

Шполянский Юлий Борисович, кандидат технических наук, генеральный директор
Тел. 8 (499) 493-51-32
Новиков Сергей Прокопьевич, старший научный сотрудник
Тел. 8 (495) 492-95-41

E-mail: NSP@niies.ru
Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора ЗАО «ИЦ СКТЭ»
Тел. 8-926-015-19-59
E-mail: Lisichkin1989@rambler.ru

УДК 502/504:532.5:621.64

В. И. АЛТУНИН, А. В. БУРЛАЧЕНКО

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

О. Н. ЧЕРНЫХ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

К ВОПРОСУ ВЫБОРА РАСЧЕТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

Приведены результаты экспериментальных гидравлических исследований моделей дорожной водопропускной трубы, выполненной из гофрированного металла с гладким лотком по дну. Дана оценка изменению пропускной способности водопропускной трубы при ее «зарядке», после которой на части длины она начинает работать полным сечением. Рассмотрена устойчивость работы труб в полунапорном и напорном режимах.

Металлические гофрированные трубы, гидравлические сопротивления, безнапорный, полунапорный и напорный режимы, гладкий лоток по дну, модельные исследования, коэффициент шероховатости, пропускная способность.

In this article there are described the results of experimental hydraulic researches of road culvert pipe models made of corrugated metal with a smooth tray on the bottom. The assessment of the capacity change of the culvert pipe is given under its «charging» after which the culvert begins to work on a part of its length with a full-cross section. There is investigated the stability of pipes operation in a half pressure and full pressure modes.

Metal corrugated pipes, hydraulic resistance, free-flow, half pressure and pressure modes, smooth tray on the bottom, model researches, roughness coefficient, capacity.

Примером инновационного конструктивного решения при организации систем поверхностного дорожного водоотвода в современных условиях является применение металлических гофрированных труб (МГТ). Грамотное их использование при проектировании дорог обеспечивает высокий уровень конструктивных решений, позволяет получить более экономичные (на 30...60 %) и разнообразные транспортные сооружения в сравнении с традиционными

сооружениями из бетонных труб, малыми мостами, путепроводами, что в конечном итоге увеличивает долговечность водопропускных труб при сохранении высоких потребительских свойств. Бесперебойное функционирование водоотводных каналов и малых водотоков с металлическими гофрированными трубами, простых в эксплуатации и обеспечивающих хорошее водоотведение, объясняет то, что в странах с развитой сетью автомобильных дорог такие трубы

составляют более половины всех дорожных водопропускных сооружений (рис. 1) [1].



Рис. 1. Водопропускное сооружение из металлической гофрированной трубы без оголовка со спиральной формой гофра

В России функционируют предприятия, обеспечивающие выпуск практически всего многообразия металлических гофрированных труб, используемых в мире. Во-первых, это гофры размером 130 x 32,5 мм, применяемые только в нашей стране, именно с них началось использование гофра в СССР в 70-х годах XX века, а также размерами 68 x 13 мм, 76 x 25 мм, 102 x 25 мм, 152 x 51 мм и т. д., используемые за рубежом. Во-вторых, наряду с круглыми гофрированными трубами в настоящее время достаточно широко используются трубы не круглого поперечного сечения (эллипсоидные горизонтальные и вертикальные), полигональные различного очертания, арочные с гофрированным дном и без него, грушевидные и др.). В-третьих, наряду с нормальным гофром, у которого волна гофрированного листа с осью трубы составляет прямой угол $\varphi = 90^\circ$, используются спиральновитые металлические гофрированные трубы, имеющие $\varphi < 90^\circ$ (см. рис. 1). Между нормальными и спиральновитыми металлическими гофрированными трубами имеется существенное конструктивное отличие: нормальные металлические гофрированные трубы собираются на месте из отдельных конструктивных элементов на болтах, спиральновитые – изготавливаются цельными секциями, как бетонные трубы, а соединяются на месте с помощью бандажей.

Поэтому фильтрационные утечки из спиральновитых металлических гофрированных труб практически отсутствуют, а наличие угла спиральности уменьшает гидравлическое сопротивление, испытываемое водным потоком.

