


Оригинальная статья

УДК 532.542/.551

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-69-75



## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ В КРУГЛОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

**Карпов Денис Федорович** , соискатель, старший преподаватель

Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021; ORCID ID: 0000-0002-3522-9302; Scholar ID: gQUipfkAAAAJ; e-library ID: 564418 e-library SPIN: 9241-4996; Research Gate: /www.researchgate.net/profile/Denis-Karpov-6; karpovdf@vogu35.ru

**Павлов Михаил Васильевич**, канд. техн. наук, доцент

Author ID SCOPUS57204361039; WoS ResearcherID AAN-5773-2021; ORCID0000-0002-8687-3296; ID РИНЦ 564419; SPIN код6544-7267; URL: pavlovmv@vogu35.ru

Вологодский государственный университет; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

**Аннотация.** Представлена методика определения потерь давления на трение в медном трубопроводе постоянного круглого сечения. Дано описание лабораторной установки и перечня измерительных приборов, необходимых для ее реализации по предложенному алгоритму. Основные этапы экспериментальной работы включают в себя: подачу воздуха в трубопровод центробежным вентилятором; определение геометрических показателей трубопровода; измерение температуры воздуха в помещении термогигрометром, скорости движения воздуха на выходе из трубопровода термоанемометром, перепадов (потерь) давления воздуха на участках прямолинейного трубопровода дифференциальным манометром. По экспериментальным данным выполнено определение потерь напора на трение на исследуемом участке трубопровода с последующей оценкой погрешности результатов косвенных измерений. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими данными (номограммы И.И. Никурадзе), подтверждающее их достоверность, выполнена оценка сходимости полученных результатов. Знание подобного рода инженерно-технических и научных решений позволит качественно выполнять контроль потерь и падений давления в трубопроводах, подбирать необходимое гидравлическое оборудование (нагнетатели), избегать аварийных ситуаций при эксплуатации инженерных систем жизнеобеспечения.

**Ключевые слова:** гидравлические измерения, гидравлический режим, трубопровод, потери давления на трение, коэффициент гидравлического трения, коэффициент динамической вязкости, гидродинамическое давление, скорость движения жидкости, пропускная способность, термогигрометр, термоанемометр, дифференциальный манометр

**Формат цитирования:** Карпов Д.Ф., Павлов М.В. Методика определения потерь давления на трение в круглом трубопроводе постоянного сечения // Природообустройство. 2023. № 1. С. 69-75. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-69-75.

© Карпов Д.Ф., Павлов М.В., 2023

Original article

## METHOD FOR DETERMINING FRICTION PRESSURE LOSSES IN A CIRCULAR PIPELINE OF CONSTANT CROSS-SECTION

**Karpov Denis Fedorovich** , applicant, senior lecturer

Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021; ORCID ID: 0000-0002-3522-9302; Scholar ID: gQUipfkAAAAJ; e-library ID: 564418; SPIN: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

**Pavlov Mikhail Vasilyevich**, candidate of technical sciences, associate professor

Author ID SCOPUS57204361039; WOS Researcher ID AAN-5773-2021; ORCID0000-0002-8687-3296; RSCI ID564419; SPIN code 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

Vologda State University; 160000, Vologda, Lenin str., 15, Russia

**Annotation.** The procedure for determining friction pressure losses in the copper pipeline of constant round section is presented. A description of the laboratory installation and the list of measuring instruments required for its implementation according to the proposed algorithm are given. The main stages of experimental work include: air supply to the pipeline by centrifugal fan; determination of pipeline

geometrical parameters; measurement of the air temperature in the room with a thermohygrometer, the speed of air movement at the outlet of the pipeline with a thermoanemometer, air pressure drops (losses) in the sections of the rectilinear pipeline with a differential pressure gauge. Based on experimental data, friction head losses were determined on the investigated section of the pipeline with subsequent assessment of the error of indirect measurements. The results were compared with theoretical data (nomograms by I.I. Nikuradze), confirming their reliability and the convergence of the results was assessed. Knowledge of such engineering, technical and scientific solutions will make it possible to perform high-quality control of losses and pressure drops in pipelines, select the necessary hydraulic equipment (superchargers), and avoid emergencies during operation of engineering life support systems.

