рельсов, столкновения, наезды на препятствия на переездах.

Причинами чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте являются неудовлетворительное техническое состояние дорог и техники, большое количество развязок и пересечений дорог на одном уровне, в том числе и с железными дорогами, возросшее количество автомобильного транспорта, принадлежащего физическим лицам, и т. д.

Особую опасность представляют аварии при транспортировке химически опасных веществ на речном транспорте. В республике ре-

ки судоходны на протяжении 1900 км, что говорит о возможности переноса на большие расстояния химически опасных веществ в случае возникновения аварий. Данный вид аварии представляет собой особую проблему, поскольку место возможной катастрофы с трудом поддается прогнозу. В табл. 1 приведены некоторые станции по выгрузке и отстою сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ).

Таблица 1
Перечень некоторых станций
по выгрузке и отстою СДЯВ

Название станции	Виды работ		Вид вещества
	Выгрузка	Отстой	
Свислочь	+	–	Хлор
Могилев	+	–	Сероуглерод
Брест	+	–	Цианистый водород
Новополоцк	+	–	Аммиак

В то же время за последние годы зарегистрировано лишь несколько случаев аварий на транспорте с выбросом сильнодействующих ядовитых веществ в водные объекты.

Таким образом, ежегодное повторение аварийных ситуаций, сопровождающихся массовым сбросом загрязняющих веществ в водные объекты (принимая во внимание стратегический характер водных ресурсов страны), требует принятия превентивных мер для ограничения их распространения, локализации и последующей ликвидации [10, 11].

Поэтому изучение процесса переноса химических загрязнений в водных объектах дает возможность своевременного принятия управленческих решений по ограничению распространения химического загрязнения, локализации и последующей ликвидации последствий аварии [5, 11].

В рамках исследований по заданию «Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера» были проведены исследования переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при различных сценариях возникновения и развития источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера (разливах, переливах, разрывах трубопроводов, продуктопроводов и т. д.). Исследования выполнены на лабораторной установке, которая представляет собой гидравлический лоток шириной 1,07 м и длиной 14,0 м. Непосредственно к лотку примыкает тарировочный бак, с треугольным водосливом, позволяющим изменять расход воды при различных сценариях развития аварийных ситуаций (рис. 2).



Рис. 2. Гидравлический лоток с моделями водохранилищ

В ходе исследований определялись качественные показатели процесса переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера [13–15]:

- распространение химического загрязнителя в зависимости от места возникновения аварии;
- время, за которое происходит распространение химического загрязнителя в водоемах;
- скорость распространения химического загрязнителя в водоемах;
- расход воды, поступающей через треугольный водослив лотка;
- наиболее неблагоприятные сценарии возникновения и развития аварии.

В лотке в соответствии с выбранным масштабом исследований устанавливали пространственные модели искусственных водных объектов (водохранилищ). В качестве объекта исследований был выбран каскад водохранилищ, входящих в состав Вилейско-Минской водной системы. Модели выполняли с устройством водосбросных сооружений в теле плотины. Горизонтальный масштаб модели – 1:1000, вертикальный – 1:100. Данные масштабы выбраны для достижения наиболее максимального геоморфологического подобия моделей с натурными объектами [1, 2]. Маркеры-красители для имитации химических загрязнителей подготавливаются весовым способом и в растворенном виде с помощью химических пипеток вносятся в водный поток.

По данным натурных исследований тестовых водохранилищ [12] на моделях наносили створы для измерения скорости потока с использованием микрокомпьютерного расходомера-скоростемера (рис. 3). Для определения уровня воды устанавливаются мерные рейки.



Рис. 3. Микрокомпьютерный расходомер-скоростемер

Обработка результатов экспериментальных данных проводили в соответствии с ГОСТ 8.207. Для определения доверительных интервалов погрешности результата измерения доверительная вероятность P принималась равной 0,95.

Для статистической обработки результатов эксперимента были выполнены следующие действия:

- исключали известные систематические погрешности по результатам наблюдений в соответствии с ГОСТ 11.002;
- находили среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений;
- вычисляли среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;
- вычисляли оценку среднего квадратичного отклонения от результатов измерения;
- проверяли гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению;
- вычисляли доверительные границы случайной погрешности результатов измерения;

- определяли границы не исключенной систематической погрешности результатов измерений;
- вычисляли доверительные границы погрешности результатов измерений.

