

УДК 627.01

DOI: 10.37890/jwt.v82.567

Исследование изменения параметров сноса судна в створе мостового перехода

Е.М. Куприна

ORCID: 0009-0004-1476-8886

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

Аннотация. В данной статье приведено исследование возможности повышения безопасности на внутренних водных путях и уменьшению аварийности по типу «судно – мост». В связи с сложностью проводки судов в створе мостового перехода, необходимо выявить причины навала судов на опоры моста, для чего для чего выполняется анализ поведения потока и возможного сноса судна при прохождении в районе мостовых опор. Выявлены три расчетные области: I - на подходе к мосту; II - в створе мостового перехода; III – за мостом. По результатам исследования были получены формулы, позволяющие определить угол сноса судна в зависимости от его местоположения относительно мостового перехода. Для зоны II предлагается ввод нового коэффициента бокового сноса K_c , который позволит учесть действие продольных и циркуляционных течений, образующихся в области сужения русла у опор моста и приводящих к навалу судна на них. Предлагаемый коэффициент K_c был получен аналитически – статистическим методом, путем вычисления его через различные изменяющиеся параметры, зависящие от ряда факторов. Под изменяющимися факторами приняты русловые характеристики (уклон свободной поверхности воды I и шероховатость русла n) и геометрические характеристики мостовых опор (ширина опоры B). Факторная вариация позволяет получить зависимости приоритетного влияния параметров на результирующую K_c .

Ключевые слова. Проводка судов, мостовые сооружения, скоростные изменения, скорость ветра, предмостовой подпор, ширина опоры, коэффициент бокового сноса, уклон свободной поверхности, шероховатость русла

Investigation of changes in the parameters of ship demolition in the alignment of the bridge crossing

Ekaterina M.Kuprina

<https://orcid.org/0009-0004-1476-8886>

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article presents a study of the possibility of improving safety on inland waterways and reducing accidents of the "ship – bridge" type. Due to the complexity of the wiring of ships in the alignment of the bridge crossing, it is necessary to identify the causes of the bulk of ships on the bridge supports, for which an analysis of the flow behavior and possible demolition of the vessel when passing in the area of bridge supports is performed. Three calculation areas have been identified: I - on the approach to the bridge; II - in the alignment of the bridge crossing; III – behind the bridge. According to the results of the study, formulas were obtained that allow determining the angle of demolition of the vessel depending on its location relative to the bridge crossing. For zone II, it is proposed to introduce a new lateral drift coefficient K_c , which will take into account the effect of longitudinal and circulating currents formed in the narrowing area of the channel at the bridge supports and leading to the bulk of the vessel on them. The proposed K_c coefficient was obtained analytically and statistically by calculating it through various changing parameters depending on a number of factors. Channel characteristics (slope of the free water surface I and roughness of the channel n) and geometric characteristics of bridge supports

(width of the support B) are assumed to be changing factors. Factor variation allows us to obtain dependences of the priority influence of parameters on the resulting Kc.

Keywords. Ship wiring, bridge structures, speed changes, wind speed, bridge support, support width, lateral drift coefficient, slope of the free surface, roughness of the riverbed.

Введение

Проводка судов под мостами является сложной и ответственной задачей, требующей особого внимания и осторожности. Это связано с тем, что мостовые сооружения ограничивают судовую ход по ширине и высоте подмостового габарита. Кроме того, навигационные условия по проходу судов через створ моста усложняет неравномерностью потока. На подходе к мостовому переходу поток разделяется, а непосредственно за опорами образуются водоворотные области и свальные течения, что приводит к боковому смещению судна от намеченного курса. Отклонение от оси судового хода приводит к сносу судна в сторону опор с возможным последующим навалом на опоры или посадкой на мель при уходе за пределы судоходной полосы в пролете моста [5,6].

Так, по данным работы [14], с 1970 по 1974 гг на внутренних путях США было зарегистрировано 811 случаев навала судна на опорные конструкции с минимальными повреждениями последних. Общий ущерб от аварий составил 23млн долл. США.

Согласно общемировой статистике (Рис. 1), ежегодно происходит 1- 2 серьезные аварии по типу «судно-мост». В 30% случаев такие столкновения приводят к человеческим жертвам и полному разрушению мостов. Так, согласно работе [11], с 1960 по 1993гг произошло 29 крупных аварий, где в суммарной сложности погибло 321 человек. Данная статистика продолжает постоянно пополняться.

