

УДК 502/504:621.644:532.54

О. Н. ЧЕРНЫХ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

В. И. АЛТУНИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва

А. В. БУРЛАЧЕНКО

САО Mercedes-Benz, г. Москва

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

Приведены результаты гидравлических исследований спиральновитой металлической гофрированной трубы (СМГТ). Рассматривается ее работа в различных гидравлических режимах, даются рекомендации по назначению расчетного режима. Отмечается, что гофрированные металлические трубы можно проектировать на пропуск максимального расхода в частично-напорном и напорном режимах. Отмечены особенности механизма смены гидравлических режимов работы в гладких и гофрированных трубах. Выполненные экспериментальные гидравлические исследования модели металлической гофрированной трубы с $d = 1,2$ м без входного оголовка со срезом, перпендикулярным оси трубы, со спиральным гофром размером 125x25 мм позволяют сделать следующие выводы. Проведенные исследования позволили получить значения параметров расхода, при которых происходит «зарядка» исследованной модели СМГТ при различных ее уклонах. На экспериментальной модели установлено, что СМГТ самопроизвольно заряжается и устойчиво работает сначала в частично-напорном режиме, который затем плавно сменяется напорным режимом. Получена зависимость для определения длины конечного безнапорного участка СМГТ, работающей в частично-напорном режиме.

Спиральновитая металлическая гофрированная водопропускная труба, экспериментальные исследования, гидравлические режимы работы, коэффициент шероховатости.

Введение. В современных условиях интенсификации транспортных потоков очень важно при строительстве транспортных магистралей обеспечивать их безопасную и бесперебойную работу [1, 3]. Неотъемлемой составной частью любой автомобильной дороги являются дорожные водопропускные сооружения, которые обеспечивают пропуск поверхностных вод под насыпью дороги. В подавляющем большинстве своем это дорожные водопропускные трубы.

Наряду с традиционными бетонными трубами в настоящее время все большее применение при строительстве новых и особенно при реконструкции старых автомобильных и железных дорог находят металлические гофрированные трубы (МГТ) (рис. 1). В немалой степени это связано с появлением возможности использовать в РФ начиная с 2008 г., инновационных конструкций МГТ со спиральной формой гофра.



а



б

Рис. 1. Водопропускные сооружения из металлических гофрированных конструкций: а – замена железобетонного моста на металлическую гофрированную трубу (МГТ), ЗАО Гоффросталь; б – спиральновитая металлическая труба (СМГТ)

Спиральновитые металлические гофрированные трубы (СМГТ) отличаются от традиционных МГТ с нормальным гофром тем, что волна гофрированного листа у них направлена не по диаметру, как у МГТ, а составляет острый угол с ним. Они выпускаются секциями любой длины от 1 м до 13,5 м по желанию заказчика и соединяются на бандажах. Поэтому из СМГТ исключена утечка воды, а собранная за 1,5–2 часа труба длиной до 27 м имеет повышенную жесткость. Относительная легкость конструкции позволила использовать гофрированные структуры при выполнении капитального ремонта водопропускных труб методом гильзования без вскрытия земляной насыпи и остановки движения транспортного потока. Замена бетонной водопропускной трубы осуществляется без ее демонтажа путем вставки меньшей по размеру гофрированной трубы. Пространство между трубами заполняется раствором бетона и получается практически новая водопропускная труба с нормативным сроком безаварийной эксплуатации не менее 50...70 лет [2].

Согласно действующему в России с 2009 г отраслевому дорожно-методическому документу (ОДМ) [1] водопропускные трубы из металлических гофрированных конструкций на автомобильных дорогах постоянного использования должны проектироваться на пропуск расчетного расхода в безнапорном режиме. При этом между поверхностью потока в трубе диаметром до 3,0 м и шельгой ее свода должен сохраняться зазор не менее j отверстия трубы в свету, а в трубах диаметром более 3,0 м – не менее 0,75 м. Кроме того, рекомендуется ограничивать заполнение входного и выходного сечений МГТ при пропуске как расчетного, так и наибольшего расходов в безнапорном режиме. Величина заполнения водопропускного отверстия не должна превышать соответственно 0,75 и 0,9 от высоты МГТ. Работа МГТ в полунапорном или напорном (частично-напорном) режимах нормами допускается [1], но только при их устройстве на временных автомобильных дорогах. Такой подход объясняется опасением разработчиков ОДМ того, что при смене полунапорного режима напорным режимом, называемым «зарядкой», в гофрированной трубе сформируется переходный гидравлический режим, как это происходит в гладких водопропускных трубах. При переходном режиме обычная

гладкостенная водопропускная труба работает в неудовлетворительных гидравлических условиях, поскольку в трубу поступает воздух и наблюдается нестационарное движение, как в самой трубе, так и на выходе из нее.

