

УДК 627.132

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi82.569>

Исследование влияния строительства мостового перехода через р. Ока (г. Нижний Новгород) на вышерасположенные водоводы с применением математического моделирования руслового потока

М.А. Решетников

ORCID: 0000-0002-8492-0052

Ю.Е. Воронина

А.Н. Ситнов

ORCID: 0000-0003-4720-8194

М.В. Шестова

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Для проектируемого мостового перехода через р. Ока в г. Нижний Новгород произведена оценка влияния его строительства на надежность эксплуатации вышерасположенных по течению водоводов в русле. Данные водоводы подвержены размыву и для оценки влияния возводимых опор моста на состояние водоводов произведено трехмерное математическое моделирование речного потока в исследуемом районе реки. Моделирование основывается на системе уравнений Навье-Стокса. Для описания турбулентных явлений используется *k-ε* модель турбулентности. Трехмерная геометрия исследуемого участка включает русло реки, мостовые опоры, водоводы. Выполненное математическое моделирование участка р. Ока в районе водоводов в двух состояниях – в естественном (до строительства моста) и эксплуатационном (после ввода моста в эксплуатацию) при низких меженных уровнях позволило сделать вывод о практически отсутствующем влиянии опор моста на дальнейший размыв дна в районе водоводов. Также не оказывает влияния на размыв дна под трубами водоводов дноуглубление, необходимое для поддержания судоходства на дополнительном судовом ходу в рукаве. Результаты работы предназначены для использования при проектировании и строительстве объекта.

Ключевые слова: речной поток, гидравлика, математическое моделирование, мостовые опоры, дноуглубление.

Investigation of the impact of the construction of a bridge crossing over the river. Oka (Nizhny Novgorod) on the upstream waterways using mathematical modeling of the riverbed flow

Maxim A. Reshetnikov

ORCID: 0000-0002-8492-0052

Yulia E. Voronina

Aleksandr N. Sitnov

ORCID: 0000-0003-4720-8194

Marina V. Shestova

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. For the projected bridge crossing over the river. An assessment of the impact of its construction on the reliability of operation of upstream aqueducts in the riverbed was carried out in Nizhny Novgorod. These conduits are subject to erosion and to assess the impact of the bridge supports being erected on the condition of the conduits, three-dimensional mathematical modeling of the river flow in the studied river area was performed. The

simulation is based on a system of Navier-Stokes equations. The k- ϵ turbulence model is used to describe turbulent phenomena. The three-dimensional geometry of the area under study includes the riverbed, bridge supports, and culverts. The performed mathematical modeling of the section of the river The Oka in the area of the aqueducts in two states – in natural (before the construction of the bridge) and operational (after the bridge was put into operation) at low inter-soil levels allowed us to conclude that there was practically no effect of the bridge supports on further erosion of the bottom in the area of the aqueducts. Also, dredging, which is necessary to maintain navigation on an additional ship's course in the sleeve, does not affect the erosion of the bottom under the pipes of the aqueducts. The results of the work are intended for use in the design and construction of the facility.

Keywords: river flow, hydraulics, mathematical modeling, bridge supports, dredging.

Введение

Нижегородская агломерация является крупнейшей в Поволжье. Она – драйвер экономического роста всего региона: здесь сконцентрировано более 60% населения области и 75% валового регионального продукта (ВРП). Базовая программа развития агломерации включает в себя три основных направления: развитие жилищного строительства; реформа общественного транспорта; реновация исторического центра.

Юг столицы Приволжья — это посёлок Новинки и деревня Ольгино, которые совсем недавно вошли в состав областного центра. Эти площади предлагается развивать с помощью инновационного механизма комплексного развития территории. Недавно, для обеспечения связности территорий, здесь было завершено возведение крупной развязки: масштабное жилищное строительство будет полностью синхронизировано с дорожным каркасом. Транспортная доступность нового микрорайона будет обеспечена путём строительства дублёра проспекта Гагарина, в состав которого войдёт пятый мост через Оку.

Дублер является неотъемлемой частью комплексного развития нижегородской агломерации. Проект реализуется по поручению президента России и при поддержке Министерства транспорта РФ. Дублер проспекта Гагарина (рис. 1) станет частью нового транспортного каркаса нижегородской агломерации.



