УДК 502/504:621.644:532.54

А.В. БУРЛАЧЕНКО
САО Mercedes-Benz, г. Москва

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований металлических гофрированных водопропускных труб с повышенной абразивной устойчивостью. Для защиты металлических труб из гофрированных структур от коррозионного разрушения и обеспечения нормативной долговечности на внутреннюю и внешнюю поверхность в заводских условиях обычно наносится цинковое и иногда полимерное покрытие. Однако опыт эксплуатации показывает, что в условиях повышенной агрессивности пропускаемого потока этого недостаточно для безопасной и надёжной работы водопропускного сооружения. Нормами проектирования указана необходимость установки в придонной области таких труб лотка, что не всегда выполняется при их строительстве и проектировании. Выявлены основные факторы, позволяющие определить глубину и скорость водного потока на выходе из трубчатого сооружения, выполненного из гофрированного металла. Установлено, что наличие защитного бетонного лотка приводит к уменьшению относительной глубины на выходе из таких труб и увеличению скорости в выходном сечении по сравнению с существующими рекомендациями, разработанными для гофрированных труб без защитного бетонного лотка по дну. Значения действительных глубин на выходе из гофрированной трубы с защитным лотком по дну заметно меньше глубин, рассчитанных по существующим нормативным рекомендациям. Отмечается, что отсутствие лотка в подобных инновационных трубчатых переходах на транспортных магистралях любой категории недопустимо и ведёт к резкому снижению надёжности работы и долговечности трубчатых водопропускных сооружений из металлических гофрированных элементов.

Металлические гофрированные водопропускные трубы, абразивная устойчивость, экспериментальные исследования, безнапорный и полунапорный режимы работы, гладкий лоток, коэффициент шероховатости.

Введение. В настоящее время при строительстве новых искусственных водопропускных сооружений и реконструкции старых широко используются металлические гофрированные трубы (МГТ) [1–3]. Связано это с такими преимуществами труб из металлических гофрированных конструкций (МГК) в сравнении с бетонными трубами, как легкость, транспортабельность, быстрота сборки и строительства водопропускного сооружения, ускорение реализации всего объекта в целом, ограничение затрат на строительство, сейсмическая устойчивость, отсутствие фундамента и др. В последние годы в РФ налажено производство и применение спиральновитых металлических гофрированных труб (СМГТ), которые изготавливаются секциями любой длины от 1 м до 13,5 м, соединяемых с помощью бандажей (рис. 1). СМГТ имеют дополнительные преимущества в сравнении с бетонными трубами, поскольку из них не происходит утечки воды, а сборка водопропускной трубы из двух секций длиной до 27 м занимает 1,5…2 ч. Наибольшее распространение трубы из МГК находят в удаленных районах с экстремальными климатическими условиями. В нашей стране это регионы Сибири и Дальнего Востока, а в США – Аляска, где за пятилетний период, с 2008…2012 гг., было построено 75% гофрированных труб и 25% пластиковых труб, а бетонные трубы не применялись [3].

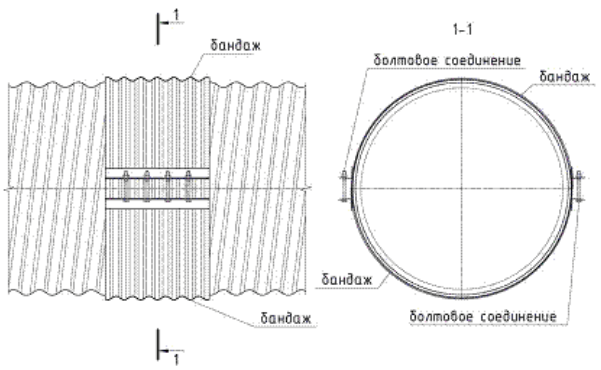

Рис. 1. **Конструкция бандажного соединения секций спиральновитых труб SPIREL для гофра 125×25 мм**

