

**ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТИХНИЧЕСКИЕ
СООРУЖЕНИЯ**

**WATERWAYS, PORTS AND HYDRAULIC ENGINEERING
CONSTRUCTIONS**

УДК 627.157

DOI: 10.37890/jwt.vi72.294

**Методические подходы оценки заносимости перекатов
нижнего бьефа Нижегородской ГЭС и их влияние на
обеспечение судоходных глубин участка**

Ю.Е. Воронина

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

Аннотация. Для обеспечения судоходных глубин на проблемном участке Городец – Нижний Новгород требуется проведение значительных дноуглубительных работ по разработке практически всех перекатов участка. Однако песчаные грунты, слагающие русло, приведут к значительной заносимости судоходных прорезей, что потребует выполнения дополнительного дноуглубления в летне-осенний период при низких уровнях воды. На существенную заносимость участка оказывают влияние факторы: 1) исчерпанные гидравлические возможности реки; 2) влияние особенностей, связанных с нахождением участка в пределах нижнего бьефа Нижегородской ГЭС. Выполненные расчеты заносимости по планам русловых съемок и аналитическим методом дают сопоставимые результаты.

Ключевые слова: интенсивные дноуглубительные работы, заносимость переката, причины заносимости, график потери глубины.

**Methodological approaches to assessing the drift of the
Nizhegorodskaya HPP lower pool riffles and their impact on
ensuring the navigable depths of the area**

Yulia E. Voronina

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. To ensure navigable depths in the problem area Gorodets - Nizhny Novgorod, significant dredging is required to develop almost all the riffles in the area. However, the sandy soils that make up the channel will lead to a significant sinking of the soil into the shipping channels, which will require additional dredging during the summer-autumn period when the water is low. Factors influencing a significant change in the site are: 1) exhausted hydraulic capacity of the river; 2) the influence of features associated with the location of the site within the lower pool of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station. The transferred calculations based on channel survey plans and the analytical method give comparable results.

Keywords: intensive dredging, subsiding soils, causes of subsiding soils, depth reduction schedule.

Введение

Проблема судоходства в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС имеет давнюю историю, связанную с включением в транспортную стратегию развития внутренних водных путей до 2025 года проектирование и строительство низконапорного гидроузла (ННгу). Однако на стадии проектирования ННгу путем продвижения так называемых альтернативных вариантов решения проблем судоходства, произошел отказ от выработанного и досконально изученного в течение двух десятилетий кардинального решения проблемы в виде постройки низконапорного гидроузла в районе Б. Козино. Поэтому в новую стратегию развития до 2030 года [1,2,3] уже внесены изменения и принято решение о строительстве пристроя к камере 15А. Для правильного функционирования шлюза 15 и 15А необходимо выполнение значительного по своим объемам дноуглубления как на подходах к шлюзу, так и на всем участке Городец – Нижний Новгород. Для подготовки к реализации идеи строительства дополнительной камеры 15А к шлюзу №15 Нижегородского гидроузла заранее, еще до окончания проектных и начала строительных работ, перед Администрацией Волжского бассейна была поставлена задача начать углубление участка в навигацию 2021 года и продолжать работы вплоть до реализации проекта возведения камеры 15А, окончание которого произойдет, по оценкам проектировщиков, через 2-3 года после начала строительных работ. По всем подсчетам для разработки участка необходимо значительно увеличить судоходную глубину. Однако гидравлические возможности реки здесь уже себя давно исчерпали [4] и любые дноуглубительные работы спровоцируют как значительную посадку уровня воды в районе шлюзов, так и интенсивную заносимость судоходных прорезей. На первое окажет влияние то, что участок Городец – Балахна сложен трудно разрабатываемыми грунтами, такими как глины, суглинки, мергель, с включением камней. А на второе – участок Балахна – Нижний Новгород представляет собой русло с песчаным дном и со значительной заносимостью. Однако, несмотря на все негативные аспекты, по заданию Министерства транспорта Российской Федерации и Федерального агентства морского и речного транспорта ФБУ «Администрация Волжского бассейна» выполняла работы по углублению русла р. Волга на участке Городец – Н. Новгород в районе Георгиевского переката на 888,5-890 км судового хода.

