

## **ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

### **WATERWAYS, PORTS, AND HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS**

УДК 627.4, 574.65

DOI: 10.37890/jwt.vi77.445

#### **Оценка влияния строительства мостового перехода (г. Нижний Новгород) на русловые процессы и устойчивость судового хода в нижнем течении р. Ока**

**А.Н. Ситнов**

*ORCID: 0000-0003-4720-8194*

**Ю.Е.Воронина**

**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 устойчивость русла и судового хода. Выполненное математическое моделирование гидродинамики речного потока на исследуемом участке нижнего течения Оки позволило выявить особенности русловых деформаций реки при возведении сооружений моста и создании судоходных прорезей, выполнить их анализ и разработать рекомендации по снижению негативных последствий строительства. Они касаются выбора предпочтительных вариантов очередности этапов строительства и лучшей из рассматриваемых в проекте технологических схем возведения сооружения, рекомендаций по временным периодам производства работ с учетом уровня режима реки и оценке их влияния на нижерасположенные гидротехнические сооружения. Результаты работы предназначены для использования при проектировании и строительстве объекта.

**Ключевые слова:** русловые деформации, математическое моделирование, судоходные условия, гарантированные габариты пути, дноуглубительные работы.

#### **Assessment of the impact of the construction of a bridge crossing (Nizhny Novgorod) on the channel processes and the stability of the navigation in the lower reaches of the Oka river**

**Aleksandr N. Sitnov**

*ORCID: 0000-0003-4720-8194*

**Yulia E. Voronina**

**Marina V. Shestova**

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract** For the projected bridge over the river Oka in the city of Nizhny Novgorod, an assessment of the impact of its construction on the stability of the channel and navigation was made. The performed mathematical modeling of the hydrodynamics of the river flow in the studied section of the lower reaches of Oka made it possible to identify the features of the channel deformations of the river during the construction of the bridge and the creation of

navigable slots, to analyze them and develop recommendations to reduce the negative consequences of construction. They relate to the choice of preferred options for the sequence of construction stages and the best of the technological schemes for the construction of the structure considered in the project, recommendations on the time periods for the production of work, taking into account the level regime of the river and the assessment of their impact on the downstream hydraulic structures. The results of the work are intended for use in the design and construction of the facility.

**Keywords:** channel deformations, mathematical modeling, navigation conditions, guaranteed track gauge, dredging.

### Введение

Проектируемый мостовой переход на р. Ока, являющийся четвертой очередью объекта «Дублер проспекта Гагарина в г. Нижний Новгород» окажет определенное влияние на русловые процессы реки и устойчивость судовых ходов. Поэтому целью исследования явилось обоснование оценки такого влияния на речном участке протяженностью 20 км до места впадения Оки в Волгу (рис. 1), а задачи включали решение вопросов, связанных с устойчивостью русла реки, судовых ходов как до строительства моста, так и в периоды строительства и после его окончания.

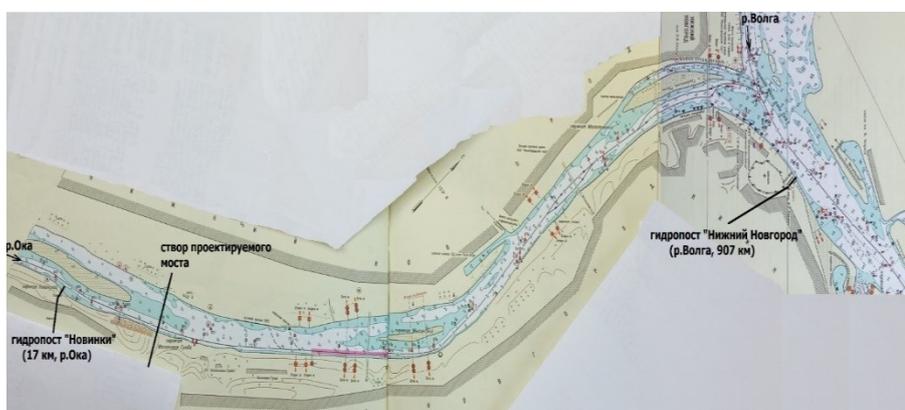


Рис. 1. Ситуационный план исследуемого участка р. Ока

### Исследование влияния строительства мостового перехода на русловые процессы и устойчивость судового хода в нижнем течении р. Ока. Математическое моделирование

Выполненные расчеты с использованием классических подходов оценки устойчивости русел по методам и критериям Ржаницына Н.А., Маккаеева Н.И., Карасева И.Ф., Гришанина К.В. и др. [1,2,3,4,5,6] показали, что русло р. Ока в нижнем течении является достаточно стабильным для выполнения каких-либо русловых работ, в том числе по возведению опор будущего мостового перехода.

