

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330

## LABORATORY INVESTIGATIONS OF ROAD WATER FREIGHT CONSTRUCTION

**Yu. K. Ivanovskiy, K. P. Morgunov, G. G. Ryabov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The laboratory studies of the hydraulic characteristics of the culvert from corrugated metal pipes, which is a part of the road crossing over the Taunga River on the Lidoga – Vanino route, are described. In the absence of normatively defined design rules, the practice of hydraulic engineering provides for the possibility of conducting laboratory studies of the projected facility on large-scale models. This approach allows you to get the information necessary for the informed adoption of design design decisions at the pre-project stage. Proceeding from the fact that the defining criterion for similarity is the Froude number, a linear modeling scale of 1:32 is adopted. The tests were performed on a model manufactured and placed in a hydraulic tray of the laboratory of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The main objective of laboratory hydraulic research was to assess the possibility of safe passage through such a culvert construction of the maximum flow through the Taunga River. The measured parameters were: water flow in the bed, water levels in front of and behind the structure, maximum flow rates at the outlet of the culvert. The measurements were carried out using a complex based on a panel computer. A series of laboratory studies of the capacity of the structure was performed, depending on the level of underflooding of the inlet and outlet openings of the culvert, as well as various costs in the channel. As the defining conditions are taken: provision of a non-pressure flow regime in corrugated pipes and flow rates that are safe for the stability of gabion structures. As a result of the research it was established that the culverts of the structure ensure that a given peak flow rate is missed in any possible modes with an allowable degree of filling, and flow velocities do not pose a threat to the stability of gabion structures.*

*Keywords: culvert, corrugated metal tube, laboratory modeling of hydraulic processes, capacity of the structure, degree of channel filling.*

**For citation:**

Ivanovskiy, Yuri K., Konstantin P. Morgunov, and Georgiy G. Ryabov. “Laboratory investigations of road water freight construction.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330.

УДК 626.4.421

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОДОРОЖНОГО ВОДОПРОПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ

**Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Описаны лабораторные исследования гидравлических характеристик водопропускного сооружения из гофрированных металлических труб, входящего в состав автодорожного перехода через реку Таунга на трассе Лидога – Ванино. При отсутствии нормативно определенных правил проектирования практика гидротехнического строительства предусматривает возможность проведения лабораторных исследований проектируемого объекта на масштабных моделях. Такой подход позволяет на предпроектной стадии получать информацию, необходимую для обоснованного принятия конструктивных проектных решений. Исходя из того, что определяющим критерием подобия является число Фруда, принят масштаб линейного моделирования, равный 1:32. Испытания выполнены на модели, изготовленной и размещенной в гидравлическом лотке лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлась оценка возможности безопасного пропуска через такое водопропускное сооружение максимального расхода, проходящего по реке Таунга. Измеряемыми параметрами являлись расход воды в русле, уровни воды перед сооружением и за ним, максимальные скорости потока на выходе из водопропускного сооружения. Измерения проводились с использованием комплекса на базе панельного*

компьютера. Выполнена серия лабораторных исследований пропускной способности сооружения в зависимости от уровня подтопления входного и выходного отверстий водопропускного сооружения, а также различных расходов в русле. В качестве определяющих условий приняты обеспечение безнапорного режима течения в гофрированных трубах и скоростей потока, безопасных для устойчивости габионных конструкций. В результате исследований установлено, что водопропускные галереи сооружения обеспечивают пропуск заданного пикового расхода в любых возможных режимах при допустимой степени наполнения, а скорости потока не создают угрозы устойчивости габионных конструкций.

*Ключевые слова:* водопропускное сооружение, гофрированная металлическая труба, лабораторное моделирование гидравлических процессов, пропускная способность сооружения, степень наполнения русла.

**Для цитирования:**

Ивановский Ю. К. Лабораторные исследования автодорожного водопропускного сооружения / Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330.

**Введение (Introduction)**

Неотъемлемой частью практически любой автомобильной дороги являются водопропускные сооружения, обеспечивающие пропуск поверхностных вод под насыпью дороги. В подавляющем большинстве это традиционные бетонные трубы. Однако все большее применение при строительстве и реконструкции автомобильных дорог находят металлические гофрированные трубы. Исследованию гидравлических безнапорных и частично-напорных режимов течения в таких водопропусках посвящен ряд работ [1] – [3].

В последние годы водопропускные сооружения из гофрированных металлических труб используются также при проектировании и строительстве автодорожных переходов через небольшие водотоки (реки, каналы) вместо обычных мостов с опорами-быками. Например, несколько таких сооружений было запроектировано и реализовано при строительстве автомобильной дороги Хабаровск – Лидога – Ванино (рис. 1).



Рис. 1. Водопропускные сооружения из гофрированных труб на трассе Хабаровск – Лидога – Ванино

При отсутствии законодательно утвержденных технических регламентов по проектированию и расчету таких конструкций проектировщикам приходится использовать действующие нормативные документы, которые не всегда в полной мере отражают реальные процессы взаимодействия водных потоков с подобными рода водопропускными [4] – [6].

Актуальность проблемы обусловила разработку Центральным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ОАО ЦНИИС) ряда отраслевых дорожных методических документов [7] – [9]. В частности, ОДМ 218.2.001-2009 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)», рекомендованного к применению распоряжением Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р. Однако перенос условий гидравлической работы гладкостенных труб на гофрированные трубы, как это сделано в некоторых случаях разработчиками ОДМ, вряд ли можно считать корректным и оправданным.

