

# Сравнение методов расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах

Андрей Львович Зуйков<sup>1</sup>, Назира Тентимишовна Джумагулова<sup>1</sup>,  
Абдуламир Лейс Саид Абдуламир<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Университет Кербелы; г. Кербела, Ирак

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрены три метода расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах: экспериментальный, традиционный и с использованием программного обеспечения SewerCAD. Сегодня возможно дальнейшее развитие гидравлических методов расчета турбулентных течений в безнапорных трубопроводах благодаря новым способам измерения и эффективным программным продуктам. Для повышения точности гидравлических расчетов (ГР) необходимо проведение экспериментальных исследований. Цель исследования — определить гидравлические характеристики потока в безнапорных трубопроводах тремя методами и найти взаимосвязь между ними. В ходе выполнения ГР трубопроводов, обеспечивающих подачу воды на большие расстояния, следует предъявлять повышенные требования к точности конечных результатов, так как это связано с мониторингом аварийных ситуаций. При безнапорном движении жидкости движущей силой, определяющей скорость потока, является составляющая силы тяжести, направленная вдоль потока. До настоящего времени широко применяется формула, устанавливающая среднюю скорость равномерного течения в безнапорном трубопроводе, предложенная А. Шези. Определены зависимости наполнения трубы от средней скорости потока при различных уклонах. Проведено сравнение средних скоростей, полученных в результате экспериментальных исследований и расчетным путем с помощью программы SewerCAD. Правомочность практического использования предложенной методики подтверждается результатами обработки экспериментальных данных как авторами, так и другими исследователями.

**Материалы и методы.** Применены методы расчета турбулентных течений в безнапорных трубопроводах с помощью экспериментальных данных, традиционных методов и компьютерных технологий, что повышает точность расчетных параметров потока, надежность работы трубопроводной системы.

**Результаты.** Представлены результаты эксперимента, программы SewerCAD и традиционного метода расчета скорости при различных расходах для безнапорных труб из полиэтилена диаметром 100 мм при наполнении трубопровода от 0,1 до 0,8.

**Выводы.** Проведены лабораторные исследования по определению гидравлических характеристик потока полиэтиленового трубопровода диаметром 100 мм. Получены соответствующие зависимости для средней скорости между результатами эксперимента и программой SewerCAD для безнапорной системы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** методы расчета турбулентных течений, скорость потока, уклон трубы, гидравлические характеристики потока, программное обеспечение SewerCAD, безнапорное движение потока

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Зуйков А.Л., Джумагулова Н.Т., Абдуламир А.Л.С. Сравнение методов расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 800–810. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.800-810

Автор, ответственный за переписку: Абдуламир Лейс Саид Абдуламир, laithsaeed62@gmail.com.

## Comparison of methods for calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines

Andrey L. Zuykov<sup>1</sup>, Nazira T. Dzhumagulova<sup>1</sup>, Abdulameer Layth Saeed Abdulameer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> University of Karbala; Karbala, Iraq

## ABSTRACT

**Introduction.** Three methods of calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines are considered. These methods are experimental, traditional and using SewerCAD software. Currently, further development of hydraulic methods for calculating turbulent flows in non-pressure pipelines is possible due to new measurement methods and effective software products. To improve the accuracy of hydraulic calculations, it is necessary to conduct experimental studies. The purpose of the work is to determine the hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines using three methods

and find the relationship between them. When carrying out hydraulic calculations of pipelines that supply water over long distances, it is necessary to place increased demands on the accuracy of the results, as this is associated with monitoring emergencies. When fluid moves without pressure, the driving force that determines the flow velocity is the component of gravity directed along the flow. To this day, the formula that determines the average velocity of a uniform flow in a non-pressure pipeline, proposed by A. Chezy, is widely used. The work established the dependence of pipe filling on the average flow velocity at various slopes. A comparison was made of the average velocity obtained as a result of experimental studies and calculations using SewerCAD programme. The validity of the practical use of the proposed methodology is confirmed by the results of processing experimental data both by the authors and by other researchers.

**Materials and methods.** Methods of calculation of turbulent flows in non-pressure pipelines using experimental data, traditional methods and computer technologies were applied, which increases the accuracy of the calculated flow parameters and the reliability of the pipeline system.

**Results.** The results of the experiment, SewerCAD programme and traditional method of velocity calculation at different flow rates for non-pressure polyethylene pipes with a diameter of 100 mm with a pipeline filling from 0.1 to 0.8 are presented.

**Conclusions.** Laboratory researches were carried out to determine the hydraulic characteristics of the flow of a polyethylene pipeline with a diameter of 100 mm. Corresponding dependencies for the average velocity between the experimental results and SewerCAD programme for a non-pressure system were obtained.

**KEYWORDS:** methods of calculation of turbulent flows, flow velocity, pipe slope, hydraulic flow characteristics, SewerCAD software, non-pressure flow

**FOR CITATION:** Zuykov A.L., Dzhumagulova N.T., Abdulameer A.L.S. Comparison of methods for calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):800-810. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.800-810 (rus.).

*Corresponding author:* Abdulameer Layth Saeed Abdulameer, laithsaeed62@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Турбулентное движение жидкости представляет собой одно из сложнейших гидравлических явлений [1–10]. Вследствие сложной картины движения частиц жидкости в турбулентном потоке до сих пор нет законченной строгой теории такого движения.

Усовершенствование методов гидравлического расчета (ГР) водопроводных сетей — необходимое условие дальнейшего улучшения проектирования трубопроводных систем для транспортирования воды, повышения эффективности их дальнейшего использования и снижения стоимости строительства [11–22].

Сравнение метода моделирования ГР трубопроводных сетей подачи воды обеспечивает возможность глубокого и всестороннего анализа их работы [23–29].