Вместе с тем, возведение опор моста приведет к изменению кинематической структуры потока и русловым переформированиям. Для их оценки выполнено математическое моделирование речного потока на участке с построением математических моделей на основе подходов, изложенных в [7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17]. С учетом технологических особенностей строительства моста были созданы и смоделированы 16 расчетных вариантов для восьми моделей (этапов строительства). Модели этапов производства работ приняты в соответствии со схемами строительства моста, а само моделирование произведено при двух уровнях

воды: низким (проектном) с отметкой 63,80 мБС и расходом воды 560 м<sup>3</sup>/с и высоким уровне весеннего половодья с отметкой 66,40 мБС, которому соответствует руслоформирующий расход 2420 м<sup>3</sup>/с. Один из начальных вариантов схемы строительства приведен на рис. 2, последний на рис. 3. Соответственно им созданные модели со второй по четвертую включают удлиненную технологическую площадку у левого берега и последовательность возведения элементов моста от левого берега к правому, а модели с пятой по седьмую рассматривают укороченную технологическую площадку у левого берега и последовательность строительства от правого берега к левому. Первая и восьмая модели характерны для естественного и эксплуатационного (после окончания строительства) состояний.

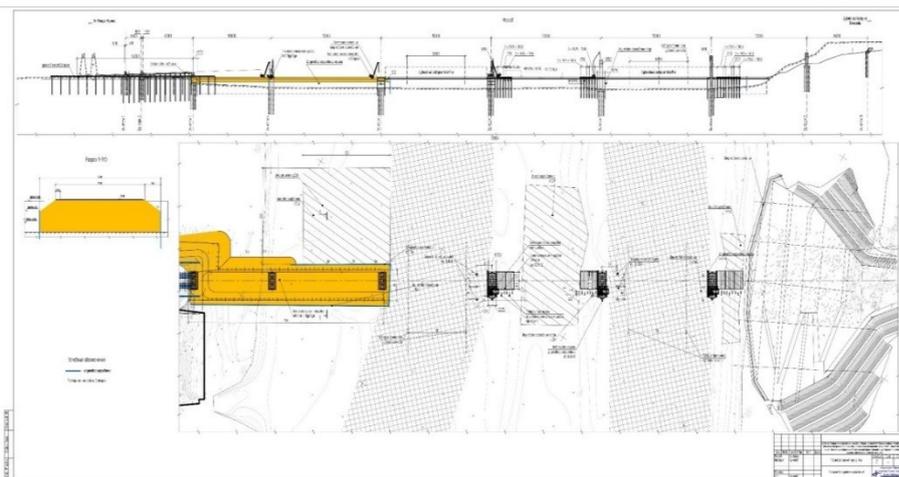


Рис. 2. Схема строительства моста (начальный вариант)

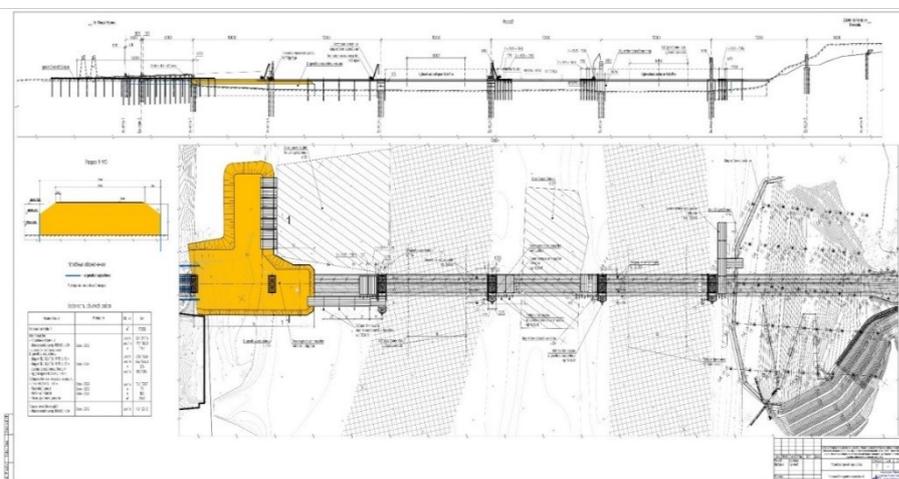


Рис. 3. Схема строительства моста (последний вариант)

