

## DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335

# EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT OF METAL SPIRALLY-TWISTED CORRUGATED PIPES

# K. P. Morgunov, Yu. K. Ivanovsky, A. Yu. Baranov

<sup>1</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

St. Petersburg, Russian Federation

Pipes made of corrugated metal structural elements have a roughness that differs from the roughness of technically smooth concrete pipes. The hydraulic operating conditions of corrugated pipes due to increased roughness of the walls have their own characteristics. The experimental works on determining the roughness coefficients of the inner surface of metal spirally-twisted corrugated pipes with a polymer and zinc coating are described in the paper. Two standard dimensions of corrugated pipes are considered: with a diameter of 500 mm with a corrugation, the corrugation dimensions are  $68 \times 13$  mm; and with a diameter of 1,000 mm with corrugation dimensions of  $125 \times 26$  mm. The non-pressure mode of flow in the pipe with various degrees of filling (02; 0.4; 0.6 and 0.8 for several slopes of the pipe position: 0.03; 0.02 and 0.01) is studied. The experimental setup is located in a tray with 2,000 mm width and 800 mm height. During the experiments, the water flow rate in the pipe, which determines the degree of its filling, is measured, as well as piezometers record the distribution of flow depths along the pipe length and control the flow uniformity. Based on the measured values, the hydraulic characteristics of the flow, namely, area of effective cross-section, wetted perimeter and hydraulic radius, using of which the roughness coefficient value is calculated by Chezy's formula, are computed. The roughness coefficient values for pipes with 1000 mm diameter at high degrees of filling are obtained using the theory of similarity. The research results have showed that the determined roughness coefficients for pipes of the considered diameter depend practically only on the pipes diameter and the corrugation dimensions, and do not depend on the slope of the pipe location, degree of filling, and lining material. Based on the results of the performed work, the quantitative values of the roughness coefficients for each pipe diameter are recommended.

*Keywords: metal spirally-twisted corrugated pipes, experimental studies, roughness coefficient, hydraulic motion parameters.* 

#### For citation:

Morgunov, Konstantin P., Yuri K. Ivanovsky, and Andrey Yu. Baranov. "Experimental determination of the roughness coefficient of metal spirally-twisted corrugated pipes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335.

# УДК 625.73

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНОВИТЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ

## К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, А. Ю. Баранов

 <sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
 <sup>2</sup> — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментов по определению коэффициента шероховатости металлических гофрированных труб, необходимого для выполнения гидравлических расчетов водопропускных сооружений. Трубы из гофрированных металлических конструктивных элементов имеют шероховатость,



которая отличается от шероховатости технически гладких бетонных труб. Гидравлические условия работы гофрированных труб вследствие повышенной шероховатости стенок имеют свои особенности. В статье описаны экспериментальные работы по определению коэффициентов шероховатости внутренней поверхности металлических спиральновитых гофрированных труб с полимерным и цинковым покрытием. Рассмотрены два типоразмера гофрированных труб: диаметром 500 мм с гофром размерами гофра 68 × 13 мм; и диаметром 1 000 мм с гофром размерами 125 × 26 мм. Исследовался безнапорный режим течения потока в трубе с различными степенями наполнения: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 для нескольких уклонов расположения трубы: 0,03; 0,02 и 0,01. Экспериментальная установка находится в лотке шириной 2 000 мм и высотой 800 мм. При проведении экспериментов измерялся расход воды в трубе, определявший степень её наполнения, а также пьезометрами фиксировалось распределение глубин потока вдоль длины трубы и контролировалась равномерность потока. На основе измеренных величин выполнялись расчеты гидравлических характеристик потока: площади живого сечения, смоченного периметра и гидравлического радиуса, с использованием которых по формуле Шези рассчитывалось значение коэффициента шероховатости. Значения коэффициента шероховатости для труб диаметром 1000 мм при больших степенях наполнения получены с использованием теории подобия. Результаты исследований показали, что определяемые коэффициенты шероховатости для труб рассматриваемого диаметра зависят практически только от диаметра труб и размеров гофра и не зависят от уклона расположения трубы, степени наполнения и материала облицовки. На основе результатов выполненных работ рекомендованы количественные значения коэффициентов шероховатости для каждого диаметра труб.

Ключевые слова: спиральновитые гофрированные металлические водопропускные трубы, экспериментальные исследования, коэффициент шероховатости, гидравлические параметры движения.

#### Для цитирования:

*Моргунов К. П.* Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спиральновитых гофрированных труб / К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, А. Ю. Баранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335.