Анализ планов русловых съемок по углублению Георгиевского переката в сентябре 2021 года

До начала производства работ на указанном участке 02.09.2021 была выполнена русловая съемка для уточнения характера дна и составления плана производства дноуглубительных работ (рис. 1). На съемке нанесены границы прорези и места укладки извлеченного грунта, согласно [5]. Сами работы выполнялись в период до 20 сентября 2021 года с целью извлечения заданного агентством объема дноуглубления, по результатам которых выполнена контрольная съемка участка [6]. Для оценки объема заносимости на 888,5-890 км судового хода после интенсификации дноуглубительных работ была проведена дополнительная русловая съемка через 30-

44

сут.

(20-28.10.2021 г).

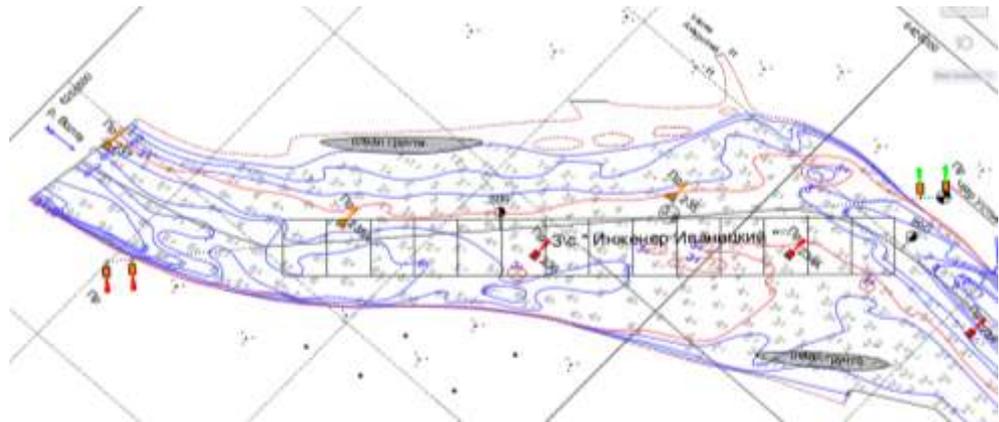


Рис. 1. План русловой съемки Георгиевского переката (сентябрь 2021 г.) с местоположением дноуглубительной прорези

Для исследования заносимости участка р. Волга на 888,5-890 км в 2021 году с учетом производимых интенсивных дноуглубительных работ на нем выполнено детальное построение поперечных сечений по каждой из предоставленных съемок через 100 м по длине судоходной прорези, а также продольные сечения на участке 888,5-890 км по оси судоходной прорези, на ее кромках и на расстоянии 50 м. за обеими кромками.

Форма поперечного сечения на перекате после значительных по объему дноуглубительных работ сильно изменяется. Сформированные в результате дноуглубления отвалы в поперечном сечении разделяют его на 2 зоны. Первая зона – в границах выемки грунта до уложенного отвала. Вторая – прибрежная, в пределах которой и располагаются отвалы грунта. В результате дноуглубительных работ поперечное сечение на перекате приобретает форму более крутой параболы. Выемка грунта в зоне наибольших глубин (зона 1) при планомерном наращивании глубины осуществляется в грунтах более плотного сложения, за счет чего деформация прорези уменьшается и устойчивость русла увеличивается.