Непосредственно в районе проектируемого моста дноуглубительные работы проводились в разные годы в небольших объемах. Однако в период строительства необходима разработка двух судоходных прорезей для поддержания гарантированных габаритов по имеющемуся основному и создаваемому дополнительному судовым ходам, влияние которых учтено в рассматриваемых моделях. Кроме того, ниже створа

Мызинского моста расположен пережат, представляющий большое затруднение для судоходства.

Поэтому для оценки характера и интенсивности изменения русловых процессов в период строительства и после его окончания, в большой степени влияющих на безопасность судоходства в нижнем течении р. Ока, значительное внимание уделено объектам непосредственно ниже створа будущего моста, Мызинскому пережатию и устьевому участку реки, особенности влияния на которых рассмотрены ниже.

Нужно отметить, что влияние технологии возведения опор моста и их наличие сказывается на характере русловых изменений всего исследуемого участка от створа моста до устья Оки, но с разной интенсивностью, которая по мере удаления от створа моста ослабевает и наиболее ярко проявляется непосредственно на близлежащих нижних участках. Здесь находится водозабор водопроводной станции «Малиновая гряда» (АО «Нижегородский водоканал»), которым осуществляется забор воды на 14,15 км от устья реки у правого берега и водозабор ООО «Автозаводская ТЭЦ» в 13,8 км от устья у левого берега (рис. 4).



Рис. 4 - Местоположение водозаборов в районе строительства моста

### Результаты математического моделирования

Анализ результатов моделирования показал, что при низких уровнях воды после начала строительных работ на участке до водозабора «Автозаводская ТЭЦ» начинаются активные русловые деформации. Технологические площадки у левого и правого берегов оказывают на поток воздействие, аналогичное выправительным сооружениям, которые работают как водостеснительные и увеличивают скорости течения в створе моста и ниже его (табл. 1).

Таблица 1

**Изменение скоростей течения в характерных точках на участке от моста до водозабора «Автозаводская ТЭЦ» (при низких уровнях)**

Расчетная модель	Скорость течения у оголовка водозабора «Малиновая Гряда», м/с	Скорости течения в створе водозабора «Автозаводская ТЭЦ», м/с		
		Оголовок	Прибрежная зона	Максимальная в створе
модель 1 (естественное состояние)	0,31	0,26	0,30	0,30
модель 2	0,80	0,26	0,02	0,50
модель 3	0,66	0,31	0,61	0,80
модель 4	0,50	0,43	0,71	1,00
модель 5	0,12	0,41	0,44	0,47
модель 6	0,47	0,16	0,04	0,46
модель 7	0,36	0,26	0,08	0,34
модель 8 (эксплуатационное состояние)	0,30	0,28	0,10	0,30

Наиболее неблагоприятное влияние оказывает левобережная технологическая площадка, которая перенаправляет поток к правому берегу и способствует образованию локальных зон размыва у правого берега со скоростями течения до 1,0 м/с в районе створа водозабора «Автозаводская ТЭЦ».

Вдоль левого берега в районе расположения створов водозабора «Малиновая Гряда» и «Автозаводская ТЭЦ» формируются вихревые водоворотные зоны с обратным течением. По ширине они практически занимают половину поперечного сечения русла. Причем водозабор «Автозаводская ТЭЦ» оказывается в этой зоне.

В результате стеснения русла скорости течения в районе водозабора «Малиновая Гряда» увеличиваются почти в 2,5 раза до значений 0,8 м/с.

Расчеты показали, что в период строительства между створами водозаборов и ниже их структура потока нарушается и влияет на устойчивость судового хода. В эксплуатационном состоянии после разбора всех стесняющих русло технологических элементов состояние потока на участке стабилизируется. Скорости течения практически восстанавливаются до значений, соответствующих естественному состоянию потока, в том числе в районе водозаборов.

