

динамическим нагрузкам, что требует создания качественно новых расчетно-теоретических методов оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений, обеспечивающих адекватный многовариантный анализ их технического состояния.

1. **Жарницкий В. Я.** Оперативный геотехнический контроль в обеспечении качества устройства каменно-земляных плотин и прогноз их деформаций по результатам строительства: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 172 с.

2. **Радченко С. В.** Причины повреждений и аварий грунтовых плотин (по данным СИГБ) // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 99–113.

3. World Register of Dams. – Paris: ICOLD, 1985. – 753 p.

4. ICOLD. GENERAL REPORT. QUESTION 75. – Florence: Incidents and Failures of Dams, 1997.

5. **Каякин В. В.** Оценка вероятности и риска террористических актов на гидро-

технических сооружениях // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 4. – С. 15–18.

6. **Зарецкий Ю. К., Ломбардо В. Н.** Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

7. **Красников Н. Д.** Динамические свойства грунтов и методы их определения. – М.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1970. – 242 с.

8. **Ляхов Г. М.** Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. – М.: Недра, 1964. – 216 с.

9. **Ляхов Г. М., Полякова Н. И.** Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967. – 231 с.

Материал поступил в редакцию 01.10.13.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru,

**Сергеев Роман Геннадьевич**, аспирант

Тел. 8-916-053-90-57

УДК 502/504:627.8:532.5

## В. И. АЛТУНИН

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»

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГОФРИРОВАННЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

*Приведены результаты экспериментальных исследований водопропускных сооружений из гофрированных металлических труб. Выявлены основные факторы, позволяющие определить глубину и скорость водного потока на выходе из гофрированной трубы с гладким лотком по дну.*

*Металлические гофрированные водопропускные трубы, экспериментальные исследования, безнапорный и полупонапорный режимы работы, гладкий лоток, коэффициент шероховатости.*

*The results of experimental researches of culvert constructions made of corrugated metal pipes are given. There are identified the main factors which make it possible to determine the depth and speed of the water flow on the outlet of the corrugated pipe with a smooth bottom tray.*

*Corrugated metal culvert pipes, experimental studies, non-pressure and semi-pressure modes of operation, smooth tray, roughness coefficient.*

Расчет крепления и размыва за ним в нижнем бьефе дорожных водопропускных труб, обычно работающих не полным сечением с неподтопленным выходом, проводят по средней скорости в выходном сечении трубы, которая определяется глубиной потока. На глубину в выходном отверстии  $h_{\text{вых}}$  влияют пропускаемый расход, уклон трубы, режим движения, а при коротких трубах и входные условия [1].

При уклоне трубы меньше критического уклона ( $i_t < i_k$ ) глубину на выходе находят в долях от критической глубины ( $h_{\text{вых}}/h_k = K_1$ ). Для различных типов входного оголовка в работе [1] рекомендуется принимать  $K_1 = 0,75...0,85$ , в [2] –  $0,72$ . Если уклон трубы превышает критический ( $i_t > i_k$ ), то глубина на выходе принимается в долях от нормальной глубины ( $h_{\text{вых}}/h_0 = K_2$ ). В работе [1] предлагается принимать  $K_2 = K_1$  или  $K_2 = 0,8$  [2].

Проведенные исследования прямоугольных и квадратных гладкостенных труб показали, что коэффициент  $K_2$  зависит от расхода (уменьшаясь с его увеличением) и уклона трубы (величина коэффициента  $K_2$  для большинства исследованных моделей оказалась больше единицы и при  $i_t = 0,15$  достигала 1,6) [3]. Такие данные противоречат существующим представлениям и могут быть объяснены неточным определением нормальной глубины бурного потока, поскольку с увеличением  $i_t$  гидравлическое сопротивление по длине увеличивается. Авторы публикуемой статьи результаты своих исследований представили также через коэффициент  $K_1$ , который оказался меньше единицы, а для безнапорного режима и не зависящим от расхода. Они предлагают

устанавливать глубину коэффициентом  $K_1$  на выходе при любых уклонах трубы. Такой же подход применяют и другие авторы для круглых труб [2].

Исследовав металлические гофрированные трубы (МГТ) при уклонах, близких к критическому уклону ( $0 \leq i_t \leq 0,03$ ), Ч. Нейла предлагает принимать  $K_1 = 1$  (в экспериментах глубину измеряли с помощью пьезометра на некотором удалении от выходного отверстия, и поэтому в выходном отверстии глубина должна быть меньше –  $K_1 < 1$ ) [2, 4]. Для гладких водопропускных труб и для металлических гофрированных труб в США глубину на выходе при  $i_t \geq i_k$  рекомендуется принимать равной нормальной глубине ( $K_2 = 1$ ), а при  $i_t < i_k - h_{\text{вых}}/h_k = K_1 = 1$  [4].