### Introduction (Введение)

Водопропускные трубы из различного материала (бетонные, металлические, пластиковые) являются наиболее распространенным типом малых водопропускных сооружений, используемых при проектировании и строительстве автомобильных дорог. При этом могут быть использованы как гладкие, так и гофрированные трубы. Гофрированные трубы выполняются из металла с нормальным (МГТ) и спиральновитым (СВМГТ) гофром, у которых гофр составляет острый угол с диаметральной осью трубы (рис. 1). При этом величина угла спиральности ф изменяется в зависимости от размера гофра и диаметра трубы. С увеличением диаметра трубы угол спиральности уменьшается: для трубы с диаметром 1,2 м он равен 9°21', а для труб диаметра 3,6 м — 3°09'. Угол спиральности оказывает влияние на гидравлические сопротивления и распределение глубин в СВМГТ.



*Рис. 1.* Схемы труб с нормальным и спиральновитым гофром: *а* — нормальная форма гофра; *б* — спиральная форма гофра

По параметрам гофра (рис. 2) наиболее распространенными являются СВМГТ с гофром 68 × 13 мм, 125 × 26 мм, 150 × 50 мм. По виду основного защитного покрытия различают гофрированные трубы с *одиночным покрытием* (цинковым, алюминиевым, сплавом цинка с алюминием



или другим металлизированным покрытием) и с *двойным покрытием* (металлизированное плюс полимерное покрытие), наносимым в заводских условиях.



*Рис. 2.* Параметры гофра: 68 × 13 мм (*a*); 125 × 26 мм (б)

При проектировании водопропускных сооружений с применением СВМГТ российскими нормативными документами (СП 35.13330.2011 СНиП 2.05.03–84\* «Мосты и трубы») определена необходимость выполнения гидравлических расчетов. При этом отраслевым дорожным методическим документом ОДМ 218.2.087–2017 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из спиральновитых металлических гофрированных труб» рекомендовано при проектировании водопропускных сооружений с применением СВМГТ принимать, как правило, безнапорный режим работы. Реализация напорного или безнапорного режима работы определяется уклоном укладки труб, который, в свою очередь, зависит от пропускаемого трубой расхода и коэффициента шероховатости внутренней поверхности трубы. Кроме того, чтобы определить, будет ли труба «длинной» либо «короткой» в гидравлическом отношении, т. е. нужно ли при гидравлических расчетах учитывать наличие в трубе местных сопротивлений движению потока, следует выполнить расчет критического уклона потока, для которого также необходимо определить коэффициент шероховатости внутренней поверхности трубы.

Трубы из гофрированных металлических конструктивных элементов имеют шероховатость, отличающуюся от шероховатости технически гладких бетонных труб. Гидравлические условия работы гофрированных труб вследствие повышенной шероховатости стенок имеют свои особенности. Коэффициенты гидравлического сопротивления в таких трубах зависят от размера и формы гофра, расстояния между волнами гофра, типа швов, применения болтов или заклепок, шероховатости материала, способа изготовления, диаметра трубы и износа поверхности.

В соответствии с российскими отраслевыми дорожными методическими документами: 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)», ОДМ 218.2.082–2017 «Методические рекомендации по проведению гидравлических расчетов малых ИССО на автомобильных дорогах», разрешается проектировать работу гофрированных труб на постоянно действующих автодорогах лишь в безнапорном режиме. Работа в полунапорном и напорном режимах допускается только при их установке на временных автодорогах. Однако значительное количество исследований по оценке коэффициента шероховатости как в России, так и за рубежом проводилось для напорного режима работы гофрированных труб [1]–[3] либо для труб, в которых часть внутренней поверхности была защищена от разрушения гладким лотком (асфальтовое покрытие с бетонированием, предварительно нанесенный полимер с бетонированием, предварительно нанесенный полимер и полимеризированных асфальт) [4]–[6]. При этом основная часть исследований выполнена для труб с нормальным гофром (МГТ) [7], [8]. Исследования металлических труб со спиральным



гофром [9]–[11] показали, что на гидравлические сопротивления таких труб существенное влияние оказывает угол спиральности, с увеличением которого возрастают также сопротивления. Поэтому у труб большого диаметра, угол спиральности которых близок к 90°, сопротивления близки к сопротивлениям труб с кольцевым гофром. Наличие в трубах гладкого лотка несколько уменьшает (примерно на 15–20 %) коэффициент шероховатости.