При отсутствии нормативно определенных правил проектирования практика гидротехнического строительства предусматривает возможность проведения лабораторных исследований проектируемого объекта на масштабных моделях. Такой подход позволяет на предпроектной стадии получать информацию, необходимую для обоснованного принятия конструктивных проектных решений. Лабораторные исследования, выполненные на основе теории подобия, в этом случае являются необходимым, а порой и единственно возможным инструментом, обеспечивающим проектировщика данными, достоверно отражающими гидравлические процессы, обуславливающие работу сооружения и его влияние на окружающую среду.

В настоящей работе представлены материалы лабораторных гидравлических исследований пропускной способности искусственного водопропускного сооружения, заложенного в проекте автомобильного перехода через реку Таунга на автодороге Хабаровск – Лидога – Ванино. Строительство автомобильной дороги Хабаровск – Лидога – Ванино с подъездом к г. Комсомольск-на-Амуре обусловлено необходимостью создания автомобильного сообщения между административным центром края г. Хабаровском и Тихоокеанским побережьем (рис. 2). Дорога позволяет также заместить недостающие пропускные мощности железной дороги на участке Комсомольск-на-Амуре – Ванино.



Рис. 2. Схема автодороги Хабаровск – Лидога – Ванино с подъездом к Комсомольску-на-Амуре

Строительство автомобильной дороги протяженностью 347 км началось в 1997 г. До этого времени автомобильная дорога Лидога – Ванино не имела сквозного проезда и являлась отдельными участками лесовозных дорог со стороны поселков Лидога и Ванино. Окончательно автодорога сдана в эксплуатацию в октябре 2017 г. Проложенная по трем районам Хабаровского края пио-

нерная дорога обеспечила России выход к Тихому океану. По окончании её строительства была завершена последняя часть автомобильного сообщения евроазиатского международного «коридора» «Транссиб», которая имеет огромное стратегическое и экономическое значение, обеспечивая транспортный выход с федеральных автомагистралей «Амур» (Чита – Хабаровск), «Уссури» (Хабаровск – Владивосток) к морским международным портам Ванино и Советская Гавань. Автомобильная дорога спроектирована по нормам III технической категории с асфальтобетонным покрытием, по одной полосе в прямом и обратном направлениях.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В соответствии с проектом, выполненным ОАО ЦНИИС по заданию Главного управления специального строительства при Спецстрое России «Дальспецстрой», на участке пересечения автодорогой реки Таунга взамен ранее запроектированного железобетонного трехпролетного моста длиной 24 м было предложено строительство искусственного сооружения «ПК 15 + 53» (рис. 3) с применением металлических гофрированных конструкций замкнутого сечения, засыпанных грунтом, по которому проложена автодорога. Водопропускное отверстие представлено тремя трубами из металлических гофрированных конструкций эллипсоидного сечения, размерами 12,152 × 7,810 м каждое (рис. 4). Длина сооружения из металлических гофрированных конструкций составляет 30,0 м по лотку. Конструкция состоит из металлических листов, изогнутых по радиусу и соединенных между собой на болтах.

Грунтовая призма вокруг сооружения выполняется из грунтов, пригодных для устройства подушки (щебенистого грунта). Кроме того, допускается применять мелкие пески, содержащие не более 10 % частиц размером менее 0,1 мм, в том числе не более 2 % глинистых частиц размером менее 0,005 мм. Модуль деформации грунта с учетом уплотнения до 0,95 должен быть не менее 300 кгс/см<sup>2</sup>.