Работа любых водопропускных труб в переходном режиме справедливо считается недопустимой. Однако перенос условий гидравлической работы гладкостенных труб на гофрированные трубы при «зарядке», выполнен составителями ОДМ без какого-либо обоснования, что нельзя считать корректным и оправданным. Не смотря на то, что нормами [1] допускается работа водопропускных МГТ при пропуске расчетного расхода в полунапорном и напорном режимах (например, если они устраиваются на временных автомобильных дорогах), но не приводятся рекомендации по выполнению гидравлического расчета при этих режимах.

Материалы и методы исследований.

Учитывая отмеченные выше особенности в лаборатории кафедры гидравлики МАДИ проводятся экспериментальные гидравлические исследования модели СМГТ с внутренним диаметром $d = 240$ мм и гофром 25×5 мм (угол спиральности $\varphi = 9^\circ 21'$), которая в масштабе 1:5 моделирует натурную трубу $d = 1200$ мм с гофром 125×25 мм [9]. Исследуемая модель трубы состоит из четырех секций, соединяемых на фланцах с общей длиной $l = 408$ см с различными уклонами $i_t = 0,01...0,05$. Вход в СМГТ выполнен без оголовка со срезом, перпендикулярным оси трубы (рис. 2), а на выходе устроена порталная стенка. Моделирование СМГТ проводится по Фрудру с назначением масштаба модели из условия обеспечения при напорном движении водного потока квадратичной области сопротивления с диаметром трубы при этом не менее 20 см, поскольку согласно исследованиям ЦНИИС [9], при меньшем размере модели МГТ на гидравлические сопротивления начинает влиять размер модели, т. е. начинает сказываться масштабный эффект. Секции СМГТ в натуральных условиях соединяются на бандажах, поэтому концевые участки секций труб обычно выполняются с нормальной формой гофра. Экспериментальная модель на концевых участках имела три длины волны нормального гофра 68×13 мм ($13,54 \times 2,54$ мм при масштабе 1:5). В качестве расчетного диаметра исследованной модели СМГТ принимался минимальный внутренний диаметр в свету. Для

регистрации поверхности воды в трубе при безнапорном движении и пьезометрического давления в различных сечениях по длине трубы при напорном, по ее дну между выступами гофров (у внешнего диаметра), были установлены пьезометры.

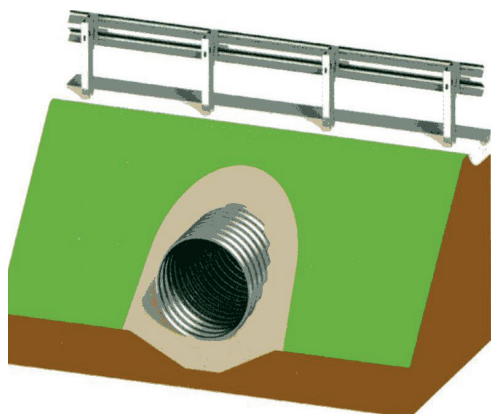


Рис. 2. Общий вид водопропускной металлической гофрированной трубы диаметром 1,5 м из листа толщиной 1,5...3 мм со спиральновитым гофром

Подводящий и отводящий к трубе лотки имели прямоугольную форму и выполнялись из оргстекла. Уровни свободной поверхности воды перед трубой и за ней регистрировались с помощью мерной иглы. Расходы Q измерялись треугольным водосливом Томсона с тонкой стенкой. Обработка опытных данных осуществлялась с помощью специально разработанной компьютерной программы [3].

