Гидравлические исследования донных регуляционных устройств

А.Г. Ходзинская, В.Л. Зоммер

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварии на подводных трубопроводных переходах приводят к тяжелым последствиям для экологии. Выбор места трубопроводного перехода, сделанный без учета общей динамики руслового процесса, применение неправильной технологии строительства подводных траншей и укладки трубопроводов часто приводят к их разрушениям, которые возникают вследствие размывов и провисаний труб. Существующие методы защиты трубопровода с помощью отсыпки грунта или щебня, заделки оголений мешками с песком, укрепления гибкими бетонными матами и другими материалами не всегда эффективны, и, как правило, дороги.

Материалы и методы. Исследован метод защиты от размыва магистрального трубопровода при помощи сквозных донных устройств различных видов для определения их эффективности. Скорости потока измерялись за донными преградами на оси потока в нескольких точках по глубине с помощью прибора микрокомпьютерный расходомер-скоростемер (МКРС). Измерительные створы находились на расстояниях 1–10 глубин потока от донных преград. Придонные скорости на высоте выступов шероховатости были определены согласно зависимостям, предложенным В.Н. Гончаровым.

Результаты. Приведены результаты лабораторных гидравлических исследований обтекания в лотке моделей четырех видов донных преград: сплошная плоская стенка, плоская стенка с прорезями, объемная круглая в сечении преграда из жестко закрепленных синтетических струн и объемная мягкая конструкция. Модели конструкций вызывали перестройку эпюр скорости и уменьшение придонных скоростей, однако для отложения наносов за преградами пригодны только сквозные устройства, пропускающие через себя наносы. При снижении придонных скоростей до значений меньше размывающих наносы будут откладываться за преградами на некотором относительном расстоянии.

Выводы. Изученные модели сквозных донных конструкций эффективны для уменьшения придонной скорости и отложения за ними на некотором расстоянии наносов. Наиболее эффективной можно признать «объемную» конструкцию, так как она дает наибольшее снижение относительных скоростей на определенном относительном расстоянии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подводные трубопроводы, защита от размыва, регуляционные сооружения, сквозная донная преграда, эпюры скорости, средние и придонные скорости, модели устройств

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ходзинская А.Г., Зоммер В.Л. Гидравлические исследования донных регуляционных устройств // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 464–472. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.464-472

Hydraulic studies of bottom regulatory devices

Anna G. Khodzinskaya, Victor L. Zommer

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Accidents at underwater pipeline crossings lead to serious environmental consequences. The choice of the location of the pipeline junction made without accounting the general dynamics of the channel process, use of improper construction technology of underwater trenches and pipeline laying often result in their destruction, which are caused by erosion and pipe sagging. Existing methods for protecting the pipeline by soil or crushed stone filling, exposure embedding with sandbags, strengthening with flexible concrete mats and other materials are not always effective and, as a rule, are expensive.

Materials and methods. The article considers a method of protection of the main pipeline against erosion by means of through bottom devices of various types to determine their efficiency. Velocities of the flow are measured behind the bottom obstacles at the flow axis at several points in depth using the microcomputer flowmeter/velocimeter. The measuring sections are located at distances of 1 to 10 of flow depths from the bottom obstacles. The near-bottom velocities at the height of the roughness protrusions are calculated according to the dependences suggested by V.N. Goncharov.

Results. The article shows results of laboratory hydraulic investigations of a tray flow around four types of bottom obstacle models: solid flat wall, slotted flat wall, volumetric round-section obstacle of fixed synthetic strings and volumetric soft structure. All the studied design models cause a rearrangement of the velocity diagrams and a decrease of near-bottom velocities. However, only through-passing structures are suitable for sediment deposition behind the barriers. If the bottom velocities are reduced to values less than sediment-washing ones, sediments will be deposited behind the barriers at a certain relative distance determined in the work.

Conclusions. The investigated models of through bottom structures showed themselves to be quite effective in reducing the near-bottom speed and depositing sediments at a certain distance behind them. The most effective is the “volumetric” construction, since it gives the greatest reduction in relative velocities at a certain relative distance.