Многолетние прибрежные отвалы грунта при прочих равных условиях уменьшают крутизну прибрежных склонов русла реки (зона 2). Способность потока транспортировать наносы определяется значением касательного напряжения на дне,

т.е. значением динамической скорости $V_* = \sqrt{\frac{t_0}{\gamma}} = \sqrt{ghI}$. Причем на основании

имеющихся формул расхода наносов можно считать, что эта способность пропорциональна V_*^3 . В канализованных руслах, каким и является нижний бьеф Нижегородской ГЭС, скорость течения и касательные напряжения в зоне 2 оказываются меньше, чем в русле реки до проведения дноуглубительных работ. При этом ширина полосы подводного прибрежного откоса, провоцирующего «сползание» донных частиц в канализованное русло также становится меньше, чем в естественном [6].

Выйдя из состояния покоя, частица грунта, испытывающая на себе действие силы тяжести $G_\sigma = G \cdot \sin \alpha$, которая направлена по поверхности откоса, начинает перемещаться вниз по нему и через некоторое время оказывается внизу откоса в самой судоходной прорези. Из-за того, что интенсивные дноуглубительные работы по увеличению глубины на участке Балахна – Нижний Новгород, сложенном песчаными

грунтами, в плане будут расширять зону отвала (зону 2), частицы извлеченного грунта все быстрее и интенсивнее будут переходить в зону разрабатываемых прорезей. Такая активность в движении частиц повлечет за собой заносимость на разработанной судоходной прорези в течение навигации, в которой производились активные дноуглубительные работы. Помимо этого при увеличении самой площади живого сечения в районе гребня переката произойдут значительные изменения в гидравлике потока из-за увеличения скоростей течения. Это отрицательно скажется на способности русла поддерживать достигнутую глубину без какой-либо посадки уровня воды. Оба этих фактора поспособствуют значительным переформированиям русла судоходной реки, неустойчивости достигнутых глубин с посадкой уровня воды на протяженном участке русла выше по течению от разрабатываемого места.

Анализ совмещенных поперечных сечений выявил указанные выше зоны и позволил оценить поперечные деформации русла на участке интенсивных дноуглубительных работ.

Согласно полученным съемкам Георгиевского переката осенью 2021 года выявлены значимые причины заносимости, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа совмещенных поперечных сечений в районе разработки 888,5-890 км р. Волга

Поперечное сечение	Разработка по глубине, см	Заносимость по глубине, см	Потеря глубины за месяц, %	Стеснение русла по ширине, м	Характер русла в сечении	Особенности сечения	Причина заносимости
1	2	3	4	5	6	8	7
1	90	90	100	–	Плоская ложина с небольшой подрезкой слева	Стабильность сечения после проведения дноуглубительных работ	Уполаживание откосов в зоне максимальных глубин сечения. Естественные переформирования русла после дноуглубления
2	90	90	100	–		Наличие отвала грунта вдоль левого берега	Уполаживание откосов за счет размыва береговой полосы левого берега, влияние отвала грунта, интенсификация русловых процессов
3	110	70	63	–			Влияние зоны отвала грунта на конфигурацию сечения
4	8	6	75	–			Стабильные глубины от дноуглубительных работ со значительным увеличением зоны мелководья левой вдольбереговой полосы за счет отвала грунта
5	15	-30	–	–			Стабильные глубины от дноуглубительных работ со значительным увеличением зоны мелководья левой вдольбереговой полосы за счет отвала грунта