Рис. 1. Схема расположения моста и водоводов

Проектом строительства моста предусматривается также выполнение дноуглубительных судоходных прорезей. Однако возведение мостового перехода, а также разработка дноуглубительных прорезей может оказать влияние на структуру речного потока в зоне перехода. В эту зону попадают водоводы Заводских сетей,

располагающиеся в несудоходном рукаве р. Ока в районе острова Новинского водного узла примерно на 1 км выше створа моста. В настоящее время в зоне водоводов существуют локальные зоны размыва дна реки, что ухудшает их надежную эксплуатацию. Для оценки влияния строительства мостового перехода на русловые процессы в районе водоводов следует исследовать изменение структуры речного потока.

Большинство рекомендации по прогнозной оценке влияния мостовых переходов на динамику русловых процессов основаны на приближённых гидравлико-морфологических расчётах применительно к весьма схематизированному представлению морфологии русла, а также взаимодействию потока и опор моста [1, 2, 3, 4]. В настоящее время стало актуальным использование численных методов моделирования, основанных на компьютеризированном решении обладающих большими размерами систем уравнений гидравлики (гидродинамики) [5,6,7].

Методика проведения исследования

Для решения поставленной задачи по оценке влияния строительства мостового перехода через р. Ока на водоводы Заводских сетей использовался программный комплекс, предназначенный для численного решения уравнений динамики движения жидкости. Целью моделирования движения жидкости в расчетной области являлось получение распределения скоростей потока. Для расчета данных параметров задавались физические законы их изменения, совокупность свойств которых использована для постановки математической модели конкретной задачи.

Основными преимуществами численных методов исследования являются: возможность решения исследуемой задачи в трёхмерной (пространственной) постановке; возможность охвата расчётами участка реки, включающего одновременно район расположения опор мостового перехода и зону их влияния на состояние реки; оперативность расчётов для определения оптимального варианта расположения и конфигурации мостовых опор; учет геометрической конфигурации водоводов.

Структура речного потока описывается системой уравнений Навье-Стокса (1), дополненная уравнением неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \tag{1}$$

где: V_x, V_y, V_z – компоненты скоростей в проекции на соответствующую ось;

P – давление;

F_x, F_y, F_z – компоненты массовых сил;

ν – эффективная вязкость, определяемая выражением:

$$\nu = \nu_k + \nu_t \tag{2}$$

где ν_k – кинематическая вязкость среды;

ν_t – турбулентная вязкость.

Для определения турбулентной вязкости ν_t применяется k - ϵ подход. Величина турбулентной вязкости определяется по формуле (3):

$$\nu_t = c_p \cdot \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3)$$

где k – кинематическая энергия турбулентности;
 c_p – турбулентная константа среды;
 ϵ – диссипация турбулентной энергии.

Величины c_p и ϵ принимаются по модели второго порядка Джонсона-Лаундера [8, 9, 10].

Создание твердотельной модели исследуемого участка основывается на имеющихся гидрографических планах участка с помощью CAD-программного обеспечения. Полученная CAD модель участка описывает весь рельеф дна и представляет из себя триангуляционную сеть. Следующим этапом подготовки данных для моделирования является создание расчетной трехмерной объемной сети с промежуточным переразбиением поверхностной сети. При ее создании особое внимание уделено зоне водоводов, в которой сетка дополнительно измельчалась для наиболее точного решения потока. Общее количество расчетных ячеек составляет 1,3млн. Участок трехмерной сети представлен на рис. 2.