При высоких уровнях также с началом строительных работ активизируются русловые деформации.

Для примера стеснение потока левобережной технологической площадкой существенно меняет его режим в районе и ниже створа будущего мостового перехода, создавая резко выраженное неравномерное движение. В результате вдоль левого берега за этой площадкой формируется вихревая водоворотная зона течений, направленных обратно основному потоку. Граница влияния этой зоны простирается вплоть до створа Мызинского моста. Отличительной особенностью, по сравнению с полученными результатами при низких уровнях воды, является количество формируемых вихрей вдоль левого берега. В рассматриваемой модели образуется один мощный вихрь, валец которого находится между створами водозаборов «Малиновая Гряда» и «Автозаводская ТЭЦ». Он занимает порядка 54% ширины русла (при низких уровнях – до 60%). Струи вихревого потока меняют свое направление на встречное по отношению к направлению потока у левого берега, причем скорости течения здесь возрастают до 1,1 м/с (в 2,2 раза больше, чем при

низких уровнях воды), что будет способствовать развитию боковой эрозии. Этот процесс затронет и створ водозабора «Автозаводская ТЭЦ» (табл. 2).

Таблица 2

**Изменение скоростей течения в характерных точках на участке от моста до водозабора «Автозаводская ТЭЦ» (при высоких уровнях)**

Расчетная модель	Скорость течения у оголовка водозабора «Малиновая Гряда», м/с	Скорости течения в створе водозабора «Автозаводская ТЭЦ», м/с		
		Оголовок	Прибрежная зона	Максимальная в створе
модель 1 (естественное состояние)	0,66	0,64	0,69	0,71
модель 2	1,46	0,26	1,18	1,48
модель 3	1,38	0,26	0,71	0,93
модель 4	1,54	0,31	1,18	1,21
модель 5	0,28	0,78	0,95	0,95
модель 6	1,12	0,41	0,46	1,05
модель 7	1,12	0,46	0,40	1,01
модель 8 (эксплуатационное состояние)	0,70	0,65	0,53	0,71

В результате стеснения русла левобережной технологической площадкой транзитный поток отклоняется к правому берегу. Сжатие ширины потока происходит на 40%, за счет чего происходит увеличение скоростей течения ниже створа моста в 2,2 раза - до значений 1,46 м/с (в районе водозабора «Малиновая гряда»). Таким образом, ниже створа моста в правобережной части русла формируется локальная зона размыва протяженностью до 1 км, в которую попадает в том числе водозабор «Малиновая Гряда».

Обобщая результаты деформаций на участке при низких и высоких уровнях воды получено, что направленность русловых деформаций в обоих случаях схожи, а отличие заключается в интенсивности происходящих процессов. Отмечается, что возведение укороченной технологической площадки (пирса) у левого берега и начало строительства с возведения технологической площадки у правого берега сопровождается менее интенсивными русловыми процессами и позволяет руслу реки быстрее адаптироваться к новым условиям.

В эксплуатационном состоянии поток в районе участка стабилизируется, в скорости течения восстанавливаются до своих естественных значений, что отражено на рис. 5.