По результатам экспериментальных исследований модели МГТ с  $i_t = 0,01; 0,03; 0,1$ , выполненных в ЦНИИС в 1976 году, предложена зависимость, рекомендуемая при  $\theta \leq 0,8$  [2]:

$$h_{\text{вых}}/h_k = 0,795 - 1,75 i_t. \quad (1)$$

Для предотвращения абразивного разрушения металлических гофрированных труб взвесенесущим водным потоком по дну водопропускной трубы обычно укладывают бетонный или асфальтобетонный гладкий лоток, занимающий сегмент с центральным углом  $90$  или  $120^\circ$  (по распоряжению Росавтодора, с 2009 года устройство гладкого лотка является обязательным элементом конструкции металлических гофрированных труб). Такая труба занимает промежуточное положение между гладкими и гофрированными трубами, поскольку часть ее внутреннего периметра гладкая, а часть – гофрированная (рис. 1).

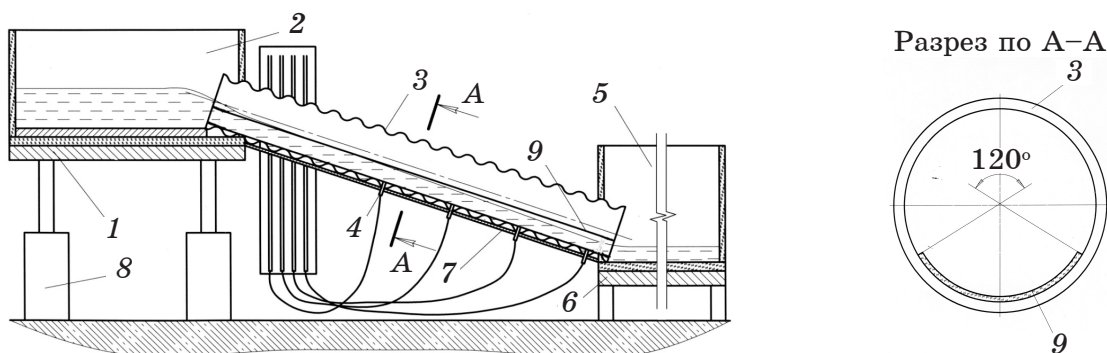


Рис. 1. Модельная установка водопропускного сооружения с металлической гофрированной трубой [5]: 1 – опорная рама подводящего прямоугольного лотка 2; 3 – гофрированная труба; 4 – пьезометры; 6 – опорная рама отводящего лотка 5; 7 – основание водопропускной трубы; 9 – гладкий лоток по дну

В лаборатории кафедры гидравлики МАДГТУ (МАДИ) проводили экспериментальные исследования модели металлических гофрированных труб с гладким лотком по дну при  $i_t = 0,096$  (см. рис. 1) [5]. Моделировали трубу диаметром 1 м с гофром 130x32,5 мм в масштабе 1:5. Модель имела диаметр 20 см и внутренний минимальный диаметр  $d_{вн}$  19,35 см. В качестве расчетного диаметра  $d_p$  принимали диаметр круглой трубы, площадь сечения которой равнялась минимальной внутренней площади гофрированной трубы за вычетом площади, занимаемой гладким лотком (исследованная модель имела  $d_p = 18,6$  см). При проведении экспериментов с помощью специально изогнутой мерной иглы регистрировали глубину на выходе из трубы. Показатели глубины менялись от минимальных (3...4 см) до полного заполнения сечения трубы, которым соответствовали расходы  $Q$ , равные 3...55 л/с, измерявшиеся треугольным водосливом Томсона.

Исследования показали, что относительную глубину на выходе при  $\theta < 1,05$  можно рассчитать по следующей зависимости:

$$h_{\text{вых}}/h_k = 0,35 + 0,23\theta, \quad (2)$$

где  $\theta = Q/\sqrt{gd_p^{5/2}}$  – безразмерный параметр расхода, определяемый по расчетному диаметру  $d_p$ .

В результате исследований этой же модели металлической гофрированной трубы без гладкого лотка установлено, что при  $\theta < 0,93$  относительную глубину на выходе можно найти по зависимости

$$h_{\text{вых}}/h_k = 0,38 + 0,31\theta. \quad (3)$$

Сопоставление зависимостей (2) и (3) показывает, что глубина на выходе из металлической гофрированной трубы с гладким лотком по дну меньше, чем из металлической гофрированной трубы без гладкого лотка (при одинаковых параметрах расхода). При параметре расхода  $\theta = 0,35$ , соответствующем расчетному заполнению трубы на входе ( $h_{\text{вх}}/d_p = 0,75$ ) при пропуске расчетного расхода, различие составляет примерно 13,47 %, т. е. достаточно существенное.

Уклон исследованной модели металлической гофрированной трубы с гладким лотком по дну и без него превышает критический уклон ( $i_t > i_k$ ). Поэтому по полученным экспериментальным данным подсчитывали коэффициент  $K_2 = h_{\text{вых}}/h_0$ . Для модели МГТ с гладким лотком

по дну результаты приведены на рис. 2.