Значительное повышение эффективности магистральных систем транспортирования воды может быть получено за счет улучшения гидравлических характеристик потока и правильного подбора параметров трубы путем применения методов моделирования при определении потерь напора в трубопроводах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Гидравлический расчет самотечной трубы

Гидравлический расчет трубы с незаполненным сечением осложняется тем, что площадь живого сечения потока при этом оказывается зависимой от двух переменных — диаметра трубы и глубины наполнения  $h$ . Обычно расчет безнапорных труб ведут в предположении равномерного движения потока и, следовательно, основной расчетной формулой является уравнение Шези. При равномерном движении пьезометрический уклон равен гидрав-

лическому уклону, поэтому уравнение Шези можно представить в следующем виде:

$$Q = \omega \cdot V; \quad (1)$$

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot i} = C \sqrt{R \cdot dnj/ds}, \quad (2)$$

где  $Q$  — измеренный расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega$  — площадь живого сечения потока,  $\text{м}^2$ ;  $V$  — средняя скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C$  — коэффициент Шези (в зависимости от гидравлического радиуса и коэффициента шероховатости смачиваемого трубопровода площадь,  $\text{м}^{0.5}/\text{с}$ );  $R$  — гидравлический радиус;  $i = dnj/ds$  — гидравлический уклон.

Следует иметь в виду, что при заданной шероховатости стенок и уклоне дна трубы гидравлический радиус не может быть принят больше, чем  $R_{\text{гн}}$  при гидравлически наиболее выгодном профиле.

Смоченный периметр при наполнении от 0,1 до 0,8 можно определить по формулам:

$$\chi_1 = 3,14 \cdot r \cdot \beta_1/180; \quad (3)$$

$$\chi_2 = 3,14 \cdot r \cdot \beta_2/180, \quad (4)$$

где  $\chi_1$  — смоченный периметр при наполнении  $h/d \geq 0,5$ ;  $\chi_2$  — смоченный периметр при наполнении  $h/d \leq 0,5$ .

Центральные углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  определяются по выражениям:

$$\beta_1 = 360 - 2\alpha_1; \quad (5)$$

$$\beta_2 = 2\alpha_2; \quad (6)$$

$$\cos \alpha_1 = a_1/r \text{ и } \cos \alpha_2 = a_2/r. \quad (7)$$

Гидравлические радиусы  $R_1$  и  $R_2$  рассчитываются по формулам:

$$R_1 = \omega_1/\chi_1; \quad (8)$$

$R_2 = \omega_2/\chi_2.$  (9)

На рис. 1 показано поперечное сечение трубы, которая отображает определения параметра  $\alpha$  в зависимости от наполнения трубы, на рис. 2 приведен участок трубы с сечениями, где производились замеры.

На рис. 3 представлена экспериментальная установка, эксперименты проводились в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения МГСУ.

Исследования выполнены с использованием полиэтиленовой трубы ПНД ГОСТ 18599–83 110С 200 номинальным диаметром 100 мм в диапазоне уклонов трубопровода (0,005–0,03).

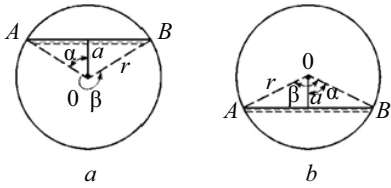
**Методика расчета для определения характеристик потока в безнапорном трубопроводе**

Н.Н. Павловский предложил формулу для определения коэффициента Шези  $C$ :

$C = \frac{1}{n} R^y,$  (10)

где  $n$  — коэффициент шероховатости стенок труб;  $y$  — переменный показатель степени, в расчетах по Маннингу значение этого показателя  $y = 1/6$ .

Основное расчетное уравнение равномерно-го движения для установления расхода и скорости представлено в выражениях (1) и (2). С гидравлической точки наивыгоднейшей формой поперечного



**Рис. 1.** Поперечное сечение трубы для определения углов  $\alpha$  и  $\beta$ :  $a$  — при  $h/d \geq 0,5$ ;  $b$  — при  $h/d \leq 0,5$

**Fig. 1.** Pipe cross section to determine angles  $\alpha$  and  $\beta$ :  $a$  — at  $h/d \geq 0.5$ ;  $b$  — at  $h/d \leq 0.5$

сечения является такая, которая при заданном уклоне обеспечивает наибольшую пропускную способность (рис. 4).

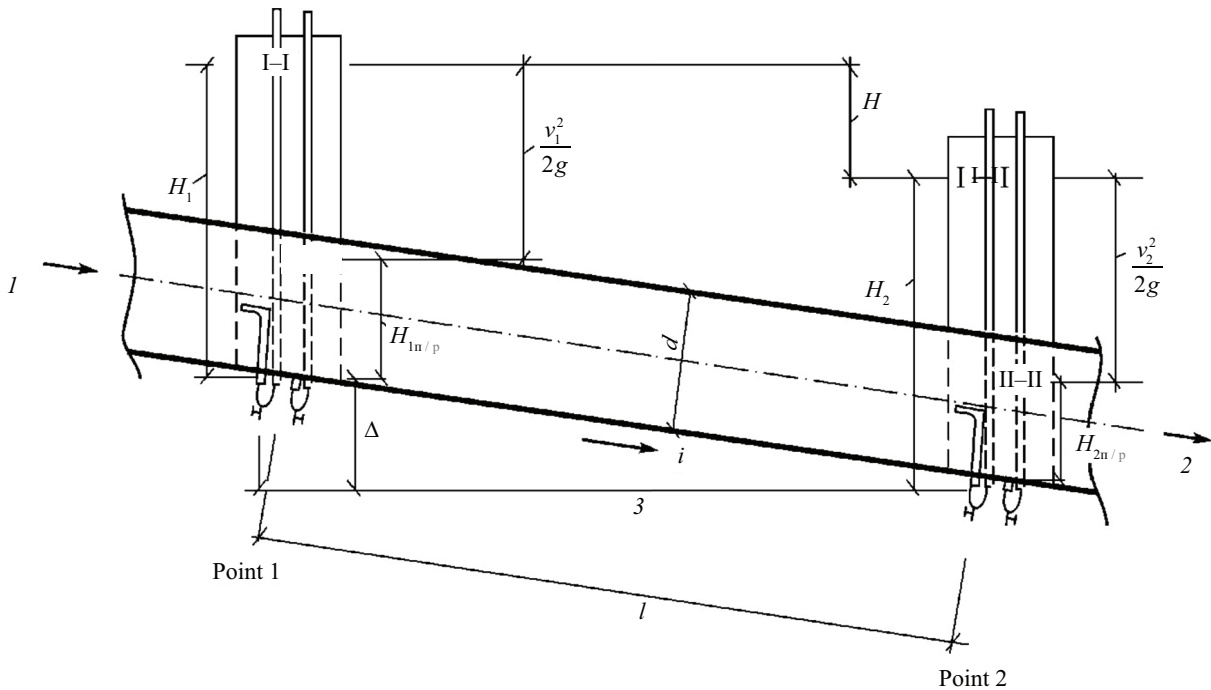
Далее рассчитаем гидравлические параметры:

$\frac{h}{d} = \frac{(1 - \cos \varphi)}{2};$  (11)

$\omega = \frac{1}{8} \cdot (\varphi - \sin \varphi) \cdot d^2;$  (12)

$X = \frac{\varphi \cdot d}{2};$  (13)

$R = \frac{\omega}{X}.$  (14)



**Рис. 2.** Эскиз опытного гидравлического стенда:  $v_1^2/2g$  и  $v_2^2/2g$  — скоростные напоры;  $d$  — внутренний диаметр, м;  $H_{1n}$  и  $H_{2n}$  — показания пьезометра;  $i$  — уклон трубопровода (0,005–0,03);  $\Delta$  — перепад высот при соответствующих уклонах, м; I–I — уровень воды в трубках Пито, м; II–II — уровень воды в пьезометрах, м

**Fig. 2.** Sketch of experimental hydraulic stand:  $v_1^2/2g$  and  $v_2^2/2g$  — velocity pressures;  $d$  — internal diameter, m;  $H_{1n}$  and  $H_{2n}$  — piezometer readings;  $i$  — pipeline slope (0.005–0.03);  $\Delta$  — height difference at corresponding slopes, m; I–I — water level in Pitot tubes, m; II–II — water level in piezometers, m



Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда  
Fig. 3. General view of the experimental stand

Программа SewerCAD

Программное обеспечение (ПО) SewerCAD — программа для проектирования и анализа самотеч-

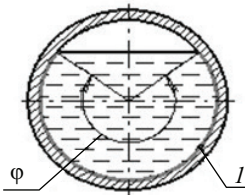


Рис. 4. Поперечное сечение самотечной трубы: *I* — смоченный периметр  
Fig. 4. Cross section of a gravity pipe: *I* — wetted perimeter

ных и напорных потоков в трубопроводных сетях и насосных станциях. Программа может работать в режиме AutoCAD, предоставляя все возможности AutoCAD, или в автономном режиме с применением специального графического интерфейса. SewerCAD позволяет построить графическое представление сети трубопроводов, содержащее такую информацию, как данные о трубах, сведения о насосах, нагрузке и инфильтрации. Гравитационная сеть рассчитывается с помощью встроенной чис-

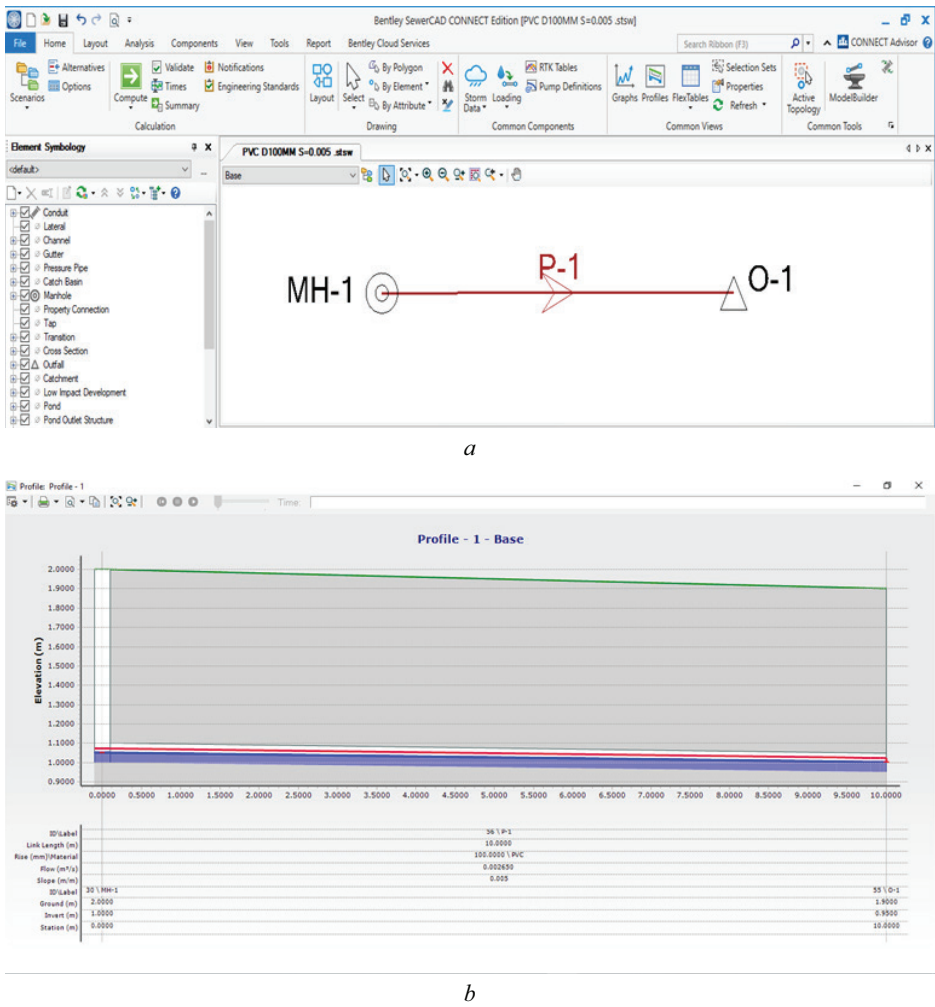


Рис. 5. Имитационная модель с использованием программы SewerCAD: *a* — модель; *b* — продольный профиль трубопровода  
Fig. 5. Simulation model using SewerCAD: *a* — model; *b* — longitudinal pipeline profile