Для СВМГТ, наиболее широко применяемого в Российской Федерации спирального гофра, размером 125 × 26 мм гидравлические исследования как без гладкого лотка по дну, так и с лотком практически не проводились. Одно из последних исследований [12], выполненное в МАДИ на экспериментальных моделях, определило следующие тенденции изменения коэффициента шероховатости:

– соотношение между коэффициентами шероховатости СВМГТ при безнапорном и напорном движении зависит от уклона водопропускной трубы, причем значения коэффициентов гидравлического сопротивления в зависимости от уклона при безнапорном движении могут быть как больше, так и меньше, чем при напорном режиме работы трубы (примерно на 10 %);

– на величину коэффициента шероховатости при безнапорном движении оказывает влияние степень наполнения трубы (отношение глубины потока в трубе к ее диаметру  $a = \frac{h}{D}$ ), при  $a \ge 0,45$  коэффициент шероховатости достигает максимального значения, которое в источнике [12] рекомендуется принимать в качестве расчетного;

-с увеличением уклона расположения трубы коэффициент шероховатости возрастает.

Все это определяет актуальность выполнения работ по оценке коэффициента шероховатости СВМГТ и его зависимости от различных условий движения потока.

Задачей выполняемых исследований являлось экспериментальное обоснование выбора величины коэффициента шероховатости СВМГТ при движении потока в трубе в безнапорном режиме при различной степени наполнения трубы.

# Materials and Methods (Материалы и методы)

Экспериментальное определение коэффициента шероховатости основано на использовании формулы Шези для равномерного режима движения потока жидкости [13], которая устанавливает зависимость расхода от гидравлических характеристик потока:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri},\tag{1}$$

где Q — расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

ω — площадь живого сечения потока, м<sup>2</sup>;

*С* — коэффициент Шези, м<sup>0,5</sup>/с;

 $R = \frac{\omega}{\chi}$  — гидравлический радиус живого сечения, м;

*χ* — смоченный периметр, м;

*i* — гидравлический уклон, который при равномерном движении потока со свободной поверхностью равен геометрическому уклону дна и свободной поверхности.

Коэффициент Шези обычно определяют по формуле Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^{y}, \tag{2}$$

где *n* — коэффициент шероховатости;

*у* — показатель степени.

Для определения скорости безнапорного потока в открытом русле используется также формула Маннинга [14]:

$$\upsilon = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} ,$$

которая для расхода примет вид



$$Q = \omega \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} .$$
(3)

В 2002 г. формула Маннинга (3), до того считавшаяся эмпирической, была выведена теоретически Г. Джоем и Ф. А. Бомбарделли [15]. Формулу (3) можно преобразовать к виду, аналогичному формуле (1):

$$Q = \omega A \sqrt{Ri} ,$$

где коэффициент А будет определяться в виде

$$A = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}.$$
 (4)

Таким образом, формула Н. Н. Павловского (2) переходит в формулу Маннинга (4), если показатель степени принять

$$y = \frac{1}{6}.$$
 (5)

Объединив формулы (1), (2) и (5), получим выражение для расхода жидкости в открытом потоке:

$$Q = \omega \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \sqrt{Ri} = \frac{1}{n} \omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}},$$
(6)

откуда можно выразить коэффициент шероховатости следующим образом:

$$n = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q} \,. \tag{7}$$

2020 год. Tom 12. Nº

Формула (7) также имеет название — формула Маннинга [14], по ней выполняется экспериментальное определение коэффициента шероховатости. Видно, что для определения коэффициента шероховатости по формуле (7) необходимо знать значения площади живого сечения потока, смоченного периметра и гидравлического радиуса, которые зависят от степени наполнения трубы, т. е. от отношения глубины потока в трубе к ее диаметру  $a = \frac{h}{D}$ .

Оценим величины живого сечения и гидравлического радиуса при различных значениях степени наполнения трубопровода. Живое сечение потока в трубе представляет собой круговой сегмент (рис. 3). Величина смоченного периметра — это длина дуги окружности *AB*.



Рис. 3. Схема движения потока в трубе

Площадь сегмента круга находится как разность площади сектора *AOB* и площади равнобедренного треугольника *AOB*:

$$S_{\rm cefm} = S_{\rm cekt} - S_{\rm tpeyf}.$$



Очевидно, что эта площадь зависит от величины угла α, под которым из центра трубы видна свободная поверхность потока в трубе. Площадь живого сечения, выраженная через угол в градусах, определяется в виде

$$S_{\text{cerm}} = \frac{r^2}{2} \left( \pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right). \tag{8}$$

Смоченный периметр потока — это длина дуги окружности, соответствующая углу α. Как известно, она определяется (если угол α выражен в градусах) в виде

$$\chi = l = \pi r \frac{\alpha}{180} \,. \tag{9}$$

Гидравлический радиус определится в виде  $R = \frac{\omega}{\chi}$ . Таким образом, основные гидравлические характеристики живого сечения потока: площадь, смоченный периметр, гидравлический радиус, определяются величиной угла  $\alpha$ .

Из рис. 3 видно, что этот угол определится следующим образом:

$$\alpha = 2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right),$$

где *h* — глубина потока воды в трубе.

