

Оценка влияния заиливания трубопровода на его пропускную способность

А.Э. Тен, Н.Т. Джумагулова, Ю.В. Брянская

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время при строительстве инженерных систем различного назначения используются трубопроводы из полимерных материалов. При проведении гидравлических расчетов зачастую такие трубопроводы считаются гладкими. Данное предположение в большинстве случаев принимается без проведения гидравлических испытаний. Трубопроводы с гофрированной поверхностью, представляющей собой регулярные местные сопротивления, следует рассматривать как шероховатые. Для установления особенностей их работы и повышения точности гидравлических расчетов необходимо проведение экспериментальных исследований. Гофрированный трубопровод АСО Qmax был разработан в качестве дренажной системы для отвода поверхностного стока. Цель работы — сравнение пропускной способности трубопровода системы АСО Qmax при частичном заиливании в пределах гофра и при его отсутствии.

Материалы и методы. Ввиду сложной структуры внутренней поверхности сопротивление описанного полимерного трубопровода возможно определить только опытным путем. С помощью экспериментов в лаборатории гидравлики и гидромеханики НИУ МГСУ выявлены гидравлические характеристики для гофрированного трубопровода АСО Qmax с частичным заиливанием в пределах нижней части гофра.

Результаты. Эксперименты выполнялись при следующих режимах: при расходах Q (от 13,9 до 79,1 м³/ч) и уклоне дна лотка $i = 0,005$; при расходах Q (от 14 до 89,1 м³/ч) и уклоне дна лотка $i = 0,01$.

Выводы. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о том, что частичное заиливание трубопровода в пределах гофра лотковой части практически не оказывает влияния на его гидравлическое сопротивление. Сравнение экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе показывает, что они практически не различаются. Полученные значения коэффициента шероховатости можно принять для данного трубопровода постоянными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гофрированный трубопровод, трубопровод из полимерных материалов, гидравлическое сопротивление, глубина потока, заиливание, коэффициент гидравлического сопротивления, коэффициент шероховатости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тен А.Э., Джумагулова Н.Т., Брянская Ю.В. Оценка влияния заиливания трубопровода на его пропускную способность // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 360–369. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.360-369

Impact assessment of silting on pipeline capacity

Andrey E. Ten, Nazira T. Dzhumagulova, Yuliya V. Bryanskaya

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Currently, in the construction of engineering systems for various purposes, pipelines made of polymer materials are often used. The ACO Qmax corrugated pipeline was developed as a drainage system for the drainage of surface runoff. The widespread use in practice of corrugated pipes, which have a significantly higher roughness than technically smooth ones, has caused the need to perform a number of calculations that take into account the features of their hydraulic operation. The purpose of the work is to compare the pipeline capacity in the case of partial silting within the corrugation and in the absence of it.

Materials and methods. Due to the complex structure of the inner surface, the resistance of the described polymer pipeline can only be determined experimentally. The hydraulic characteristics of the ACO Qmax corrugated pipeline with partial silting were determined experimentally in the Laboratory of Hydraulics and Hydromechanics of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

Results. The experiments were carried out under the following conditions: at flow rates Q (from 13.9 to 79.1 m³/h) and the slope of the bottom of the tray $i = 0.005$; at flow rates Q (from 14 to 89.1 m³/h) and the slope of the bottom of the tray $i = 0.01$. According to the experimental data obtained, the values of the hydraulic resistance coefficient, the Shezi coefficient, the Manning roughness, and the average flow velocity were calculated. The roughness obtained in a “clean” and partially silted pipeline is compared.

Conclusions. According to the results of the conducted experimental studies, it is concluded that the partial silting of the pipeline within the corrugation of the tray part practically does not affect its hydraulic resistance. A comparison of the experimen-

tal values of the average flow velocities in a silted and non-silted pipeline shows that they practically do not differ. Thus, the obtained values of the roughness coefficient can be assumed to be constant for this pipeline.

KEYWORDS: corrugated pipeline, pipeline made of polymer materials, hydraulic resistance, flow depth, silting, drag coefficient, roughness coefficient

FOR CITATION: Ten A.E., Dzhumagulova N.T., Bryanskaya Yu.V. Impact assessment of silting on pipeline capacity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):360-369. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.360-369 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на рынке появляются новые строительные материалы, которые широко внедряются в инженерной практике, в том числе при производстве трубопроводов различного назначения. При строительстве трубопроводов и коллекторов довольно часто используют пластмассовые (полимерные) трубы, что составляет около 25 % от общего объема [1]. Важнейшими характеристиками, определяющими выбор полимерного материала, являются их коррозионная стойкость, повышенная долговечность, малый вес и т.д.¹ [2, 3]. Считается, что в этих трубах с течением времени гидравлическое сопротивление не увеличивается. В результате, что очень важно, водопропускная способность таких труб в период эксплуатации не сокращается^{2, 3} [4]. Особый интерес для решения практических задач представляет движение жидкости в открытых каналах [5]. Один из основных вопросов, решаемых при проектировании трубопроводных инженерных систем, — гидравлический расчет, учитывающий потери напора на трение по длине трубы и потери в местных сопротивлениях [6–8]. Общеизвестно, что величина потерь напора зависит от состояния внутренней поверхности трубы. Как правило, коэффициент шероховатости трубопроводов из полимерных материалов неизвестен. Считается, что шероховатость пластмассовых трубопроводов мала, и при гидравлическом расчете их можно считать гладкими. Однако состояние внутренней поверхности трубопроводов в значительной степени зависит от технологии их производства, наличия стыков, ребер жесткости и т.п. Несмотря на то, что пластмассовые трубопроводы применяются уже несколько десятилетий, особенности их гидравлической работы до сих пор мало изучены [9–13]. И в отечественной, и в зарубежной литературе вопрос об изучении гидравлического сопротивления трубопроводов и каналов из различных материалов остается актуальным [14–23].