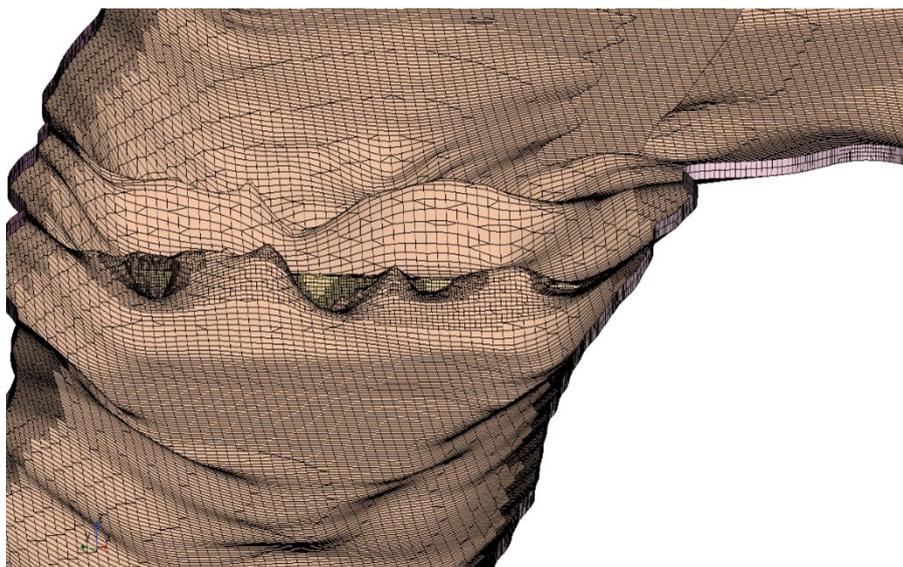


Рис. 2. Рельеф дна в районе водоводов после построения трехмерной сетки

Для учета влияния геометрии водоводов, расположенных выше дна реки на структуру потока, их геометрия булевой операцией вырезана из общей расчетной области потока (рис. 3).

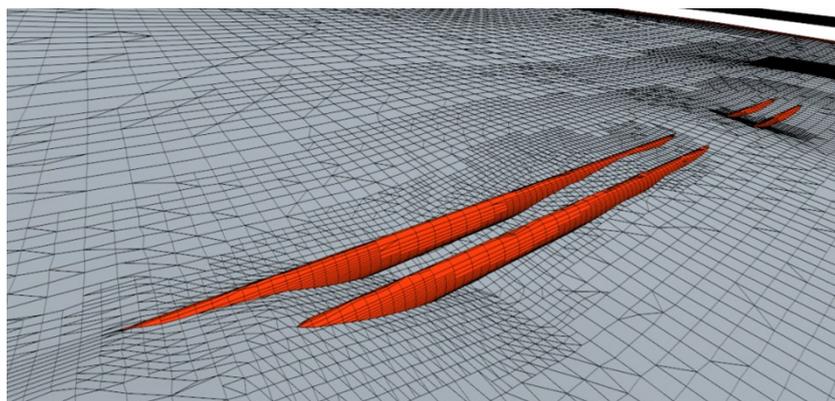


Рис. 3. Учет геометрии водоводов, расположенных выше дна реки (провисающие участки)

Для решения задачи моделирования речного потока используются следующие граничные условия:

а) входная область (inlet). Описывается значениями скоростей потока, которые определяются исходя из расчета расхода (4):

$$v_x = f(x, y, z); v_y = f(x, y, z); v_z = f(x, y, z). \quad (4)$$

б) выходная область (outlet). Условие по которому производная скорости потока приравнивается к нулевому значению (5):

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

в) стенка (wall). Условие по которому массовый расход жидкости через данную область запрещен (6):

$$V_x = V_y = V_z = 0 \quad (6)$$

г) поверхность воды (symmetry). Для данной области скоростные компоненты перпендикулярные к области равны нулю. Движение жидкости предусматривается только вдоль области.

В процессе моделирования создано две расчетных модели:

1. естественное состояние русла (до строительства опор моста);
2. проектное состояние русла – после завершения строительства мостового перехода и производства в целях судоходства дноуглубительных работ на транзитном и дополнительном судовых ходах. Математические модели созданы при условии прохождения низкого (проектного) расхода воды, равного 560 м³/с и принятого на основании анализа гидрологического режима реки [3].

Результаты математического моделирования

На основе полученных результатов математического моделирования речного потока на исследуемом участке р. Ока в районе водоводов Заводских сетей выполнен анализ и прогноз возможных русловых деформаций в естественном и эксплуатационном состояниях. Применение численного моделирования позволяет исследовать изменение структуры потока по множеству скалярных и векторных величин. Для выявления изменения структуры потока сравниваются скоростные поля в естественном и проектном состояниях. На рис. 4 представлены значения поверхностных скоростей речного потока в двух состояниях.