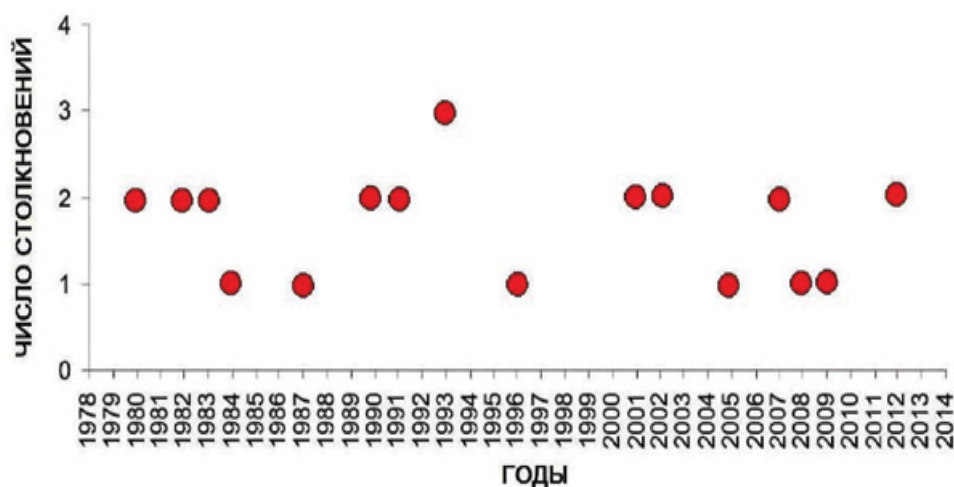


Рис. 1. Количество крупных аварий с 1978 по 2014гг по общемировой статистике

В связи возросшим темпом строительства мостовых переходом, в том числе на территориях субъектов Российской Федерации, растет и аварийность по типу «судно-мост». Таким образом, учитывая негативную тенденцию, возникает необходимость в повышении безопасности на водных путях.

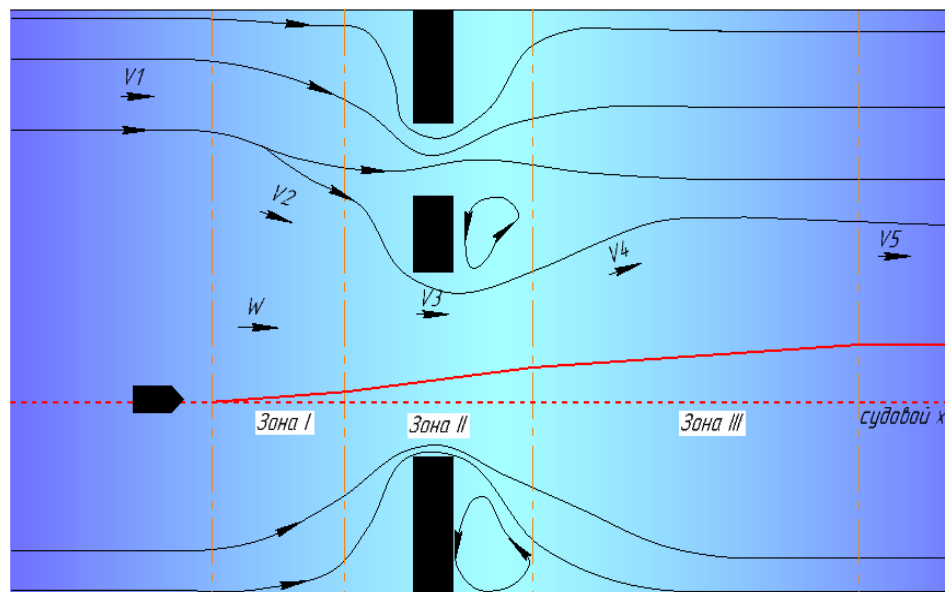
Определение сноса судна в створе мостового перехода

Для достижения безаварийности при проходе судов в створе мостового перехода и нахождения критериев по повышению безопасности необходимо провести анализ поведения сноса судна в створе моста.

В практике судовождения определение сноса судна на внутренних водных путях предполагает проведение небольшого векторного (графического) расчета с использованием известного вектора скорости и вектора течения. Однако, при прокладке маршрута через мостовой переход, такой расчет становится невозможным. Это связано с тем, что в створе мостового перехода поток воды неравномерен, что приводит к увеличению числа скоростных векторов до числа n .

По принципу работы опор в потоке [3,5,6,9], скоростные изменяя возможно разделить на три характерные области (рис.2).