¹ Выбор характеристик полиэтиленовых труб в зависимости от результатов гидравлического расчета // Сантехника. 2019. № 2. С. 22–25.

² Методическое пособие по проектированию и монтажу наружных сетей водоотведения из полипропиленовых гофрированных труб SN8, SN10, SN16. СПб., 2019.

³ СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гофрированный трубопровод АСО Qmax был разработан в качестве дренажной системы для отвода поверхностного стока. Трубопровод изготовлен из полиэтилена, включая материалы вторичного использования, он прочный и устойчивый к коррозии. В заводском производстве трубы длиной 2 м имеют герметичные соединения между отдельными секциями, просты при сборке и монтаже.



Рис. 1. Трубопровод системы АСО Qmax при отсутствии заиливания

Fig. 1. The pipeline of the ACO Qmax system in the absence of silting

Сложный профиль внутренней поверхности трубы системы АСО Qmax по всей длине секции представляет собой регулярные впадины размером 11 × 11 мм, образованные ребрами жесткости трубопровода, перемежающиеся через каждые 1,4 м полыми опорами глубиной 50 мм и шириной 55 мм. Постоянные сужения и расширения — это регулярные местные сопротивления (рис. 1), которые для упрощения описания и оценки обобщенного гидравлического сопротивления трубопровода можно условно трактовать как некоторую макрошероховатость. Трубопроводы системы АСО Qmax работают, как правило, в безнапорном режиме, следовательно, имеют свободную поверхность, положение которой при неравномерном и неустановившемся движении может изменяться с течением времени, а также по длине потока. Как известно, такие гидравлические характеристики потока, как глубина, расход, уклон дна канала и уклон свободной поверхности, взаимосвязаны [5, 24, 25], что усложняет математическое описание процесса движения жидкости. Ввиду слож-

ной структуры внутренней поверхности сопротивление описанного полимерного трубопровода возможно определить только опытным путем.

В процессе эксплуатации углубления в придонной части трубопровода будут заполняться загрязнениями, содержащимися в сточных водах. Для оценки изменения гидравлических характеристик выполнены экспериментальные исследования по определению пропускной способности гофрированного трубопровода АСО Qmax с частичным заиливанием нижней части трубопровода в пределах гофра в лаборатории гидравлики и гидромеханики НИУ МГСУ.

Данная работа является продолжением исследований, посвященных экспериментальному изучению гидравлических характеристик гофрированного трубопровода АСО Qmax [26].

Экспериментальные исследования, описанные в настоящей статье, направлены на изучение гидравлических характеристик трубы при эксплуатации с частичным заиливанием нижней части гофра. Гофрированные складки в придонной области и полые опоры были заполнены плиточным клеем, который после высыхания покрыт эпоксидным клеем для предотвращения вымывания заполнителя и имитации отложений ила на поверхности (рис. 2).



Рис. 2. Трубопровод системы АСО Qmax с имитацией частичного заиливания придонной части

Fig. 2. The pipeline of the АСО Qmax system with simulation of partial silting of the bottom part

В ходе экспериментов осуществлялись замеры:

- наполнения трубопровода в зависимости от расхода;
- изменения глубины по длине трубопровода для различных уклонов;
- средней скорости потока при различных расходах.

При проведении экспериментов исследуемый трубопровод был установлен в лабораторном канале⁴ (изготовитель G.U.N.T. Gerätebau GmbH (Германия))

⁴ HM162. Experimental flume 309 × 450 mm / U. Linke. Hamburg : G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 2013. 52 p.

длиной 15,5 м, шириной $B = 0,31$ м. Исходя из параметров лабораторного канала, для экспериментальных исследований взят натуральный трубопровод диаметром 225 мм, суммарная длина установленного трубопровода составила 14 м (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальный стенд

Fig. 3. The experimental stand

Лабораторный канал оборудован электромагнитным расходомером Promag 10D80⁵, пультом управления режимом работы лотка, коммутатором дистанционного управления лабораторным каналом, пультом управления уклоном канала, управляющим компьютером со специализированным программным обеспечением.

Наполнение трубопровода производилось сосредоточенно из резервуара экспериментального стенда. Для сопоставления опытных данных, полученных для «чистого» трубопровода и трубопровода с частичным заиливанием гофрированных складок в придонной части, расходы и уклоны были выбраны такими же, как и при проведении экспериментов с чистым трубопроводом. Следует отметить, что выбранные уклоны 0,5 и 1 % близки к реальным. При выполнении экспериментов расход изменялся от 3,86 до 21,97 л/с при уклоне $i = 0,005$ и от 3,89 до 24,75 л/с при уклоне $i = 0,01$. В процессе экспериментальных исследований замерялось изменение глубины по длине потока электронным шпигунмаштабом с точностью измерений до 0,01 мм, что позволило установить длину начального участка с неравномерным движением. Поскольку испытуемый трубопровод имеет значительную шероховатость, длина начального участка невелика и не превышает $15d$. На достаточном удалении от начального сечения течение может считаться стабилизировавшимся. Для расчета гидравлического сопротивления был выбран створ с равномерным движением, в котором не наблюдается влияние начальных возмущений, а также влияние выходного участка. С целью контроля полу-

⁵ Паспорт государственного эталона единицы объема жидкости в диапазоне значений объемного расхода от 0 до 130 м³/ч № ЛПГ-0001. М. : МГСУ, 2017.