Поскольку дорожные водопропускные трубы обеспечивают пропуск поверхностных вод постоянных и временных водотоков под насыпью автомобильных и железных дорог, то их размер, величина напора H в верхнем бьефе перед трубой, глубина и скорость в трубе и на выходе из нее назначаются на основании гидравлического расчета. Металлические гофрированные трубы имеют повышенную шероховатость, которая создает дополнительные гидравлические сопротивления в сравнении с гладкими бетонными трубами, величина которых зависит от формы и размера гофра, наличия и величины угла спирали гофра, формы поперечного сечения, условий гидравлической работы. Открытый водный поток обычно несет с собой малое или большое количество взвешенных частиц, оказывающих абразивное воздействие на донную часть таких труб, что приводит к достаточно быстрому ее разрушению. Для предотвращения этого на дно трубы укладывается бетонный, асфальтовый или асфальтобетонный гладкий лоток, занимающий сектор с центральным углом $\alpha = 90^\circ$ и 120° – в нашей стране, с углом $\alpha = 90^\circ$ и 180° – за рубежом [2, 3].

Все металлические гофрированные трубы, изготавливаемые в Российской Федерации, согласно нормативным рекомендациям, должны иметь гладкий лоток по дну [2]. В результате срок службы таких труб повышается примерно на 25 лет (в настоящее время составляет 50–70 лет) [4–7]. Если гладкий лоток делать съемным, то можно существенно увеличить нормативный срок, заменяя гладкий лоток по мере его износа.

В «Рекомендациях по проектированию и строительству труб из металлических гофрированных структур в Российской Федерации» на постоянно действующих автодорогах в качестве расчетного режима работы металлических гофрированных труб принимается безнапорный режим, при котором входной оголовок не затоплен и движение водного потока в трубе безнапорное (рис. 2) [2]. Между

поверхностью потока в трубе диаметром до 3,0 м и шельгой ее свода должен сохраняться зазор не менее 1/4 отверстия трубы в свету, а в трубах диаметром более 3,0 м – не менее 0,75 м. Кроме того, ограничивается заполнение входного и выходного сечений металлической гофрированной трубы при пропуске расчетного и наибольшего расходов в безнапорном режиме, которое не должно превышать 0,75 и 0,9 м от высоты такой трубы соответственно.

Подобные ограничения объясняются желанием сохранить безнапорный режим работы металлической гофрированной трубы и в том случае, если поступающий к сооружению расход несколько превысит расчетный расход. «Зарядка», переход к напорному режиму и работа в нем считаются опасными вследствие формирования вакуумметрического давления на входном участке трубы. Попадание воздуха в зону с вакуумметрическим давлением из-за недостаточного затопления входного оголовка либо через вихревые воронки, формирующиеся над входным оголовком, приводит к увеличению давления в трубе, снижению ее пропускной способности и формированию переходного режима. Движение воздуха по трубе в зависимости от типа входного оголовка происходит либо в виде воздушных пузырей, либо в процессе захватывания гидравлическим прыжком, формирующимся в трубе. При переходном режиме водопропускная труба испытывает динамическую вибрационную нагрузку. Кроме того, поступление в трубу воздуха может привести к «разрядке» металлической гофрированной трубы, т. е. срыву напорного режима, формированию полунапорного режима и увеличению напора H . Если при этом произойдет повторная «зарядка», то может сформироваться крайне нежелательный вид переходного режима, «сопровождающийся сменой полунапорного режима на напорный режим и обратно» [2]. Работа водопропускного сооружения в переходных режимах недопустима, поскольку «сопровождается резкими колебаниями уровня воды перед насыпью и вибрациями металлической гофрированной трубы, что сокращает срок ее службы» [2].

Описанные негативные последствия попадания в водопропускную трубу воз-

духа происходят только при условии наличия вакуумметрического давления на входном участке водопропускной трубы, работающей в напорном режиме. Результаты ранее выполненных в МАДИ экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что в металлических гофрированных трубах, которые укладываются с уклонами $i_t \leq 0,05$ и имеют повышенные гидравлические сопротивления по длине, вакуумметрическое давление на входе не формируется [1]. Однако оно может сформироваться в трубах с гладким лотком по дну, занимающих промежуточное положение между гладкими (бетонными) и гофрированными (металлическими) трубами.

Работа металлических гофрированных труб в полунапорном и напорном режимах при пропуске расчетного и максимального расходов в рекомендациях, разработанных ЦНИИС, все же допускается, но только при их установке на временных автодорогах (см. рис. 2) [2, 4]]. При этом необходимо:

- обеспечить герметичность всех стыковых соединений;

- применять входные оголовки только специальной конструкции;

- устраивать противодиффузионные экраны вокруг оголовков;

- обеспечивать фильтрационную устойчивость земляной насыпи и гарантированную надежность всей конструкции;

- укреплять русла на входе и выходе из металлической гофрированной трубы.