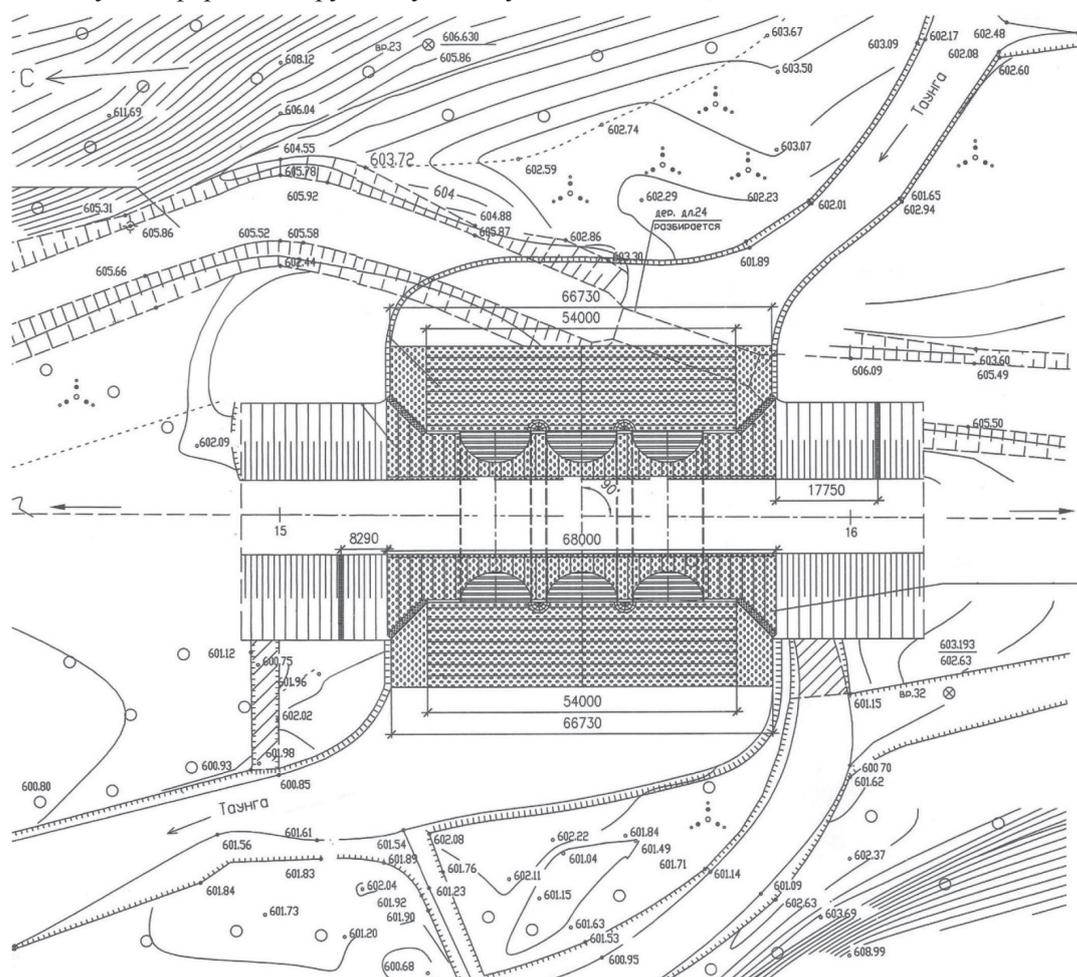


Рис. 3. Автодорожный переход реки Таунга

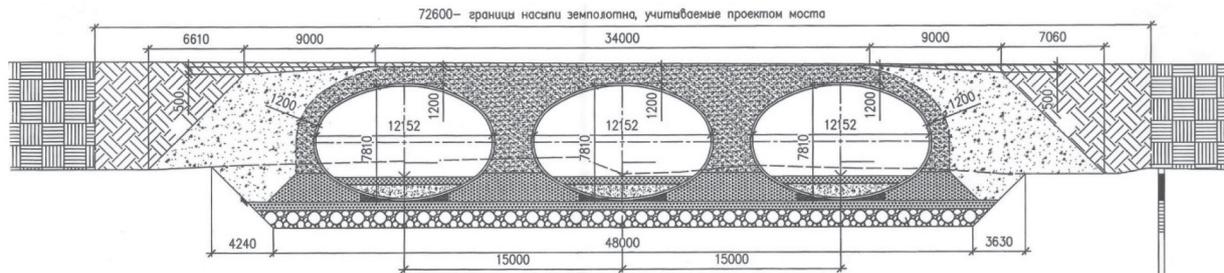


Рис. 4. Водопропускное отверстие искусственного сооружения «ПК 15 + 53»

Для предотвращения вымывания мелких частиц из грунтовой призмы предусмотрено укрепление откосов матрасами Рено. С целью сокращения длины металлической гофрированной конструкции, а также предотвращения проникновения воды в грунтовую призму, оголовки водопропускного сооружения оформлены монолитными железобетонными порталами и габионными стенками. Габионные сетчатые изделия (по ГОСТ Р 52132-2003), выполненные из сетки проволочной крученой с шестиугольными ячейками, изготовленной по ГОСТ Р 51285-99, предназначенной для габионных конструкций, применяются для устройства подпорных стенок, укрепления склонов и откосов насыпей, берегоукрепления, армирования грунтов, решения экологических задач восстановления и оздоровления природных ландшафтов [10].

Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлась оценка возможности безопасного пропуска через такое водопропускное сооружение максимального расхода, проходящего по реке Таунга. В соответствии с проектным заданием, максимальный расход в реке составляет 411 м<sup>3</sup>/с. При этом должны быть обеспечены следующие требования, принимаемые при моделировании в качестве обязательных исходных предпосылок:

1. Трубы следует считать гидравлически «короткими», т. е. длина трубы не оказывает влияния на её пропускную способность.
2. Пропуск водного потока через гофрированные трубы должен осуществляться только в безнапорном режиме, при котором входное отверстие и сжатое сечение не затоплены и на всем протяжении трубы поток имеют свободную поверхность, пропускная способность зависит только от условий на входном участке трубы.
3. Нормы [10], [11] ограничивают скорость движения воды в местах расположения коробчатых габионных конструкций, максимально допустимые скорости не должны превышать 6,0 – 6,4 м/с.

При безнапорном режиме в пределах входной части гофрированной трубы линия свободной поверхности водного потока имеет вид кривой спада от подпертой глубины (глубины на входе  $h_{вх}$ ) до сжатого сечения. Минимальная глубина устанавливается в сжатом сечении, которое в зависимости от конструкции входного оголовка, а также формы поперечного сечения и уклона дна находится на расстоянии  $(1,0 - 2,0)h_{вх}$  от входа в трубу, а глубина потока в сжатом сечении колеблется в пределах  $(0,4 - 0,7)h_{вх}$ .