В свою очередь, глубина безнапорного потока в трубе *h* при равномерном режиме движения (нормальная глубина) определяется степенью наполнения  $a = \frac{h}{D}$ .

В выполненных в рамках настоящей работы исследованиях было рассмотрено несколько степеней наполнения трубы: a = 0,2; 0,4; 06; 0,8. Оценим гидравлические характеристики потока на примере течения со степенью наполнения a = 0,4 (рис. 4). Глубина потока при этом h = 0,8r.

Из рис. 4 видно, что величина *b* (катет прямоугольного треугольника), определенная по теореме Пифагора, в этом случае

$$b = \sqrt{r^2 - (0, 2r)^2} = \sqrt{0,96r^2} = 0,98r,$$

откуда

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{b}{r} = 0,98.$$

Тогда угол α в градусах определится как

$$\alpha = 2 \arcsin 0.98 = 2 \times 78,52^{\circ} = 157,04^{\circ}$$



*Рис. 4.* Схема определения гидравлических характеристик потока в трубе при *a* = 0,4

Площадь живого сечения потока при степени наполнения a = 0,4 определяется из формулы (8):

$$\omega = \frac{r^2}{2} \left( \pi \frac{157,04}{180} - \sin 157,04 \right) = \frac{r^2}{2} \left( 3,14 \frac{157,04}{180} - 0,39 \right) = 1,17r^2$$



Смоченный периметр определяется из формулы (9):

$$\chi = \pi r \frac{\alpha}{180} = 3,14r \frac{157,04^{\circ}}{180^{\circ}} = 2,74r,$$

гидравлический радиус —

$$R = \frac{\omega_{0,4}}{\chi_{0,4}} = \frac{1,17 R^2}{2,74 R} = 0,43 r.$$

Определенные аналогичным образом гидравлические характеристики потока для различных степеней наполнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Степень наполнения	Нормальная глубина	Площадь живого сечения	Смоченный периметр	Гидравлический радиус
0,2	$h_0 = 0,4r$	$\omega_{0,2} = 0,47r^2$	$\chi_{0,2} = 1,85r$	$R_{0,2} = 0,24r$
0,4	$h_0 = 0.8r$	$\omega_{0,4} = 1,17r^2$	$\chi_{0,4} = 2,74r$	$R_{0,4} = 0,43r$
0,6	$h_0 = 1,2r$	$\omega_{0,6} = 1,97r^2$	$\chi_{0,6} = 3,54r$	$R_{0,6} = 0,55r$
0,8	$h_0 = 1,6r$	$\omega_{0,8} = 2,69r^2$	$\chi_{0,8} = 4,43r$	$R_{0,8} = 0,61r$

Эксперименты по определению коэффициентов шероховатости гофрированных труб проводились в русловом лотке гидротехнической лаборатории имени профессора В. Е. Тимонова ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Поперечные размеры лотка: ширина — 200 см, высота — 70 см.

Основой экспериментальной установки являлся металлический каркас, изготовленный из профиля 30 × 30 мм (рис. 5). С напорной стороны перпендикулярно продольной оси лотка на каркасе закреплялся щит, полностью перегораживающий поток в лотке. В щите выполнялось входное отверстие для оголовка гофрированной трубы, размеры которого определялись диаметром исследуемой трубы.



Рис. 5. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки Условные обозначения: 1 — испытуемая гофрированная труба; 2 — щит с входным отверстием; 3 — металлический каркас; 4 — пьезометры

2020 год. Том 12. № 2 Э



Исследовались четыре типа спиральновитых металлических гофрированных труб:

- труба с двойным полимерным покрытием Ø 500 мм, размеры гофра 68  $\times$  13 мм;
- труба с одиночным цинковым покрытием Ø 500 мм, размеры гофра 68 × 13 мм;
- труба с двойным полимерным покрытием Ø 1 000 мм, размеры гофра 125  $\times$  26 мм;
- труба с одиночным цинковым покрытием Ø 1 000 мм, размеры гофра 125  $\times$  26 мм.

Длина трубы во всех случаях составляла около 10 000 мм (~ 10,0 м), труба монтировалась из двух частей по 5,0 м, соединенных бандажом. Исследовался характер течения для нескольких уклонов трубы: i = 0,01; 0,02 и 0,03. Для максимального уклона трубы (при равномерном режиме течения — это уклон дна трубы, уклон свободной поверхности потока и гидравлический уклон), равного 0,03, при длине трубы 10 000 мм разница высотных отметок начального и конечного сечений трубы составит 300 мм. Поэтому нижняя кромка входного отверстия располагалась на отмет-ке 300 мм от дна лотка. Нижняя кромка конечного (выходного) сечения трубы при уклоне 0,03 установлена на дне руслового лотка. При исследовании течения с меньшими уклонами (0,02 и 0,01) конечная часть трубы поднималась.