А



Б

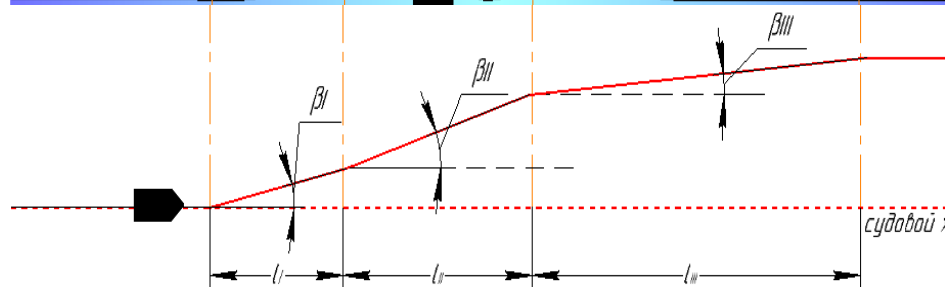


Рис. 2. Схема отклонения судна от судового хода при движении под мостовым переходом
А- структура потока под мостовым переходом; Б - отклонения судна от судового хода

Область зоны I располагается выше створа мостового перехода. Её протяженность принимается равной длине русловой части с начальным отклонением водного потока l_I (спокойное течение переходит к бурному, образуя начальный предмостовой подпор z_1) (рис. 3).

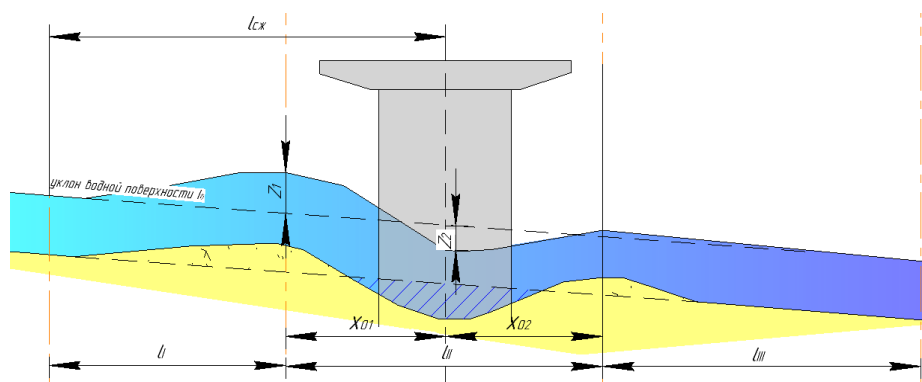


Рис. 3. Схема изменения подпора водной поверхности

Длина начального отклонения:

$$l_I = l_{сж} - X_{01} = l_{сж} - \left(\left(\frac{\beta_{сж}^{\frac{5}{3}} - 1}{z_2} \right) \frac{l_{сж}}{\beta_{сж} - 1} \right), \text{ м} \quad (1)$$

где: $\beta_{сж}$ - коэффициент стеснения русел,
 z_2 - подпор в зоне мостового перехода, м
 X_{01} , - первое критическое расстояние, м
 $l_{сж}$ - расстояние сжатия потока опорами моста, равняется расстоянию от оси отверстия моста до расчетного створа, расположенного в зоне с нулевым напором, м

Расстояние сжатия потока:

$$l_{сж} = \frac{B_0 - L_M}{1 + \frac{L_{МП}}{L_{БП}}}, \text{ м} \quad (2)$$

где: B_0 - ширина русла реки при расчетном уровне высокой воды (РУВВ), м;
 L_M - расчетная длина мостового перехода, м
 $L_{МП}, L_{БП}$ - протяженность меньшей и большей поймы в поперечном сечении, м

В области I происходит постепенное отклонение водного потока в сторону свободной части русла (см рис.2). Скорости течения начинают увеличиваться, а уклон свободной поверхности воды начинает уменьшаться, образуя начальный предмостовой подпор z_1 (см рис.3).

Как показывают натурные наблюдения и на моделях, приведенных в Кучинской гидравлической лаборатории Водгео [9], основная величина подпора располагается в непосредственной близости от моста, на первом критическом расстоянии X_{01} . Предмостовой напор возникает в следствии стеснения русла опорами моста и подходными насыпями на поймах. Таким образом, величина напора z_1 , критические расстояния X_{01} , а также длина зоны сжатия $l_{сж}$ находятся в прямой зависимости от степени стеснения русла $\beta_{сж}$ (формула 1).

Полученное выражение (1) будет действительно для случаев, когда длина мостовых опор не превышает восьми ширин ($L \leq 8B$). В случае удлинении опор до тринадцати кратной ширины, согласно опытам Наглера [3], полученные результаты

следует увеличить на 4%, так как при увеличении величины стеснения русла опорами моста по длине происходит рост кинетичности потока.