### Результаты (Results)

Лабораторное моделирование выполнялось в гидротехнической лаборатории Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Размеры экспериментальной установки определялись на основе общих принципов моделирования гидравлических явлений [12] – [15] и возможностей лабораторного оборудования. Из условий функционирования натурного сооружения следует, что определяющим критерием подобия является критерий Фруда

$$Fr = \frac{v_{вх}}{gh_{вх}} \quad (v_{вх} \text{ — скорость движения воды перед входом в сооружение}).$$
 Это обстоятельство и определило выбор максимально возможного линейного масштаба моделирования, принятого равным  $a_l = 32$ . Такая модель может быть отнесена к крупномасштабной, где выполняется условие автомодельности, и полученные данные исследований будут наиболее достоверными.

Для обеспечения подобия модели и натуры по Фрудру необходимо также учесть следующие масштабные коэффициенты:

- масштаб скорости:  $a_v = \sqrt{a_l} = 5,66$ ;
- масштаб времени:  $a_t = \frac{a_l}{a_v} = 5,66$ ;
- масштаб расхода воды:  $a_Q = a_l^{5/2} = 5\,792,62$ .

Модель сооружения «ПК 15 + 53» была размещена в большом гидравлическом лотке гидротехнической лаборатории, имеющем следующие характеристики: длина лотка — 40 м, ширина — 2 м, высота — 1 м, максимальный расход воды — до 120 л/с. Лоток снабжен головным устройством с гасителями волн и треугольным водосливом для измерения расхода. В нижней части лотка имеется наклонный поворотный щит для создания подпора. Модель размещалась равноудаленно от концов лотка, исключая их влияние.

Собственно модель сооружения собиралась на сварном каркасе из стального уголка, внутрь которого помещались три трубы из тонкого стального листа, имеющие эллиптическое сечение с полуосями, определяемыми масштабом моделирования  $2a = 380$  мм (в натуре 12152 мм);  $2b = 244$  мм (в натуре 7810 мм). Трубы устанавливались и закреплялись в эллиптических окнах, вырезанных в вертикальных стенках, выполняющих роль портала (рис. 5, а). В нижнюю часть труб были уложены обработанные по трафарету доски, придающие конструкции необходимую жесткость и выполняющие роль дна трубы. Для создания необходимой гофрированной внутренней поверхности труба покрывалась слоем разогретого пластилина толщиной около 5 мм, после чего пластилин раскатывался по трубе с помощью изготовленного трафаретного приспособления. Таким образом достигалась заданная структура внутренней поверхности труб, необходимая эллиптическая форма и размеры проходного сечения (рис. 5, б).



Рис. 5. Экспериментальная установка в гидравлическом лотке (а), фрагмент экспериментальной установки (б)

Основной задачей исследований являлась оценка работы водопропусков в пиковом режиме, т. е. при пропуске максимального расхода и при максимальном уровне подтопления. С учетом существенного разлива реки в такой ситуации, кривизна русла реки в верхнем бьефе не учитывалась, поток принимался осесимметричным. При малых расходах воды в реке влияние отлогого затопленного берега (см. рис. 3) может несколько исказить симметрию картины. Асимметрия русла при малых расходах с достаточной степенью приближения была смоделирована укладкой плоских грузов на дно модели в соответствующих местах (рис. 6).



Рис. 6. Вид модели со стороны верхнего бьефа

Для описания движения воды в каналах, имеющих замкнутый профиль, в задачах гидравлики используется понятие *степени наполнения* [16] – [18]:  $a = \frac{h}{d}$ , где  $h$  — глубина воды в замкнутом канале;  $d$  — высота свода (рис. 7).

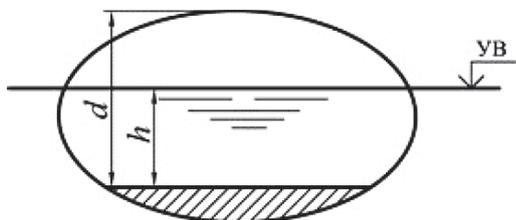


Рис. 7. Схема определения степени наполнения замкнутого канала

На практике обычно реализуется режим, при котором  $a \leq 0,75$ , что для модели определило глубину потока в 145 мм (в натуре — 4,64 м). Таким образом, в процессе лабораторных гидравлических исследований необходимо было подтвердить способность искусственного водопропускного сооружения пропускать максимальные расходы при различных уровнях воды в верхнем бьефе без превышения допустимой степени наполнения замкнутого профиля (0,75) и без подтопления нижнего бьефа. В процессе исследований необходимо было измерять расходы воды в русле, глубины потока на входе в сооружение и непосредственно за ним в нижнем бьефе, а также скорости потока в характерных точках.

Расход воды в русле определялся по треугольному водосливу, расположенному в головной части гидравлического лотка (рис. 8). Отметки поверхностей течения в русле перед сооружением и за ним определялись с помощью мерных игл (шпиценмасштабов) — рис. 9. Для измерения горизонтальных составляющих скоростей применялась микровертушка фирмы «Schitknecht» типа MicroWater6 (Германия), которая подключалась к одному из каналов информационно-измерительного комплекса на базе панельного компьютера (рис. 10). Пределы измерений микровертушкой скоростей потока — 0,04 – 5,0 м/с, погрешность измерения — 5 %.