Материалы и методы исследований. Для защиты МГТ от коррозионного разрушения и обеспечения нормативной долговечности (50…100 лет) на внутреннюю и внешнюю поверхность гофрированного металла в заводских условиях наносится цинковое покрытие. Такое защитное покрытие обеспечивает только минимальный срок безаварийной эксплуатации (~ 50 лет) и при условии расположения МГТ в неагрессивной грунтовой среде и нейтральном или слабощелочном характере водного потока (pH ≥ 7,3). Если же грунт обратной засыпки имеет повышенную кислотность (pH < 5), пониженное электрическое сопротивление (R < 1500) и транспортируется водный поток повышенной кислотности, содержащий сульфаты и хлориды, а также оказывающий повышенное абразивное воздействие на внутреннюю поверхность гофрированной трубы, то долговечность труб из МГК существенно снижается и может составлять меньше 10 лет [1]. Для повышения долговечности МГТ на её внешнюю и внутреннюю поверхности следует нанести дополнительное защитное покрытие. На внешнюю поверхность труб обычно наносится полимерное покрытие из высокопрочного полиэтилена высокого давления HDPE толщиной 250 мкм (рис. 2).

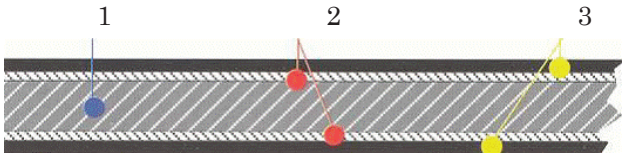

Рис. 2. **Схема защитного полимерного покрытия МГТ от коррозии для профиля гофры 125×25 мм, 68×13 мм:**
1 – стенка из стали толщиной от 1,5 до 3,5 мм; 2 – цинк 80 μm; 3 – дополнительное полимерное покрытие (HDPE) 250 μm

При пониженном и среднем уровне абразивного воздействия водного потока (1–3 уровни) HDPE обеспечивает надежную дополнительную защиту в течение 70 лет и внутренней поверхности гофрированной трубы (по принятой за рубежом 4-уровневой классификации абразивного воздействия водного потока).

Многолетние зарубежные экспериментальные исследования, продолжающиеся в настоящее время, показывают, что при повышенном абразивном воздействии водного потока (4-й уровень) только применение дополнительного защитного покрытия в виде бетонного лотка толщиной не менее 7,5 см (3 дюйма), покрывающего не менее 25% внутреннего периметра круглой гофрированной трубы (40% периметра полицентрической трубы), позволяет обеспечить увеличение долговечности на 50 лет (рис. 3) [3].

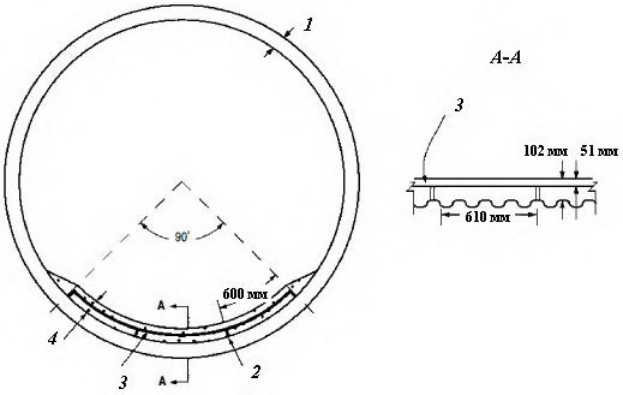

Рис. 3. **Поперечное сечение круглой МГТ с бетонным лотком по дну (США):**
1 – высота гофра листа 13,25 дюйма или 51 мм; 2 – металлические штыри, приваренные к гофрированному листу; 3 – сварная решетка, приваренная к металлическим штырям; 4 – гладкий бетонный лоток толщиной 100 мм

Согласно существующим в нашей стране нормативным рекомендациям [4] водопропускная труба из гофрированного металла должна обязательно иметь гладкий защитный бетонный лоток толщиной не менее 10 см, занимающий нижний сегмент с углом не менее 90 °. Данное нормативное требование обычно выполняется (рис. 4), но только при использовании МГТ с нормальным гофром, у которого волна гофрированного листа направлена по его диаметру.