ченных результатов в расчетном створе также производились замеры скорости потока микровертушкой⁶ [26].

При проведении гидравлических расчетов открытых каналов в мировой практике достаточно часто используется формула Шези для установления пропускной способности:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

где ω — площадь живого сечения потока; C — коэффициент Шези; R — гидравлический радиус; i — гидравлический уклон.

Для определения коэффициента Шези существует множество эмпирических формул, наибольшее распространение получила формула Маннинга, которая и была использована в настоящей работе:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (2)$$

где n — коэффициент шероховатости по Маннингу.

Также коэффициент Шези можно получить, зная величину коэффициента гидравлического сопротивления λ , используя зависимость между ними:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (3)$$

При осуществлении экспериментов значение коэффициента гидравлического сопротивления вы-

являлось с помощью зависимостей (1) и (3) следующим образом:

$$\lambda = \frac{8gRi}{V}. \quad (4)$$

Гидравлический радиус R и площадь живого сечения потока ω определялись в зависимости от наполнения трубопровода h/d по номограммам⁷. Применяя величину расхода, установленного по показаниям высокоточного электромагнитного расходомера, а также рассчитанного по наполнению трубопровода значения площади живого сечения, определялась средняя скорость потока:

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (5)$$

Таким образом, по приведенным выше зависимостям (1)–(5) установлены величины коэффициента шероховатости n по Маннингу для всех рассмотренных условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения глубины по длине потока в трубопроводе с имитацией частичного заиливания для различных наполнений с уклоном $i = 0,005$ представлены на рис. 4, а для уклона $i = 0,01$ на рис. 5.

Данные экспериментальных измерений по наполнению трубопровода приведены в таблице и на рис. 5.

⁶ СТО 4.2-2-2014. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Градуировка регулирующих сооружений. Новочеркасск : РосНИИПМ, 2014. 55 с.

⁷ Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л. : Стройиздат, 1973. 408 с.

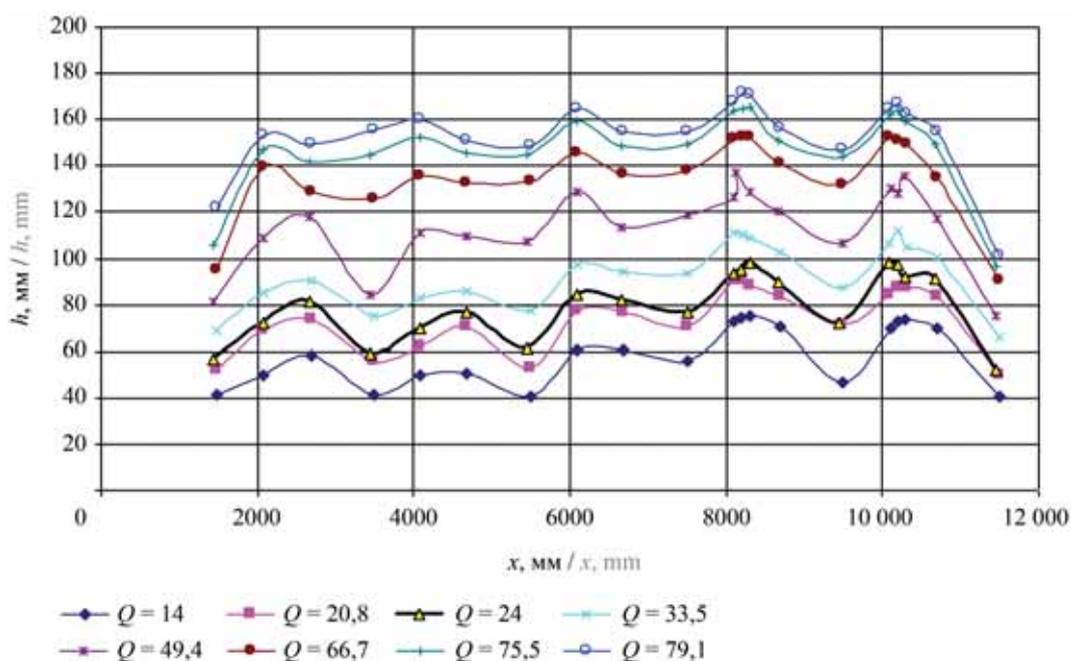


Рис. 4. Изменение глубины потока по длине трубопровода для уклона $i = 0,005$. Расход представлен в $\text{м}^3/\text{ч}$

Fig. 4. Changes in the flow depth along the length of the pipeline for the slope $i = 0,005$. The flow rate is presented in m^3/h