Равномерность характера движения воды в трубе означает равенство глубины потока вдоль ее оси. Для контроля движения вдоль оси в трубу были врезаны пьезометры, показывающие глубину потока. Места установки пьезометров выбраны так, чтобы исключить начальный (входной) участок трубы с еще не установившимся потоком и конечный (выходной) участок излива потока из трубы. Всего вдоль гофрированной трубы было установлено шесть пьезометров. Расположение пьезометров вдоль по длине трубы приведено в табл. 2.

Таблица 2

Вил трубы	$l_{0-1}$	<i>l</i> <sub>1-2</sub>	l <sub>2-3</sub>	l <sub>3-4</sub>	l <sub>4-5</sub>	l <sub>5-6</sub>	l <sub>6-7</sub>
Did ipjom	СМ						
С полимерным покрытием Ø 500 мм	93,0	156,0	156,0	171,0	151,0	153,0	125,0
С цинковым покрытием Ø 500 мм	99,0	161,0	161,0	152,5	158,5	161,0	104,0
С полимерным покрытием Ø 1000 мм	108,5	163,5	154,5	158,5	151,0	152,0	112,0
С цинковым покрытием Ø 1000 мм	103,0	160,0	173,0	140,0	162,0	158,0	112,0

Расстояния вдоль трубы между точками подключения пьезометров

Расстояния между точками подключения пьезометров для каждой испытываемой трубы несколько изменялись, поскольку пьезометры каждый раз врезались во внешний гребень гофра, и, кроме того, в центральной части трубы располагался бандаж для соединения двух составных частей.

## Results (Результаты)

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты выполнялись по следующей методике:

- в русловой лоток с установленным в нем экспериментальным стендом подавалась вода;

– регулированием расхода воды устанавливались различные степени наполнения трубы;

 после установления равномерного характера течения в СВМГТ выполнялись замеры контролируемых величин: расхода и нормальной глубины;

– рассчитывались гидравлические характеристики течения: площадь живого сечения потока, смоченный периметр, гидравлический радиус живого сечения;

– по формуле Маннинга (7) рассчитывался коэффициент шероховатости.

При проведении экспериментальных исследований были зафиксированы следующие особенности режимов течения потока воды в трубах. Во всех случаях исследовался безнапорный режим движения воды в трубе. При входе потока в трубу после прохождения гидравлического сопротивления (внезапного сужения при переходе из лотка в трубу) формировался начальный уча-



сток течения с неравномерным характером движения (рис. 6). Протяженность начального участка во всех случаях проведенных испытаний отражалась на показаниях первого по длине пьезометра.



Рис. 6. Начальный участок потока в трубе

Далее в центральной (по длине) части трубы формировался участок с равномерным характером движения. Пьезометры фиксировали одинаковую глубину потока на этом участке, при этом уклон свободной поверхности потока соответствовал уклону днища трубы.

Как отмечалось ранее, формула Маннинга для расчетов коэффициента шероховатости справедлива для равномерного режима движения потока в трубе, при котором уклон свободной поверхности соответствует уклону дна трубы. Равномерность движения контролировалась по показаниям пьезометров, фиксировавших одинаковые глубины потока в центральной части трубы. Отсутствие в потоке гидравлических прыжков, нарушавших равномерность движения, определялось соотношением уклона дна трубы и критического уклона. В свою очередь, критический уклон при безнапорном режиме движения определяется по формуле Шези [13]:

$$i_{\rm kp} = \frac{Q^2 n^2}{\omega_{\rm kp}^2 R_{\rm kp}^{\frac{4}{3}}},$$

где  $\omega_{_{\rm Kp}}$  — значения площади живого сечения;  $R_{_{\rm Kp}}$  — значения гидравлического радиуса, определяемые для критической глубины потока  $h_{_{\rm Kp}}$ .

Критическая глубина зависит от формы и размеров живого сечения и расхода жидкости и определяется соотношением

$$\frac{\omega_{\rm kp}^3}{B_{\rm kp}} = \frac{Q^2}{g}$$

где  $B_{_{\rm KD}}$  — ширина потока по «зеркалу» (в обозначениях на рис. 4  $B_{_{\rm KD}}$  = 2b при  $h = h_{_{\rm KD}}$ ).