Результаты эксперимента, программы SewerCAD и традиционного метода расчета скорости при различных расходах для безнапорных труб из полиэтилена диаметром 100 мм  
Results of the experiment, SewerCAD programme and traditional method of velocity calculation at various flow rates for non-pressure polyethylene pipes with a diameter of 100 mm

Наполнение <i>h/d</i> Filling <i>h/d</i>	<i>i</i> = 0,005				<i>i</i> = 0,01			
	Расход <i>Q</i> , м³/с Flow <i>Q</i> , m³/s	Скорость <i>V</i> эксперимент, м/с Velocity <i>V</i> experiment, m/s	Скорость <i>V</i> SewerCAD, м/с Velocity <i>V</i> SewerCAD, m/c	Скорость <i>V</i> расчет, м/с Velocity <i>V</i> calculation, m/c	Расход <i>Q</i> , м³/с Flow <i>Q</i> , m³/c	Скорость <i>V</i> экс- перимент, м/с Velocity <i>V</i> experi- ment, m/s	Скорость <i>V</i> SewerCAD, м/с Velocity <i>V</i> SewerCAD, m/c	Скорость <i>V</i> расчет, м/с Velocity <i>V</i> calculation, m/c
0,1	0,00009	0,238	0,251	0,267	0,00013	0,337	0,365	0,378
0,2	0,00044	0,393	0,409	0,411	0,00062	0,557	0,578	0,582
0,3	0,00099	0,504	0,516	0,520	0,00140	0,709	0,730	0,735
0,4	0,00175	0,601	0,604	0,607	0,00248	0,846	0,855	0,859
0,5	0,00265	0,676	0,672	0,671	0,00376	0,957	0,879	0,949
0,6	0,00362	0,736	0,724	0,715	0,00512	1,042	1,023	1,012
0,7	0,00448	0,764	0,753	0,750	0,00646	1,102	1,068	1,060
0,8	0,00548	0,813	0,762	0,758	0,00775	1,150	1,078	1,072
<i>i</i> = 0,015								
0,1	0,000169	0,413	0,454	0,464	0,000195	0,476	0,524	0,535
0,2	0,000762	0,680	0,708	0,713	0,000537	0,627	0,702	0,823
0,3	0,001727	0,872	0,896	0,901	0,000879	0,785	0,818	1,040
0,4	0,003043	1,038	1,047	1,052	0,001436	0,896	0,935	1,214
0,5	0,004601	1,170	1,165	1,163	0,001993	1,007	1,034	1,343
0,6	0,006281	1,276	1,252	1,239	0,002587	1,103	1,112	1,431
0,7	0,007917	1,334	1,308	1,299	0,003516	1,2	1,210	1,500
0,8	0,00949	1,408	1,321	1,313	0,0044	1,276	1,283	1,516
<i>i</i> = 0,025								
0,1	0,000218	0,532	0,585	0,599	0,000239	0,584	0,642	0,656
0,2	0,000601	0,705	0,785	0,920	0,001077	0,961	1,002	1,008
0,3	0,000983	0,878	0,914	1,163	0,002444	1,235	1,267	1,274
0,4	0,001607	1,002	1,046	1,358	0,004306	1,469	1,481	1,487
0,5	0,00223	1,126	1,157	1,501	0,006511	1,656	1,649	1,645
0,6	0,003079	1,233	1,266	1,600	0,008878	1,804	1,775	1,753
0,7	0,003928	1,340	1,352	1,677	0,011189	1,906	1,850	1,837
0,8	0,004937	1,429	1,436	1,696	0,013453	1,996	1,867	1,857



ленной модели, в которой используются как метод прямого шага, так и метод постепенного изменения потока со стандартным шагом. Напорными элементами можно управлять на основе гидравлики системы, включая и выключая насосы из-за изменений потоков и давлений.

ПО SewerCAD может быть использовано для:

- проектирования и анализа безнапорных систем;
- разработки и анализа различных сценариев проектирования канализационных систем;
- импорта и экспорта файлов AutoCAD и MicroStation DXF;
- создания планов и профилей участков сети.