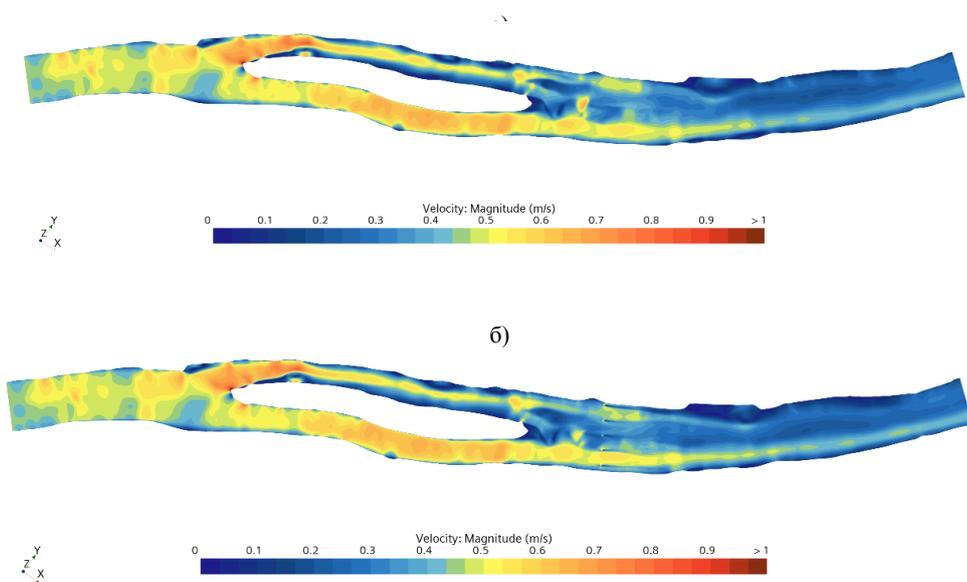


Рис. 4. Скалярное распределение поверхностных скоростей
 а) естественное состояние; б) проектное состояние.

Особое внимание уделено скоростному полю потока между водоводами и дном на оголенных участках (рис. 5).

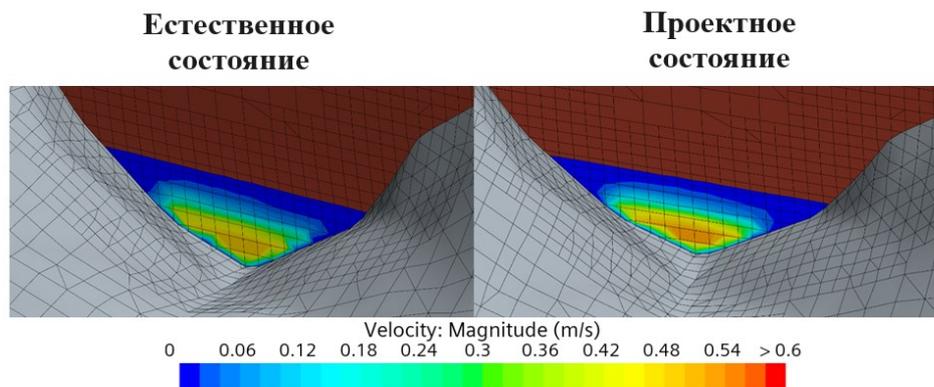


Рис. 5. Значения скоростей потока под оголенным участком нижней нитки водоводов

Для исследования также рассмотрены линии тока, зоны вихреобразования, турбулентные процессы и другие величины, позволяющие оценить влияние мостового перехода и дноуглубительных прорезей на гидраулику потока у водоводов.

Обсуждение

В эксплуатационном состоянии, когда будущий мост будет введен в эксплуатацию и выполнено дноуглубление на основном и дополнительном судовых ходах, общее поле скоростей остается практически неизменным по сравнению с естественным состоянием русла в настоящее время.

По результатам анализа продольных скоростных профилей в районе водоводов в двух состояниях полученная динамика распределения скоростей по вертикали

указывает на полное повторение характера и направленности водоворотных зон в рассматриваемых случаях. Однако, при создании опор нового мостового перехода и проведении дноуглубительных работ в районе участка, где наблюдается нависание водоводов над размывом дна русла, происходит замедление поверхностных скоростей на подходах к трубам и при переливе через них максимальные скорости сосредотачиваются у поверхности воды, что положительно сказывается на устойчивости дна ниже трубопроводов.

Незначительные плановые изменения скоростных полей получены ниже от ухвостья острова (рис. 4) при подходе к опорам моста. За счет дноуглубления дополнительного судового хода основной стрежень потока несудоходного рукава, где располагаются водоводы, равномерно перераспределяется по ширине русла.