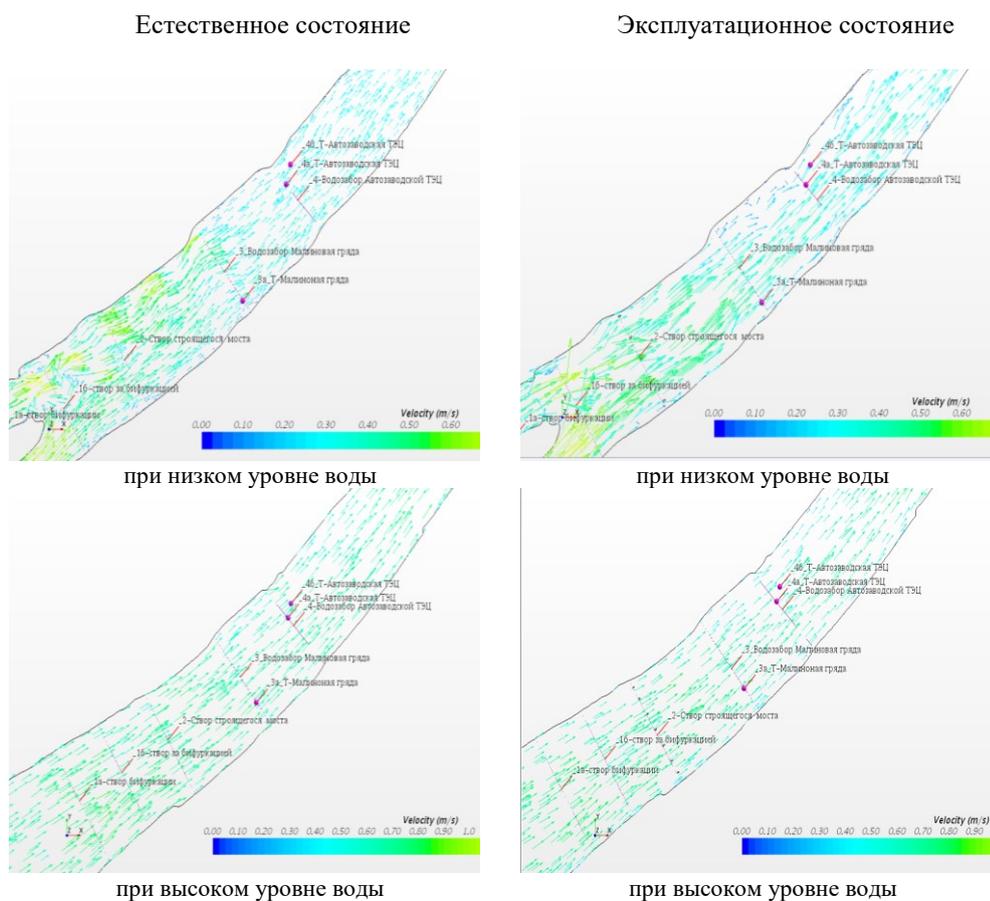


Рис. 5. Скалярное отображение модулей скорости течения на участке водозаборов

Ниже рассмотренного участка имеется проблемный отрезок пути у Мызинского моста, связанный с его двухрукавностью, ежегодным дноуглублением на судовом ходу в районе Мызинского переката в непосредственной близости от моста.

На участке до начала строительства основной поток направлен в сторону несудоходного левобережного рукава с практически равной долей разделения струй, что свидетельствует о преимущественном распределении расхода воды именно в этот рукав. Здесь же сосредоточен основной стрежень потока.

Однако первоочередное возведение правобережной технологической площадки и укороченной левобережной дамбы оказывает положительное влияние на динамику русловых процессов. Выявлено, что скорости потока при высоком уровне практически в два раза выше, чем при низком уровне и это отражается на интенсивности русловых переформирований. Одновременно в районе нескольких опор Мызинского моста наблюдается зона повышенных скоростей до 1,15 м/с, что в период высоких уровней может ускорить их размыв (рис. 6).