Снос судна (см рис. 2), при движении в зоне I можно описать следящим выражением.

$$\beta_I = \frac{W}{V_{срI}} \sin K\gamma_{V_I} \quad (3)$$

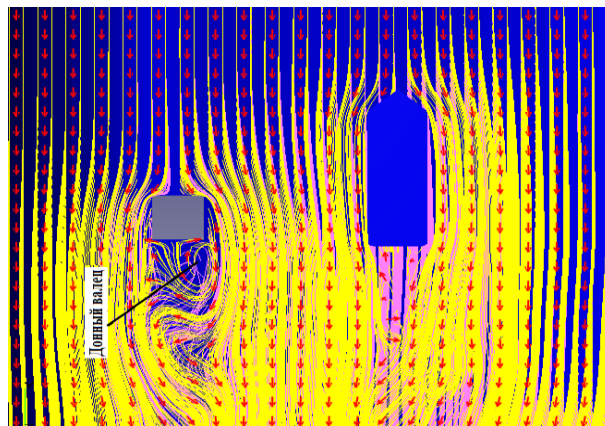
где: W – скорость ветра, м/с;
 $V_{срI}$ – средняя скорость течения для первой области, м/с;
 W – скорость ветра, м/с;
 $K\gamma_{V_I}$ – курсовой угол косины потока для первой области.

В данной области турбулентного режима не наблюдается и на снос судна оказывает влияние только направление и скорость ветра с течением. В случае совпадения угла косины потока с направлением судового хода, $\sin K\gamma_{V_I}$ следует принимать равным 1 [3].

С увеличением сжатия потока (область II), скорость течения и кинитичность потока начинают возрастать, а на движение судна начинают оказывать влияние продольные течения [2].

Продольные течения представляют собой поперечную циркуляцию воды, образуемую в результате обратного движения речного потока у опор мостов и насыпей. Образовавшийся у опоры донный валец, распространяется на боковую часть опоры, образуя контур зоны подсосывания (рис. 4).

А



Б

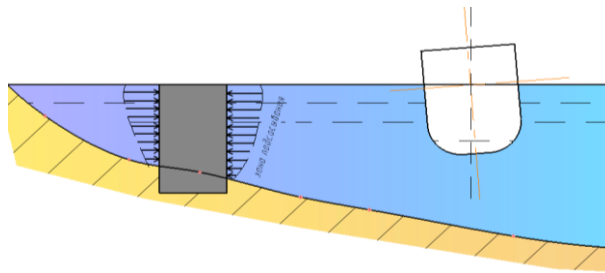


Рис. 4. Смещение судна при движении по II области
 А- модель распределения потока в программном комплексе FlowVision;
 Б – схема крена судна

Смещение судна в створе моста происходит под действием нарушения поля равенства давлений. Проходя через створ, судно оказывается в зоне повышенного сжатия с неравной пропускной способностью по левому и правому борту. Данная неравномерность является причиной возникновения перепадов давления, которые становятся источником поперечной силы, уводящее судно от оси судового хода.

Такое явление выражается через коэффициент бокового сноса Kc , полученный по результатам анализа перераспределения водного потока в створе мостового перехода и отношения скорости судна к потоку.

$$y_i = Kc \frac{Vc}{V_{срII}} \sin \alpha_{V_{II}}, \quad (4)$$

где: $V_{срII}$ – средняя скорость течения для второй области, м/с;
 V_c – скорость судна, м/с;
 Kc – коэффициент бокового сноса
 $\alpha_{V_{II}}$ – курсовой угол косины потока для второй области.

При этом протяжённость области, для которой будет верно выражение может определяться как сумма первых и вторых критических расстояний (см.рис. 3).

$$l_{II} = X_{01} + X_{02}, \text{ м} \quad (5)$$

Под критическими расстояниями понимается протяженность от оси моста до вертикали наивысшей части подпора (X_{01}) и от оси моста до зоны растекания (X_{02}).

$$X_{01} = X_{02} = \left(\frac{\beta_{сж}^{\frac{5}{3}} - 1}{\frac{z_2}{\beta_{сж}} - 1} \right) l_{сж}, \quad (6)$$

Тогда угол сноса в области II можно определить как сумму бокового сноса неравенства давлений y_i и сноса под действием течения и ветра β_{II} в области:

$$\beta_{II} = \sin \alpha_{V_{II}} \left(Kc \frac{Vc}{V_{срII}} + \frac{W}{V_{срII}} \right), \quad (7)$$

Область III располагается ниже по течению от мостового перехода (см. рис 3). Ее протяженность равняется длине растекания потока $l_{III} = l_p = 2l_{сж}$.