6	110	30	27	–	Переходная зона плесовой ложины в перекат	Разработка в стороне от максимальной глубины поперечного сечения	Стабильность глубоководного участка русла. Расположение судоходной прорези не по линии наибольших глубин и наибольших скоростей потока привело к заносимости прорези за счет действия отвала грунта, уполаживания левобережного откоса и активизации русловых процессов на участке
7	95	90	95	–		Стабильность сечения после проведения дноуглубительных работ	Русловые деформации от вышерасположенного участка путем оседания частиц грунта при его разрыхлении в процессе выемки, уполаживания откосов, влияния отвала грунта, формируемого грядового рельефа дна
8	105	90	86	90		Формирование «собранного» сечения	Русловые деформации от вышерасположенного участка путем оседания частиц грунта при его разрыхлении в процессе выемки, уполаживания откосов, влияния отвала грунта, формируемого грядового рельефа дна
9	85	50	59	100		Русловые деформации от вышерасположенного участка путем оседания частиц грунта при его разрыхлении в процессе выемки, уполаживания откосов, влияния отвала грунта, формируемого грядового рельефа дна	
10	195	25	13	70	Гребень Георгиевского переката	Разработка в стороне от максимальной глубины поперечного сечения. Разработка за пределами оси судового хода.	Расположение судоходной прорези не по линии наибольших глубин и наибольших скоростей потока привело к заносимости прорези за счет уполаживания левобережного откоса и активизации русловых процессов на участке
11	195	70	36	90		Разработка за пределами оси судового хода. Формирование «собранного» сечения	Расположение судоходной прорези не по линии наибольших глубин и наибольших скоростей потока привело к заносимости прорези за счет уполаживания левобережного откоса и активизации русловых процессов на участке

12	220	85	39	100		Разработка за пределами оси судового хода. Наличие отвала грунта вдоль правого берега	Наиболее интенсивные русловые деформации по участку за счет влияния правобережного отвала грунта, изменения направления течения, наличия поворота русла и свойственных ему русловых процессов
----	-----	----	----	-----	--	---	---

Аналитический подход к оценке заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС

По данным ФБУ «Администрация Волжского бассейна» о глубинах судовых ходов, проведенных дноуглубительных работах (первичных и повторных), а также данным об уровнях на гидрологических постах Балахна и Н. Новгород за период с 1960 по 2004 год были построены обобщенные графики потери глубин прорезями после их разработки в подготовительных период (при извлечении геометрического объема грунта) и в осенне-летний период (извлечение гидравлического объема, поступившего в прорези в результате заносимости ранее разработанных перекатов) (рис. 2).

По различным перекатам участка Балахна – Н. Новгород за многолетний рассматриваемый период установлена закономерность изменения заносимости перекатов. Выявленной закономерностью графиков первоначальной интенсивной потери глубины является верхний предел заносимости перекатов в течение одной навигации. Указанная особенность получена из количественного анализа частоты разработки перекатов в период одной навигации (рис. 2). На основании графиков, построенных для р. Волга наибольшая интенсивность наступает в первые 12 суток после проведенных дноуглубительных работ. За этот период происходит наибольшее оползание откосов и наибольшее поступление наносов из отвала грунта в судоходную прорезь. Однако влияние грядового рельефа на повышение отметок дна в местах разработки продолжается дальше, и уже за более длительный срок заносимость будет продолжаться. Еще одной особенностью является рост длительности устойчивости прорези после ее разработки.

Кривую процесса заносимости в начальный период времени (12 суток) можно представить в виде математической функции.

$$that = \frac{e^{\alpha t} - e^{-\alpha t}}{e^{\alpha t} + e^{-\alpha t}} \tag{1}$$

где t – время заносимости прорези после углубления переката.

После окончания начального периода заносимости судоходной прорези потеря глубины происходит равномерно по зависимости:

$$\frac{\Delta z}{\Delta h} = 0,02t + C \tag{2}$$

где C – эмпирический коэффициент, принимаемый в пределах от 0 до 2,5 в зависимости от того, какой по счету раз разрабатывался один и тот же перекат.