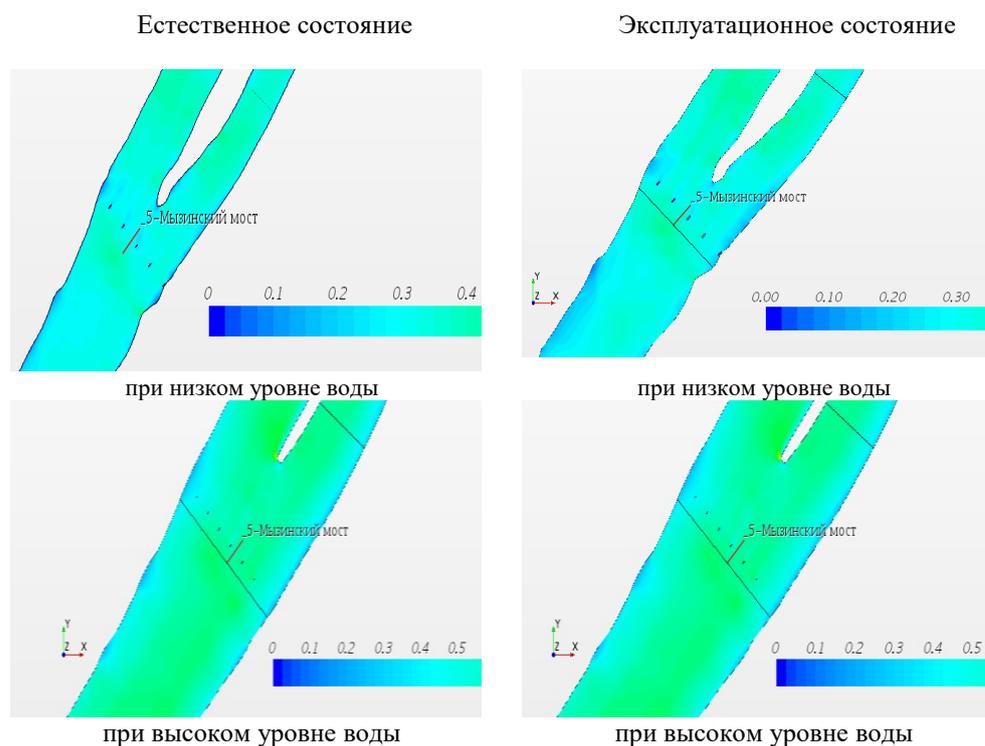


Рис. 6. Векторное отображение кинематической структуры потока в районе опор Мызинского моста г. Н. Новгород

После завершения возведения опор и разбора всех вспомогательных перемычек, технологических площадок и извлечения забитых свай поток более равномерно распределится по рукавам Мызинского узла. Приверх осередка продолжит размываться до возникновения баланса равновесия гидравлико-морфометрической системы, когда площадь живого сечения русла увеличится до параметров, необходимых для уменьшения скоростей потока ниже неразмываемых значений. В ухвостье осередка возникнут майданные течения за счет увеличенных скоростей потока, проходящих по участку в эксплуатационном состоянии. Но серьезных глубинных деформаций в русле не будет наблюдаться, а размыв правого берега у ухвостья осередка за счет длительного действия на него вдольбереговых течений благоприятно скажется на судоходстве в правом рукаве в будущем.

Участок от метромоста до Стрелки является наиболее удаленным от створа будущего мостового перехода. В естественном состоянии на нем основной поток сосредоточен в правом рукаве, сконцентрировавшись вдоль правого закрепленного берега р. Ока (рис.7). Левый берег основного русла у о. Гребневские пески на протяжении всего участка является зоной пониженных скоростей, особенно в районе опор метромоста. Опоры указанного моста играют исключительную роль в этом процессе движения потока, отжимая часть его в несудоходный рукав.

Поведение потока в районе данного участка практически по всем рассматриваемым моделям сопоставимо как с естественными условиями русла до проведения строительных работ, так и с условиями после ввода в эксплуатацию будущего моста. А в эксплуатационном состоянии линии тока максимальных скоростей перенаправятся в сторону существующего судового хода в правом рукаве, делая его более устойчивым к русловым деформациям. Вдольбереговые

вихреобразные течения у правого берега будут вымывать на участке наносы и переносить их вниз по течению. Тем самым медленно, но последовательно улучшая ситуацию с глубинами на подходах к причалам речного вокзала.