Выполнение перечисленных требований не позволяет избежать вышеописанных переходных режимов после «зарядки». Причина формирования переходных режимов заключается в том, что после «зарядки» водопропускной трубы и формирования напорного режима происходит резкое увеличение ее пропускной способности, уменьшение напора H перед ней при постоянном расходе до уровня, при котором в трубу начинает поступать воздух. Необходимым условием формирования переходного режима является резкое увеличение пропускной способности водопропускной трубы после ее «зарядки», поэтому такой режим, прежде всего, формируется в гладких бетонных водопропускных трубах. Составители рекомендаций из ЦНИИС,

очевидно, считают, что переходные режимы могут формироваться не только в гладких водопропускных трубах, но и в трубах с гладким лотком по дну и без него, но это требует экспериментального обоснования. Если же это происходит, то металлические гофрированные трубы достаточно быстро разрушаются как на постоянных автомобильных дорогах, так и на временных. Тот факт, что на временных автомобильных дорогах работа металлических гофрированных труб в полунапорном и напорном режимах все же допускается, можно объяснить тем, что у составителей

рекомендаций нет полной уверенности в том, что в таких трубах могут формироваться переходные режимы [2]. При этом также учитывается сложившаяся практика проектирования металлических гофрированных труб за рубежом.

Зарубежные рекомендации по назначению расчетного режима, во-первых, многообразны, во-вторых, не исключают работу металлических гофрированных труб ни в одном из возможных гидравлических режимов – безнапорном, полунапорном, частично-напорном и напорном (см. рис. 2) [1].

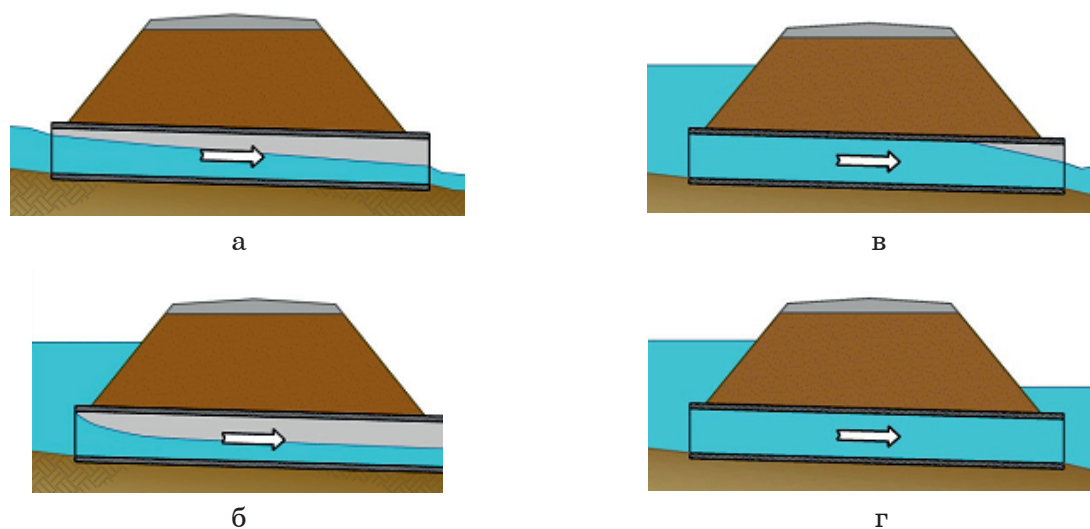


Рис. 2. Схемы основных гидравлических режимов работы водопропускной трубы: а – безнапорный; б – полунапорный; в – частично-напорный; г – напорный

В США, при большом разнообразии применяемых конструкций металлических гофрированных труб и гидравлических режимов их работы, используется иная классификация гидравлических режимов. К первому классу (inlet control) относят режимы, при работе в которых на пропускную способность гофрированных труб влияют только сопротивления на входе. По отечественной классификации это безнапорный режим при условии работы металлической гофрированной трубы по типу «короткой», когда сопротивления по длине не влияют на ее пропускную способность, а также полунапорный режим. Ко второму классу (outlet control) относят режимы, при работе в которых на пропускную способность металлической гофрированной трубы влияют как сопротивления на входе, так и по длине трубы. Это напорный режим и безнапорный, если труба работает по типу «длинной».