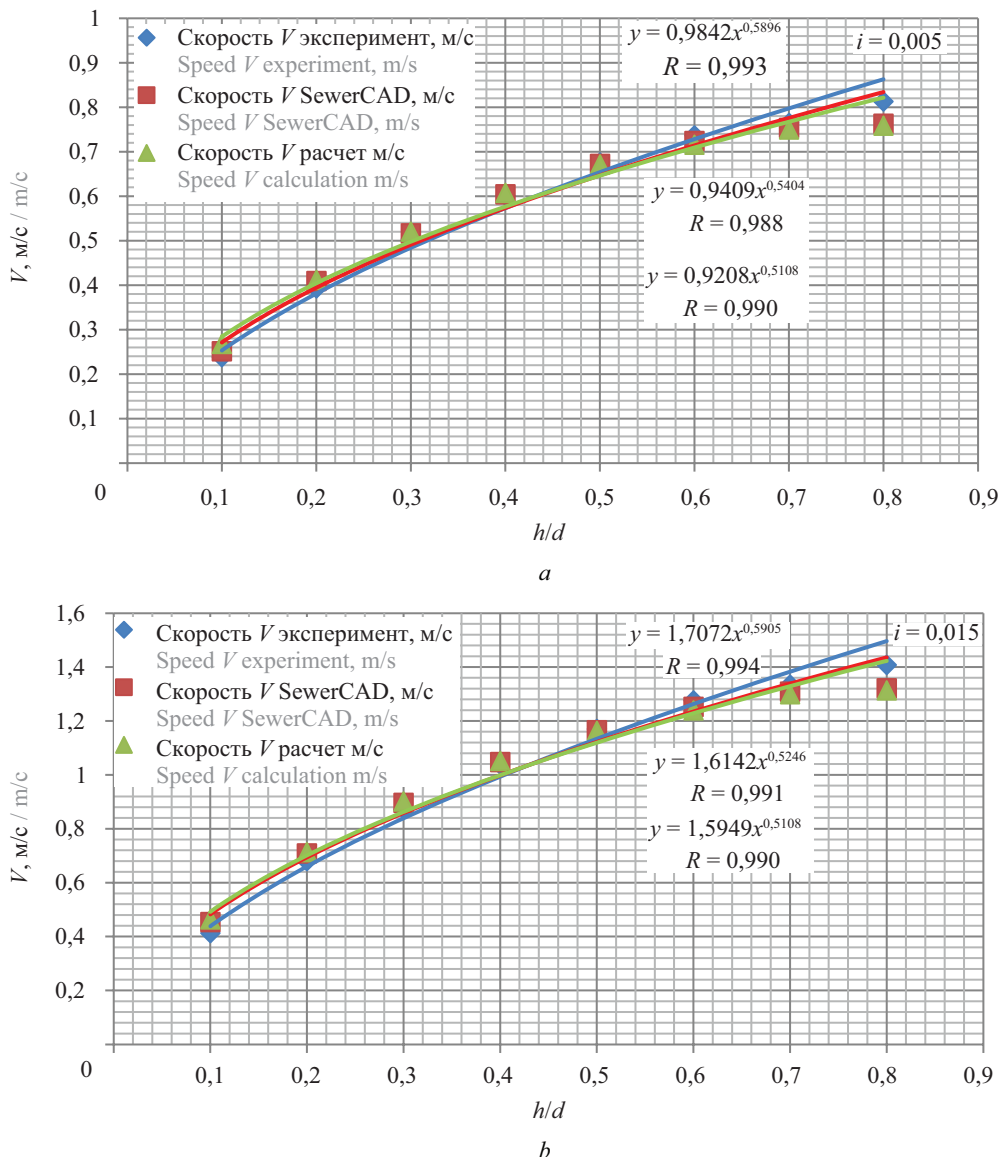
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После завершения экспериментов полученные результаты сравнивались с результатами расчетных и традиционных методов. Программа SewerCAD была применена для создания имитационной модели движения жидкости в трубе в безнапорном режи-

ме. Выполнены расчеты гидравлических характеристик потока в полиэтиленовой трубе при различных уклонах с учетом заполнения  $h/d$  в пределах 0,1–0,8. На рис. 5 показана имитационная модель с использованием ПО SewerCAD.

Уравнение Маннинга использовалось в программе для расчета скорости, гидравлического радиуса и заполнения  $h/d$  для каждого уклона. Проведены расчеты гидравлических характеристик потока в полиэтиленовой трубе при различных уклонах с учетом наполнения  $h/d$  в пределах 0,1–0,8 и диапазоне уклонов трубопровода 0,005–0,03. Сравнение средних скоростей, рассчитанных при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционными методами, представлено в таблице.

Из таблицы видно, что скорости, рассчитанные при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционными методами, близки по значению.