Расчеты показали, что в исследуемых в проведенных экспериментах случаях критические уклоны находятся в диапазоне 0,009–0,013. Поэтому уклоны 0,03 и 0,02 заведомо больше критического. При уклоне трубы 0,01 действительные глубины потока в трубе, определяемые степенью наполнения, оказывались существенно бо́льшими, чем критические глубины, что также исключало возможность возникновения гидравлических прыжков. Так, например, для трубы диаметром 0,5 м с полимерным покрытием при расходе 9,5 л/с, обеспечившим действительную глубину потока на равномерном участке около 0,1 м, расчеты критической глубины дали значение 0,038 м.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования были проведены для разных уклонов дна труб: 0,03; 0,02 и 0,01 при разных степенях заполнения. Измерения показали, что в центральной части трубы формируется участок с режимом движения, близким к равномерному, с постоянной глубиной потока и уклоном, равным уклону днища (или оси) трубы. На рис. 7 представлен типичный пример распределения глубин потока вдоль оси трубы (линия свободной поверхности) для случая оцинкованной трубы



диаметром 500 мм при уклоне 0,02. Отметки вдоль горизонтальной оси графика соответствуют точкам подключения пьезометров. Видно, что в средней части трубы устанавливается равномерное движение и лишь на концевом участке линия свободной поверхности несколько искажается.



*Рис.* 7. Глубины потока в трубе Ø 500 мм при уклоне 0,02

Результаты экспериментального определения коэффициентов шероховатости для труб диаметром 500 мм приведены в табл. 3.

Таблица 3

Облицовка	Уклон	Коэффициент шероховатости	Среднее значение	Разброс относительно среднего значения, %
Полимер	0,03	0,02039	0,02018	1,03
	0,02	0,01965		2,64
	0,01	0,02050		1,60
Оцинковка	0,03	0,02076		1,42
	0,02	0,01993	0,02047	2,63
	0,01	0,02072		1,21

## Коэффициенты шероховатости труб Ø 500 мм

Для СВМГТ диаметром 1,0 м, по условиям конструкции экспериментального стенда, фиксированные испытания были проведены для степеней наполнения 0,2 и 0,4. Максимальные степени наполнения, которых удалось достичь на стенде, составили 0,42. Поэтому дополнительно к экспериментальным исследованиям для труб диаметром 1000 мм были выполнены модельные расчеты с использованием методов теории подобия [16], [17].

Линейные размеры исследованных в настоящей работе труб меньшего размера (диаметр 500 мм, размеры гофра 68 × 13 мм) имеют по отношению к трубам большего размера (диаметр 1 000 мм, размеры гофра 125 × 26 мм) линейный масштаб 1 : 2 как по поперечным размерам, так и по размерам гофра. Поэтому возможно применение методов теории подобия для получения характеристик труб большего размера с использованием результатов, полученных на трубах меньшего диаметра.

Моделирование выполняется из условия соблюдения равенства для модели (труба диаметром 500 мм) и натуры (труба диаметром 1 000 мм) критерия Фруда  $Fr = \frac{v^2}{gl}$ , который характеризует соотношение между силами инерции и силами, в поле которых происходит движение потока (силами тяжести). Эти условия дают следующие масштабы для определяемых параметров:

– для линейных размеров (горизонтальных и вертикальных) *b*<sub>1</sub> = 2;

– для скоростей движения потока  $b_{\upsilon} = \sqrt{b_l} = 1,41;$ 

– для расхода воды 
$$b_O = b_I^{\overline{2}} = 5,66$$

– для коэффициента шероховатости  $b_n = b_l^{\frac{1}{6}} = 1,12.$ 



Такое масштабирование было использовано при получении результатов для труб диаметром 1000 мм при степенях наполнения a = 0,6 и 0,8. Предварительно метод подобия был протестирован на экспериментальных результатах, полученных на трубах диаметром 1000 мм для меньших значений степени наполнения. Сопоставление результатов, полученных при масштабном пересчете с использованием теории подобия для небольших степеней заполнения, с экспериментальными данными показало хорошее их совпадение, что подтвердило действенность и результативность такого подхода.

Обобщенные результаты значений коэффициентов шероховатости спиральновитых гофрированных труб диаметром 1000 мм и размером гофра 125 × 26 мм приведены в табл. 4.

Таблица 4

Облицовка	Уклон	Коэффициент Среднее		Разброс относительно среднего	
		шероховатости	значение	значения, %	
Полимер	0,03	0,02629		3,45	
	0,02	0,02481	0,02541	2,37	
	0,01	0,02514		1,08	
Оцинковка	0,03	0,02628		3,68	
	0,02	0,02552	0,02535	0,70	
	0,01	0,02424		4,37	

## Коэффициенты шероховатости труб Ø 1000 мм

## Обсуждение (Discussion)

Результаты выполненной серии экспериментов для спиральновитых металлических гофрированных труб диаметром 500 мм и размерами гофра 68 × 13 мм, а также диаметром 1000 мм и размерами гофра 125 × 26 мм с различным покрытием показали, что определяемые коэффициенты шероховатости для труб рассматриваемого диаметра зависят практически только от диаметра труб и размеров гофра. Полученные коэффициенты шероховатости не зависят от уклона расположения трубы, степени наполнения и материала облицовки. Такой результат представляется вполне обоснованным, поскольку само понятие шероховатости, количественной характеристикой которого является коэффициент шероховатости, характеризует прежде всего качество поверхности: ее размеры, кривизну и неровности.