Рис. 8. Треугольный водослив в головной части лотка для определения расхода



Рис. 9. Измерение отметок свободной поверхности шпигенмасштабом

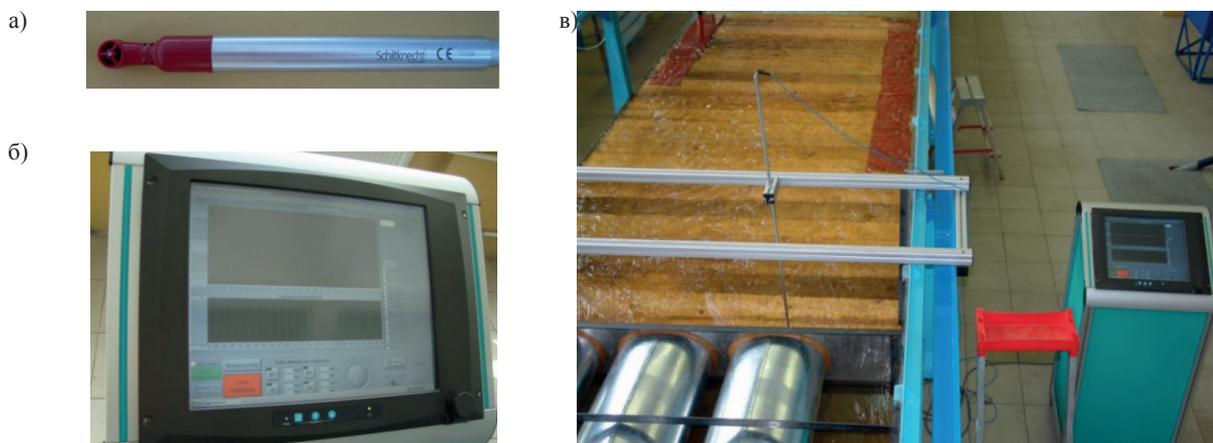


Рис. 10. Комплекс для измерения скоростей потока:  
 а — микровертушка фирмы Schitknecht типа MicroWater6; б — панельный компьютер;  
 в — измерительный комплекс на базе панельного компьютера

Поскольку на выходе из сооружения наблюдались четко выраженные подтопленные струи, для определения характера распределения скоростей в нижнем бьефе и нахождения максимальных значений скорости была выполнена последовательность промеров в различных областях нижнего бьефа и определены наиболее характерные точки с наибольшими скоростями. Далее производились измерения максимальных скоростей в этих точках. Схема расположения контрольных точек представлена на рис. 11. В соответствии с программой были выполнены следующие лабораторные исследования:

1. Определение пропускной способности сооружения при максимально возможном расходе  $Q = 411 \text{ м}^3/\text{с}$  (для модели —  $0,0709 \text{ м}^3/\text{с} = 70,9 \text{ л/с}$ ) без подтопления нижнего бьефа. При этом фиксировались глубины перед сооружением и непосредственно за ним. Определялись максимальные значения скоростей потока в характерных точках нижнего бьефа.

2. Определение влияния подтопления нижнего бьефа на пропускную способность сооружения и изменение поля скоростей. Устанавливалось максимальное подтопление.

3. Определение расхода, соответствующего максимально возможному уровню воды в русле перед сооружением. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

4. Определение расхода, соответствующего уровню воды перед сооружением, равному 80 % от максимально возможного. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

5. Определение расхода, соответствующего уровню воды перед сооружением, равному 60 % от максимально возможного. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

6. Определение уровня воды перед сооружением (подпор верхнего бьефа) при глубине в нижнем бьефе, соответствующей максимально возможному в русле. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

а)



б)

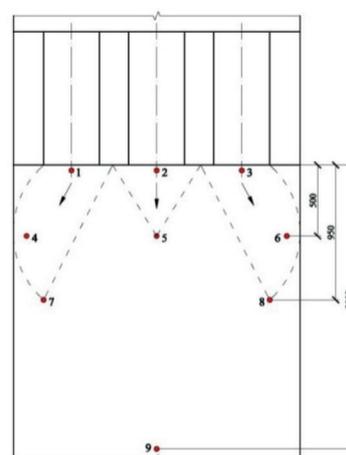


Рис. 11. Места расположения контрольных точек в нижнем бьефе с максимальными скоростями потока: а — фотография; б — схема

Максимально возможный уровень воды в русле определялся как уровень 1 %-й обеспеченности. Согласно исходным данным проекта, это отметка в натурном рельефе 604,19 м, что соответствует глубине потока в районе расположения сооружения 2,95 м (на модели — 92,0 мм).

### Обсуждение (Discussion)

Результаты лабораторных исследований показали следующее (далее приводятся результаты, полученные на модели, а в скобках — пересчет на натурные условия).

1. Максимальный расход  $Q = 0,071 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $411 \text{ м}^3/\text{с}$ ), без подтопления нижнего бьефа (рис. 12, а).

Результаты:

- глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{ВВ}} = 124,0 \text{ мм}$  (3,97 м);
- глубина нижнего бьефа —  $h_{\text{НБ}} = 40,0 \text{ мм}$  (1,28 м);
- глубина на выходе из трубы —  $h_{\text{ВЫХ}} = 75,0 \text{ мм}$  (2,40 м).

Степень наполнения в трубопроводе оказалась равной  $a = 0,64$ , что меньше допустимого значения 0,75.

Глубина перед сооружением превысила максимальный уровень 92,0 мм (2,95 м), что вполне объяснимо, так как устройство в русле реки дополнительной преграды (автомобильного моста с водопропуском) приводит к подпору и повышению уровня верхнего бьефа.

Тем не менее в этом случае сооружение обеспечивает пропуск заданного расхода. Значения скоростей, измеренных в характерных точках, сведены в табл. 1.