По одной из применяемых концепций по назначению расчетного режима при проектировании металлических гофрированных

труб допускается работа таких труб в любом гидравлическом режиме, но оговаривается, что при пропуске расчетного расхода величина гидростатического напора перед трубой H не должна превышать $1,25d$, т. е. $H/d \leq 1,25$, и что величина максимально допустимого предельного напора составляет $(H/d)_{\max} = 3...5$ [8]. Дается также указание, что если у проектировщика нет уверенности в условиях работы металлических гофрированных труб (inlet или outlet control), то расчет выполняется по обоим вариантам и в качестве расчетного принимается максимальное значение из полученных напоров H , при котором обязательно проводятся также фильтрационный расчет земляной насыпи и расчет устойчивости откосов. Такой же подход и в последнем справочнике по гидравлическим расчетам дорожных водопропускных труб, но величина относительного напора перед металлической гофрированной трубой не ограничивается, хотя указывается, что перелив через дорожную насыпь при пропуске

расчетного расхода допускать не следует [3].

В справочнике [9] также дается ограничение величины относительного напора H/d :

- при $d \leq 1,2$ м (48 дюймов) $H/d \leq 1,5$;
- при $d > 1,2$ м (48 дюймов) $H/d \leq 1,2$.

Указывается, что уклон металлических гофрированных труб не должен превышать 25 %, т. е. $i_T \leq 0,25$, что существенно больше уклона $i_T = 0,05$, который принимается в Российской Федерации с 2009 года в качестве максимально допустимого [2].

Такой же подход используется и в справочнике по автомобильным дорогам, но даются свои рекомендации [7]:

- при $d \leq 4,5$ м $H/d \leq 1,5$;
- при $d > 4,5$ м $H/d \leq 1,0$.

В справочнике по гофрированным водопропускным трубам, изданном в Канаде, дается рекомендация обеспечивать пропуск малых расходов большой обеспеченности (10 %) без учета статического напора на входе, т. е. в безнапорном режиме, а расход 1 % обеспеченности пропускать со статическим напором, т. е. в полунапорном или напорном режимах [5].

Практически во всех рассмотренных зарубежных справочниках рекомендуемый напор H перед металлической гофрированной трубой при пропуске расчетного расхода обеспечивает затопление входного оголовка и работу трубы в полунапорном или напорном гидравлических режимах. Однако четких рекомендаций по установлению конкретного режима не дается и даже предлагается принимать в качестве расчетного наихудший вариант [3, 8].

Поскольку пропускная способность металлических гофрированных труб существенно зависит от выбранного расчетного гидравлического режима, то представляется, что и в нашей стране настало время более тщательно изучить вопрос о целесообразности и возможности принятия при проектировании таких труб полунапорного или напорного режимов в качестве расчетного не только на временных, но и на дорогах постоянного применения.

С этой целью в МАДИ были выполнены экспериментальные гидравлические исследования модели металлических гофрированных труб с гладким лотком по дну в диапазоне применяемых в нашей стране уклонов ($0,01 \leq i_T \leq 0,05$). В линейном масштабе 1:5 моделировалась натурная труба без входного оголовка диаметром 1 м с гофром 130 x 32,5 мм, имеющая различ-

ные уклоны и относительные длины, диапазон изменения которых указан в работе [6]. Изучалась «зарядка» модели металлической гофрированной трубы, изменение ее пропускной способности при этом, а также устойчивость работы в напорном режиме.

Исследования показали, что металлическая гофрированная труба со стандартным входом без оголовка (со срезом, перпендикулярным оси трубы) самопроизвольно «зарядается» и устойчиво работает в частично-напорном и напорном режимах (см. рис. 1). Формирующиеся в верхнем бьефе над входным оголовком воронки с вихревым шнуром, через которые в металлическую гофрированную трубу поступает воздух, практически не влияют ни на устойчивость напорного режима, ни на пропускную способность трубы. Объясняется это тем, что вследствие повышенного гидравлического сопротивления на входном участке трубы не формируется вакуумметрическое давление, и поэтому поступающий в трубу воздух не изменяет давление в трубе, а перемещается совместно с водным потоком, постепенно поднимаясь к шельге трубы. Уменьшение пропускной способности металлической гофрированной трубы за счет замещения воды воздухом небольшое вследствие малого количества воздуха, поступающего в трубу через вихревую воронку.