KEYWORDS: underwater pipelines, erosion protection, control structures, through bottom barrier, speed plots, average and near-bottom speeds, device models

FOR CITATION: Khodzinskaya A.G., Zommer V.L. Hydraulic studies of bottom regulatory devices. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):464-472. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.464-472 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Трассы магистральных трубопроводов пересекают множество рек, где подводные трубопроводы подвергаются размывам и провисаниям, вследствие чего возникают их колебания и разрушения из-за недопустимо больших изгибающих моментов. Аварии на подводных частях трубопроводов возникают значительно чаще, чем на надводных, и могут вызывать тяжелые последствия для экологии.

Методы проектирования и строительства подводных трубопроводов, причины аварий на них, случаи использования неправильной технологии строительства подводных траншей рассмотрены в работах [1–8].

Размывы трубопроводов образуются в связи с изменениями в течение года водности рек, интенсивности и направленности русловых процессов, которые следует учитывать при выборе места подводного перехода [9, 10].

Вопросы безопасности и причины аварий проанализированы в трудах [11–14].

Традиционные и современные методы защиты трубопроводов от размывов описаны в работах [15–18]. Выделяют три основные группы методов:

- к первой группе относятся такие методы экстренной защиты трубопроводов от возможных аварий, как: намыв песка земснарядами, отсыпка щебня, заделка провисов и оголений мешками с песчаной смесью; сюда же можно отнести дополнительное заглубление трубопровода методом подсадки, что на практике дает временный защитный эффект на 5–7 лет;
- ко второй группе относится крепление различными видами покрытий, например гибкими матами из бетона и синтетических материалов; дополнительное заглубление трубопровода методом подсадки, что на практике дает временный защитный эффект на 5–7 лет;
- к третьей группе относятся методы защиты трубопроводов с помощью регуляционных устройств: донных порогов, сквозных и глухих шпор, полузапруд, наносодерживающих сооружений, продольных и поперечных дамб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Защита по первому методу не всегда дает требуемый эффект, так как после отсыпки строительного материала, сужается русло реки, что приводит к увеличению скоростей потока и продолжению размывов на соседних участках трубопровода. Только устройство грунтовых, каменных и щебеночных отсыпок на большой площади или применение методов укрепления грунта может изменить характеристики руслового процесса и способствовать нормальной эксплуатации трубопроводов.

Второй метод защиты трубопроводов от размыва, в котором используются гибкие защитные покрытия, тоже не лишен недостатков, не говоря уже о высокой стоимости таких конструкций. В частности, в работе [19] были исследованы гидравлические характеристики потока при обтекании универсальных гибких защитных бетонных матов (УГЗБМ). Результаты проведенных исследований показывают, что при обтекании гибких бетонных матов за ними возможен размыв русла, так как в конце креплений в части потока находящегося в донных зазорах скорости возрастают в 4–5 раз по сравнению со скоростями на входе в донные зазоры. К сожалению, эксперименты были проведены только на жесткой неразрываемой модели.

К безаварийным технологиям, обеспечивающим надежную и эффективную эксплуатацию трубопроводов в течение длительного времени относятся методы защиты трубопроводов с помощью регуляционных сооружений [20].

В работе [21] для защиты подводных участков трубопроводов рекомендованы сквозные завесы, состоящие из секций, каждая из которых включает в себя расположенные по ее краям балластные карманы, между ними имеется решетка, выполненная из деревянных или металлических пластин, заключенных в раму. Недостатками такой завесы являются значительный расход материалов (металла, бетона) из-за значительного веса железобетонного основания каждой секции.

Для предложенной сквозной вертикальной донной преграды [21], расположенной перед защи-

щаемым объектом, было показано, что придонная скорость уменьшается на расстоянии $2-10 h_c$, где h_c — высота стенки. Минимум придонной скорости, которая уменьшалась до 70 %, достигался на расстоянии $5-6 h_c$.

Так как трубопроводные переходы нередко проходят в глухих малонаселенных территориях, а берега рек часто труднодоступны, для защиты трубопроводов от размывов еще с середины прошлого века использовались ветвистые заграждения, которые представляют собой свежесрубленные деревья или кустарники, закрепляемые на дне для регулирования хода руслового процесса. Такие завесы используются и как продольные, и как поперечные регуляционные сооружения, как правило, на малых реках [20]. Это разновидность регуляционных сквозных устройств, которые пропускают через себя и осаждают донные и взвешенные наносы. Главным недостатком таких сооружений является их относительная недолговечность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы являются гидравлические исследования моделей донных регуля-

ционных устройств, конструкции которых похожи на предлагаемые в труде [21] и одновременно на ветвистые завесы, но из неподдающихся гниению материалов. Данные конструкции значительно дешевле, например, бетонных и могут быть вполне эффективны.