Результаты исследований. Исследования показали, что модель СМГТ самопроизвольно «заряжается» и устойчиво работает сначала в частично-напорном режиме, который затем плавно сменяется напорным режимом. Вследствие повышенных сопротивлений по длине МГТ ее пропускная способность после «зарядки» существенно не увеличивалась. Поэтому уменьшение напора H перед трубой после «зарядки» не приводило к оголению входного оголовка, поступлению в трубу воздуха и формированию переходного гидравлического режима даже при максимально допустимом уклоне ($i_t = 0,05$) по действующим рекомендациям [1].

Следует отметить, что после «зарядки» над входом без оголовка формировалась устойчивая воронка переменной интенсивности, через вихревой шнур

которой в трубу поступал воздух. Однако это не нарушало устойчивость напорного движения водного потока в трубе и практически не оказывало влияние на ее пропускную способность.

Как известно, в гладкой трубе с обычными типами входного оголовка при таких условиях происходит отрыв потока от стенок трубы и формирование переходного гидравлического режима. В трубе наблюдается гидравлический прыжок, занимающий различное положение в зависимости от интенсивности вихревой воронки, определяющей количество поступающего в трубу воздуха. При работе гладкой трубы с неподтопленным выходным отверстием гидравлический прыжок «выскакивает» из трубы, происходит ее «разрядка» и срыв напорного режима. Труба начинает работать в полунапорном режиме, при котором пропускная способность гладкостенной трубы существенно снижается. Поэтому увеличивается напор H , обеспечивающий пропуск поступающего в трубу расхода Q , что приводит к переливу воды через дорожную насыпь, если в качестве расчетного принят напорный режим. В результате происходит разрушение дорожной насыпи, конструкция которой не предусматривает перелив через нее водного потока. При этом нарушается гидрологическая и техническая безопасность всего водопропускного комплекса и движения автотранспорта на магистрали, что приводит к значительному материальному ущербу.

Все вышеописанное объясняется пониженными гидравлическими сопротивлениями по длине в гладкой трубе и сжатием потока на ее входе. Поэтому на входном участке гладкой трубы формируется вакуумметрическое давление, которое меняется при попадании в трубу воздуха через вихревую воронку. Вихревые воронки нарушают устойчивость напорного режима в гладкой трубе, снижают ее пропускную способность и даже приводят к срыву напорного режима. Проектировать гладкие бетонные трубы на работу в напорном режиме вследствие этого не следует.

Как показывают эксперименты, попадание воздуха в исследуемую модель СМГТ через вихревую воронку не приводит к вышеописанным негативным по-

следствиям. Объясняется это тем, что в ней не формируется вакуумметрическое давление на входе вследствие повышенного гидравлического сопротивления гофрированной поверхности трубы. Эксперименты показали, что для исследуемой модели СМГТ диаметром 1,2 м с гофром размером 125x25 мм величину коэффициента шероховатости при напорном движении водного потока можно принимать равной $n = 0,027$ [2] Это заметно выше рекомендуемого в справочнике [4] значения $n = 0,022$ для трубы с таким же нормальным гофром и диаметром. Такое существенное расхождение (~22,7 %) свидетельствует о том, что в существующих зарубежных рекомендациях [4], где приводятся заметно меньшие величины коэффициентов шероховатости по сравнению с реальными величинами, данные не обоснованы экспериментальными гидравлическими исследованиями. Для СМГТ с гофром 125x25 мм при диаметрах $d > 1,2$ м угол спиральности уменьшается по сравнению с исследованным ($\varphi = 9^{\circ}21'$). Это может привести к некоторому увеличению значений коэффициента шероховатости [3]. Однако, учитывая, что уменьшение φ небольшое (не более 5°) значение коэффициента шероховатости для труб с $d > 1,2$ м можно принимать таким же, то есть $n = 0,027$, до получения достоверных экспериментальных данных.

Проведенные исследования позволили получить значения параметров расхода $\theta = Q / d^2 \sqrt{gd}$, при которых происходит «зарядка» исследованной модели СМГТ ($\theta_{зар}$) при различных ее уклонах. Так при $i_T = 0,01; 0,02; 0,03$ и $0,05$ величины $\theta_{зар}$ оказались соответственно равными 0,515; 0,58; 0,634 и 0,756 (рис. 3).