На рисунке 3 приведен график зависимости относительного напора H/d перед трубой от величины параметра расхода $\theta = Q / \sqrt{gd}^{5/2}$ для исследованной модели с максимальным уклоном $i_T = 0,05$.

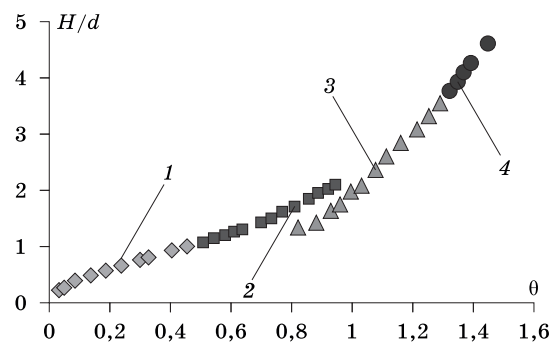


Рис. 3. График зависимости относительного напора H/d перед металлической гофрированной трубой без входного оголовка с гладким лотком по дну с относительной длиной $l_T/d \approx 22$ с уклоном $i_T = 0,05$ от величины параметра расхода θ : 1, 2, 3, 4 – экспериментальные точки соответственно при безнапорном, полунапорном, частично-напорном и напорном режимах

Эксперименты показали, что при уклонах модели $i_T = 0,01$; $0,031$ и $0,05$ «зарядка» происходит соответственно при $H/d \approx 1,23$; $\theta_{зар} \approx 0,565$; $H/d \approx 1,796$; $\theta_{зар} \approx 0,833$ и $H/d \approx 2,145$; $\theta_{зар} \approx 0,953$ [6]. Модель металлической гофрированной трубы начинает работать в частично-напорном режиме (см. рис. 2). Ее пропускная способность увеличивается, что приводит к уменьшению относительного напора в верхнем бьефе при постоянной величине подаваемого расхода. При $i_T = 0,01$ снижения практически нет, а при $i_T = 0,031$ оно почти незаметно (до $H/d \approx 1,7$). Если же $i_T = 0,05$, то относительный напор снижается заметно, но затопление входного оголовка остается существенным ($H/d \approx 1,76$), поэтому «разрядки» модели металлической гофрированной трубы не происходит.

Уменьшение величины подаваемого расхода после «зарядки» трубы приводит к увеличению длины концевой участка, работающего неполным сечением. «Разрядка» моделей с уклонами $i_T = 0,031$ и $i_T = 0,05$ наступает при практически одинаковом параметре расхода $\theta \approx 0,82$, но относительные напоры при этом заметно различаются: $H/d \approx 1,6$ при $i_T = 0,031$ и $H/d \approx 1,35$ при $i_T = 0,05$.

Увеличение расхода после «зарядки» приводит к уменьшению длины концевой безнапорного участка и смене частично-напорного режима напорным режимом (см. рис. 3 при $\theta \approx 1,33$). В диапазоне изменения параметра расхода от $\theta \approx 0,82$ до $\theta_{зар} \approx 0,833$ при $i_T = 0,031$ и до $\theta_{зар} \approx 0,95$ при $i_T = 0,05$ металлическая гофрированная труба может работать как в полунапорном, так и в частично-напорном режиме, в зависимости от предшествующих условий работы металлической гофрированной трубы (величину $\theta_{зар}$ для других уклонов трубы можно установить по рекомендациям, приведенным в работе [7]). При $i_T \leq 0,031$ практически не происходит изменения пропускной способности трубы при ее «зарядке» или «разрядке».

Незначительное изменение напора H перед металлической гофрированной трубой с гладким лотком по дну после ее «зарядки» объясняется, во-первых, тем, что труба начинает работать полным сечением только на части своей длины (в частично-напорном режиме), во-вторых, тем, что поток на начальном напорном участке испытывает повышенные гидравлические сопротивления по длине. Поэтому не происходит резкого увеличения пропускной способности металлических гофрированных труб после «зарядки», как это наблюдается в гладких водопропускных трубах, не уменьшается величина

напора H перед металлической гофрированной трубой, в ней не формируются описанные неблагоприятные виды переходного режима. Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют, что металлическую гофрированную трубу с гладким лотком по дну можно проектировать на пропуск расчетного расхода в полунапорном или напорном режимах, как это делается за рубежом.