Под длиной растекания понимается протяженность участка от зоны возмущения потока l_{II} до зоны с полным восстановлением естественных условий реки. По гидравлическому режиму область III обратно пропорциональна области I. Как и в случае с областью I, на участке III нет ярко выраженных турбулентных зон, а на снос судна оказывает влияние только направление и скорость ветра с течением. При отдалении от створа мостового перехода скорость начинает уменьшаться, а искажение водной поверхности практически исчезает.

Таким образом, угол сноса β_{III} можно определить по следующему выражению:

$$\beta_{III} = \frac{W}{V_{срIII}} \sin \alpha_{V_{III}} \quad (8)$$

Исследование изменения коэффициента бокового сноса

Под коэффициентом бокового сноса Kc понимается процесс изменение поведения угла перераспределения сжатого потока в створе мостового перехода. Его поведение зависит от многочисленных факторов, таких как: средний диаметр грунта d (в пределах рассматриваемой области), уклон свободной поверхности воды I и ширина мостовых опор B .

Поведение потока в створе мостового перехода хорошо прослеживается при сравнении естественного состояния русла с состоянием русла в первые годы после возведения мостового перехода. В начале эксплуатационного периода местный размыв и перераспределение водного потока в зоне установки мостовых опор, происходит сильней и отчетливей (рис 5).

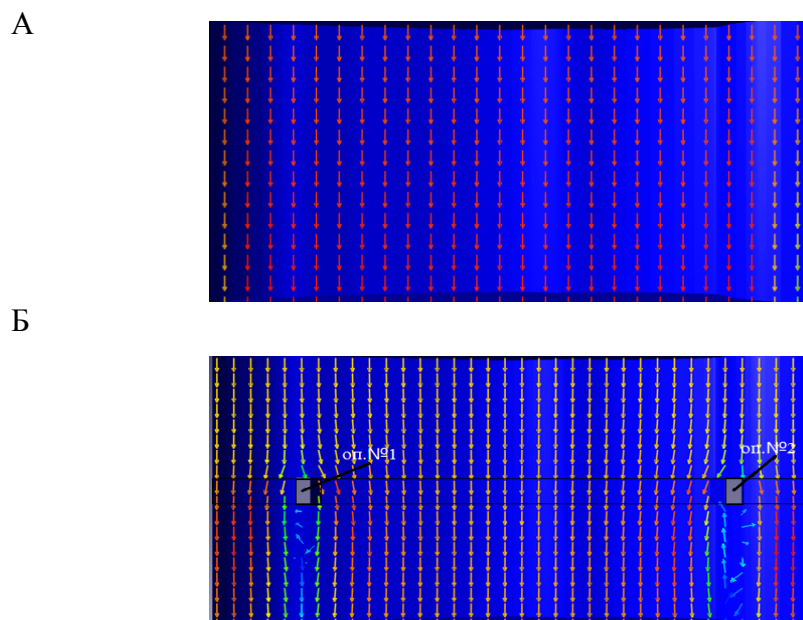


Рис. 5. Поведение потока в створе мостового перехода в II зоне.
А - при естественном состоянии русла; Б - после возведения мостового перехода

На основании анализа литературы [1,3,4,7,10,12,13] и полученных результатов распределения потока в створе мостового перехода (рис 4,5), для поиска коэффициента бокового сноса K_c предполагается следующая теория. Теория гласит, что после возведения мостового перехода в русле реки, гидравлические и гидростатические характеристики (скорость V_{cp} , удельный расход q , давление воды P и т.д), действующие возле опор моста, изменяться с течением времени, но остаются неизменными по своему направлению. Таким образом, коэффициент K_c возможно определить аналитически, путем анализа перераспределения (смещения) потока в первые годы после постройки мостового перехода при различных изменяющихся факторах.

Результаты расчета коэффициентов бокового сноса от геометрических характеристик опор моста представлены в таблице 1, а график зависимости полученных величин K_c представлены на рис 6.