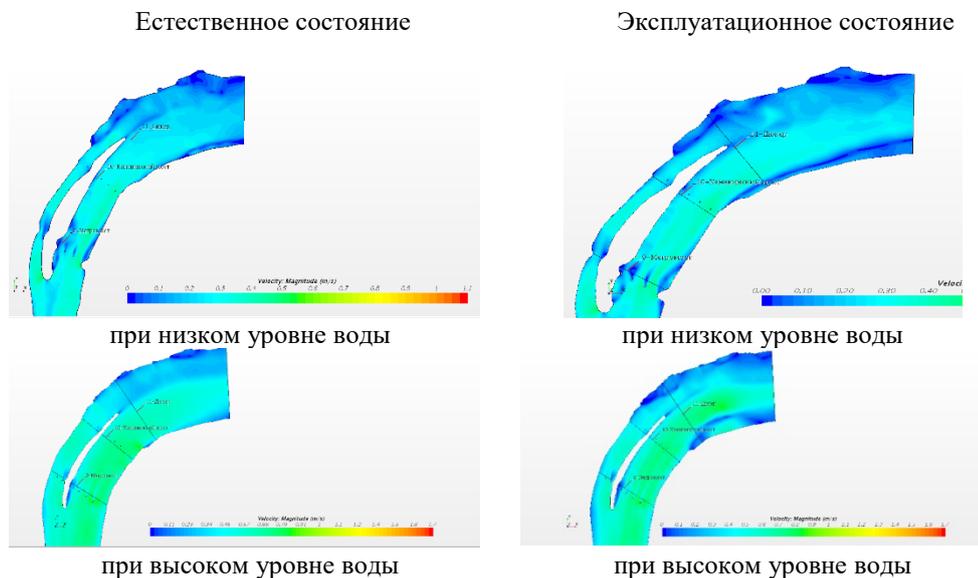


Рис. 7. Участок в районе створа метромоста до Стрелки

### Результаты исследований и выводы

Результаты выполненного анализа русловых переформирований и устойчивости судового хода на исследуемом участке от створа мостового перехода до устья р. Ока использованы для разработки предложений по снижению негативных последствий строительства моста.

На основе результатов выполненных исследований сделаны основные выводы:

- влияние технологии возведения опор моста и их наличие сказывается на характере русловых изменений всего исследуемого участка от створа моста до устья Оки, но с разной интенсивностью, которая по мере удаления от створа моста ослабевает и наиболее ярко проявляется непосредственно на близлежащих нижних участках;
- характер и направленность русловых деформаций при высоких и низких уровнях воды идентичны. Отличие заключается в интенсивности протекающих русловых переформирований: при высоких уровнях воды интенсивность переформирований выше, чем при низких;
- водозаборы ниже створа мостового перехода оказываются в неблагоприятных условиях эксплуатации, так как находятся в зоне активных русловых деформаций. Однако, после разбора всех технологических площадок и сооружений (после окончания строительных работ), состояние русла в их зоне возвращается к своему естественному состоянию;
- ниже Мызинского моста влияние строительных работ минимально. Наблюдается лишь изменение русловых процессов, связанных с повышением уровня воды, которое наступает ежегодно в естественных условиях.

### **Заключение и рекомендации**

Учитывая полученные при моделировании результаты сделаны следующие рекомендации по снижению негативных последствий строительства моста:

- наиболее благоприятной по своему влиянию на гидравлику потока является модель с укороченной левобережной технологической площадкой. Чем она короче, тем меньшее влияние она оказывает на русловые деформации;
- максимальное двустороннее стеснение русла должно происходить при низких уровнях воды, в межень и по возможности носить кратковременный характер;
- наиболее предпочтительным вариантом последовательности этапов строительства является начало возведения технологической площадки у правого берега с дальнейшим возведением элементов моста к левому берегу;
- все строительные работы целесообразно вести совместно с дноуглубительными, чтобы не спровоцировать значительные негативные русловые деформации при максимальном стеснении русла р. Ока и любых уровнях воды.

Таким образом, строительство нового моста на р. Ока с проведением комплекса дноуглубительных работ в период строительства окажет влияние как на поведение потока, так и на русловые деформации в характерных участках судового хода ниже створа мостового перехода. Однако предпочтительная в соответствии с расчетами и рекомендациями очередность возведения технологических сооружений, временной аспект выполнения работ, в также разбор вспомогательных строительных конструкций после возведения опор практически полностью восстановят естественный ход русловых процессов р. Ока с сохранением и даже частичным улучшением необходимых условий судоходства на ряде проблемных участков пути. Результаты работы предназначены для использования при проектировании и строительстве объекта.

### **Список литературы**

1. Гришанин, К.В. Водные пути / К.В. Гришанин, В.В. Дегтярев, В.М.Селезнев. – М.: Транспорт, 1986. – 400 с.
2. Руководство по изысканиям и анализу руслового процесса на затруднительных участках свободных рек / Главное управление водных путей и гидротехнических сооружений Минречфлота РСФСР. – М.: Транспорт, 1981. – 36 с.
3. Чернышов Ф.М. Пути повышения эффективности дноуглубительных и выправительных работ на судоходных реках.// Труды гидротехники, вып. XXVIII./ Ф.М. Чернышов – Новосибирск, 1968. – С. 122–142.
4. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках.// С. Петербург, 1992. – 312 с.
5. Отчет о научно-исследовательской работе. Переработать руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек (заключительный).// Л.: ЛИВТ, 1990. - 418 с.
6. Руководство по методам расчета планирования и оценки эффективности путевых работ на свободных реках.// М.: Транспорт, 1978. – 104 с.
7. Липатов И.В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений (Монография) - Н.Новгород, изд. ВГУВТ, 2006. - 106 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
9. Launder, В.Е., and Spalding, D.B. 1974. 'The numerical computation of turbulent flows', *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 3, pp. 269-289.