Таблица 1

### Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $v_{\text{мод}}$ , м/с	Скорость натурального объекта $v_{\text{нат}}$ , м/с
1	0,67	3,79
2	0,68	3,85
3	0,71	4,02
4	0,82	4,64
5	0,80	4,53
6	0,82	4,64
7	0,80	4,53
8	0,80	4,53
9	0,67	3,79

2. Расход  $Q = 0,071 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $411 \text{ м}^3/\text{с}$ ), подтопление нижнего бьефа — максимальное (рис. 12, б).

*Результаты:*

- глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{вб}} = 170,0 \text{ мм}$  ( $5,44 \text{ м}$ );
- глубина нижнего бьефа —  $h_{\text{нб}} = 150,0 \text{ мм}$  ( $4,80 \text{ м}$ ).

Степень наполнения  $a = 0,88$ , что больше допустимого значения —  $0,75$ . В этом случае сооружение пропускает заданный расход, но с превышением допустимой степени наполнения ( $a = 0,88 > 0,75$ ). Однако следует отметить, что данный режим представлял интерес лишь с точки зрения оценки влияния подтопления нижнего бьефа на величину максимальных скоростей. Установленное в эксперименте подтопление превышает реально возможную максимальную отметку нижнего бьефа  $2,95 \text{ м}$ .

Измеренные скорости при данном режиме существенно снизились, наибольшими из них оказались скорости в контрольной точке 2 —  $v_{\text{мод}} = 0,40 \text{ м/с}$  (на натуре —  $2,26 \text{ м/с}$ ) и в контрольной точке 5 —  $v_{\text{мод}} = 0,35 \text{ м/с}$  (на натуре —  $1,98 \text{ м/с}$ ).

3. Уровень воды перед сооружением — максимально возможный  $92,0 \text{ мм}$  ( $2,95 \text{ м}$ ), без подпора (рис. 12, в). Необходимо оценить расход.

*Результаты:*

- глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{вб}} = 92,0 \text{ мм}$  ( $2,95 \text{ м}$ );
- глубина на выходе из трубы —  $h_{\text{вых}} = 55,0 \text{ мм}$  ( $1,76 \text{ м}$ ).

Измеренный расход оказался равным  $Q = 0,040 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $232 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Значения максимальных скоростей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $v_{\text{мод}}, \text{ м/с}$	Скорость натурального объекта $v_{\text{нат}}, \text{ м/с}$
4	0,67	3,79
5	0,67	3,79
6	0,67	3,79

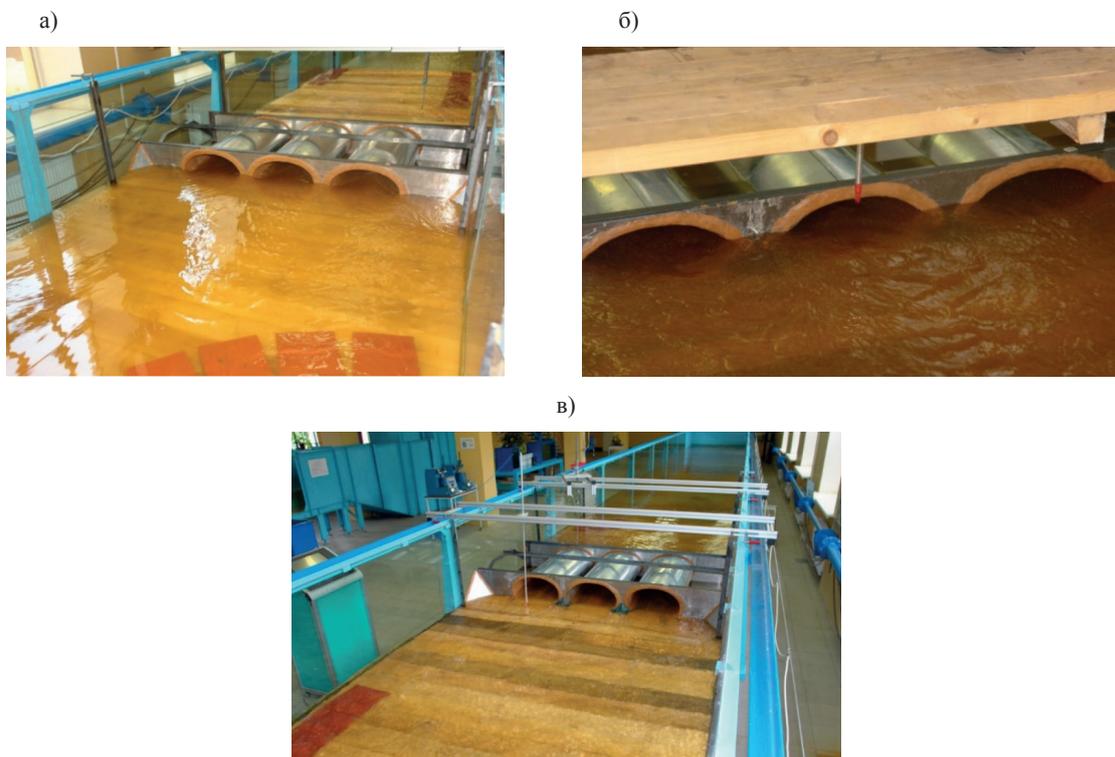


Рис. 12. Вид установившегося потока воды:

а — со стороны верхнего бьефа при максимальном расходе без подтопления нижнего бьефа;

б — со стороны нижнего бьефа при максимальном его подтоплении;

в — со стороны нижнего бьефа при максимально возможном уровне перед сооружением, но без подпора

4. Уровень воды перед сооружением — 80 % от максимально возможного, без подпора.