Рис. 4. **Установленные с отступлением от норм бетонные лотки в трубчатых водопропускных переходах из МГК:** а – «ViaCon Ukraine», 2010 г.; б – ООО «Инженерно-экологическая защита», 2006 г. [3]

В качестве дополнительного защитного покрытия для спиральновитых гофрированных труб в настоящее время в РФ используется только HDPE, которое при 4-м повышенном уровне абразивного воздействия водного потока не обеспечивает надежную защиту гофрированной поверхности от разрушения (рис. 5) [3].

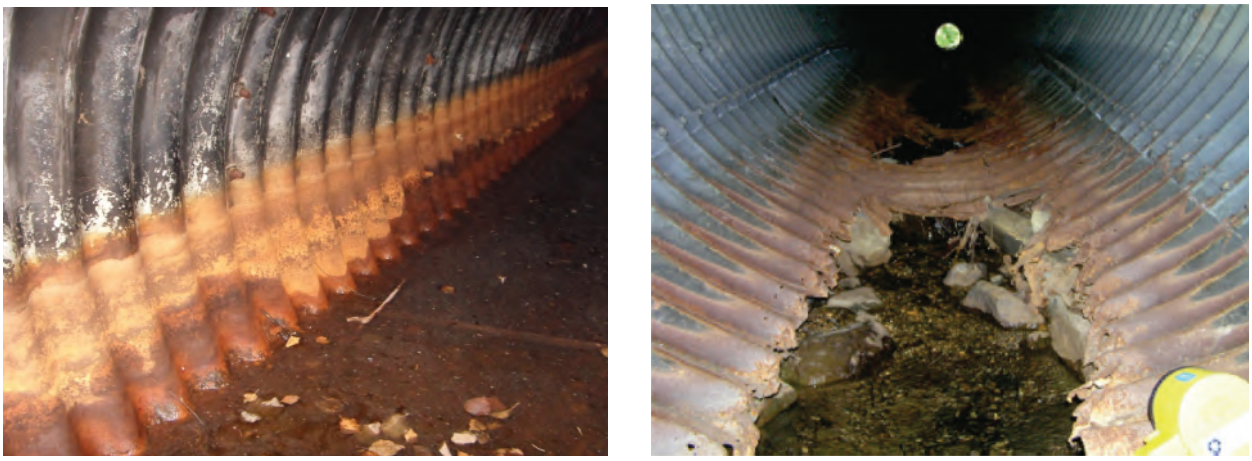

Рис. 5. **Примеры коррозии незащищённой поверхности МГТ, ускоренной истиранием, Caltrans, США, 2013 г.** [3]

Гофрированная труба с защитным бетонным лотком по дну с точки зрения гидравлики занимает промежуточное положение между гладкой и гофрированной трубами. При малых наполнениях водный поток находится внутри лотка, и её можно считать гладкой. С увеличением расхода поток выходит за пределы лотка на гофрированную поверхность, и часть смоченного периметра имеет повышенную шероховатость. При этом с увеличением наполнения трубы доля смоченного периметра с гофрированной поверхностью возрастает, и поэтому коэффициент шероховатости увеличивается. Это сказывается на сопротивлении, испытываемом водным потоком, и наполнении трубы.

В настоящее время в нашей стране в качестве расчетного гидравлического режима, на который рассчитывается гофрированная труба при пропуске расчетного расхода, принимается безнапорный режим. При этом ограничивается максимальное заполнение трубы, которое наблюдается на входе [2–4]. В настоящее время ни в нашей стране, ни за рубежом нет методики гидравлического расчета водопропускных труб из гофрированного металла с гладким защитным бетонным лотком по дну. Поэтому в МАДИ проводятся исследования металлических гофрированных труб с нормальной и спиральной формами гофра, имеющими гладкий защитный лоток по дну, в ходе которых изучаются условия их гидравлической работы (подробное описание исследуемых моделей приводится в литературе [1, 2]).