Следует подчеркнуть, что при этом существенно возрастает пропускная способность металлических гофрированных труб. Например, исследованная модель с гладким лотком по дну при $i_T = 0,05$ и работе в безнапорном режиме с максимально допустимым заполнением на входе $0,75d$ пропускает расход, соответствующий $\theta \approx 0,32$, а при работе в полунапорном режиме с $H/d \approx 1,5$ эта же модель пропускает расход, отвечающий $\theta \approx 0,72$, т. е. увеличение пропускной способности таких труб составляет: $0,72/0,32 = 2,25$.

Выводы

Проведенный анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур с гладким лотком по дну позволил выявить, что повышенные гидравлические сопротивления, испытываемые водным потоком при безнапорном и напорном движении с гладким лотком по дну обеспечивают плавную «зарядку» металлических гофрированных труб со стандартными типами входного оголовка и их устойчивую работу в частично-напорном и напорном режимах.

Установлено, что в исследованном диапазоне уклонов ($i_T \leq 0,05$) в металлических гофрированных трубах отсутствует вакуумметрическое давление на входе, поэтому формирующиеся в верхнем бьефе над входным оголовком воронки с вихревым шнуром, через которые поступает воздух, не оказывают влияния ни на устойчивость частично-напорного и напорного режимов, ни на пропускную способность таких труб.

Исследования показали, что металлические гофрированные трубы целесообразно проектировать на пропуск расчетного и поверочного расходов в полунапорном и напорном режимах. Если принять в качестве допустимого относительного напора $H/d = 1,5$ (как это принято в большинстве зарубежных рекомендаций), то пропускаемый металлической гофрированной трубой с гладким лотком по дну без входного оголовка расход при полунапорном режиме примерно в 2,2 раза превысит расход, пропускаемый такой трубой в

безнапорном режиме с расчетным заполнением на входе $0,75d$. Принятие в качестве расчетного частично-напорного или напорного режимов еще больше повышает эффективность использования металлических гофрированных труб с гладким лотком по дну.

1. 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.

2. 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. – 206 с.

3. Hydraulic design of highway culverts / U.S. Department of Transportation. – Hydraulic design series number 5. – Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. – 2012. – 326 p.

4. Highway design manual. Chapter 8 Highway drainage (Limited Revisions) Revision 51. – September 22, 2006.

5. Handbook of Steel drainage and highway construction products. Published C.S.P.I. – Second Canadian Edition. – Cambridge, Ontario, Canada. – Second Printing. – November, 2007.

6. Ушаков В. В., Федотов М. В., Алтунин В. И., Черных О. Н., Нахмури С. С. Работа гофрированной водопропускной трубы с гладким лотком по дну // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 2(61). – С. 38–40.

7. Формирование напорного режима в гофрированных трубах с гладким лотком по дну / В. В. Ушаков [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2 (65). – С. 38–40.

8. Hydraulics Manual / Washington State Department of Transportation. – M 23-03. – January, 1997.

9. Federal Lands Highway. Project development and design manual: Publication № FHWA-DF-88-003 Ch 7: Metric Revision, U.S. Department of Transportation // Hydrology and Hydraulics. – June, 1996.

Материал поступил в редакцию 29.01.14.

Алтунин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (499) 155-03-16

E-mail: chtara@mail.ru

Черных Ольга Николаевна, кандидат технических наук, профессор

Тел. 8 (499) 190-53-43

E-mail: gtsmgup@mail.ru

Бурлаченко Алена Владимировна, инженер

Тел. 8 (499) 618-05-14

E-mail: burlachenco@dimler.com

УДК 502/504:624.042:627.8

В. П. ШАРКОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

О ВЕЛИЧИНЕ СКАЧКА В ЭПЮРЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЯЧЕЙСТЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ГТС

На основе анализа опытных данных предложено использовать зависимость для определения уменьшения вертикального давления заполнителя в ячейстых конструкциях гидротехнических сооружений, возникающего в результате динамических воздействий. Зависимость проверена экспериментально.

Динамика, ячейстые конструкции, заполнитель, осадки, вертикальное давление заполнителя, горизонтальное давление

On the basis of the experimental data analysis it is proposed to use a dependence for determination of reduction of the filler vertical pressure in cellular structures of hydraulic works arising as a result of dynamic impacts. The dependence was checked experimentally.

Dynamics, cellular structures, filler, settlement, filler vertical pressure, horizontal pressures.