Гидравлические исследования по обтеканию моделей преград различных конструкций были проведены в гидравлической лаборатории НИУ МГСУ на научно-исследовательском лотке с поперечными размерами 311×450 мм и длиной 15,5 м [22].

В середине лотка на рабочем участке с помощью специальной вставки, жестко присоединяемой к стеклянным стенкам лотка, устанавливались и закреплялись различные преграды (рис. 1, 2).

Модели донных преград были следующих видов: I (сплошная) — плоская стенка высотой 6 см; II (с прорезями) — плоская стенка с прорезями через 3 мм также высотой 6 см; III (объемная) — в сечении круглая преграда диаметром 5,5 см из жестко закрепленных синтетических струн (ершиков); IV (мягкая) — объемная преграда из мягкой фольги, в потоке имевшая высоту около 5 см (рис. 3). Указанные виды моделей выбраны по следующим соображениям: сплошная стенка — крайний случай для

Рис. 1. Схема установки в лотке: h — глубина потока перед преградой; $h_{п}$ — высота преграды; z — перепад уровней воды перед и за преградой

Fig. 1. Layout of installation in tray: h — flow depth before obstacle; h_{ob} — obstacle height; z — differential of water levels before and after obstacle

Рис. 2. Преграда «сплошная стенка» в гидравлическом лотке

Fig. 2. “Solid wall” obstacle in hydraulic tray

Рис. 3. Преграды: *a* — «стенка с прорезями»; *b* — сечение преграды «объемная»; *c* — сечение преграды «мягкая» (движение воды справа налево); размеры в см

Fig. 3. Obstacles: *a* — “slotted wall”; *b* — “round” obstacle section; *c* — “soft” obstacle section. Water flows right to left, dimensions in cm

сравнения с моделями с прорезями; стенка с прорезями — аналог модели, предложенной в работе [21]; модель с синтетическими струнами — аналог ветвистой модели, но из синтетических прочных материалов; и мягкая конструкция — модель донной растительности.

Скорости измерялись за преградами в центре потока в 5–6 точках по глубине в среднем через 2 см, а также на поверхности (погружение оси вертушки 10 мм) и как можно ближе к дну (на расстоянии 16 мм) с помощью прибора микрокомпьютерный расходомер-скоростемер (МКРС) с точностью 2 %.

В первых опытах створы измерений находились на расстояниях 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 см от преграды. В последующих опытах число створов было сокращено.

Ниже приводится табл. 1, в которой указаны характеристики потока и моделей в экспериментах.

Величина подпора у сооружения определяется по формуле:

$$z = \zeta \frac{V_o^2}{2g}, \quad (1)$$

откуда можно найти ζ — коэффициент сопротивления конструкции.

«Застройка шпоры» — это отношение площади живого сечения, занимаемого стержнями (или другими конструкциями в нашем случае) F_1 , к площади живого сечения, перекрываемого конструкцией F :

$$p = \frac{F_1}{F}. \quad (2)$$

Табличные значения p_m оказались достаточно близкими значениям, предлагаемым в работе [20], для размываемых русел.

На рис. 4 приводятся эпюры скоростей в различных створах в опыте 2.

На рис. 5 показан график зависимостей отношения средней скорости на вертикали к измеренному значению придонной скорости на вертикали от относительной длины L/h_c (L — расстояние от

Табл. 1. Характеристики потока и моделей в экспериментах

№ п/п / Item No.	Название преграды / Obstacle name	Q , м ³ /час / m ³ /h	I , %	h_n , см / cm	h , см / cm	V , м/с / m/s	z , мм / mm	ζ	p	p_t
I	сплошная / solid	31,2	0,1	6,0	15,2	0,166	9,6	5,9	0,56	0,63
II	с прорезями / slotted	19,9	0,1	6,0	10,4	0,177	11,8	8,6	0,62	0,68
III	объемная / round	31,2	0,1	5,5	10,3	0,163	10,9	3,3	0,53	0,45
IV	мягкая / soft	31,2	0,1	5,05	10,6	0,163	9,2	3,1	0,48	0,42

Примечание: Q — расход потока; I — уклон; h_n — высота преграды; h — глубина воды в створе преграды; V — средняя скорость перед преградой; z — величина подпора — разность отметок свободной поверхности перед преградой на расстоянии 20 см и за ней при самой низкой отметке; ζ — коэффициент сопротивления конструкции; p — фактическое значение застройки шпоры; p_m — табличное значение, определяемое в зависимости от ζ по [20].