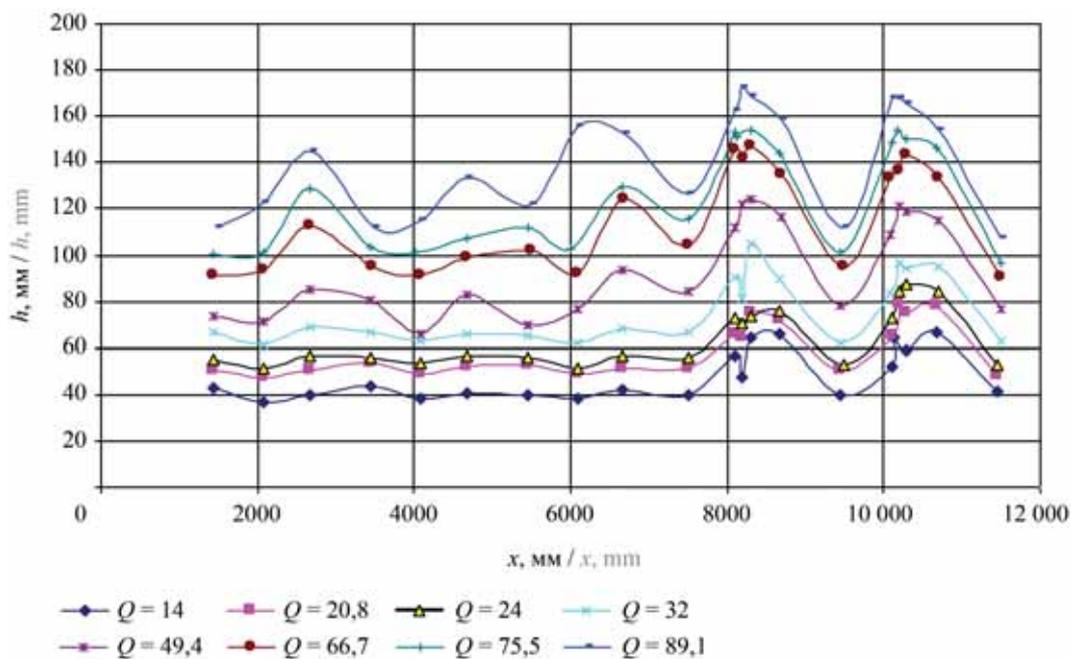


Рис. 5. Изменение глубины потока по длине трубопровода для уклона $i = 0,01$. Расход представлен в $\text{м}^3/\text{ч}$
 Fig. 5. Change in the flow depth along the length of the pipeline for the slope $i = 0.01$. The flow rate is presented in $\text{м}^3/\text{ч}$

Экспериментальные значения и гидравлические характеристики для трубопровода с частичным заиливанием
 The experimental values and the hydraulic characteristics of pipe with a partial silting

i	$Q, \text{м}^3/\text{ч} / \text{м}^3/\text{h}$	$h, \text{мм} / \text{mm}$	h/d	$V, \text{м/с} / \text{m/s}$	λ	$R, \text{м} / \text{m}$	C	n	Re
0,005	13,9	73	0,32	0,35	0,1297	0,0405	24,38	0,024	56 700
0,005	20,8	88,5	0,39	0,40	0,1136	0,0473	26,27	0,023	76 356
0,005	33,5	109	0,48	0,50	0,085	0,0540	30,32	0,020	107 568
0,005	66,5	152	0,68	0,64	0,063	0,0658	35,10	0,018	168 480
0,005	24,0	96	0,43	0,40	0,1214	0,0495	25,39	0,024	79 200
0,005	49,4	131	0,58	0,58	0,072	0,0608	33,02	0,019	139 725
0,005	75,5	164	0,73	0,69	0,056	0,0675	37,31	0,017	184 950
0,005	79,1	168	0,75	0,69	0,0556	0,0675	37,62	0,017	186 300
0,01	66,7	142	0,63	0,70	0,1018	0,0636	27,60	0,023	177 975
0,01	75,5	152	0,68	0,72	0,0996	0,0658	28,18	0,023	189 540
0,01	49,4	118	0,52	0,66	0,103	0,0574	27,73	0,022	151 470
0,01	14,0	57,4	0,26	0,47	0,1199	0,0338	25,37	0,022	63 450
0,01	24,0	77	0,34	0,58	0,098	0,0422	28,17	0,021	97 875
0,01	20,8	71	0,31	0,56	0,097	0,0388	28,39	0,020	86 940
0,01	32,0	93	0,41	0,59	0,109	0,0484	26,77	0,023	114 165
0,01	89,1	169	0,75	0,78	0,087	0,0675	29,97	0,021	210 600

Сравнение результатов по изменению глубины потока по длине трубопровода с частичным заиливанием с результатами, полученными при экспериментах с чистым трубопроводом [26], показало, что наполнение трубопровода при частичном заиливании в пределах гофра слабо влияет на глубину потока в трубопроводе, который остается близким к наполнению трубы при отсутствии заиливания. Изменение

экспериментальных значений средней скорости в зависимости от расхода для различных уклонов показано в таблице и на рис. 6.

Экспериментальные данные по связи средней скорости потока с расходом, приведенные на рис. 7, показывают, что скорость практически линейно возрастает с расходом и увеличивается с ростом уклона.