*Результаты:*

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{ВБ}} = 74,0$  мм (2,37 м);

– глубина на выходе из трубы —  $h_{\text{ВЫХ}} = 46,0$  мм (1,47 м).

Измеренный расход  $Q = 0,029$  м<sup>3</sup>/с (168 м<sup>3</sup>/с).

Значения максимальных скоростей приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Скорости в характерных точках нижнего бьефа**

Номер контрольной точки	Скорость на модели, $v_{\text{мод}}$ , м/с	Скорость натурального объекта, $v_{\text{нат}}$ , м/с
4	0,61	3,45
5	0,64	3,62
6	0,58	3,28

5. Уровень воды перед сооружением — 60 % от максимально возможного, без подпора.

*Результаты:*

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{ВБ}} = 55,0$  мм (1,76 м);

– глубина на выходе из трубы —  $h_{\text{ВЫХ}} = 37,0$  мм (1,18 м).

Измеренный расход  $Q = 0,018$  м<sup>3</sup>/с (104 м<sup>3</sup>/с).

Значения максимальных скоростей даны в табл. 4.

Таблица 4

**Скорости в характерных точках нижнего бьефа**

Номер контрольной точки	Скорость на модели $v_{\text{мод}}$ , м/с	Скорость натурального объекта $v_{\text{нат}}$ , м/с
4	0,47	2,66
5	0,48	2,72
6	0,52	2,94

6. Глубина в нижнем бьефе соответствует максимально возможной в русле.

Такое подтопление сооружения соответствует максимальному в натуре, т. е. при заданном расходе  $Q = 0,071$  м<sup>3</sup>/с (411 м<sup>3</sup>/с) будет наибольшая степень наполнения  $a$ .

*Результаты:*

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) —  $h_{\text{ВБ}} = 131,0$  мм (4,19 м);

– глубина нижнего бьефа —  $h_{\text{НБ}} = 92,0$  мм (2,95 м);

– глубина на выходе из трубы —  $h_{\text{ВЫХ}} = 87,0$  мм (2,78 м).

Степень наполнения оказалась равной  $a = 0,675 < 0,75$ .

Скорости в контрольных точках приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Скорости в характерных точках нижнего бьефа**

Номер контрольной точки	Скорость на модели $v_{\text{мод}}$ , м/с	Скорость натурального объекта $v_{\text{нат}}$ , м/с
1	0,58	3,28
2	0,60	3,39
3	0,60	3,39
4	0,53	3,00
5	0,55	3,11
6	0,53	3,00

**Выводы (Conclusions)**

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Водопропускные галереи сооружения «ПК 15+53» обеспечивают пропуск заданного пикового расхода в любых возможных режимах при допустимой степени наполнения.

2. Подпор (увеличение глубины потока) в нижнем бьефе сооружения, как и следовало ожидать, приводит к увеличению степени наполнения трубопровода. Однако с учетом того, что мак-

симальный уровень нижнего бьефа не может превысить величину уровня 1 % обеспеченности (2,95 м в натуральных условиях), степень наполнения остается в допустимых пределах ( $< 0,75$ ), т. е. пропускная способность сооружения обеспечивается при любом возможном в натуре подпоре.

3. Измеренные скорости потока оценивались с точки зрения влияния потока на устойчивость габионных конструкций. Полученные в результате исследования значения скоростей потока находились в пределах 0,35 – 0,82 м/с (1,98 – 4,64 м/с для натуральных условий). Ведомственные строительные нормы [10, п. 5.4.2] дают следующие значения: предельная скорость потока для коробчатых габионов высотой 0,5 – 1,0 м при среднем диаметре камня заполнения 190 мм равна 6,4 м/с. В пособии по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений [11] указана предельная скорость течения воды до 6,0 м/с. Максимальная скорость потока, зафиксированная в процессе гидравлических исследований в пиковом режиме, в пересчете на натурные условия составила 4,64 м/с. Таким образом, можно сделать вывод об устойчивости габионных конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтунин В. И. Водопропускные трубы в транспортном строительстве. Гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур / В. И. Алтунин, О. Н. Черных, М. В. Федотов. — М.: МАДИ, 2012. — 240 с.
2. Алтунин В. И. О гидравлическом режиме дорожных водопропускных труб из гофрированного металла / В. И. Алтунин, О. Н. Черных // Дороги и мосты. — 2015. — Т. 1. — № 33. — С. 234–247.
3. Алтунин В. И. Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме / В. И. Алтунин, О. Н. Черных, А. В. Бурлаченко // Приволжский научный журнал. — 2015. — № 1 (33). — С. 28–36.
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. — М., 2011. — 341 с.
5. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). — М.: ПКТИтрансстрой, 1992.
6. Пособие по гидравлическим расчётам малых мостов и водопропускных труб на железных и автомобильных дорогах / под общ. ред. Г. Я. Волченкова. — М.: Транспорт, 1992. — 204 с.
7. Методические рекомендации по применению металлических гофрированных труб: отраслевой дорожный метод. док. / Утв. распоряжением Росавтодора № ОС-542-р от 17.06.2002 г.
8. Методические рекомендации по применению металлических труб большого диаметра в условиях наледеобразования и многолетнемерзлых грунтов (для опытно-экспериментального строительства): отраслевой дорожный метод. док.; введ. в действие распоряжением Минтранса России от 25 августа 2003 г. № ОС-753-р. — М., 2003.
9. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон). — М.: Информавтодор, 2009. — 201 с.
10. Ведомственные строительные нормы ВСН-АПК 2.30.05.001-2003. Мелиорация. Руководство по защите земель, нарушенных водной эрозией. Габионные конструкции противоэрозионных сооружений. — М., 2003. — 29 с.
11. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений. ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИС). — М.: Транспорт, 1992. — 408 с.
12. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. — Л.: Энергия, 1967. — 236 с.
13. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. — 10-е изд., доп. — М.: Наука, 1987. — 432 с.
14. Зуев К. И. Основы теории подобия / К. И. Зуев. — Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2011. — 51 с.
15. Иванов И. Е. Методы подобия физических процессов / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. — М.: МАДИ, 2015. — 144 с.
16. Чугаев Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. — 4-е изд. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 672 с.
17. Моргунов К. П. Гидравлика / К. П. Моргунов. — СПб.: Изд-во «Лань», 2014. — 288 с.
18. Штеренлихт Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. — 5-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2015. — 656 с.