**Keywords:** hydraulic measurements, hydraulic mode, pipeline, friction pressure loss, hydraulic friction coefficient, dynamic viscosity coefficient, hydrodynamic pressure, fluid velocity, capacity, thermohygrometer, thermoanemometer, differential pressure gauge

**Format of citation:** Karpov D.F., Pavlov M.V. Method of determining the friction pressure loss in a circular pipeline of constant cross-section // Prirodobustrojstvo. 2023. № 1. S. 69-75. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-69-75.

**Введение.** На данный момент в природе различают четыре агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазменное [1, 2]. Все жидкости подразделяют на две группы: капельные и газообразные. К первым относятся вода, нефть, бензин, керосин, спирт, масло и другие, а ко вторым – газы. В гидравлике объектом изучения являются капельные жидкости. Основное отличие жидкостей – их текучесть, то есть малое сцепление частиц, отсутствие сил трения между частицами в состоянии покоя, поэтому жидкость принимает форму сосуда, резервуара, водоема и т.д. При изучении общих закономерностей гидравлики часто используют понятие идеальной жидкости – несжимаемой среды, не обладающей внутренним трением между отдельными частицами. Идеальная жидкость в отличие от реальной считается совершенно несжимаемой и нерасширяющейся средой, обладающей абсолютной подвижностью частиц, в которой полностью отсутствуют силы внутреннего трения (вязкости).

При гидравлическом расчете инженерных сетей и коммуникаций (водопроводных, тепловых, газовых и т.д.), как правило, решают две основные задачи: определение диаметров участков трубопроводов и потерь давления в них для последующей разработки гидравлического режима и выявления располагаемых давлений у потребителей [1]. Известны различные способы выполнения гидравлического расчета трубопроводов: метод удельных потерь давления на трение; метод гидравлических характеристик; метод приведенных длин и др. [2]. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, а также область применения. Ввиду того, что гидравлический расчет всей трубопроводной системы является важной и сложной частью инженерных изысканий, разработаны специальные таблицы, номограммы и специализированное программное обеспечение [3-5].

Известно, что потери давления (гидравлические сопротивления) являются одним из ключевых понятий в области прикладной механики жидкости [6-8]. При движении жидкости они складываются из потерь давления на трение и потерь давления на местные (гидравлические) сопротивления (при их наличии) [9-13].

**Научная новизна.** Исследовано в лабораторных условиях влияние пропускной способности трубопровода на его гидравлическое сопротивление. Выполнена оценка достоверности общепринятых научно-теоретических методов определения гидравлических сопротивлений трубопроводов, основанная на сравнительном анализе теоретических данных с результатами лабораторных исследований.

**Материалы и методы исследований.** Многочисленные эксперименты показывают и подтверждают, что потери давления на трение  $\Delta p$ , Па при движении жидкости в трубопроводе (рис. 1) могут зависеть от следующих параметров [3-13]: диаметра трубопровода  $d$ , м, его длины  $l$ , м; физических свойств жидкости (плотности  $\rho$  и вязкости кинематической  $\nu$  или динамической  $\mu$ ); средней скорости движения жидкости в трубопроводе  $w$ , м/с; высоты выступов шероховатости на стенках трубопровода  $k_s$ , м.

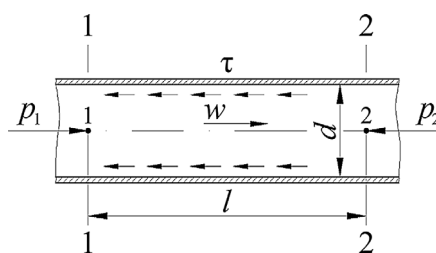


Рис. 1. Схема к определению потерь напора на трение в круглом трубопроводе постоянного сечения

Fig. 1. Diagram for determination of friction head losses in the circular pipeline of constant section

Определим потери давления на трение  $\Delta p$ , Па в прямолинейном трубопроводе круглого сечения в лабораторных условиях (рис. 2). Центробежный вентилятор, имеющий пусковое устройство, подает воздух из помещения во входное отверстие трубопровода. Для регулирования расхода (подачи) воздуха в трубопроводе на нагнетательной линии вентилятора установлен шибер. С целью измерения потерь давления по длине трубопровода в конце каждого его участка установлен штуцер. Воздух, преодолев гидравлическое сопротивление трубопровода, попадает в помещение через его выходное отверстие.