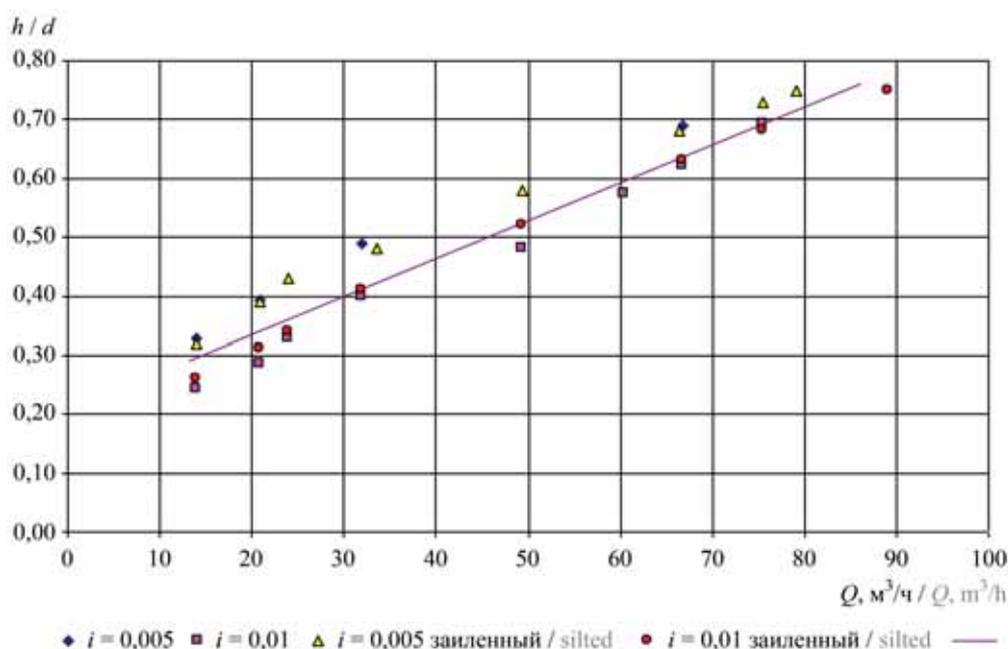


Рис. 6. Изменение наполнения трубопровода в зависимости от расхода при различных уклонах $h/d = f(Q)$

Fig. 6. Changes in the filling of the pipeline depending on the flow rate at different slopes

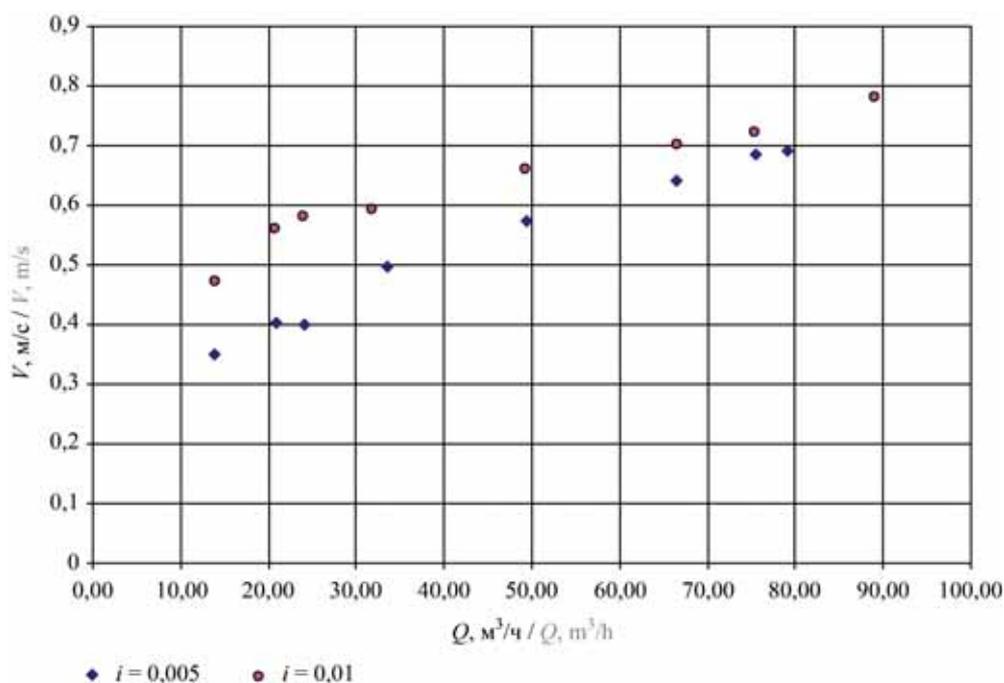


Рис. 7. Изменение средней скорости в зависимости от расхода для различных уклонов в трубопроводе с частичным заиливанием

Fig. 7. Changes in the average speed as a function of flow rate for different slopes in a partially silted pipeline

Сопоставление экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе (рис. 8) демонстрирует, что они практически не различаются.

Полученное в результате экспериментов значение шероховатости по Маннингу для чистого трубопровода и с имитацией частичного заиливания приведено на рис. 9.

Из сопоставления экспериментальных данных видно, что значение шероховатости практически

не обнаруживает влияния уклона, наполнения и частичного заиливания трубопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований для трубопроводов системы АСО Qmax с частичным заиливанием нижней части гофра в пределах лотковой части получено значение коэффициента шероховатости по Маннингу, равное