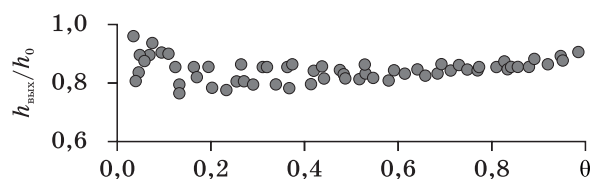


Рис. 2. График зависимости  $h_{\text{вых}}/h_0 = f(\theta)$  для металлической гофрированной трубы с гладким лотком по дну ( $d_p = 18,6$  см;  $l_t = 520$  см;  $i_t = 0,096$ ) при безнапорном и полупапорном режимах работы

В исследованном диапазоне параметров расхода без большой погрешности можно считать значение  $K_2$  постоянным и равным  $h_{\text{вых}}/h_0 = 0,85$ . Для модели МГТ без гладкого лотка значения коэффициента  $K_2$  не остаются постоянными и увеличиваются с увеличением параметра расхода от  $K_2 = 0,69$  (при  $\theta = 0,26$ ) до  $K_2 = 0,77$  (при  $\theta = 0,93$ ), хотя и не очень существенно. Полученная величина  $K_2 \approx 0,85$  для исследованной модели металлической гофрированной трубы с гладким лотком по дну достаточно хорошо согласуется с существующими в нашей стране рекомендациями по назначению  $K_2$  для гладких труб [1, 2]. Однако определять глубину на выходе по  $K_2$  сложнее, чем по  $K_1$  с помощью зависимости (2), поскольку в такой трубе с гладким лотком по дну величина коэффициента шероховатости является переменной величиной, зависящей от наполнения трубы [2].

#### Выводы

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что существующие представления об отсутствии влияния шероховатости внутренней поверхности водопропускной трубы на глубину потока на выходе из нее при безнапорном движении не подтверждаются. Устройство гладкого лотка по дну металлической гофрированной трубы приводит к уменьшению глубины и увеличению скорости на выходе. Полученные результаты являются первичными, и поэтому необходимо продолжить исследования в данном направлении.

1. Розанов Н. П. Гидравлические расчеты водопропускных труб: учеб. пособие. – М.: МГМИ, 1979. – 68 с.

2. Алтунин В. И., Черных О. Н.,

**Федотов М. В.** Водопропускные трубы в транспортном строительстве: гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур: монография. – М.: МАДГТУ (МАДИ), 2012. – 240 с.

3. **Рабухин Л. Г., Цивин М. Н.** О глубине потока на выходе из водопропускных труб: Известия вузов. Строительство и архитектура: сборник науч. трудов. – Новосибирск, 1971. – № 3. – С. 51–55.

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

5. Экспериментальный стенд для гидравлических исследований моделей дорожных гофрированных водопропускных труб с гладким лотком по дну: патент РФ №2458263 RU C1 МПК F15B 19/00 / В. И. Алтунин [и др.]; заявл. 21.04.2011; опубл. 10.08. 2012. – Бюл. № 22. – 2012. – 8 с.

Материал поступил в редакцию 10.06.13.  
**Алтунин Владимир Ильич**, кандидат технических наук, доцент  
Тел. 8 (499) 155-03-16  
E-mail: chatra@mail.ru  
**Черных Ольга Николаевна**, кандидат технических наук, профессор  
Тел. 8 (499) 976-24-60

УДК 502/504:627.8:004

**А. М. БЕЛОСТОЦКИЙ**

Научно-исследовательский центр СтаДиО, Москва

**Д. С. ДМИТРИЕВ**

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

## **СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ЗАДАНЫМ АКСЕЛЕРОГРАММАМ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS)**

*Представлено сравнение различных методов динамического расчета гидротехнических сооружений в программном комплексе ANSYS. Приведено краткое описание используемых методик, их преимуществ и недостатков.*

*Динамические расчеты, акселерограмма, учет взаимодействия сооружения с водой, ANSYS mechanical APDL, задача Вестергарда.*

*There is given a comparison of different methods of dynamic calculation of hydraulic structures in the software complex ANSYS. The brief description of the used methods, their advantages and disadvantages is given.*

*Dynamic calculations, accelerogram, accounting of the structure interaction with water, ANSYS Mechanical APDL, Westergaard's task.*

С повышением требований к уровню безопасности крупных энергетических объектов возникла потребность в разработке методики влияния сейсмического воздействия на гидротехнические сооружения с применением современных расчетных программных комплексов.

Авторами проведена научно-техническая работа, задача которой – создание методики учета водной среды в программном комплексе ANSYS при динамиче-

ских расчетах гидротехнических сооружений. Методика должна удовлетворять следующим требованиям:

иметь сходство результатов расчета с данными, полученными по методике, официально рекомендованной строительными нормами и правилами (метод с использованием присоединенной массы воды, вычисленной заранее);

процесс моделирования конечно-элементной модели и задания граничных