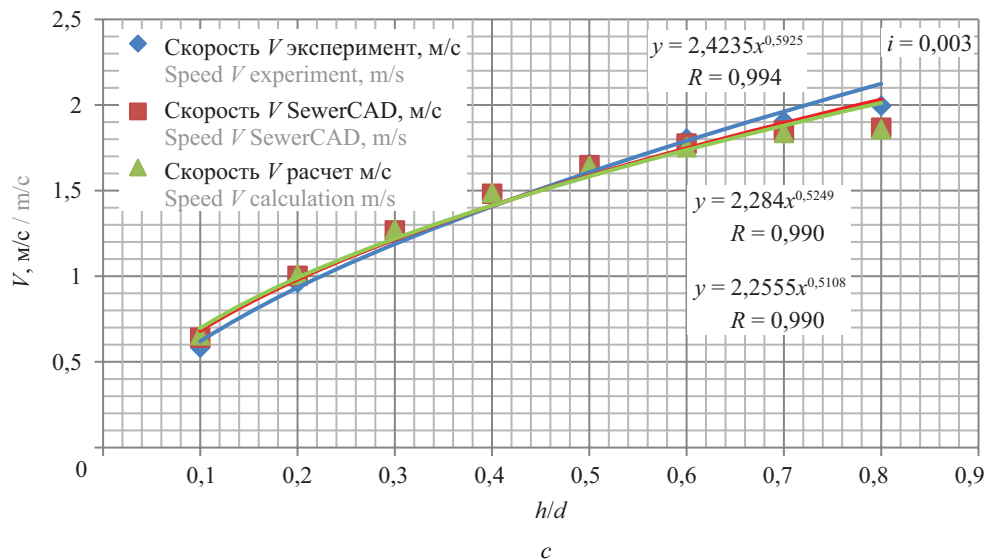
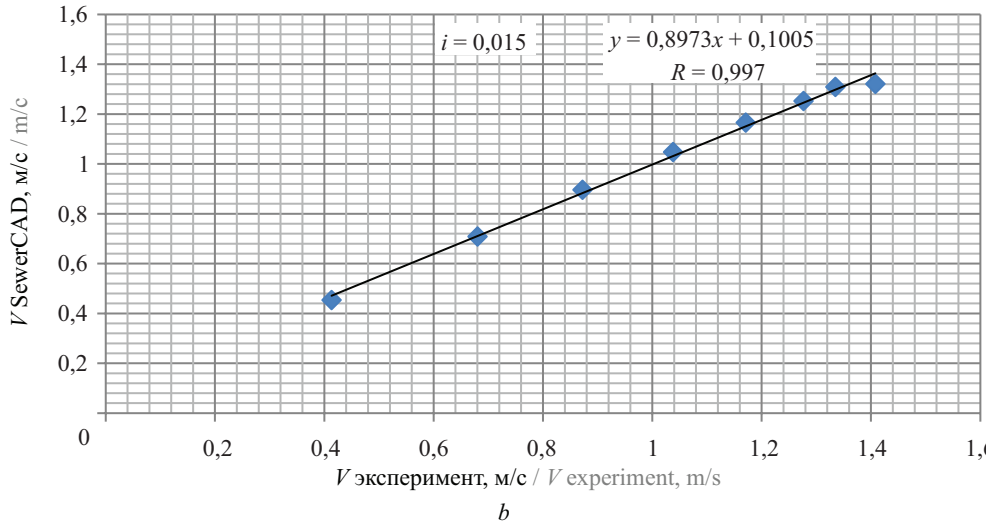
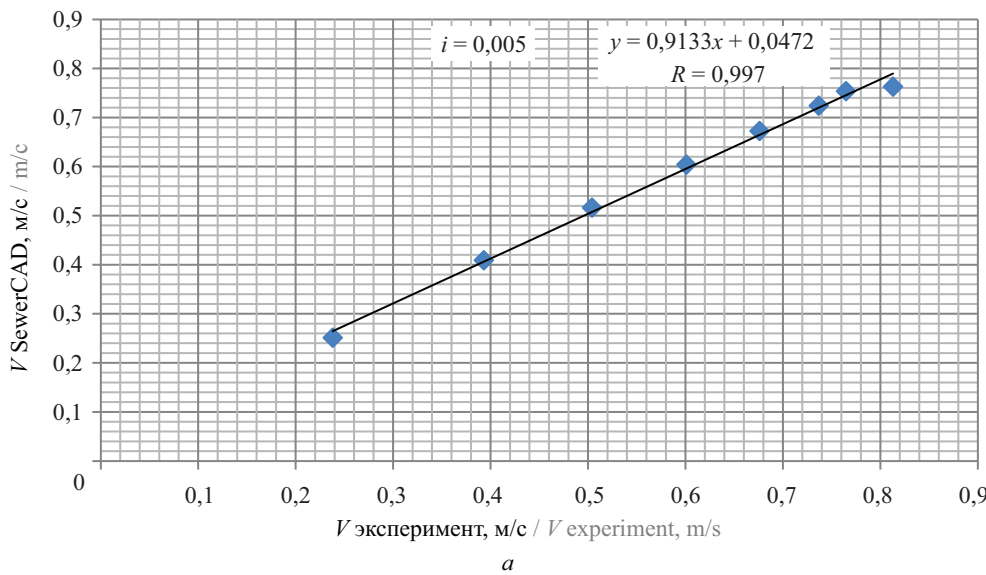


Рис. 6. Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными традиционными методами и программой SewerCAD

Fig. 6. Comparison of the experimental results with the results obtained by traditional methods and SewerCAD programme



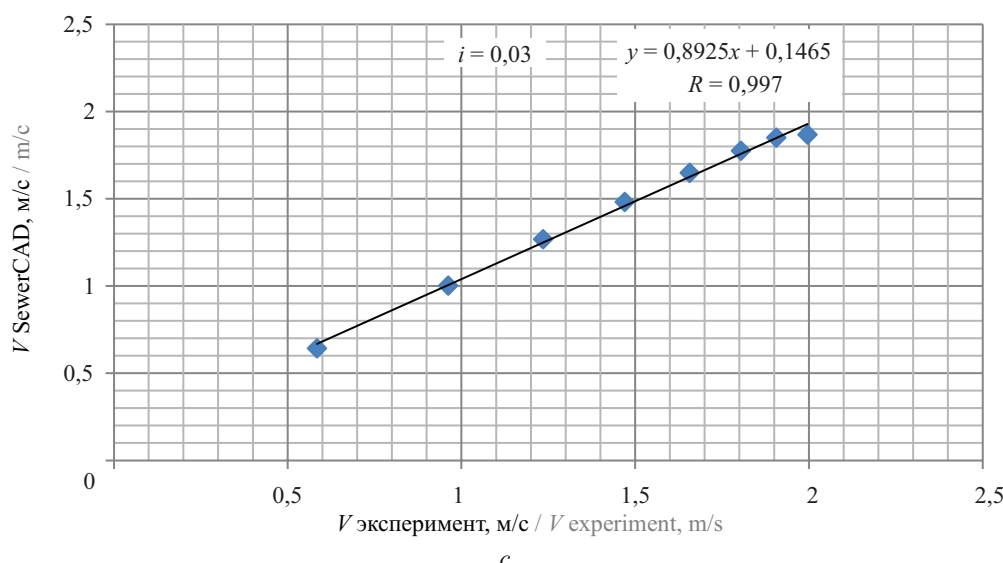


Рис. 7. Зависимость между экспериментальной скоростью и расчетной, полученными с использованием имитационной модели SewerCAD

Fig. 7. Relationship between experimental and calculated velocity obtained using the simulation model SewerCAD

Сравнение скоростей, рассчитанных при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционным методами, представлено на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что скорость потока воды в эксперименте, программе и традиционных методах практически идентична. На рис. 7 приведена зависимость между экспериментальной скоростью и имитационной моделью.

Необходимо отметить, что коэффициент корреляции для трех случаев составил  $R = 0,997$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для безнапорного трубопровода получены значения средней скорости потока при различной степени наполнения и уклона. Установлено, что значения скоростей потока, полученные в эксперименте, традиционным методом и с помощью программы SewerCAD, практически идентичны.