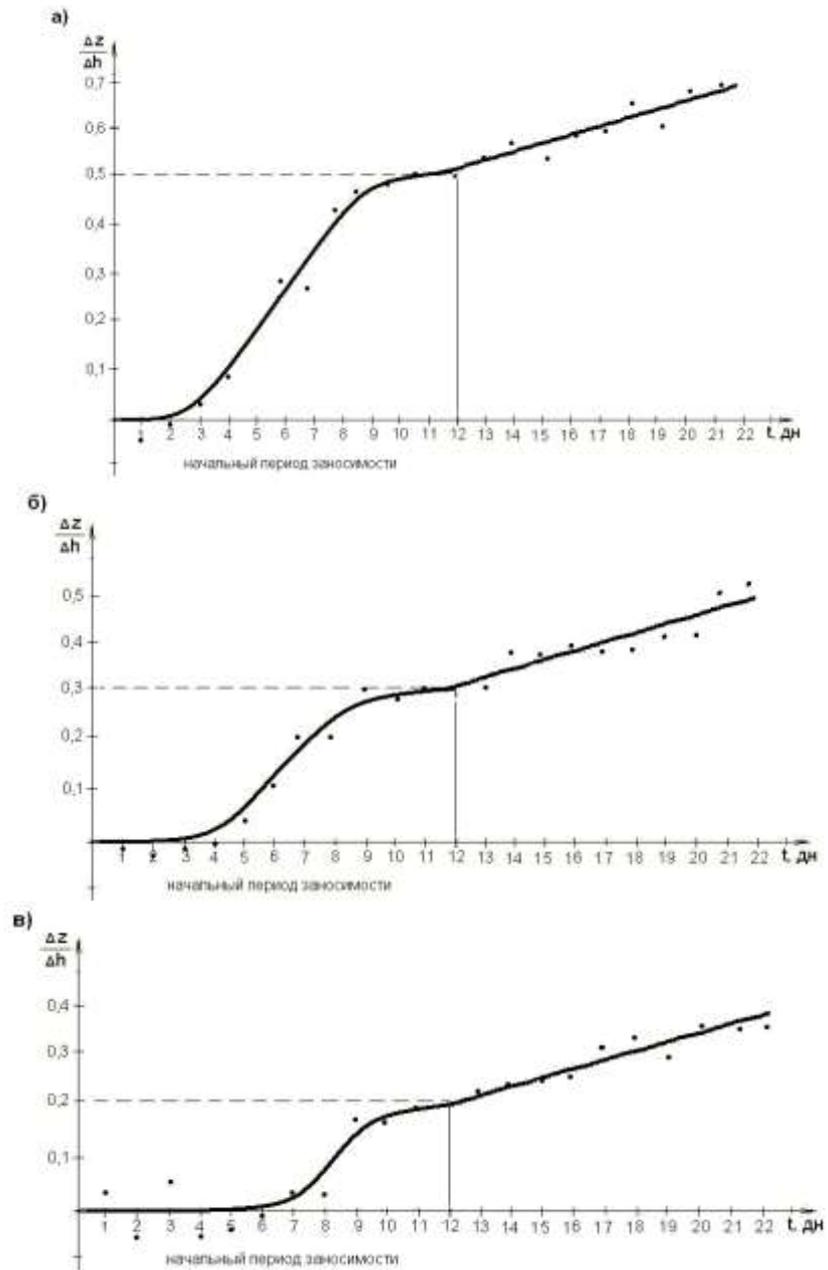


Рис. 2. Обобщенные графики заносимости прорезей: а) после первичного дноуглубления, б) после повторного дноуглубления, в) после последующего повторного дноуглубления ($\Delta z/\Delta h$ – приращение потери глубины на перекате по отношению к толщине снимаемого слоя)

При осреднении зависимости между первичным дноуглублением и двойным повторным было получено значение начальной заносимости Георгиевского переката в навигацию 2021 года 0,35. С использованием графиков зависимости рис. 2 для определения интенсивности потери глубины на конкретный момент времени получен окончательный график потери глубины для Георгиевского переката в навигацию 2021

года (рис. 3), из которого видно, что для конкретного перекатного участка в период первых 7 дней (поправка на плановый материал съемок по результатам интенсивного дноуглубления) заносимость составляет 18,7%. Дополнительные 47,2% в зависимости от неравномерной заносимости участков судоходной прорези может наступить от 3 до 21 дня после разработки [7].