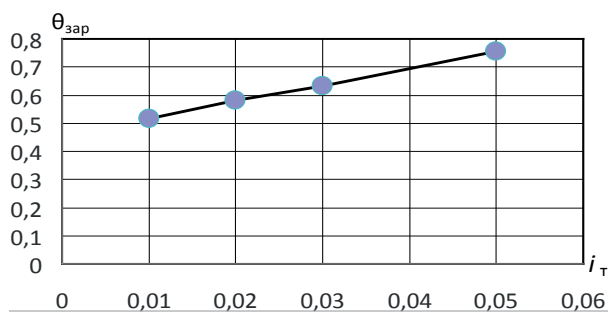


Рис. 3. График зависимости $\theta_{зар} = f(i_T)$ для исследованной модели СМГТ с входом без оголовка со срезом, перпендикулярным оси трубы

Зависимость $\theta_{зар}$ от уклона трубы i_T с достаточной точностью (максимальная ошибка не превышает 1 %) описывается следующей линейной зависимостью:

$$\theta_{зар} = 0,46 + 6 i_T. \quad (1)$$

Как отмечалось выше, после «зарядки» исследованной модели СМГТ происходит небольшое уменьшение относительного напора (H/d) перед трубой, зависящее от ее уклона. С увеличением i_T возрастают значения $\theta_{зар}$ и $(H/d)_{зар}$ и большим оказывается снижение. Так при максимально допустимом уклоне СМГТ $i_T = 0,05$ «зарядка» наступает при $\theta_{зар} = 0,756$ и $(H/d)_{зар} = 1,85$. После «зарядки» относительный напор снижается до $H/d = 1,45$. При уклоне трубы $i_T = 0,03$ после «зарядки», наступающей при $(H/d)_{зар} = 1,49$, относительный напор снижается весьма незначительно (до $H/d = 1,4$). При исследованных уклонах $i_T = 0,02$ и $0,01$ уменьшения напора перед трубой после «зарядки» практически не происходит.

После «зарядки», исследованная модель СМГТ на большей части своей длины работает полным сечением, но на конечном участке трубы наблюдается безнапорное движение (рис. 4). Такой режим называется частично-напорным. Расчет пропускной способности трубы при этом режиме выполняется по тем же формулам, что и при напорном режиме при отсутствии подтопления ее выходного отверстия [3], но расчетная длина гофрированной трубы уменьшается на длину конечного безнапорного участка l_k [5]. С увеличением параметра расхода θ относительная длина конечного безнапорного участка l_k/d уменьшается.

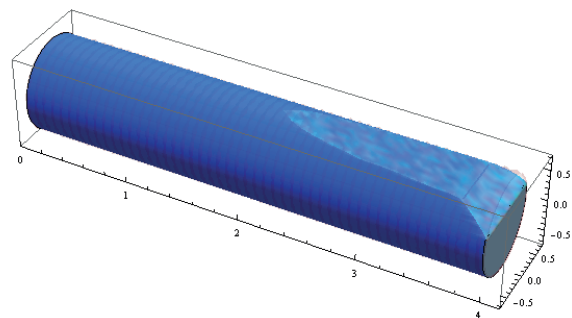


Рис. 4. 3D модель движения водного потока в исследованной модели СМГТ при частично-напорном режиме с конечным безнапорным участком

Определить относительную длину l_k/d после «зарядки» исследованной конструкции СМГТ вне зависимости от ее уклона можно по зависимости:

$$l_k/d = 4,5 - 4,1\theta. \quad (2)$$

При $\theta \geq 1,1$ длину концевой безнапорного участка следует принимать равной нулю, то есть считать, что в трубе на всей длине движение напорное и она работает в напорном режиме с незатопленным выходным отверстием.

Выводы

Выполненные экспериментальные гидравлические исследования модели металлической гофрированной трубы с $d = 1,2$ м без входного оголовка со срезом, перпендикулярным оси трубы, со спиральным гофром размером 125x25 мм позволяют сделать следующие выводы:

спиральновитая металлическая гофрированная труба самопроизвольно «заряжается» и устойчиво работает в частично-напорном режиме, который плавно сменяется напорным режимом; СМГТ можно проектировать на работу в полунапорном, частично-напорном и напорном гидравлических режимах;

«зарядка» исследованной СМГТ происходит достаточно плавно при параметре расхода $\theta_{зар}$, устанавливаемом по зависимости (1), даже при максимально допустимом ее уклоне $i_t = 0,05$; после «зарядки» СМГТ работает в частично-напорном режиме с концевым безнапорным участком, относительная длина которого устанавливается по предлагаемой зависимости (2).