Максимальные скорости у дна достигают значений, причем в районе нижнего по течению водовода. Между двумя нитками труб водоводов формируется закручивание потока на малых скоростях течения, образуя отдельную область турбулентности, ограниченную трубами, дном и обратными течениями ниже нижней нитки водовода. Ввиду того, что здесь скорости незначительные, циркуляция потока не влияет на размыв непосредственно у дна. Однако повышение скоростей у нижней ветки водоводов при неблагоприятных условиях может спровоцировать продолжение подмыва в будущем. В данном случае (при низком уровне) размыв дна в районе труб не наблюдается ввиду малых значений донных скоростей ниже неразмывающих для реки Ока.

Заключение

Выполненное математическое моделирование участка р. Ока в районе водоводов в двух состояниях (в естественном и эксплуатационном) при низких меженных уровнях позволило сделать вывод о практически отсутствующем влиянии опор моста на дальнейший размыв дна в районе водоводов. Дноуглубление, необходимое для поддержания судоходства на дополнительном судовом ходу в несудоходном рукаве, производится ниже самого створа водоводов, поэтому влияния на размывы дна под трубами не оказывает, а лишь незначительно перенаправляет поток к ухвостью острова.

При низких уровнях воды скоростные поля как в естественном, так и в эксплуатационном состояниях неизменны. Незначительные изменения скоростного поля просматриваются лишь у поверхности воды и связаны с перенаправлением потока в сторону дноуглубления. Средние и донные течения полностью повторяют конфигурацию естественного русла. Значения донных скоростей в обоих расчетных состояниях не превышают средних неразмывающих скоростей для участка р. Ока в нижнем течении (не превышают 0,55 м/с). Причем, все значения скоростей не превышают неразмывающих значений по участку, что говорит об отсутствии размывов непосредственно в период низких уровней.

Список литературы

1. Гладков, Г.Л. Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках: Учебное пособие для вузов / Г.Л.Гладков, М.В.Журавлев, Ю.П.Соколов. - СПб, Изд-во А.Кардакова 2005. – 241 с.
2. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт, 1990. 319 с.
3. Ситнов, А. Н. Оценка влияния строительства мостового перехода (г. Нижний Новгород) на русловые процессы и устойчивость судового хода в нижнем течении р. Ока / А. Н. Ситнов, Ю. Е. Воронина, М. В. Шестова // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 77. – С. 273-284. – DOI 10.37890/jwt.vi77.445. – EDN IUENBI.
4. Воронина Ю.Е., Шестова М.В., Решетников М.А. Влияние технологии возведения мостового перехода на р. Ока (15-й км судового хода), производства дноуглубительных работ и уровня режима на русловые процессы и устойчивость

- судового хода.//Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/2023/5_3.pdf
5. Липатов И.В., Решетников М.А., Бандин Д.А. Особенности создания математической модели и ее реализации для моделирования гидродинамики речного потока в нижнем течении р. Ока.//Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/2023/5_6.pdf
 6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
 7. Зиновьев А.Т. Математическое моделирование руслового потока для прогнозов влияния строительства в поймах на гидрологический режим крупных рек (на примере реки Обь) / А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин, Е.Д. Кошелева // Водное хозяйство России, №2, 2017. – с. 54-72
 8. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974. „The numerical computation of turbulent flows“, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 3, pp. 269-289.
 9. Rodi, W. 1979. „Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale“, *Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows*.
 10. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. *Journal of Energy*, 7(4), 345–353. doi:10.2514/3.48086