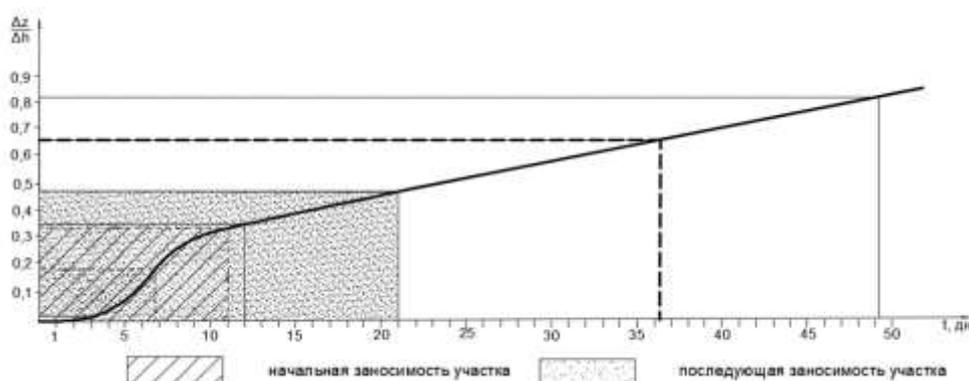


Рис. 3. График потери глубины от дноуглубительных работ на Георгиевском перекате в навигацию 2021 года

Результаты расчетов

Таким образом, максимальные деформации на участке наблюдаются в районе гребня Георгиевского переката в начале его подваля. На значительную заносимость русла оказывают влияние как сама конфигурация русла, так и местоположение отвалов грунта от сильной интенсификации дноуглубительных работ. Потеря глубины по сечениям распределяется неравномерно – от 13 до 100%. При подходе к гребню разрабатываемого переката начинает наблюдаться «собранность» сечения, оказывающая значительное влияние на русловые процессы в самом русле реки.

По анализу съемок, выполненных 3.09 и съемок 15.09 заносимость составляет 33%. При других периодах выдерживания времени между дноуглублением и первичной контрольной съемки заносимость варьируется между 18,7% и 47,2%. Поэтому при всех возможных вариантах съемок в зависимости от конкретной даты разработки и даты повторной контрольной съемки отдельные участки судоходной прорези могут заноситься до 80%. По представленным съемкам, выполненным на период 30-44 дня (по графику рис.3 время заносимости составляет 36 суток) заносимость соответствует 66%.

Заключение

В районе Георгиевского переката за рассматриваемый период наблюдается заносимость русла, сложенного песчаным грунтом, что потребовало выполнения дноуглубительных работ в июне и июле месяцах. Исследования заносимости участка р. Волга на 888,5-890 км в 2021 году с учетом производимых интенсивных дноуглубительных работ на нем выполнены различными методами, основанными на натурных данных и аналитических выводах по участку р. Волга от Балахны до Н. Новгорода. Анализ совмещенных поперечных сечений показал, что максимальные деформации на участке наблюдаются в районе гребня Георгиевского переката в начале его подваля. На значительную заносимость русла оказывают влияние как сама конфигурация русла, так и местоположение отвалов грунта от сильной интенсификации

дноуглубительных работ. Потеря глубины по сечениям распределяется неравномерно и в среднем составляет 51,3%. По всей судоходной прорези выявлена трансформация поперечных сечений с признаками явного разделения на зоны 1 и 2, что не влияет на русловые процессы в самом русле, но и активизирует заносимость прорези.

Для оценки степени заносимости русла после выполненных интенсивных дноуглубительных работ были построены совмещенные продольные профили участка, позволяющие определить потерю глубины за период наблюдения в 30-35 дня. На основании натурных съемок и аналитическим методом получены полностью сопоставимые результаты заносимости участка после интенсивных дноуглубительных работ. Полученные результаты позволяют констатировать значительные русловые деформации, связанные с заносимостью прорези, составляющие более 65% за текущую навигацию.