Результаты, представленные в исследовании [12] и показавшие, что полученный автором «коэффициент шероховатости» зависит от степени наполнения, уклона трубы и некоторых других условий движения потока, свидетельствуют, скорее всего, о том, что параметр, исследуемый в работе [12], является неким условным коэффициентом гидравлического сопротивления. В этом случае находит объяснение его зависимость от всех указанные ранее характеристик потока.

## Выводы (Conclusions)

По итогам выполненных в рамках настоящей работы исследований установлено следующее:

– среднее значение коэффициента шероховатости труб Ø 500 мм получено n = 0,0203;

- среднее значение коэффициента шероховатости труб Ø 1000 мм получено n = 0,0254.

Эти значения рекомендуется использовать при выполнении гидравлических расчетов водопропускной способности соответствующих спиральновитых металлических гофрированных труб.

Работа выполнена совместно и при финансовой поддержке ООО «Мегатех инжиниринг» (г. Санкт-Петербург).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж. Питер Олт. Исследования в условиях строительства гофрированных стальных труб с полимерным покрытием. Национальная ассоциация по производству гофрированных стальных труб / Дж. Питер Олт; Американский институт железа и стали. — NW, Washington DC., 2012. — 39 с. ВЕСТНИК ПОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

2. *Алтунин В. И.* К вопросу выбора расчетного гидравлического режима при проектировании металлических гофрированных водопропускных труб / В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко, О. Н. Черных // Природообустройство. — 2014. — № 2. — С. 51–57.

3. *Черных О. Н.* Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме / О. Н. Черных, В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко // Приволжский научный журнал. — 2015. — № 1 (33). — С. 28–36.

4. *Алтунин В. И.* Гидравлические сопротивления водопропускных труб из гофрированного металла с повышенной абразивной устойчивостью / В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко, О. Н. Черных // Гидротехническое строительство. — 2016. — № 6. — С. 23–29.

5. *Черных О. Н.* Повышение эффективности гидравлической работы дорожных водопропускных труб / О. Н. Черных, В. И. Алтунин, А. В. Бурлаченко // Природообустройство. — 2016. — № 2. — С. 42–47.

6. *Ханов Н. В.* Гидравлические аспекты обеспечения надёжной и безопасной работы трубчатых водопропускных сооружений из гофрированного металла / Н. В. Ханов, А. В. Бурлаченко // Природообустройство. — 2016. — № 5. — С. 32–39.

7. *Altunin V. I.* Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert / V. I. Altunin, O. N. Chernykh // Power Technology and engineering. — 2016. — Vol. 50. — Is. 2. — Pp. 125–129. DOI: 10.1007/ s10749-016-0672-0

8. Черных О. Н. Особенности гидравлического расчета водопропускных сооружений с круглой трубой из металлических гофрированных структур в частично-напорном и напорном режимах труб / О. Н. Черных, Н. В. Ханов, А. В. Бурлаченко // Природообустройство. — 2018. — № 4. — С. 40–47. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-40-47

9. Алтунин В. И. Гидравлические сопротивления металлической гофрированной водопропускной трубы со спиральной формой гофра / В. И. Алтунин, О. Н. Черных // Гидротехническое строительство. — 2016. — № 1. — С. 31–36.

10. Ушаков В. В. Работа водопропускной трубы со спиральной формой гофра / В. В. Ушаков, В. И. Алтунин, О. Н. Черных, А. В. Бурлаченко // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2016. — № 1 (75). — С. 14–17.

11. *Altunin V. I.* Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance / V. I. Altunin, A. V. Burlachenko, O. N. Chernykh // Power Technology and engineering. — 2016. — Vol. 4. — Is. 50. — Pp. 385–390. DOI: 10.1007/s10749-016-0718-3

12. *Бурлаченко А. В.* Совершенствование методов расчета и проектирования водопропускных сооружений из гофрированного металла: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Бурлаченко. — М.: МАДИ 2017. — 214 с.

13. Моргунов К. П. Гидравлика / К. П. Моргунов. — СПб.: Издательство «Лань», 2014. — 288 с.

14. Штеренлихт Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. — СПб.: Издательство «Лань», 2015. — 656 с.