Получены соответствующие зависимости для средней скорости между результатами эксперимента и программой SewerCAD для безнапорной системы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Olgarenko G., Olgarenko V., Olgarenko I., Olgarenko V.I. Justification of methodological approaches to standardisation of irrigation as an element of resource saving and minimization of the anthropogenic load on agrobiocenosis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 337. Issue 1. P. 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012027
2. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 3. P. 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060
3. Ткачев А.А., Ольгаренко И.В. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN NTRFMJ.
4. Tas E., Ağralıoğlu N. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different

formulas // International Symposium on Urban Water and Wastewater Management. 2018. Pp. 602–609.

5. Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia // Journal of Civil Engineering Research. 2020. Vol. 10. Issue 1. Pp. 20–28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03

6. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 448. Issue 1. P. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066

7. Terlumuna U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using watercard and watergems // Journal of Engineering and Sciences. 2019. Vol. 5. Issue 2. Pp. 147–156.

8. Bhaskar S.P., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems Software // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering



and Technology. 2017. Vol. 6. Issue 7. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132

9. *Arunjyoti S., Senapati S., Sirisha A.* A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems // *African Journal of Agricultural Research*. 2016. Vol. 11. Issue 8. Pp. 683–692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648

10. *Шмелёв Б.Г.* Техничко-экономические проблемы применения полимерных трубопроводов в мелиорации и в водном хозяйстве // *Полимерные трубы*. 2011. Т. 34. № 4. С. 35–37.

11. *Митрахович А.И., Макоед В.М., Сергеев А.П., Лавушев С.М.* Из опыта применения на осушительных системах коллекторов из труб большого диаметра // *Мелиорация*. 2019. № 2 (88). С. 13–17. EDN CCYDWN.

12. *Митрахович А.И., Макоед В.М., Лавушев С.М., Сергеев А.П.* Условия применения двухслойных гофрированных полиэтиленовых труб «корсис» на мелиоративных объектах // *Мелиорация*. 2020. № 1 (91). С. 15–23. EDN FYKDWT.

13. *Rubeiz C.* Case studies on the use of HDPE pipe for municipal and industrial projects in North America // *Pipeline Division Specialty Congress*. 2004. DOI: 10.1061/40745(146)22

14. *Hajibabaei M., Nazif S., Sereshgi F.T.* Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 43. Pp. 538–549. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.014

15. *Diogo A.F., Vilela F.A.* Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes // *Urban Water Journal*. 2014. Vol. 11. Issue 5. Pp. 414–425. DOI: 10.1080/1573062X.2013.768682

16. *Боровков В.С., Байков В.Н., Писарев Д.В., Волинов М.А.* Локальное подобие течения и распределение скоростей в турбулентных потоках // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 6 (32). С. 12–19. DOI: 10.5862/MCE.32.2. EDN PDZKDX.

17. *Heller V.* Scale effects in physical hydraulic engineering models // *Journal of Hydraulic Research*. 2011. Vol. 49. Issue 3. Pp. 293–306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914

18. *Kim J.H., Kwon S.H., Yoon K.S., Lee D.H., Chung G.* Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. Pp. 773–778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582

19. *Leopardi M.* On roughness similarity of hydraulic models // *Journal of Hydraulic Research*. 2004. Vol. 42. Issue 3. Pp. 239–245. DOI: 10.1080/00221686.2004.9728389

20. *Ивановский Ю.К., Моргунов К.П., Рябов Г.Г.* Лабораторные исследования автодорожного водопропускного сооружения // *Вестник государствен-*

ного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. С. 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330. EDN UPZIVA.

21. *Моргунов К.П., Ивановский Ю.К., Баранов А.Ю.* Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спирально-витых гофрированных труб // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2020. Т. 12. № 2. С. 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335. EDN VRMTTG.

22. *Yu X.G., Choi K.Y.* Systematic and exact scaling analysis of the single-phase natural circulation flow: The hydraulic similarity // *Progress in Nuclear Energy*. 2016. Vol. 89. Pp. 78–87. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.02.001

23. *Аношкин Ю.И., Добров А.А., Легчанов М.А., Субарев М.А., Хробостов А.Е.* Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления вставок из упруго-пористого проволоочного материала в канале круглого сечения // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2019. № 1 (124). С. 92–99. DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_1\_92. EDN ZANGJF.

24. *Алтуни В.И., Черных О.Н.* О гидравлическом расчете дорожных водопропускных труб из гофрированного металла // *Дороги и мосты*. 2015. Т. 1 (33). С. 234–247. EDN UYBLMB.

25. *Алтуни В.И., Черных О.Н., Федотов М.В.* Водопропускные трубы в транспортном строительстве. Гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур : монография. М. : МАДИ, 2012. 240 с. EDN RFEAET.

26. *Черных О.Н., Алтуни В.И., Бурлаченко А.В.* Повышение эффективности гидравлической работы дорожных водопропускных труб // *Природообустройство*. 2016. № 2. С. 42–47. EDN WAAEWB.

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

28. *Боровков В.С., Брянская Ю.В., Байков В.Н.* Уточнение условий подобия равномерных широких открытых потоков при гидравлическом моделировании недеформируемых каналов // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2009. Т. 253. С. 22–27. EDN KYQUIL.

29. *Воронов Ю., Пугачев Е., Перевозникова Е.* Гидравлические основы расчета водоотводящих самотечных трубопроводов из пластмассовых труб // *Полимерные трубы*. 2006. № 3 (12). С. 38–41. EDN ZVHTMF.