По результатам лабораторных исследований получены данные (табл. 2), на основании которых разработан алгоритм процесса переноса загрязняющих веществ в водоемах.

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований

Номер опыта	Показатели		
	Время, с	Расстояние, см	Скорость, м/с
№ 4	10	50	5
	20	90	4,5
	30	110	3,666667
	60	125	2,083333
	90	140	1,555556
	120	155	1,291667
	150	170	1,133333
	180	180	1
	210	190	0,904762
	240	200	0,833333
	300	260	0,866667

Заключение. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что:

- скорость процесса переноса загрязнителя изменяется в зависимости от длины и ширины водохранилища;
- конфигурация пролива загрязнителя не оказывает какого-либо воздействия на скорость перемещения фронта загрязнения;
- скорость перемещения фронта загрязнения зависит от плотности загрязнителя, скорости течения и морфометрических характеристик водохранилища.

Список литературы

1. Левкевич В. Е. Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 149 p.
2. Водные ресурсы – основа устойчивого развития Республики Беларусь / А. Н. Апацкий [и др.] // Международное сотрудничество в решении водно-экологических проблем: материалы III Международного водного форума. Минск, 2006. С. 8–21.
3. Родзиллер И. Д. К вопросу о расчете сточных вод в реках. М.: Стройиздат, 1954. 142 с.
4. Руффель М. А. Метод расчета разбавления сточных вод при санитарной охране водоемов // Гигиена и санитария. 1960. Вып. 4. С. 23–27.
5. Водохранилища Белоруссии: природные особенности и взаимодействие с окружающей средой / В. М. Широков [и др.]. Минск: Университетское, 1991. 178 с.
6. Левкевич В. Е. Натурные исследования течений на малых равнинных водохранилищах // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. 1982. Вып. 12. С. 18–23.
7. Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера: отчет о НИР (заключит.) / КИИ МЧС Респ. Беларусь; рук. темы Г. И. Касперов. Минск, 2010. 144 с. № ГР 20091268.
8. О некоторых вопросах нормирования качества воды рыбохозяйственных водных объектов: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Бела-

рუსь и Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 8 мая 2007 г., № 43/42 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pravo.by/document/index.php?guid=2012&oldDoc=2010-29/2010-29/> (дата обращения: 15.05.2020).

9. Об утверждении инструкции по нормированию сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 20 янв. 2006 г., № 2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/upload/docs/op/W21732141_1497992400.pdf/ (дата обращения: 15.05.2020).

10. Об обращении с отходами: Закон Республики Беларусь, 20 июля 2007 г., № 271-З. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/upload/docs/op/H11900186_1559941200.pdf/ (дата обращения: 19.03.2020).

11. Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г. № 143-З [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=Hk1400149&p1=1/> (дата обращения: 19.03.2020).

12. Колмогоров А. Н., Велапов М. А. О новом варианте гравитационной теории движения взвешенных наносов // Вестн. МГУ. Сер. физ.-мат. и естеств. науки. 1954. № 3. С. 25–29.

13. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 216 с.

14. Пааль Л. Л. Инженерные методы расчета формирования качества вод водотоков. Ч. II. Таллин: Высшая школа, 1976. 123 с.

15. Расчет разбавления сточных вод в реках Урала / под ред. В. С. Шахова. Свердловск: ДГТУ, 1976. 157 с.

References

1. Levkevich V. Ye. *Dinamika formirovaniya beregov ravninnykh vodokhranilishch* [Dynamics of Formation of Small Flat Water Bodies Banks]. Riga, LAP LAMBERT Academic Publ., 2018. 149 p.

2. Apatskii A. N., Ablazhey V. P., Kalinin M. Yu., Stankevich A. P. Water Recourses – the Basis of Sustainable Development of the Republic of Belarus. *Mezhdunarodnoye sotrudnichestvo v reshenii vodno-ekologicheskikh problem: materialy III Mezhdunarodnogo Vodnogo foruma* [International Cooperation in Dealing with Water And Environment Concerns: Materials of the III International Water Forum]. Minsk, 2006, pp. 8-21 (In Russian).