Note: Q — flow rate; I — slope; h_{ob} — obstacle height; h — water depth before obstacle; V — average velocity before obstacle; z — backwater value, i.e. differential of water level 20 cm before obstacle and lowest water level after obstacle; ζ — structure resistance coefficient; p — actual value of spur dike; p_t — table value depending on ζ as per [20].

Рис. 4. Эпюры скоростей в опыте «стенка с прорезями». На свободной поверхности — значения глубины в мм; ниже — значения средних скоростей на вертикалях — V_{cp} , мм/с; а под линией дна — значения средних скоростей, определенных ниже уровня стенки — V_{np} , мм/с

Fig. 4. Velocity plots for “slotted” obstacle model. Upper values show depth, mm; values above bottom line show average velocities at vertical sections V_{av} , mm/s; values under bottom line show average velocities below wall level V_{sl} , mm/s

конструкции до промерной вертикали; h_c — высота стенки (конструкции)).

На рис. 5 видно, что для сквозных конструкций относительная скорость в целом убывает в зависимости от относительного расстояния L/h_c , а для сплошной стенки относительная скорость сначала возрастает от минимальной относительной скорости $V/V_d = 2,2$ (V и V_d — средняя и донная скорости на вертикали на относительном расстоянии $L/h_c = 3,3$ до относительного расстояния 6,6, а затем так же, как и для других устройств, убывает, стабилизируясь на расстоянии около 10–14 L/h_c в зависимости от вида устройства.

На рис. 5 заметно, что наибольшее воздействие на поток оказывает сплошная стенка — эпюры скорости у дна сильно искажаются. За сплошной

донной преградой образуется закрученное вихревое движение с повышенной турбулентностью на расстоянии приблизительно до $8 L/h_c$. Кроме того, через сплошную стенку не будут двигаться наносы, поэтому ее не целесообразно использовать в данном случае. При расположении под углом к потоку ее используют, например, для отведения наносов к берегам.

Следует отметить, что другие виды конструкций также искажают эпюру скорости и приводят к уменьшению ее придонных значений. Даже так называемая «мягкая» конструкция очень заметно перестраивает эпюру скорости.

Определение значений придонных скоростей на высоте выступов шероховатости было выполнено согласно В.Н. Гончарову [23]. Уменьшение ско-

Рис. 5. Зависимость относительных скоростей V/V_d от относительного расстояния L/h

Fig. 5. Dependence of relative velocities V/V_b on relative distance L/h_w

ростей потока в придонной области происходило от значений, измеренных на расстоянии 16 мм от дна до значений на высоте выступов шероховатости.

Определим расчетную высоту выступов шероховатости Δ_r по формуле:

$$\frac{H}{\Delta_r} = \left(\frac{Re + 800}{41} \right)^{0,92} = \left(\frac{20\,000 + 800}{41} \right)^{0,92}, \quad (3)$$

где Re — число Рейнольдса для лабораторного потока при скорости $V = 0,20$ м/с и глубине потока $h = 10$ см, $Re = 20\,000$; высота расчетных выступов шероховатости — $\Delta_r = 0,32$ мм.

Скорость на высоте выступов шероховатости U_Δ определяем по формуле:

$$\frac{U_\Delta}{U_o} = \left(\frac{y}{H} \right)^m. \quad (4)$$

Считаем, что на глубине 16 мм скорость известна и равна U_o .

$$m = \frac{0,43}{\lg \frac{6,15H}{\Delta}} = \frac{0,43}{\lg \frac{6,15 \cdot 16}{0,32}} = 0,17.$$

Получаем

$$\frac{U_\Delta}{U_i} = \left(\frac{y}{H} \right)^m = \left(\frac{0,32}{16} \right)^{0,17} = 0,51. \quad (5)$$

Согласно В.Н. Гончарову скорость на высоте выступов шероховатости выразим также через среднюю скорость на вертикали:

$$U_\Delta = \frac{1,25U}{\lg \frac{6,15H}{\Delta}}, \quad (6)$$

где подставим например $U = 28,59$ см/с скорость на вертикали с глубиной 9,8 см (рис. 4). Подста-

вив в формулу (6) значения, получим скорость $U_\Delta = 10$ см/с, что составляет $0,35U$.