Результаты исследований. Одним из основных параметров, устанавливаемых

в результате выполнения гидравлического расчета водопропускной трубы при безнапорном движении водного потока в ней, является глубина на её выходе ($h_{вых}$). По величине $h_{вых}$ рассчитывается скорость на выходе, устанавливаются вид и размеры крепления. Глубина в выходном отверстии зависит от величины пропускаемого расхода, уклона трубы, её шероховатости, а при коротких трубах – и от входных условий [1, 2, 5]. При уклоне трубы, меньшем критического уклона ($i_т < i_к$), глубины на выходе определяются в долях от критической глубины ($h_{вых}/h_к = K_1$), а при $i_т > i_к$ глубина на выходе может устанавливаться как в долях от нормальной глубины ($h_{вых}/h_0 = K_2$), так и от критической глубины (по K_1) [5].

Определять глубину на выходе из гофрированной трубы с защитным лотком по дну по коэффициенту K_2 сложно ввиду необходимости знать, каким образом коэффициент шероховатости зависит от наполнения трубы и от её уклона. Более удобно при любом уклоне водопропускной трубы устанавливать глубину на её выходе по коэффициенту K_1. Выполненные исследования позволили получить значения коэффициентов K_1 для МГТ без входного оголовка с нормальной формой гофра и защитным лотком по дну, а также для СМГТ без входного оголовка с защитным лотком по дну и без него. По результатам выполняемых исследований установлено, что K_1 зависит от вида гофра, наличия гладкого лотка, уклона трубы и безразмерного параметра расхода $\theta = Q \big/ \sqrt{g} d_D^{5/2}$. Для оценки влияния всех этих факторов на относительную глубину на выходе из гофрированной трубы $h_{вых}/d$ были выполнены расчеты коэффициентов K_1 для исследованных моделей при параметре расхода $q = 0{,}3$, соответствующем работе трубы без оголовка в безнапорном режиме с максимально допустимой в нашей стране степенью заполнения её входного сечения ($h_{вх}/d = 0{,}75$). Полученные коэффициенты K_1 пересчитаны на относительные глубины $h_{вых}/d$. Расчеты выполнены для исследованных уклонов гофрированных труб. Результаты расчетов приведены в таблице, в которой также указаны относительные глубины, рассчитанные по зависимости, рекомендуемой нормами, для установления глубин на выходе из МГТ как с защитным лотком по дну, так и без него, и полученной ЦНИИС по результатам экспериментальных исследований МГТ с нормальным гофром без защитного лотка по дну [4, 6, 7].

Таблица

Значения относительных глубин на выходе из МГК при различных уклонах труб

Рекомендации	$h_{вых}/d$ при различных уклонах трубы $i_т$		
	$i_т = 0{,}01$	$i_т = 0{,}03$	$i_т = 0{,}05$
МГТ с защитным лотком по дну	0,369	0,307	0,254
ЦНИИС для МГТ с защитным лотком по дну и без него	0,416	0,371	0,354
СМГТ без защитного лотка по дну	0,38	0,349	0,341
СМГТ с защитным лотком по дну	0,375	0,314	0,278

Приведенные в таблице результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Относительная глубина на выходе из гофрированной трубы зависит от уклона трубы и с его увеличением $h_{вых}/d$ уменьшается.

2. Наличие защитного лотка по дну приводит к уменьшению относительной глубины на выходе из гофрированной трубы при $i_т = 0{,}03$ и $i_т = 0{,}05$.

3. При $i_т = 0{,}01$ относительная глубина на выходе не зависит от наличия защитного лотка по дну и практически одинакова для нормального и спирального гофра.

4. Распространение рекомендации ЦНИИС, полученной при исследовании МГТ без защитного лотка по дну, на МГТ с защитным лотком по дну приводит к завышению $h_{вых}/d$ и занижает скорости на выходе.

5. Относительные глубины на выходе из МГТ и СМГТ с защитным лотком по дну при всех уклонах достаточно близки, но все же на выходе из СМГТ величина $h_{вых}/d$ несколько выше, в особенности при уклоне $i_т = 0{,}05$.