Алгоритм определения потерь давления на трение в прямолинейном трубопроводе круглого сечения (рис. 2) следующий:

1. Измеряют температуру воздуха в помещении  $t$ , °С, с помощью термогигрометра «Testo 625» (табл.).

2. Фиксируют длину каждого участка трубопровода (расстояние между двумя соседними штуцерами)  $l_i$ , м,  $i = 1, 2, \dots, N$  (где  $N$  – количество участков трубопровода) механической рулеткой (табл.).

3. Определяют внутренний диаметр трубопровода  $d$ , м, электронным штангенциркулем «ГТТ 19856» (табл.).

4. Включают центробежный вентилятор. Пуск вентилятора выполняют при закрытом шибере, дожидаясь выхода вентилятора на максимальный режим своей работы.

5. Регулируют пропускную способность трубопровода соответствующим положением шибера по трем вариантам:  $n = 0,33$  (открыт частично на 1 / 3);  $n = 0,67$  (то же на 2 / 3);  $n = 1$  (открыт полностью).



Рис. 2. Фотография и принципиальная схема лабораторной установки:

1 – вентилятор; 2 – трубопровод;

3 – регулирующая заслонка (шибер); 4 – штуцер

Fig. 2. Photo image of the fragment and schematic diagram of the experimental installation:

1 – fan; 2 – pipeline; 3 – control damper (gate); 4 – connector

6. Измеряют максимальную скорость движения воздуха на выходе из трубопровода  $w_0$ , м / с термоанемометром «Testo 425» (табл.), установив приемный датчик прибора по центру сечения трубопровода.

7. Для заданного гидравлического режима трубопровода измеряют перепады давлений на его участках  $\Delta p_{i, i+1}$ , Па,  $i = 1, 2, \dots, N$  дифференциальным манометром «Testo512» (табл.). Измерения выполняют путем подключения соединительных шлангов (силиконовых, резиновых, ПВХ и т.п. диаметром 4 / 6 мм) к приемным отверстиям измерительного прибора и соответствующим соседним штуцерам трубопровода.

Обработка полученных экспериментальных данных выполняется в такой последовательности:

1. По результатам измерений температуры воздуха в помещении  $t$ , °С, определяют его плотность по уравнению состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{353}{t + 273,15}, \text{ кг / м}^3. \quad (1)$$

2. Коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре  $t$ , °С, вычисляют по формуле Милликена:

$$\mu = 1,712 \cdot 10^{-5} + 4,93 \cdot 10^{-8} t, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (2)$$

3. Предварительно приняв турбулентный режим течения воздуха в трубопроводе, рассчитывают среднюю скорость его движения по соотношению:

$$w = 0,813 w_0, \text{ м / с}. \quad (3)$$

4. По средней скорости движения воздуха в трубопроводе  $w$ , м / с, и его внутреннему диаметру  $d$ , м, рассчитывают значение критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} = \frac{w d}{\nu}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па · с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup> / с.

5. При известном критическом значении безразмерного числа  $Re_{кр}$ , уточняют режим течения воздуха в трубопроводе.

6. Если режим течения воздуха в трубопроводе оказался ламинарным, то среднюю скорость движения воздуха определяют по соотношению:




$$w = 0,5 w_0, \text{ м / с}. \quad (5)$$

7. Коэффициент эквивалентной шероховатости старого медного



Таблица. Список измерительных приборов

Table. List of measuring instruments

№ п/п items	Наименование оборудования Name of equipment	Функциональное назначение Functionality	Основные технические характеристики Basic performance specification
1	 Дифференциальный манометр «Testo 512» Differential pressure gauge «Testo 512»	Измерение перепадов давления и скорости движения жидкости в трубопроводе Measurement of pressure drops and fluid velocity in the pipeline	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон измерений давления – от 0 до 2 гПа.</li> <li>2. Диапазон измерений скорости – от 2 до 17,5 м/с.</li> <li>3. Разрешение – 0,001 гПа / 0,1 м/с.</li> <li>4. Погрешность – <math>\pm 0,5\%</math> от диап. <math>\pm 1</math> цифра.</li> <li>5. Перегрузка – <math>\pm 10</math> гПа.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pressure measurement range – from 0 to 2 hPa.</li> <li>2. Measurement range of velocities – from 2 to 17.5 m/s.</li> <li>3. Resolution – 0.001 hPa/0.1 m/s.</li> <li>4. Error – <math>\pm 0,5\%</math> of diap. <math>\pm 1</math> digit.</li> <li>5. Overload – <math>\pm 10</math> hPa.</li> </ol>
2	 Термоанемометр «Testo 425» Thermoanemometer «Testo 425»	Измерение температуры, скорости и объемного расхода потока жидкости Measurement of temperature, velocity and volumetric flow rate of liquid	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон измерений температуры – от <math>-20</math> до <math>70^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>2. Диапазон измерений скорости – от 0 до 20 м/с.</li> <li>3. Разрешение – <math>0,1^{\circ}\text{C}</math> / 0,01 м/с.</li> <li>4. Погрешность – <math>\pm 0,5^{\circ}\text{C}</math> (от 0 до <math>60^{\circ}\text{C}</math>), <math>\pm 0,7^{\circ}\text{C}</math> (в ост. диапазоне) / <math>\pm(0,03</math> м/с + 5% от изм. знач.).</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The measuring range of the tempo-town is from <math>-20</math> to <math>70^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>2. Measurement range of velocities – from 0 to 20 m/s.</li> <li>3. Resolution – <math>0.1^{\circ}\text{C}</math>/0.01 m/s.</li> <li>4. The error is <math>\pm 0,5^{\circ}\text{C}</math> (from 0 to <math>60^{\circ}\text{C}</math>), <math>\pm 0,7^{\circ}\text{C}</math> (in the rest. range) / <math>\pm (0.03</math> m/s + 5% of the change).</li> </ol>
3	 Термогигрометр «Testo 625» Thermohygrometer «Testo 625»	Измерение температуры и относительной влажности окружающего воздуха Measurement of ambient temperature and relative humidity	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон измерений температуры – от <math>-10</math> до <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>2. Диапазон измерений относительной влажности – от 0 до 100%.</li> <li>3. Разрешение – <math>0,1^{\circ}\text{C}</math> / 0,1% отн. влажная.</li> <li>4. Погрешность – <math>\pm 0,5^{\circ}\text{C}</math> / <math>\pm 2,5\%</math> отн. влажн. (от 5 до 95% отн. влажн.).</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The measuring range of the temperature is from <math>-10</math> to <math>60^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>2. Range of measurements of relative humidity – from 0 to 100%.</li> <li>3. Resolution – <math>0.1^{\circ}\text{C}</math>/0.1% rel. wet.</li> <li>4. Error – <math>\pm 0,5^{\circ}\text{C}</math> / <math>\pm 2,5\%</math> rel. wet. (5 to 95% rel. wet).</li> </ol>
4	 Электронный штангенциркуль «FIT 19856» Electronic calipers «FIT 19856»	Измерение геометрических параметров различных изделий и заготовок Measurement of geometric parameters of different products and blanks	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон измерений – от 0 до 150 мм.</li> <li>2. Разрешение – 0,01 мм.</li> <li>3. Погрешность – 0,01 мм/м.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Measurement range – 0 to 150 mm.</li> <li>2. Resolution – 0.01 mm.</li> <li>3. Error – 0.01 mm/m.</li> </ol>
5	 Механическая рулетка Mechanical roulette	Измерение геометрических параметров Measurement of geometric parameters	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Дальность измерений – не менее 3 м.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Measurement range – at least 3 m.</li> </ol>

трубопровода равен  $k_s = 0,15$  мм (для сравнения: у нового цельнотянутого медного трубопровода  $k_s = 0,01$  мм).

8. В зависимости от режима течения воздуха в трубопроводе вычисляют коэффициент гидравлического трения по зависимостям:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}; \quad (6)$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

9. По известной скорости движения воздуха в трубопроводе  $w$ , м/с, вычисляют его гидродинамическое давление по уравнению:

$$p_{\text{вых}} = \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Па}. \quad (8)$$

10. По суммарной протяженности участков трубопровода  $l = \sum_{i=1}^N l_i$ , м, рассчитывают потери давления на трение:

$$\Delta p_{12} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Па}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

11. С учетом выражения (10) определяют давление воздуха на входе в трубопровод:

$$\Delta p_{12} = p_1 - p_2, \text{ Па}; \quad (10)$$

$$p_{\text{вх}} = p_{\text{вых}} + \Delta p_{12}, \text{ Па}. \quad (11)$$

12. Выполняют гидравлический расчет трубопровода в зависимости от его пропускной способности, например, при  $n = 0,33$ ,  $n = 0,67$ ,  $n = 1$ .