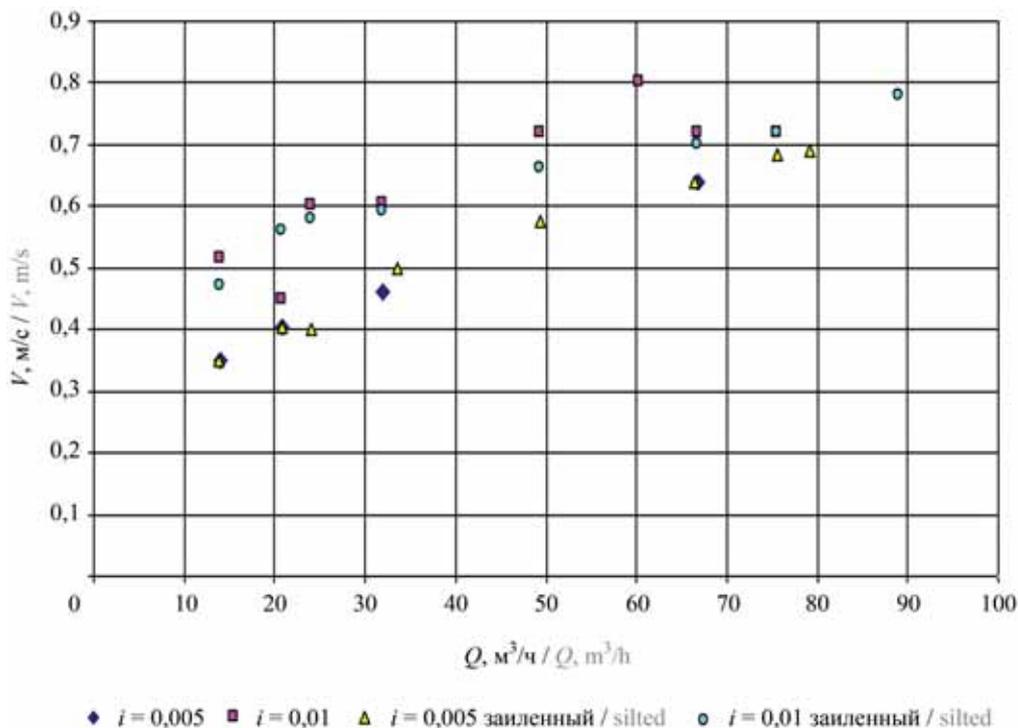


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных значений средних скоростей течения в заиленном и незаиленном трубопроводе

Fig. 8. Comparison of experimental values of the average flow velocity in silted and non-silted pipelines

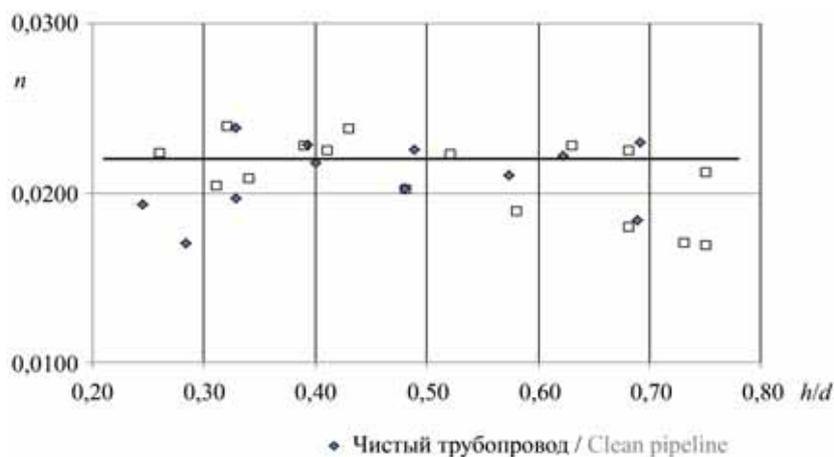


Рис. 9. Изменение шероховатости в зависимости от наполнения трубопровода

Fig. 9. Changes in roughness depending on the filling of the pipeline

0,022–0,024. Несмотря на то что частичное заиливание и сглаживание шероховатости нижней части гофра могло бы привести к уменьшению гидравлического сопротивления трубопровода, значения коэффициента шероховатости оказались близкими к значениям, полученным для трубопровода без заиливания [26]. Согласно справочным данным⁸, такое значение коэффициента шероховатости близко к значениям, соответствующим шероховатости земляных каналов. По-

⁸ Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. М. : Энергия, 1972. 312 с.

лученные значения коэффициента шероховатости по Маннингу соответствуют значениям коэффициента гидравлического сопротивления порядка 0,1.

Сопоставление полученных значений шероховатости для частично заиленного и чистого трубопровода системы АСО Qmax позволяет сделать вывод о том, что коэффициент шероховатости можно принять постоянным вне зависимости от занесения нижней части трубопровода неразмываемым осадком.