6. Увеличение уклона гофрированной трубы с защитным лотком по дну приводит к более существенному уменьшению значений $h_{вых}/d$, чем гофрированной трубы без защитного лотка по дну.

Анализ сформулированных выводов свидетельствует о том, что действительные

глубины на выходе из гофрированной трубы с защитным лотком по дну заметно меньше глубин, рассчитанных по существующим нормативным рекомендациям, разработанным ЦНИИС на основе проведенных в 1976 г. экспериментальных гидравлических исследований [6, 7]. При уклоне трубы $i_т$ = 0,05 расхождение является максимальным и составляет 39,4%. Поэтому действительные скорости на выходе из гофрированной трубы с защитным лотком по дну оказываются существенно выше тех, которые получаются в результате расчета по существующим методическим рекомендациям. Расчеты показывают, что при $i_т$ = 0,05 это увеличение составляет 58%. Таким образом, в реальных условиях размывающая способность потока на выходе из МГТ с защитным бетонным лотком по дну получается выше, следовательно, подобранная по заниженным скоростям конструкция водобоя, рисбермы и концевого устройства может не обеспечить защиту от размыва в нижнем бьефе и отводящем канале за сооружением.

Выводы

По результатам исследований водопропускных труб из гофрированного металла можно сделать следующие выводы:

1. Использование конструкции спиральновитых металлических труб в качестве водопропускных сооружений на водных объектах без полимерного покрытия и устройства гладкого лотка по дну представляется нерациональным, как с точки зрения надёжности работы, так и условий пропуска расхода водотока.

2. Для обеспечения нормативной долговечности (не менее 50 лет) инновационных конструкций круглых водопропускных труб из гофрированного металла с нормальным и спиральным гофром, работающих в условиях повышенной агрессивности внешней среды, при 4-м повышенном уровне абразивного воздействия водного потока, внутри трубы по её дну обязательно должен укладываться защитный бетонный лоток толщиной не менее 7,5 см и занимающий сегмент с центральным углом не менее 90°.

3. Наличие защитного бетонного лотка приводит к уменьшению относительной глубины на выходе из трубы и увеличению скорости на выходе по сравнению с существующими рекомендациями, разработанными для гофрированных труб без защитного бетонного лотка по дну (максимальное увеличение скорости достигает 58% при $i_т$ = 0,05).

4. Для установления относительных глубин на выходе ($h_{вых}/d$) из МГТ и СМГТ без входного оголовка со срезом перпендикулярным оси трубы с защитным бетонным лотком по дну при безнапорном режиме работы с максимально допустимой степенью заполнения трубы на входе ($h_{вх}/d$ = 0,75) следует использовать данные, приведенные в таблице, полученные в ходе современных экспериментальных гидравлических исследований.

Библиографический список

1. **Алтунин В.И.** Долговечность дорожных водопропускных труб из гофрированного металла / В.И. Алтунин, О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко // Дороги и мосты. – 2016. – Вып. 34/1. – С. 234–247.
2. **Алтунин В.И., Черных О.Н., Федотов М.В.** Водопропускные трубы в транспортном строительстве. Гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур. – М.: МАДИ, 2012. – 269 с.
3. **Алтунин В.И., Черных О.Н., Федотов М.В.** Водопропускные сооружения транспортных магистралей из металлических гофрированных структур. – М.: МАДИ, 2016. – 304 с.
4. 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.: ФДА (РОСАВТОДОР), 2009. – 200 с.
5. **Алтунин В.И., Черных О.Н.** Гидравлические условия работы нижних бьефов гофрированных водопропускных труб // Природообустройство. – 2013. – № 5. – С. 40–43.
6. **Алтунин В.И., Черных О.Н., Бурлаченко А.В.** Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме // Приволжский журнал. – 2015. – № 1. – С. 28–36.
7. **Алтунин В.И., Черных О.Н., Бурлаченко А.В.** Повышение эффективности гидравлической работы дорожных водопропускных труб /// Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

Материал поступил в редакцию 22.05.2016.