Таблица 1

Результаты коэффициента бокового сноса от ширины мостовых опор

Ширина опоры В,м	Коэффициента бокового сноса
0 (до установки)	0
2	0,027304 - 0,027581
4	0,049833689 - 0,050482835
6	0,077823697 - 0,077943099
8	0,10361143 - 0,103869166
10	0,132895604 - 0,133046047

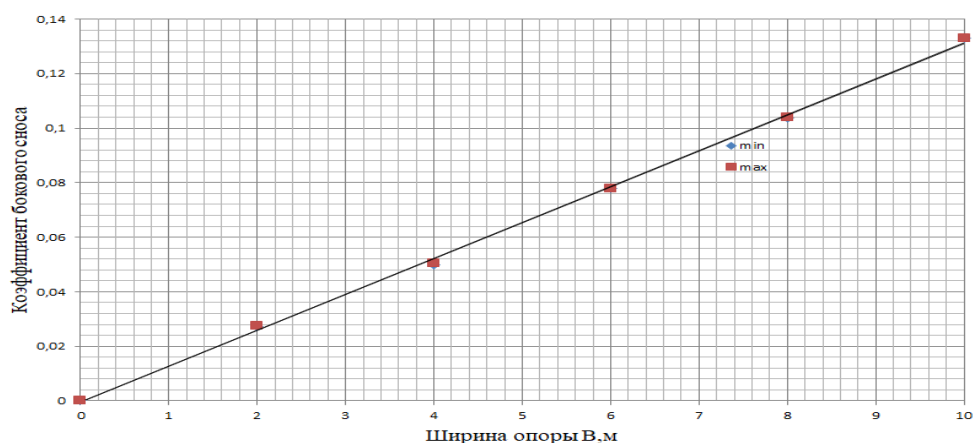


Рис. 6. График зависимости коэффициента бокового сноса от ширины мостовых опор

Результаты расчета показали, что коэффициент бокового сноса K_c напрямую зависит от ширины опоры B и при увеличении ширины опоры, коэффициент бокового сноса возрастает практически в 1,5 раза. Такое явление объясняется тем, что при увеличении параметра B , происходит уменьшение свободной части русла, что приводит к повышению напора Z в створе мостового перехода.

Согласно уравнению Бернули (формула 9), скорость потока V и давление P прямо пропорциональны напору Z . Следовательно, с ростом геометрического параметра ширины опоры их значения также будут возрастать. А неравенство зоны давления будет оказывать большее влияние на крен судна (рис 2, 4) [9].

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{aV_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{aV_2^2}{2g} + h_w, \quad (9)$$

где z_1 и z_2 - геометрический напор, м;
 $\frac{P}{\gamma}$ - пьезометрический напор, м;
 $\frac{aV^2}{2g}$ - динамический (статический напор), м;
 h_w - потери напора, м;

Для анализа влияния факторов B , I , n на результирующий показатель коэффициента бокового сноса K_c построены графики изменения бокового сноса от них (рис. 7). Графики зависимости представляют собой набор полиномиальных линий тренда с достоверностью аппроксимации для всех случаев $R^2 = 0.9973$. Данное решение было принято для устранения малых неточностей, возникших вследствие графического определения площади смещения водного потока после установки мостовых опор.

Согласно полученным результатам уклон свободной поверхности воды I и шероховатость русла n являются вторичными факторами.

Как в случае с геометрическим параметром ширины мостовых опор, указанные параметры I и n находятся в прямой связи с результирующим показателем K_c . Однако, уклон свободной поверхности и шероховатость русла в целом не оказывают достаточно сильного влияния на получаемый результат по сравнению с фактором ширины опоры B .