Таким образом, результаты исследований показали, что частичное заиливание трубопровода не оказывает влияния на его пропускную способность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильина С.И., Рожкова И.В., Жарков С.А. К расчету коэффициента трения в полимерных трубопроводах // *Успехи в химии и химической технологии*. 2011. Т. 25. № 1 (117). С. 91–93.
2. Отставнов А.А., Примин О.Г., Хренов К.Е., Орлов В.А., Харькин В.А. К выбору ПЭ-труб для наружных сетей // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2012. № 8 (128). С. 18–23.
3. Верецагина Л.М., Тен А.Э., Громов Г.Н., Худякова Д.Д. Методика гидравлического расчета инновационных конструкций системы отвода поверхностных сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2019. № 8. С. 56–61. DOI: 10.35776/MNP.2019.08.06
4. Отставнов А.А., Ионов В.С. К вопросу общего подхода к гидравлическим расчетам трубопроводов внутреннего водоснабжения и водяного отопления из металла и полимера // *Сантехника*. 2003. № 5. С. 42–46.
5. Castro-Orgaz O., Hager W.H. Joseph Boussinesq and his theory of water flow in open channels // *Journal of Hydraulic Research*. 2011. Vol. 49. Issue 5. Pp. 569–577. DOI: 10.1080/00221686.2011.588784
6. Wang N., You S., Wang Y., Zhang H., Miao Q., Zheng X. et al. Hydraulic resistance identification and optimal pressure control of district heating network // *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 170. Pp. 83–94. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.003
7. Arifjanov A., Rakhimov Q., Samiev L., Abduraimova D., Apakhodjaeva T. Hydraulic friction coefficient at hydraulic mixing movement in pressure pipelines // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020. Vol. 12. Issue SP7. Pp. 1332–1336. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP7/20202233
8. Stewart M.T., Cameron S.M., Nikora V.I., Zampiron A., Marusic I. Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds // *Journal of Hydraulic Research*. 2019. Vol. 57. Issue 2. Pp. 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296
9. Sukharev M.G., Karasevich A.M., Samoilov R.V., Tverskoi I.V. Investigation of the hydraulic resistance in polyethylene pipelines // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005. Vol. 78. Issue 2. Pp. 350–359. DOI: 10.1007/s10891-005-0068-8
10. Продоус О.А., Терехов Л.Д. Гидравлические характеристики раструбных труб из ВЧШГ с полиуретановым покрытием внутренней поверхности // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. № 5. С. 53–57.
11. Продоус О.А. Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2018. № 11. С. 60–64.
12. Митрахович А.И., Макоед В.М., Лавушев С.М., Сергеева А.П. Условия применения двухслойных гофрированных полиэтиленовых труб «Корсис» на мелиоративных объектах // *Мелиорация*. 2020. № 1 (91). С. 15–23.
13. Al-Mahfooz M.J., Mahdi E. Bending behavior of glass fiber reinforced composite overwrapping pvc plastic pipes // *Composite Structures*. 2020. Vol. 251. P. 112656. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112656
14. Продоус О.А., Терехов Л.Д., Смолин Е.С. Анализ зарубежных и отечественных расчетных зависимостей для определения потерь напора в трубопроводах из полимерных материалов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2019. № 1. С. 56–60.
15. Bozorov O.S., Khujayev I.Q., Mamatqulova M.S. Distribution of the impulse in pipelines with irregularly distributed hydraulic resistance // *Theoretical & Applied Science*. 2018. Vol. 66. Issue 10. Pp. 54–57. DOI: 10.15863/TAS.2018.10.66.8
16. Gersten K., Papenfuss H.-D., Kurschat T., Genillon P. New transmission-factor formula proposed for gas pipelines // *Oil and Gas Journal*. 2000. Vol. 98. Issue 7. Pp. 58–62.
17. Fournier A., Kuper W. Determining actual wall roughness from operational data. N.V. Nederlandse Gasunie, 1994 (paper for PSIG meeting 1994). URL: <http://www.psig.org/Papers/archive.asp year=1994>
18. Altunin V., Chernykh O. Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert // *Power Technology and Engineering*. 2016. Vol. 50. Issue 2. Pp. 125–129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0

19. Bossinov D.Zh., Zhabbasbaev U.K. About one inverse problem on determination the hydraulic resistance of the pipeline // *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*. 2019. Vol. 102. Issue 2. DOI: 10.26577/jmmcs-2019-2-24

20. Covas D., Stoianov I., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I — experimental analysis and creep characterization // *Journal of Hydraulic Research*. 2004. Vol. 42. Issue 5. Pp. 517–532. DOI: 10.1080/00221686.2004.9641221

21. Айда-Заде К.Р., Кулиев С.З. Задача идентификации коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода // *Автоматика и телемеханика*. 2016. № 7. С. 123–141.

22. Остякова А.В. Гидравлическое сопротивление речного русла на начальной стадии формирования рельефа дна // *Научное обозрение*. 2016. № 1. С. 259–265.

23. Zlobin A.V., Tarasevich S. Hydraulic resistance of pipes with uniform continuous roughness in the form of a metric thread of varying profile and an inserted twisted tape // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. Issue 5. Pp. 1226–1232. DOI: 10.1007/s10891-020-02225-1

24. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 373. Pp. 33–79. DOI: 10.1017/s0022112098002419

25. Брянская Ю.В., Байков В.Н., Волинов М.А. Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление при течении в трубах, каналах и речных руслах // *Гидротехническое строительство*. 2011. № 3. С. 37–39.

26. Bryanskaya Yu.V., Dzhumagulova N.T. Experimental determination of hydraulic characteristics of corrugated pipeline // *Power Technology and Engineering*. 2020. Vol. 54. Issue 1. Pp. 28–31. DOI: 10.1007/s10749-020-01161-7

Поступила в редакцию 1 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 30 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 1 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Андрей Эдисович Тен — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ten_ae@mosvodokanal.ru;

Назира Тентимишовна Джумагулова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 311480; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6392-7447, РИНЦ ID: 280769, ResearcherID: AAE-7741-2020, Scopus: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

REFERENCES

1. Il'ina S.I., Rozhkova I.V., Zharkov S.A. To calculate the coefficient of friction in polymer pipelines. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2011; 25(1):(117):91-93. (rus.).

2. Otstavnov A.A., Primin O.G., Khrenov K.E., Orlov V.A., Khar'kin V.A. To the choice of PE pipes for outdoor networks. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2012; 8(128):18-23. (rus.).