15. *Gioia G*. Scaling and similarity in open channel flows / G. Gioia, F. A. Bombardelli // Physical Review Letters. — 2002. — Vol. 88. — Is. 1. — Pp. 253–277.

16. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. — Л.: Энергия, 1967. — 235 с.

17. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. — М.: Наука, 1977. — 440 с.

#### REFERENCES

1. Olt, Dzh. Piter. Issledovaniya v usloviyakh stroitel'stva gofrirovannykh stal'nykh trub s polimernym pokrytiem. Natsional'naya Assotsiatsiya po Proizvodstvu Gofrirovannykh Stal'nykh Trub. NW, Washington DC., 2012.

2. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "On the question of the choice of the rated hydraulic mode when designing metallic corrugated culvert pipes." *Prirodoobustroistvo* 2 (2014): 51–57.

3. Chernykh, Ol'ga Nikolaevna, Vladimir Ilich Altunin, and Alyona Vladimirovna Burlachenko. "Experimental investigation of corrugated metal pipe with partly full flow." *Privolzhsky Scientific Journal* 1(33) (2015): 28–36.

4. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "Gidravlicheskie soprotivleniya vodopropusknykh trub iz gofrirovannogo metalla s povyshennoi abrazivnoi ustoichivost'yu." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 6 (2016): 23–29.



5. Chernykh, Olga Nikolaevna, Vladimir Iljich Altunin, and Alena Vladimirovna Burlachenco. "Increase of effectiveness of the hydraulic operation of road culvert pipes." *Prirodoobustroistvo* 2 (2016): 42–47.

6. Khanov, N. V., and A. V. Burlachenko. "Hydraulic aspects of ensuring reliable and safe operation of tubular corrugated culverts." *Prirodoobustroistvo* 5 (2016): 32–39.

7. Altunin, V. I., and O. N. Chernykh. "Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert." *Power Technology and engineering* 50.2 (2016): 125–129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0.

8. Chernich, Olga Nikolaevna, Nartmir Vladimirovich Khanov, and Alena Vladimirovna Burlachenko. "Features of hydraulic calculation of culverts with a round pipe made of metal corrugated structures in partially-pressure and pressure modes." *Prirodoobustroistvo* 4 (2018): 40–47. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-40-47.

9. Altunin, V. I., and O. N. Chernykh. "Gidravlicheskie soprotivleniya metallicheskoi gofrirovannoi vodopropusknoi truby so spiral'noi formoi gofra." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 1 (2016): 31–36.

10. Ushakov, V. V., V. I. Altunin, O. N. Chernykh, and A.V. Burlachenko. "Hydraulic resistance of corrugated metal culvert with a spiral corrugation." *Science and Engineering for Highways* 1(75) (2016): 14–17.

11. Altunin, V. I., A. V. Burlachenko, and O. N. Chernykh. "Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance." *Power Technology and engineering* 4.50 (2016): 385–390. DOI: 10.1007/s10749-016-0718-3.

12. Burlachenko, A. V. Sovershenstvovanie metodov rascheta i proektirovaniya vodopropusknykh sooruzhenii iz gofrirovannogo metalla. PhD diss. M.: MADI 2017.

13. Morgunov, K. P. Gidravlika. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2014.

14. Shterenlikht, D. V. Gidravlika. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2015.

15. Gioia, G., and F. A. Bombardelli. "Scaling and similarity in open channel flows." *Physical Review Letters* 88.1 (2002): 253–277.

16. Levi, I. I. Modelirovanie gidravlicheskikh yavlenii. L.: Energiya, 1967.

17. Sedov, L. I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. M.: Nauka, 1977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Моргунов Константин Петрович —	Morgunov, Konstantin P. —
кандидат технических наук, доцент	PhD, associate professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени	Admiral Makarov State University of Maritime
адмирала С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru	e-mail: morgunovkp@gumrf.ru
Ивановский Юрий Кириллович —	Ivanovsky, Yuri K. — Associate professor
доцент	Admiral Makarov State University of Maritime
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени	and Inland Shipping
адмирала С. О. Макарова»	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru	Russian Federation
Баранов Андрей Юрьевич —	e-mail: <i>kaf_gsk@gumrf.ru</i>
кандидат технических наук, доцент	Baranov, Andrey Yu. —
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский	PhD, associate professor
государственный университет промышленных	Saint Petersburg State University of Industrial
технологий и дизайна»	Technologies and Design
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	18 Bolshaya Morskaya Str., St. Petersburg, 191186,
ул. Большая Морская, 18	Russian Federation
e-mail: baranovspb@mail.ru	e-mail: baranovspb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 января 2020 г. Received: January 22, 2020. 2020 год. Том 12. № 2<sub>1</sub>

335

NEODA TION A BOUT THE AUTHORS