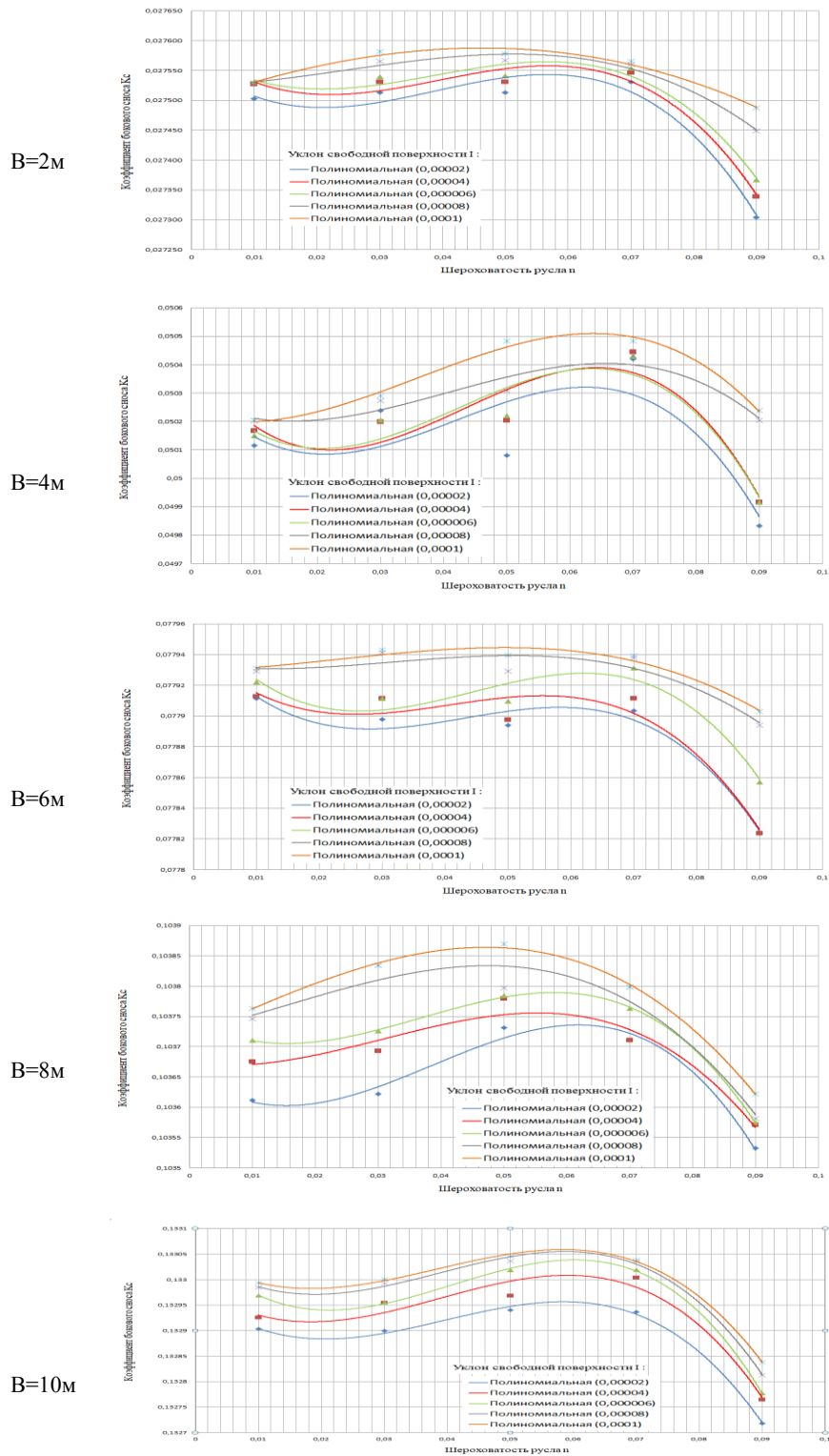


Рис.7. Графики изменения бокового сноса от факторов I и n

Полученные результаты показывают, что с ростом уклона водной поверхности I , значения коэффициента бокового сноса K_c возрастают, а с повышением шероховатости русла - убывают. Данный результат может быть объяснен через уравнения Шези –Манинга (формула 10) и Бернулли (формула 9) .

$$V = C\sqrt{T_{cp}I} \quad (10)$$

где $C = \frac{T_{cp}^{1/6}}{n}$ – коэффициент Шези;
 T_{cp} - средняя глубина на участке, м;
 I - уклон свободной поверхности, м

Согласно уравнению Шези – Манинга, скорость течения V прямо пропорциональна уклону свободной поверхности I , и обратно пропорциональна шероховатости русла n . Таким образом, при увеличении уклона свободной поверхности скорость, и динамический напор будут расти (формула Бернулли).

Заключение

Приведенный в работе анализ изменения параметров сноса судна в створе мостового перехода показал, что снос судна напрямую зависит от его местоположения и может меняться в зависимости от области, по которой проходит судно в конкретный момент времени. При движении по судовому ходу самым опасным участком является область II, где наблюдаются продольные и циркуляционные течения, приводящие к навалу судна на опору моста. В данной статье их влияние выражается через коэффициент бокового сноса K_c , полученный аналитически – статистическим методом исследования поведения потока в створе мостового перехода.

В ходе исследования параметра K_c было выявлено следующее.

1. Главным фактором, влияющий на результирующий показатель, является ширина опоры B . Так при увеличении параметра B , коэффициент K_c возрастает практически в 1,5 раза.
2. При поиске коэффициента бокового сноса уклон свободной поверхности I и шероховатость русла n являются вторичными факторами. Данные параметры находятся в прямой связи с результирующим показателем K_c . Однако оба параметра (I и n) не оказывают достаточно сильного влияния на полученные результаты, в сравнении с фактором B .