10. Rodi, W. 1979. 'Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale', Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows.
11. El Tahry, S.H. 1983. 'k-ε equation for compressible reciprocating engine flows', *AIAA J. Energy*, 7, No. 4, pp. 345–353.
12. Gutachten über die seitliche Einleitung von Überschuswasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nürnberg. Кастен Торенц, Липатов И.В. - Карлсруэ - Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) -Nr. 3.03.10043.00 – Dezember 2003.
13. Schlichting, H. "Boundary Layer Theory". 6th Edition, McGraw-Hill, New York. 1968.
14. H. Jin and R. I. Tanner, "Generation of Unstructured Tetrahedral Meshes by Advancing Front Technique", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 36, 1805-1823 (1993).
15. R. Lohner and P. Parikh, "Generation of Three Dimensional Unstructured Grids by the Advancing-Front Method", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 8, 1135-1149 (1988).
16. J. Peraire, J. Peiro, L. Formaggia, K. Morgan and O. C. Zienkiewicz, "Finite Element Euler Computations in Three Dimensions", *Int J. Numer. Methods Eng.*, 26, 2135-2159 (1988).
17. Воронина, Ю.Е. Методические подходы оценки заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС и их влияние на обеспечение судоходных глубин участка // Научные проблемы водного транспорта №72(3) – 2022 / Ю.Е.Воронина. – 2022, с.198

### References

1. Grishanin, K.V. Waterways / K.V. Grishanin, V.V. Degtyarev, V.M. Seleznev. - M.: Transport, 1986. - 400 p.
2. Guidance on surveys and analysis of the channel process in difficult sections of free rivers / Main Directorate of Waterways and Hydraulic Structures of the Minrichflot of the RSFSR. - M.: Transport, 1981. - 36 p.
3. Chernyshov F.M. Ways to improve the efficiency of dredging and straightening operations on navigable rivers.//Proceedings of hydraulic engineering, no. XXVIII./ F.M. Chernyshov - Novosibirsk, 1968. - S. 122-142.
4. Guidelines for improving navigation conditions on free rivers.// St. Petersburg, 1992. - 312 p.
5. Research report. To revise the guidelines for the design of a radical improvement in navigation conditions in difficult sections of free rivers (final). // L. : LIVT, 1990. - 418 p.
6. Guidelines on methods for calculating planning and evaluating the effectiveness of track work on free rivers.// M.: Transport, 1978. - 104 p.
7. Lipatov I.V. Hydrodynamics of river flows and its influence on the operational parameters of navigable hydraulic structures (Monograph) - N. Novgorod, ed. VGUVT, 2006. - 106 p.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
9. 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.
10. Rodi, W. 1979. 'Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale', Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows.
11. El Tahry, S.H. 1983. 'k-ε equation for compressible reciprocating engine flows', *AIAA J. Energy*, 7, No. 4, pp. 345–353.
12. Gutachten über die seitliche Einleitung von Überschuswasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nürnberg. Кастен Торенц, Липатов И.В. - Карлсруэ - Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) -Nr. 3.03.10043.00 – Dezember 2003.
13. Schlichting, H. "Boundary Layer Theory". 6th Edition, McGraw-Hill, New York. 1968.
14. H. Jin and R. I. Tanner, "Generation of Unstructured Tetrahedral Meshes by Advancing Front Technique", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 36, 1805-1823 (1993).
15. R. Lohner and P. Parikh, "Generation of Three Dimensional Unstructured Grids by the Advancing-Front Method", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 8, 1135-1149 (1988).
16. J. Peraire, J. Peiro, L. Formaggia, K. Morgan and O. C. Zienkiewicz, "Finite Element Euler Computations in Three Dimensions", *Int J. Numer. Methods Eng.*, 26, 2135-2159 (1988).

17. Voronina Yu.E. Methodological approaches to assessing the drift in the tailwaters of the Nizhny Novgorod HPP and their impact on ensuring the navigable depths of the site // Scientific problems of water transport No. 72 (3) - 2022 / Yu.E. Voronina. – 2022, p.198

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**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

**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

**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** 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

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.  
Received 27.06.2023; published online 20.12.2023.