С точки зрения судоходства такая значительная заносимость может привести как к значительным потерям в судоходной глубине в течение навигации, так и интенсификации в работе дноуглубительной техники. Земснаряды, разрабатывая судоходные прорези повторно несколько раз за осенне-летний период, будут мешать движению судов на участке и уменьшать пропускную способность. А сами суда, проходя земснаряды, работающие на перекатах, будут задерживать их работу на время, необходимое для пропуска проходящих мимо грузовых и пассажирских судов.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008г. №1734-Р «О транспортной стратегии Российской Федерации».
2. Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 №1596 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы».
3. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 февраля 2016г. № 327-Р.
4. Оценка влияния на гидрологический режим планируемого в 2021 году объема дноуглубительных работ в размере 2,5/1,0 млн. м3 на участке р. Волга 854,5-895,0 км с целью увеличения гарантированной глубины судового хода [Текст] // Отчет по НИР. – Н. Новгород: ВГУВТ, 2021.
5. Инструкция по землечерпательным работам / Минречфлот РСФСР. – М.: Транспорт, 1989. – 64 с.
6. Воронина Ю.Е. Канализирование русел судоходных рек с целью повышение безопасности судоходства / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Н. Новгород, 2004. – 181 с.
7. Анализ заносимости перекатов в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС по итогам проведения транзитных и капитальных дноуглубительных работ в 2021 г. на участке р. Волга (854,5-895,0 км) и оценка влияния капитального дноуглубления на посадку уровня воды на порогах шлюзов №15 и № 16 Городецкого гидроузла [Текст] // Отчет по НИР. – Н. Новгород: ВГУВТ, 2022 – 176 с.
8. Воронина Ю.Е. Связь объемов дноуглубительных работ с изменением гарантированных глубин судового хода. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта №23. / Ю.Е. Воронина – Н. Новгород, 2007. – С. 59-61.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 22 noiabria 2008g. no1734-R «O transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii».
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2017 no1596 «Ob utverzhdanii gosudarstvennoi programmy Rossiiskoi Federatsii «Razvitie transportnoi sistemy».

3. Strategiiia razvitiia vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda, utverzhdennaia rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 23 fevralia 2016g. no 327-R.
4. Otsenka vliianiia na gidrologicheskii rezhim planiruемого v 2021 godu obema dnouglubitel'nykh rabot v razmere 2,5/1,0 mln. m³ na uchastke r. Volga 854,5-895,0 km s tsel'iu uvelicheniia garantirovannoi glubiny sudovogo khoda [Tekst] // Otchet po NIR. Nizhnii-Novgorod.: VGUVT, 2021.
5. Instruktsiia po zemlecherpatel'nym rabotam / Minrechflot RSFSR. Moskva: Transport, 1989. 64 p.
6. Voronina I.U.E. Kanalizirovanie rusel sudokhodnykh rek s tsel'iu povyshenie bezopasnosti sudokhodstva / Dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. N. Novgorod, 2004. 181 p.
7. Analiz zanosimosti perekatov v nizhnem b'efe Nizhegorodskoi GES po itogam provedeniia tranzitnykh i kapital'nykh dnouglubitel'nykh rabot v 2021 g. na uchastke r. Volga (854,5-895,0 km) i otsenka vliianiia kapital'nogo dnouglubleniia na posadku urovnia vody na porogakh shliuzov no15 i no 16 Gorodetskogo gidrouzla [Tekst] // Otchet po NIR. Nizhnii-Novgorod.: VGUVT, 2022 – 176 p.
8. Voronina Yu.E. The relationship of the volume of dredging with the change in the guaranteed depths of the ship's course. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport No. 23. / Y.E. Voronina – N. Novgorod, 2007. – pp. 59-61.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Воронина Юлия Евгеньевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Водных путей и гидротехнических сооружений», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yulez@yandex.ru

Yulia E. Voronina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: yulez@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.06.2022; опубликована онлайн 20.09.2022.
Received 15.06.2022; published online 20.09.2022