3. Rodziller I. D. *K voprosu o rashchete stochnykh vod v rekakh* [About the Calculation of Waste Waters in Rivers]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1954. 142 p.

4. Ruffel M. A. Method of Waste Waters Dilution Calculation within Sanitary Control of Water Bodies. *Gigiyena i Sanitariya* [Hygiene and Sanitary], 1960, issue 4, pp. 23–27.

5. Shirokov V. M., Lopuh P. S., Levkevich V. Ye. *Vodokhranilishcha Belorussii: prirodnyye osobennosti i vzaimodeystviye s okruzhayushchey sredoy* [Water Bodies in Belarus: Natural Characteristics and Environment Interaction]. Minsk, Universitetskoye Publ., 1991. 178 p.

6. Levkevich V. Ye. Field Surveys Of Flows in Small Flat Water Bodies. *Vodnoye khozyaystvo i gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Water Management and Hydraulic Engineering], 1982, issue 12, pp. 18–23.

7. *Razrabotka algoritma perenosa khimicheskikh zagryazneniy v vodotokakh i vodoyemakh pri chrezvychaynykh situatsiyakh tekhnogennoy kharaktera* [The Development of the Algorithm of Chemical Contaminants Transfer in Water Flows and Water Reservoirs in Man-Made Emergencies: Research Report (Final)]. Minsk, 2010, 144 p., no. SR 20091268 (In Russian).

8. About Several Issues of Water Quality Regulation in Fish Industry: Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus and the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 8th of May 2007. Available at: <http://www.pravo.by/document/index.php?guid=2012&oldDoc=2010-29/2010-29/> (accessed 15.05.2020).

9. About Issuing the Instruction on Regulation of Waste Waters Discharge to Land Water Bodies: Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 20th of January 2006. Available at: http://www.pravo.by/upload/docs/op/W21732141_1497992400.pdf/ (accessed 15.05.2020).

10. *Ob obrashchenii s otkhodami: Zakon Resp. Belarus* [Waste Management Law of the Republic of Belarus]. Minsk, 20th of July, 2007, no. 271-Z. Available at: http://www.pravo.by/upload/docs/op/H11900186_1559941200.pdf/ (accessed 15.05.2020).

11. *Vodnyi kodeks Respubliki Belarus* [Water Code of the Republic of Belarus]. Minsk, 30th of April, 2014, no. 143-Z. Available at: <http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=Hk1400149&p1=1/> (accessed 15.05.2020).

12. Kolmogorov A. N., Velapov M. A. New Version of Gravitation Theory about Suspended Sediments Movement. *Vestnik MGU* [Proceedings of MGU], series Physics, mathematics and natural sciences, 1954, no. 3, pp. 25–29.

13. Karashev A. V. *Teorii i metody rashcheta nanosov* [Theory and Methods of Fluvial Sediments Evaluation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977. 216 p.

14. Paal L. L. *Inzhenernyye metody rashcheta formirovaniya kachestva vod vodotokov* [Engineering Methods of Calculation of Water Flows Formation]. Part II. Tallinn, Vysshaya shkola Publ., 1976. 123 p.

15. *Rashchet razbavleniya stochnykh vod v rekakh Urala* [Calculation of Waste Waters Dilution in Ural Rivers]. Edited by V. S. Shahov. Sverdlovsk, DGTU Publ., 1976. 157 p.

Информация об авторах

Левкевич Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, Республика Беларусь). E-mail: eco2014@tut.by

Касперов Георгий Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: borki1959@mail.ru

Тризнюк Яна Вячеславовна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yana_triznyuk@mail.ru

Information about the authors

Levkevich Viktor Yevgen'yevich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Water Supply and Drainage. Belarusian National Technical University (65-1, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eco2014@tut.by

Kasperov Georgiy Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borki1959@mail.ru

Triznyuk Jana Vyacheslavovna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yana_triznyuk@mail.ru

Поступила 10.03.2020