## REFERENCES

1. Altunin, V. I., O.N. Chernykh, and M.V. Fedotov. *Vodopropusknye trubyy v transportnom stroitel'stve. Gi-dravlicheskaya rabota trub iz metallicheskih gofirovannykh struktur*. M.: MADI, 2012.
2. Altunin, V.I., and O.N. Chernykh. "O gidravlicheskom rezhime dorozhnykh vodopropusknykh trub iz gofri-rovannogo metalla." *Dorogi i mosty* 1.33 (2015): 234–247.
3. Chernykh, Oľga Nikolaevna, Vladimir Ilich Altunin, and Alyona Vladimirovna Burlachenko. "Experimental investigation of corrugated metal pipe with partly full flow." *The Privolzhsky Scientific Journal* 1(33) (2015): 28–36.
4. Russian Federation. Set of Rules SP 35.13330.2011 «Mosty i trubyy». Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 2.05.03-84. M., 2011.
5. SNIP 2.05.03-84 "Bridges and Underpasses" Handbook on Surveying and Design of Railroad and Road Bridge Crossings of Streams. M.: PKTIttransstroj, 1992.
6. Volchenkov, G.Ya. *Posobie po gidravlicheskim raschetam malykh mostov i vodopropusknykh trub na zhe-leznykh i avtomobil'nykh dorogakh*. M.: Transport, 1992.
7. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu metallicheskih gofirovannykh trub. Otrasevoi dorozhnyi metodicheskii dokument*. Utverzhden rasporyazheniem Rosavtodora № OS-542-r ot 17.06.2002 g.
8. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu metallicheskih trub bol'shogo diametra v usloviyakh na-ledeobrazovaniya i mnogoletnemerzlykh gruntov (dlya opytно-eksperimental'nogo stroitel'stva)*. Otrasevoi dorozhnyi metodicheskii dokument. M., 2003.
9. Russian Federation. Branch road methodical document ODM 218.2.001-2009. Rekomendatsii po pro-ektirovaniyu i stroitel'stvu vodopropusknykh sooruzhenii iz metallicheskih gofirovannykh struktur na avtomobil'nykh dorogakh obshchego pol'zovaniya s uchetom regional'nykh uslovii (dorozhno-klimaticheskikh zon). M.: Informavtodor, 2009.
10. Russian Federation. Departmental building norms VSN-APK 2.30.05.001-2003. Melioratsiya. Rukovodstvo po zashchite zemel', narushennykh vodnoi eroziei. Gabionnye konstruksii protivoerozionnykh sooruzhenii. M., 2003.
11. *Posobie po gidravlicheskim raschetam malykh vodopropusknykh sooruzhenii. VNII transportnogo stroitel'stva (TsNIIS)*. M.: Transport, 1992.
12. Levi, I.I. *Modelirovanie gidravlicheskih yavlenii*. L.: Energiya, 1967.
13. Sedov, L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike*. 10<sup>th</sup> ed. M.: Nauka, 1987.
14. Zuev, K.I. *Osnovy teorii podobiya*. Vladimir: Izd-vo Vladimirskego gos. un-ta, 2011.
15. Ivanov, I.E., and V.E. Ereshchenko. *Metody podobiya fizicheskikh protsessov*. M.: MADI, 2015.
16. Chugaev, R.R. *Gidravlika*. 4<sup>th</sup> ed. L.: Energoizdat, 1982.
17. Morgunov, K.P. *Gidravlika*. SPb.: Izd-vo «Lan'», 2014.
18. Shterenlikht, D.V. *Gidravlika*. 5<sup>th</sup> ed. SPb.: Izd-vo «Lan'», 2015.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ивановский Юрий Кириллович** — доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: kaf\_gsk@gumrf.ru

**Моргунов Константин Петрович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

**Рябов Георгий Георгиевич** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: RyabovGG@gumrf.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ivanovskiy, Yuri K.** — associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: kaf\_gsk@gumrf.ru

**Morgunov, Konstantin P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

**Ryabov, Georgiy G.** —  
PhD  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: RyabovGG@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2018 г.

Received: January 24, 2018.