3. Vereshchagina L., Ten A., Gromov G., Khudikova D. Method of hydraulic calculation of the innovative designs of surface runoff disposal. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 8:56-61. DOI: 10.35776/MNP.2019.08.06 (rus.).

4. Otstavnov A.A., Ionov V.S. On the issue of a general approach to hydraulic calculations of internal water supply and water heating pipelines made of metal and polymer. *Plumbing*. 2003; 5:42-46. (rus.).

5. Castro-Orgaz O., Hager W.H. Joseph Bousinesq and his theory of water flow in open channels. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(5):569-577. DOI: 10.1080/00221686.2011.588784

6. Wang N., You S., Wang, Y., Zhang H., Miao Q., Zheng X. et al. Hydraulic resistance identification and optimal pressure control of district heating network. *Energy and Buildings*. 2018; 170:83-94. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.003

7. Arifjanov A., Rakhimov Q., Samiev L., Abduraimova D., Apakhodjaeva T. Hydraulic friction coefficient at hydraulic mixing movement in pressure pipelines. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020; 12(SP7):1332-1336. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP7/20202233

8. Stewart M.T., Cameron S.M., Nikora V.I., Zampiron A., Marusic I. Hydraulic resistance in

- open-channel flows over self-affine rough beds. *Journal of Hydraulic Research*. 2019; 57(2):183-196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296
9. Sukharev M.G., Karasevich A.M., Samoilov R.V., Tverskoi I.V. Investigation of the Hydraulic Resistance in Polyethylene Pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005; 78(2):350-359. DOI: 10.1007/s10891-005-0068-8
10. Prodous O.A., Terekhov L.D. Hydraulic characteristics of high-pressure bell pipes with polyurethane coating on the inner surface. *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2017; 5:53-57. (rus.).
11. Prodous O.A. Predicting head loss in pipelines made of different polymer materials. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 11:60-64. (rus.).
12. Mitrakhovich A.I., Makoed V.M., Lavushev S.M., Sergeenya A.P. Conditions of application of two-layer corrugated polyethylene pipes “Corsis” on meliorative objects. *Melioration*. 2020; 1(91):15-23. (rus.).
13. Al-Mahfooz M.J., Mahdi E. Bending behavior of glass fiber reinforced composite overwrapping PVC plastic pipes. *Composite Structures*. 2020; 251:112656. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112656
14. Prodous O.A., Terekhov L.D., Smolin E.S. Analysis of foreign and domestic dependencies for determining pressure losses in pipelines made of polymer materials. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 1:56-60. (rus.).
15. Bozorov O.S., Khujaev I.Q., Mamatqulova M.S. Distribution of the impulse in pipelines with irregularly distributed hydraulic resistance. *Theoretical & Applied Science*. 2018; 66(10):54-57. DOI: 10.15863/TAS.2018.10.66.8
16. Gersten K., Papenfuss H.-D., Kurschat T., Genillon P. New transmission-factor formula proposed for gas pipelines. *Oil and Gas Journal*. 2000; 98(7):58-62.
17. Fournier A., Kuper W. *Determining actual wall roughness from operational data. N.V. Nederlandse Gasunie, 1994 (paper for PSIG meeting 1994)*. <http://www.psig.org/Papers/archive.asp year=1994>
18. Altunin V., Chernykh O. Hydraulic resistance of a helially corrugated metal pipe culvert. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(2):125-129. DOI: 10.1007/s10749-016-0672-0
19. Bossinov D.Zh., Zhabbasbaev U.K. About one inverse problem on determination the hydraulic resistance of the pipeline. *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science*. 2019; 102(2). DOI: 10.26577/jmmcs-2019-2-24
20. Covas D., Stoianov I., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I — experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Research*. 2004; 42(5):517-532. DOI: 10.1080/00221686.2004.9641221
21. Ayda-Zade K.R., Kuliyeв S.Z. Hydraulic resistance coefficient identification in pipelines. *Automation and Telemechanics*. 2016; 7:123-141. (rus.).
22. Ostyakova A.V. Hydraulic resistance of the river bed at the initial stage of bottom relief formation. *Science Review*. 2016; 1:259-265. (rus.).
23. Zlobin A.V., Tarasevich S. Hydraulic resistance of pipes with uniform continuous roughness in the form of a metric thread of varying profile and an inserted twisted tape. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020; 93(5):1226-1232. DOI: 10.1007/s10891-020-02225-1
24. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998; 373:33-79. DOI: 10.1017/s0022112098002419
25. Bryanskaya Yu.V., Baykov V.N., Volyonov M.A. Velocity distribution and hydraulic resistance during flow in pipes, channels and riverbeds. *Power Technology and Engineering*. 2011; 3:36-39. (rus.).
26. Bryanskaya Yu.V., Dzhumagulova N.T. Experimental determination of hydraulic characteristics of corrugated pipeline. *Power Technology and Engineering*. 2020; 54(1):28-31. DOI: 10.1007/s10749-020-01161-7

Received March 1, 2021.

Adopted in revised form on March 30, 2021.

Approved for publication on April 1, 2021.

BIONOTES: **Andrey E. Ten** — postgraduate student of the Department of Water supply and sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ten_ae@mosvodokanal.ru;

Nazira T. Dzhumagulova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 311480; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Yuliya V. Bryanskaya — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 6392-7447, ID RSCI: 280769, ResearcherID: AAE-7741-2020, Scopus: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.