Библиографический список

1. «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (Дорожно-климатических зон).

ОДМ 218.2.001-2009. – М.: ФДА (РОСАВТОДОР), 2009. – 200 с.

2. Алтунин В. И. О гидравлическом расчете дорожных водопропускных труб из гофрированного металла/ В. И. Алтунин, О. Н. Черных // ДОРОГИ и МОСТЫ. – 2015. – № 33/1. – С. 234–247.

3. 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.

4. Modern Sewer Design. AISI, Washington, fourth edition 1999.

5. 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.

Материал поступил в редакцию 28.11.2015.

Сведения об авторах

Черных Ольга Николаевна, кандидат технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 г. Москва, ул. Большая Академическая, д.44; тел. 8 (499) 190-53-43; e-mail: gtsmgup@mail.ru.

Алтунин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика»; ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»; 125319, Москва, Ленинградский проспект, д.64.; тел.: 8 (499) 155-03-16; e-mail: chtara@mail.ru.

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

O. N. CHERNYKH

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

V. I. ALTUNIN

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow automobile-road state technical university (MADI)», Ivanovo

A. V. BURLACHENCO

SAO Mercedes-Benz, Moscow

INCREASE OF EFFECTIVENESS OF THE HYDRAULIC OPERATION OF ROAD CULVERT PIPES

There are given results of hydraulic researches of spiral metal corrugated pipe (SMGT). Its operation is examined in different hydraulic regimes, there are given recommendations on assigning a rated regime. It is noted that corrugated metal pipes can be designed on maximal consumptions in partially-pressurized and pressurized regimes. There are noted peculiarities of the mechanism of the change of hydraulic regimes of operation in smooth and corrugated pipes. The fulfilled experimental hydraulic researches of the model of the metal corrugated pipe with $d = 1,2$ m without inlet headwall with a cut perpendicular to the pipe axis, with a spiral corrugation of a size 125x25 mm allow draw the following conclusions. The performed investigations allowed obtain values of consumption parameters under which "charging" of the investigated model SMGT takes place under its different inclinations. On the experimental model it is established that SMGT spontaneously is charged and steadily operates at first in the partially-pressurized regime which then is smoothly changed by a pressurized regime. There is obtained dependence for determination of the length of the end non-pressure part of SMGT operating in the partially-pressurized regime.

Spiral metal corrugated culvert pipe, experimental researches, hydraulic regimes of operation, coefficient of roughness.

References

1. Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitelstvu vodopropusknyh sooruzhenij iz metallicheskih gofrirovannyh struktur na avtomobilnyh dorogah obshhego poljzovaniya s uchetom regionalnyh uslovij (Dorozhno-climaticheskikh zon). ODM 218.2.001-2009. – M.: FDA (ROSAVTODOR), 2009. – 200 s.
2. Altunin V. I. O vodopropusknyh trub raschete dorozhnyh vodopropusknyh trub iz gofrirovannogo metalla / V.I. Altunin, O.N. Chernyh // DROGI i MOSTY. – 2015. – № 33/1. – S. 234–247.
3. Altunin V. I. Vodopropusknye truby v transportnom stroitelstve. Hydravlicheskaya rabota trub iz metallicheskih gofrirovannyh struktur / V.I. Altunin, O.N. Chernyh, M.V. Fedotov. – M.: MADI, 2012. – 240 s.
4. Modern Sewer Design. AISI, Washington, fourth edition 1999.
5. Altunin V. I., Chernyh O. N., Burlachenko A. V. Experimentalnye issledovaniya metallicheskih gofrirovannoi vodopropusknoi truby pti chastichno-napornom

rezhime. // Privolzhsky zhurnal. – 2015. – № 1. – S.28–36.

Received on 28.11.2015.

Information about the authors

Chernyh Olga Nikolaevna, candidate of technical sciences, professor of the chair «Hydraulic structures» FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550 Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, 44; tel. : +7 (499) 190-53-43; e-mail: gtsmgup@mail.ru.

Altunin Vladimir Iljich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Hydraulics» FSBEI HE «The Moscow automobile-road state technical university (MADI)»; 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64.; tel.: 8 (499) 155-03-16; e-mail: chtara@mail.ru.

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