Сведения об авторе

Бурлаченко Алена Владимировна, специалист САО Mercedes-Benz; 125167 Москва, Ленинградский пр-т, 39; тел.: 8(499)6180514; e-mail: a.burlachenco@dimler.com.

A.V. BURLACHENCO
SAO Mercedes-Benz, Moscow

RELIABILITY ENHANCEMENT OF INNOVATION STRUCTURES OF WATER CULVERT PIPES

There are considered the results of experimental researches of corrugated metal culvert with a high abrasion resistance. To protect metal pipes of corrugated structures from corrosion damage and ensure normative durability, at the factory shop zinc and sometimes polymer coating are applied on the internal and external surfaces. However, the operating experience has shown that under the conditions of high aggressiveness of the passing flow it is not enough for a safe and reliable operation of the culvert. Design standards specify the necessity of installation of a tray in the bottom area of such pipes which is not always fulfilled in their construction and design. There are found basic factors that determine the depth and speed of the water flow at the outlet of the tubular structures made of corrugated metal. It is established that the availability of the protective concrete tray leads to decreasing of the relative depth on the outlet of such pipes and increasing the speed in the outlet cross-section in comparison with the existing recommendations developed for corrugated pipes without protective concrete tray along the bottom. The values of actual depths on the outlet of the corrugated pipe with a protective tray on the bottom are evidently less than the depths designed according to the existing standard recommendations. It is noted that the absence of a tray in similar innovation tubular crossings on the transport main lines of any category is not permitted and leads to a sharp worsening of the operational reliability and durability of tubular water culvert structures of metal corrugated elements.

Metal corrugated water culvert pipes, abrasive resistance, experimental researches, non-pressure and semi-pressure regimes of operation, smooth tray, coefficient of roughness.

References

1. **Altunin V.I.** Dolgovechnostj dorozhnyh vodopropusknyh trub iz gofrirovannogo metalla / V.I. Altunin, O.N. Chernykh, A.V. Burlachenco // Dorogi I mosty. – 2016. – Vyp. 34/1. – S. 234–247.
2. **Altunin V.I., Chernykh O.N., Fedotov M.V.** Vodopropusknye truby v transportnom stroiteljstve. Gidravlicheskaya rabota trub iz metallicheskih gofrirovannyh struktur. – M.: MADI, 2012. – 269 s.
3. **Altunin V.I., Chernykh O.N., Fedotov M.V.** Vodopropusknye sooruzheniya transportnyh magistralej iz metallicheskih gofrirovannyh struktur. – M.: MADI, 2016. – 304 s.
4. ODM 218.2.001–2009 «Recomendatsii po proektirovaniyu i stroiteljstvu vodopropusknyh sooruzhenij iz metallicheskih gofrirovannyh struktur na avtomobiljnyh dorogah obshchego poljzovaniya s uchetom regionaljnyh uslovij (Dorozhno-klimaticheskih zon». – M.: FDA (ROSAVTODOR), 2009. – 200 s.
5. **Altunin V.I., Chernykh O.N.** Gidravlicheskiye usloviya raboty nizhnih bjefov gofrirovannyh vodopropusknyh trub // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 5. – S. 40–43.
6. **Altunin V.I., Chernykh O.N., Burlachenko A.V.** Experimentaljnye issledovaniya metallicheskoj gofrirovannoj vodopropusknoj truby pri chastichno-napornom rezhime//Privolzhskij zhurnal.–2015.–№1.–S.28–36.
7. **Altunin V.I., Chernykh O.N., Burlachenko A.V.** Povyshenie effectivnosti gidravlicheskoj raboty dorozhnyh vodopropusknyh trub // Prirodoobustrojstvo. – 2016. – № 2. – P. 42–46.

The material was received at the editorial office 22.05.2016.

Information about the author

Burlachenco Alena Vladimirovna, specialist SAO Mercedes-Benz; 125167, Moscow, Leningradsky pr-t, 39; tel.: 8(499)618054; e-mail: a burlachenco@dimler.com.