Таким образом, скорости на высоте выступов шероховатости в экспериментах на моделях будут примерно в два раза меньше скоростей на высоте 16 мм, в 0,35 раз меньше, чем скорость на вертикали и меньше допускаемых для всех типов песков согласно исследованию¹. Здесь должно наблюдаться заиливание на размываемой модели русла.

Если принять масштаб моделирования, исходя из использованного в работе [21] соотношения высоты преграды и диаметра трубопровода равного 4, вертикальный масштаб примем равным 40. При моделировании по числу F_r соотношение скоростей на модели и в натуре будет $\sqrt{40} = 6,32$.

Уменьшение скоростей потока в придонной области (по значениям, измеренным на расстоянии 16 мм от дна) в сечениях, находящихся на расстояниях меньше 60 см, по сравнению с сечением, находящимся на расстоянии 60 см, зависит от вида преграды. Для оценки степени снижения донной скорости на вертикалях был также построен график зависимости отношения придонной скорости на вертикалях, расположенных от стенки на расстояниях до 60 см к донной скорости на расстоянии 60 см $\left(\frac{V_d}{V_{d(60)}} \right)$ (рис. 6). Снижение придонной скорости было самым большим сразу за препятствием и достигало значения 70 % для преграды с прорезями и объемной, и 60 % для «мягкой».

Наибольшее снижение относительной скорости наблюдалось для всех устройств на относительном расстоянии от преграды $2-8 L/h_c$.

¹ ВТР-П-25-80. Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов : ведомственные строительные нормы. М. : Минводхоз СССР, 1981. 58 с.

Рис. 6. Зависимость относительных скоростей $V_d/V_{d(60)}$ от относительного расстояния L/h_c

Fig. 6. Dependence of relative velocities V/V_b on relative distance L/h_w

Для сплошной стенки зависимость $V_d/V_{d(60)} = f(L/h_c)$ на относительном расстоянии 2–6,6 L/h_c качественно отличается: только на расстоянии 6,6 h_c от преграды происходит снижение донной скорости. Такая легкая преграда, как «мягкая» тоже дает заметное снижение придонной скорости (до 60 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. За всеми исследованными моделями сквозных конструкций было достигнуто снижение ско-

рости на вертикали на относительном расстоянии от 2 до 8 L/h_c на 60 % для «мягкой» и около 70 % для стенки с прорезями и объемной. Причем объемная преграда дает снижение на 60–70 % на расстоянии 2–6 L/h_c , а стенка с прорезями на этом расстоянии дает снижение на 40–70 %/ h_c , т.е. более эффективна объемная преграда.