Список литературы

1. Андреев О.В. Проектирование мостовых переходов - до в. М.: Транспорт, 1980.
2. Вальгер С.А., Федорова Н.Н., Федоров. А.В. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением.// Теплофизика и аэромеханика, 2015, том 22, No 1
3. Гидравлические исследования инженерных сооружений - Сборник трудов. Стройиздат – 1947.
4. Кнороз В .С . Неразмывающие (предельные) скорости разнозернистых по крупности материалов. - Изв.ВПИИГ, т.71, 1962.
5. Куприна, Е. М. (2024). Исследование влияния направления водного потока и конфигураций опор моста на местный размыв дна реки. *Научные проблемы водного транспорта*, (79), 227-237. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.484>
6. Куприна Е.М., Воронина Ю.Е. - Влияние конфигураций опор на возникновение неправильных течений Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022.
7. Матюгин М.А., Решетников М.А. Определение положения кривой свободной поверхности на казанцевском перекатном участке реки белой .//Транспорт.

- Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/2023/5_7.pdf
8. Михалев М.А., Алибеков А.К.-Выбор оптимального типа опоры и оценка величины местного размыва//Природ обустройство -2011 -1997-6011
 9. Mostkov M.A Гидравлический справочник / Под редакцией Латышенкова А.М – Москва 1954г
В.В. Кулебякин, В.К. Недбальский. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. 3. – 56 с
 10. Журавлев М.М. Местный размыв у опор мостов. М. : Транспорт, 1984.
 11. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05SATS118
 12. Пичугов Г.С. Влияние формы фундамента мосто - вых опор на местный размыв. - Труды Гипродорнии, вып.31 .М.,1980.
 13. Ярославцев И,А. Расчет местного размыва у мостовых опор. ЦПИИС. Сообщение No 80. М., 1956.
 14. Knott M.A. Vessel collision design codes and experience in the United States // Proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis, Copenhagen (Denmark), 10-13 May 1998. – Rotterdam (Brookfield): A.A. Balkema, 1998. – P. 75-84.

References

1. Andreev O.V. Designing bridge crossings - to V. M. : Transport, 1980.
2. Valger S.A., Fedorova N.N., Fedorov. A.V. The structure of a turbulent separation flow in the vicinity of a prism mounted on a plate with a brief summary.// Physics and Astronomy, 2015, volume 22, No. 1
3. Hydraulic research of engineering structures - Collection of works. Stroyizdat – 1947.
4. Knoroz V.C . Non-eroding (limiting) speeds of materials of different grain sizes. - Izv.VPIG, vol. 71, 1962.
5. Kuprina, E. M. (2024). Investigation of the influence of the direction of the water flow and the configurations of the bridge supports on the local erosion of the river bottom. Scientific Problems of water transport, (79), 227-237. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.484>
6. Kuprina E.M., Voronina Y.E. - The influence of support configurations on the occurrence of irregular currents Materials of the international scientific and practical forum. FGBOU VO "VGUVT". – 2022.
7. Matyugin M.A., Reshetnikov M.A. Determination of the position of the free surface curve on the Kazantsev rolling section of the Belaya river.//Transport. Horizons of development. 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum. FGBOU VO "VGUVT". – 2023. – URL: http://вф-река-море .RF/2023/5_7.pdf
8. Mikhalev M.A., Alibekov A.K.-Choosing the optimal type of support and estimating the magnitude of local erosion//Nature improvement -2011 -1997-6011
9. Mostkov M.A. Hydraulic handbook / Edited by Latyshenkov A.M. – Moscow 1954
10. Zhuravlev M.M. Local erosion at the bridge supports. М. : Transport, 1984
11. Ovchinnikov I.I., Maistrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 4 // Online magazine "Territorial Communities", 2018 No.1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (the step is free). Cover from the screen. Russian, English DOI: 10.15862/05SATS118
12. Pichugov G.S. Influence of the shape of the foundation of bridge supports on local erosion. - Proceedings of the Giprodomnia, issue 31 .М., 1980.
13. Yaroslavtsev And,A. Calculation of local erosion at bridge supports. CPIIS. Collection No. 80. Moscow, 1956.
14. Knott M.A. Vessel collision design codes and experience in the United States // Proceedings of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis, Copenhagen (Denmark), 10-13 May 1998. – Rotterdam (Brookfield): A.A. Balkema, 1998. – P. 75-84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куприна Екатерина Максимовна, аспирант кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: k_kuprina98@mail.ru

Ekaterina M. Kuprina, Postgraduate student of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, Russia, e-mail: k_kuprina98@mail.ru

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