Поступила в редакцию 27 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Львович Зуйков** — 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; РИНЦ ID: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; hydroprof3fl@yandex.ru;

**Назира Тентимишовна Джумагулова** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-0586-9464; dnazira@rambler.ru;

**Абдуламир Лейс Саид Абдуламир** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель кафедры нефтяной инженерии; **Университет Кербелы**; г. Кербела, Ирак; ORCID: 0000-0001-5317-4299; laith\_eng2009@yahoo.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Olgarenko G., Olgarenko V., Olgarenko I., Olgarenko V.I. Justification of methodological approaches to standardisation of irrigation as an element of resource saving and minimization of the anthropogenic load on agrobiocenosis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 337(1):012027. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012027
2. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 698(3):022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060
3. Tkachyev A.A., Olgarenko I.V. Urgent problems of water distribution management in main canals of irrigation systems. *Scientific journal of the Russian Research Institute for Land Reclamation Problems*. 2021; 11(2):1-23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN NTRFMJ. (rus.).
4. Tas E., Ağralıoğlu N. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different formulas. *International Symposium on Urban Water and Wastewater Management*. 2018; 602-609.
5. Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia. *Journal of Civil Engineering Research*. 2020; 10(1):20-28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03
6. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 448(1):012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
7. Terlumuna U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using Watercard and Watergems. *Journal of Engineering and Sciences*. 2019; 5(2):147-156.
8. Bhaskar S.P., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems Software. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(7). DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132
9. Arunjyoti S., Senapati S., Sirisha A. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research*. 2016; 11(8):683-692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648
10. Shtepa B.G. Technical and economic problems of the use of polymer pipelines in land reclamation and water management. *Polymer Pipes*. 2011; 34(4):35-37. (rus.).
11. Mitrakhovich A.I., Makoed V.M., Sergeenya A.P., Lavushev S.M. From the experience of large diameter pipes usage for drainage systems. *Reclamation*. 2019; 2(88):13-17. EDN CCYDWN. (rus.).
12. Mitrakhovich A.I., Makoed V.M., Lavushchev S.M., Sergeenya A.P. Conditions of application of two-layer corrugated polyethylene pipes “Corsis” on meliorative objects. *Reclamation*. 2020; 1(91):15-23. EDN FYKDWT. (rus.).
13. Rubeiz C. Case Studies on the Use of HDPE pipe for municipal and industrial projects in North America. *Pipeline Division Specialty Congress*. 2004. DOI: 10.1061/40745(146)22
14. Hajibabaei M., Nazif S., Sereshgi F.T. Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 43:538-549. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.014
15. Diogoa A.F., Vilela F.A. Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes. *Urban Water Journal*. 2014; 11(5):414-425. DOI: 10.1080/1573062X.2013.768682
16. Borovkov V.S., Baykov V.N., Pisarev D.V., Volynov M.A. Local flow similarity and velocity distribution in turbulent flows. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 6(32):12-19. DOI: 10.5862/MCE.32.2. EDN PDZKDX. (rus.).

17. Heller V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(3):293-306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914
18. Kim J.H., Kwon S.H., Yoon K.S., Lee D.H., Chung G. Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe. *Procedia Engineering*. 2016; 154:773-778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582
19. Leopardi M. On roughness similarity of hydraulic models. *Journal of Hydraulic Research*. 2004; 42(3):239-245. DOI: 10.1080/00221686.2004.9728389
20. Ivanovskiy Yu.K., Morgunov K.P., Ryabov G.G. Laboratory investigations of road water freight construction. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2018; 10(2):318-330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330. EDN UPZIVA. (rus.).
21. Morgunov K.P., Ivanovsky Yu.K., Baranov A.Yu. Experimental determination of the roughness coefficient of metal spirally-twisted corrugated pipes. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2020; 12(2):323-335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335. EDN VRMTTG. (rus.).
22. Yu X.G., Choi K.Y. Systematic and exact scaling analysis of the single-phase natural circulation flow: The hydraulic similarity. *Progress in Nuclear Energy*. 2016; 89:78-87. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.02.001
23. Anoshkin Yu.I., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Subarev M.A., Khrobostov A.E. Experimental investigations of hydraulic resistance of inserts from elastic-porous wire material in round channel. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2019; 1(124):92-99. DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_1\_92. EDN ZANGJF. (rus.).
24. Altunin V.I., Chernykh O.N. On the hydraulic calculation of road culverts made of corrugated metal. *Roads and Bridges*. 2015; 1(33):234-247. EDN UYBLMB. (rus.).
25. Altunin V.I., Chernykh O.N., Fedotov M.V. *Culverts in transport construction. Hydraulic operation of pipes from metal corrugated structures : monograph*. Moscow, MADI, 2012; 240. EDN RFEAET. (rus.).
26. Chernykh O.N., Altunin V.I., Burlachenko A.V. Increase of effectiveness of the hydraulic operation of road culvert pipes. *Environmental Engineering*. 2016; 2:42-47. EDN WAAEWB. (rus.).
27. Khanov N.V., Burlachenko A.V. Hydraulic aspects of ensuring reliable and safe operation of tubular corrugated culverts. *Environmental Engineering*. 2016; 5:32-39. EDN XHZZPJ. (rus.).
28. Borovkov V.S., Brianskaya Yu.V., Boikov V.N. Correction of similarity conditions of uniform wide open flows with hydraulic modeling of not deformable channels. *Proceedings of the VNIIG*. 2009; 253:22-27. EDN KYQUIL. (rus.).
29. Voronov Y., Pugachev E., Perevoznikova E. Hydraulic basis of calculation of water gravious flow pipelines from plastic pipes. *Polymer Pipes*. 2006; 3(12):38-41. EDN ZVHTMF. (rus.).

Received October 27, 2023.

Adopted in revised form on December 24, 2023.

Approved for publication on January 10, 2024.

**B I O N O T E S :** **Andrey L. Zuykov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; hydroprof3fl@yandex.ru;

**Nazira T. Dzhumagulova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dnazira@rambler.ru;

**Abdulameer Layth Saeed Abdulameer** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lecturer Department of Petroleum Engineering; **University of Karbala**; Karbala, Iraq; ORCID: 0000-0001-5317-4299; laith\_eng2009@yahoo.com.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*