2. Для уточнения количественных характеристик процесса требуются лабораторные исследования других конструкций сквозных устройств и исследования на размываемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л., Шадрин О.Б. Подводные трубопроводы. М. : Недра, 1979. 415 с.
2. Иванов В.А., Кузьмин С.В., Крамской В.Ф., Торопов С.Ю. Сооружение подводных переходов магистральных трубопроводов : курс лекций. Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. 217 с.
3. Дудников Ю.В. Научные основы проектирования и обеспечения безопасности сложных участков линейной части магистральных нефтепроводов : дис. ... д-ра. техн. наук. Уфа, 2012. 366 с.
4. Кукушкин Б.М. Строительство подводных трубопроводов. М. : Недра, 1982. 176 с.
5. Никифоров В.А. Анализ основных методов строительства подводных переходов магистральных трубопроводов // Научное обозрение: теория и практика. 2012. № 3. С. 10–17.
6. Awoshiku K., Tokano M. Analysis of pipelines subjected to different ground settlement // Nippon Kōkan Technical Report. 1972. No. 14. Pp. 71–75.
7. Kozhaeva K.V. Calculation of optimized methods of the river underwater pipeline backfill with the use of APMWinMachine 9.7. // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 65. Issue 5. Pp. 42–66. DOI: 10.5862/MCE.65.4
8. Британский стандарт BS8010. Практическое руководство для проектирования, строительства и укладки трубопроводов, подводные трубопроводы. Ч. 1, 2, 3. 1993.
9. Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 13–21.
10. Двинских С.А., Ларченко О.В. Подход к изучению русловых процессов // Эволюция эрозионно-русловых систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учет : сб. тр. конф. Уфа, 3–6 октября 2017. Уфа : Аэтерна, 2017. С. 122–124.
11. Godbold J.E., Sackmann N.L. Scour protection for subsea structures // Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2–4 December 2014. London : CRC Press, 2015. Pp. 753–761. DOI: 10.1201/b17703-96
12. Забела К.А., Красков В.А., Москвич В.М., Соценко А.Е. Безопасность пересечений трубопроводами водных преград. М. : Недра, 2001. 194 с.
13. Gao X.-F., Liu R., Du Z.-F., Tan Z.-D. Overview of upheaval buckling theoretical studies for submarine buried pipeline // Chuan Bo Li Xue / Journal of Ship Mechanics. 2011. Vol. 15. No. 6. Pp. 678–687.
14. Rogers C.D.F. The Influence of surrounding soil on flexible pipe performance // Transportation Research Record. 1987. No. 1129. Pp. 1–11.
15. Медведев С.С., Салюков В.В., Лебедев Н.В., Долгов И.А. Ермолаев С.А. Научно-техническое обеспечение гидротехнической защиты подводных переходов трубопроводов // Газовая промышленность. 2004. № 12. С. 11–14.
16. Долгов И.А. Методы гидротехнической защиты подводных переходов трубопроводов от размыва: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 166 с.
17. Андрианов Ю.А. Современные средства защиты оснований речных и морских сооружений от размыва // Эволюция эрозионно-русловых систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учет : докл. и сообщения Всеросс. науч.-практ. конф. и XXXII межвуз. координационного совещания, Уфа, 3–6 октября 2017. Уфа : Аэтерна, 2017. С. 68–70.
18. Пат. № 2292509 РФ. МПК F16L 1/26. Способ ремонта оголенных участков подводного трубопровода (варианты) / Д.В. Некрасов ; патентообл. Подвострой. № 2005101001/06, заявл. 18.01.2005; опубл. 27.01.2007. Бюл. № 3.
19. Боровков В.С., Брянская Ю.В., Рылова И.А., Юмашева М.А. Гидравлические характеристики потока при обтекании защитных бетонных матов // Гидротехническое строительство. 2016. № 10. С. 60–64.
20. Алтунин С.Т. Регулирование русел. М. : Сельхозгиз, 1956. 336 с.

21. Пат. № 2029014 РФ, МПК E02B 3/0. Завеса для защиты от размыва подводного трубопровода / М.М. Доманевский, Э.Р. Гольдин ; патентообл. Государственный институт проектирования на речном транспорте «Гипроречтранс». № 92002733/15 ; заявл. 02.11.1992; опубл. 20.02.1995.

22. Linke U. NM162. Experimental Flume 309×450 mm, G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Hamburg. 2013.

23. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л. : Гидрометеиздат, 1962. 374 с.

Поступила в редакцию 25 июня 2018 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2019 г.

Одобрена для публикации 25 марта 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Ходзинская Анна Геннадиевна** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, gs@mgsu.ru, Khodzinskaya2010@yandex.ru;

Зоммер Виктор Леонидович — магистр (строительства), аспирант, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, gs@mgsu.ru, gospodinzommer@yandex.ru.

REFERENCES

1. Borodavkin P.P., Berezin V.L., Shadrin O.B. *Subsea pipelines*. Moscow, Nedra Publ., 1979; 415. (rus.).

2. Ivanov V.A., Kuzmin S.V., Kramskoy V.F., Toporov S.Yu. *The construction of underwater passages of main pipelines: a course of lectures: course of lectures*. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 2003; 217. (rus.).

3. Dudnikov Yu.V. *Scientific basis for the design and safety of complex sections of the linear part of trunk pipelines : dissertation of doctor of technical sciences*. Ufa, 2012; 366. (rus.).

4. Kukushkin B.M. *Construction of underwater pipelines*. Moscow, Nedra Publ., 1982; 176. (rus.).

5. Nikiforov V.A. Analysis of the main methods of construction of underwater crossings of main pipelines. *Scientific Review. Theory and Practice*. 2012; 3:10-17. (rus.).