References

1. Gladkov, G.L. Environmental impact assessment of engineering measures on navigable rivers: A textbook for universities / G.L.Gladkov, M.V.Zhuravlev, YU.P.Sokolov. - SPb, Izd-vo A.Kardakova 2005. – 241 s.
2. Grishanin K.V. Fundamentals of the dynamics of riverbed flows. – М.: Transport, 1990. 319 s.
3. Sitnov A.N. Assessment of the impact of the construction of a bridge crossing (Nizhny Novgorod) on riverbed processes and the stability of the ship's course in the lower reaches of the Oka River / A.N. Sitnov, Y.E. Voronina, M.V. Shestova // *Russian Journal of Water Transport*. – 2023. – № 77. – С. 273-284. – DOI 10.37890/jwt.vi77.445. – EDN IUENBI.
4. Voronina Y.E., Shestova M.V., Reshetnikov M.A. The influence of technology for the construction of a bridge crossing on the Oka river (15th km of the ship's course), dredging and level regime on riverbed processes and stability of the ship's course.//Транспорт. Development horizons. 2023: Materials of the International Scientific and Practical Forum. «VGUVT». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/2023/5_3.pdf
5. Lipatov I.V., Reshetnikov M.A., Bandin D.A. Features of creating a mathematical model and its implementation for modeling the hydrodynamics of a river flow in the lower reaches of the Oka river.//Транспорт. Development horizons. 2023: Materials of the International Scientific and Practical Forum. «VGUVT». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/2023/5_6.pdf
6. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
7. Zinoviev A.T. Mathematical modeling of riverbed flow for forecasting the impact of construction in floodplains on the hydrological regime of large rivers (on the example of the Ob River) / A.T. Zinoviev, K.B. Koshelev, K.V. Marusin, E.D. Kosheleva // *Water Management of Russia*, No. 2, 2017. – pp. 54-72
8. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974. „The numerical computation of turbulent flows“, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 3, pp. 269-289.
9. Rodi, W. 1979. „Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale“, *Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows*.
10. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. *Journal of Energy*, 7(4), 345–353. doi:10.2514/3.48086

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Решетников Максим Алексеевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: serfskiwind@gmail.com

Maksim A. Reshetnikov Ph.D. in Engineering Science, senior lecturer of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Воронина Юлия Евгеньевна доцент к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yulez@yandex.ru

Yulia E. Voronina Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Ситнов Александр Николаевич профессор, д.т.н., зав. кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru

Aleksandr N. Sitnov professor, doctor of technical sciences, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Шестова Марина Вадимовна доцент к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: shestowam@yandex.ru

Marina V. Shestova PhD in Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 20.02.2025; опубликована онлайн 20.03.2025.
Received 20.02.2025; published online 20.03.2025.

УДК 656.6

DOI: 10.37890/jwt.v82.585

Анализ состояния системы обеспечения безопасности судоходства на внутреннем водном транспорте государственным портовым контролем

А.А. Фомин

ORCID: 0009-0000-4078-2914

Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Статья посвящена анализу нормативно-правового обеспечения безопасности судоходства на внутреннем водном транспорте в деятельности государственного портового контроля. Проанализирован «Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации» и приказы Министерства транспорта Российской Федерации (2012-2020 гг.), регламентирующие данную деятельность. Обращается внимание на несовершенство современного законодательства, что негативно отражается на эффективности деятельности инспектора государственного портового контроля при принятии им определенных решений. Подтверждается отсутствие нормативно-правовой базы для: осуществления контроля над объектами постройки до февраля 2012 г.; конкретики требований к техническому состоянию и процессам эксплуатации объектов водного транспорта, требований соблюдения пожарной безопасности и правил плавания по ВВП; конкретной и качественной оценки нарушений. Перечисленное делает невозможным проверки значительного количества объектов внутреннего водного транспорта. Проведенный анализ нормативно-правовых основ безопасности судоходства на внутреннем водном транспорте и собственный опыт позволили автору сделать выводы, имеющие актуальное прикладное значение для совершенствования системы обеспечения безопасности судоходства на внутреннем водном транспорте государственным портовым контролем.

Ключевые слова: судоходство, внутренний водный транспорт, безопасность судоходства, государственный портовый контроль, инспекторы государственного портового контроля, система обеспечения безопасности судоходства, техническая эксплуатация речного транспорта.

Analysis of the state of the system for ensuring the safety of navigation on inland water transport by the state port control

Andrey A. Fomin

ORCID: 0009-0000-4078-2914

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the analysis of the regulatory framework for the safety of navigation on inland water transport. The author analyzes the documents that regulate the work of the state port control - this is the "Code of Inland Water Transport of the Russian Federation" and orders of the Ministry of Transport of the Russian Federation (2012-2020). Attention is drawn to the imperfection of modern legislation. This negatively affects the efficiency of the state port control inspector. It is noted that there are no laws for monitoring objects built before February 2012; there are no specific requirements for the technical condition and operation of water transport, fire safety requirements; specific and high-quality assessment of violations. All of the above does not allow for a high-quality inspection of a significant number of water transport facilities. After analyzing the regulatory framework, the author of the article made conclusions. They are relevant and applicable to the system of ensuring the safety of navigation on inland water transport.