6. Awoshiku K., Tokano M. Analysis of pipelines subjected to different ground settlement. *Nippon Kokan Technical Report*. 1972; 14:71-75.

7. Kozhaeva K.V. Calculation of optimized methods of the river underwater pipeline backfill with the use of APMWinMachine 9.7. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 65(5):42-66. DOI: 10.5862/MCE.65.4

8. British standard BS 8010. Practical guidance for design, constructions and laying of pipelines, underwater pipelines. Part 1, 2, 3. 1993.

9. Alekseyevskiy N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S., Chalov S.R. Spatio-temporal variability of channel deformations on the rivers of Russia. *Geography and natural resources*. 2012; 3:13-21 (rus.).

10. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V. Approach to the study of channel processes. *Evolution of erosion-channel systems, economic and environmental consequences, forecast estimates and accounting*. Ufa, 3–6 October 2017. Ufa, Aeterna Publ., 2017; 122-124 (rus.).

11. Gedbold J.E. Scour protection for subsea structures. *Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2–4 December 2014*. London, CRC Press, 2014; 753-761. DOI: 10.1201/b17703-96

12. Zabela K.A., Kraskov V.A., Moskvich V.M., Soshchenko A.E. *Safety of water pipelines crossing*. Moscow, Nedra Publ., 2001; 194. (rus.).

13. Gao X.-F., Liu R., Du Z.-F., Tan Z.-D. Overview of upheaval buckling theoretical studies for submarine buried pipeline. *Chuan Bo Li Xue. Journal of Ship Mechanics*. 2011; 15(6):678-687.

14. Rogers C.D.F. The Influence of surrounding soil on flexible pipe performance. *Transportation Research Record*. 1987; 1129:1-11.

15. Medvedev S.S., Salyukov V.V., Lebedev N.V., Dolgov I.A., Ermolayev S.A. Scientific and technical support of hydrotechnical protection of underwater crossings of pipelines. *Gas Industry*. 2004; 12:11-14. (rus.).

16. Dolgov I.A. *Methods of protection of underwater crossings of pipelines from erosion : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2001; 166. (rus.).

17. Andrianov Yu.A. Modern means of protection of river and sea structures bases from washout.

Evolution of erosion-channel systems, its economic and environmental consequences, forecast estimates and accounting : reports and reports of the all-Russian scientific.-prakt. Conf. and the XXXII interuniversity coordination meeting consequences, predictive assessments and studies, Ufa, 3–6 October 2017. Ufa, Aeterna Publ., 2017; 68-70. (rus.).

18. Patent № 2292509 RU. MPK F16L 1/26. *Method of repairing bare sections of an underwater pipeline (variants)* / D.V. Nekrasov ; patentable. Podvodstroy. No. 2005101001/06, apple. 18.01.2005 ; publ. 01.27.2007. Bull. No. 3.

19. Borovkov V.S., Bryanskaya Yu.V., Rylova I.A., Yumasheva M.A. Hydraulic characteristics of

the flow around protective concrete mats. *Hydraulic Engineering.* 2016; 10:60-64. (rus.).

20. Altunin S.T. *Regulation of channels.* Moscow, Selkhozgiz Publ., 1956; 336. (rus.).

21. Pat. № 2029014 RU. *Curtain for protection against erosion of underwater pipeline* / M.M. Domanevsky, E.R. Goldin. Patentable. State Institute of river transport design “Giprorrechtrans”. No. 92002733/15, apple. 02.11.1992; publ. 20.02.1995.

22. Linke U. *NM162. Experimental Flume 309×450 mm, G.U.N.T.* Gerätebau GmbH, Hamburg. 2013.

23. Goncharov V.N. *Dynamics of channel flows.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962; 374. (rus.).

Received June 25, 2018.

Adopted in a modified form February 18, 2019.

Approved for publication March 25, 2019.

ABOUT THE AUTHORS: **Anna G. Khodzinskaya** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Hydraulics and Engineering Hydrology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, gs@mgsu.ru, Khodzinskaya2010@yandex.ru;

Victor L. Zommer — Master of science in construction, aspirant, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, gs@mgsu.ru, gospodinzommer@yandex.