13. По итогам гидравлического расчета строят графики потерь давления по длине трубопровода для трех случаев ( $n = 0,33$ ;  $n = 0,67$ ;  $n = 1$ ) и сравнивают полученные аналитические результаты с экспериментальными данными.

**Результаты и их обсуждение.** Рассмотрим пример конкретной реализации предложенной методики.

Температура воздуха в помещении по данным термогигрометра «Testo 625» составила  $t = 20,4^\circ\text{C}$ . Тогда плотность воздуха с учетом формулы (1) –

$$\rho = \frac{353}{20,4 + 273,15} = 1,203 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент динамической вязкости воздуха по формуле (2) –

$$\mu = 1,712 \cdot 10^{-5} + 4,93 \cdot 10^{-8} \cdot 20,4 = 1,813 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Длина каждого участка трубопровода  $l_i = 0,5$  м,  $i = 1, 2, \dots, 8$ ; общая протяженность

трубопровода  $l = 8 \cdot 0,5 = 4,0$  м; внутренний диаметр трубопровода  $d = 75$  мм.

Максимальная скорость воздуха на выходе из трубопровода при  $n = 1$ , по данным термоанемометра «Testo 425»,  $w_0 = 3,86$  м/с. Тогда при условии, что режим течения воздуха в трубопроводе – турбулентный, средняя его скорость по сечению трубопровода согласно соотношению (3) будет равна:

$$w = 0,813 \cdot 3,86 = 3,14 \text{ м/с}.$$

По формуле (4) определим критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{1,203 \cdot 3,14 \cdot 0,075}{1,813 \cdot 10^{-5}} \approx 15610 > 2320.$$

Поскольку  $\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}$ , то режим течения воздуха в трубопроводе, действительно, турбулентный. Тогда коэффициент гидравлического трения медного трубопровода при  $k_s = 0,15$  мм по формуле (7) составит (область смешанного течения, переходный режим, вторая область):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{75 \cdot 10^{-3}} + \frac{68}{15610} \right)^{0,25} \approx 0,031.$$

Полученное значение коэффициента гидравлического трения соответствует данным номограммы И.И. Никурадзе [1, 2].

Гидродинамическое давление воздуха по выражению (8) составит:

$$p_{\text{вых}} = \frac{1,203 \cdot 3,14^2}{2} = 5,92 \text{ Па}.$$

Таким образом, потери давления на трение в трубопроводе по уравнению (9) составят:

$$\Delta p = 0,031 \cdot \frac{4,0}{75 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,203 \cdot 3,14^2}{2} = 9,81 \text{ Па}.$$

Давление воздуха на входе в трубопровод согласно равенству (11) –

$$p_{\text{вх}} = 5,92 + 9,81 = 15,7 \text{ Па}.$$

Как известно, при косвенных технических измерениях в случае нескольких переменных величин  $x_i$  оценку абсолютной погрешности величины  $z$  производят по следующей формуле:

$$z = \sqrt{\sum_i^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (12)$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  – частные производные функции  $f$ ;  $\Delta x_i$  – известные пределы допускаемых погрешностей;  $n$  – общее количество величин  $x_i$ .

Тогда относительная погрешность измерений будет равна

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z} \cdot 100. \quad (13)$$

В рассматриваемом случае функцией  $f$  является уравнение Дарси (9), а искомой величиной  $z$  – потери давления на трение на прямолинейном участке трубопровода  $\Delta p$ , Па. При этом такие величины, как внутренний диаметр трубопровода  $d$ , мм, и его длина  $l$ , м, температура воздуха  $t$ , °С, также максимальная скорость воздуха по сечению трубопровода  $w_0$ , м/с, находятся с определенной погрешностью с помощью прямых измерений (табл.). Некоторые же величины – такие, как динамическая вязкость  $\mu$ , Па·с, или критерий Рейнольдса  $Re$ , имеют собственные погрешности, полученные в результате косвенных измерений. С учетом уравнений (12) и (13), а также абсолютных погрешностей измерительных приборов (табл.) абсолютная и относительная погрешности косвенных измерений линейных потерь давления на трение  $\Delta p$  (при пропускной

способности  $n = 1$ ) соответственно составили  $\approx 1,04$  Па и  $\approx 10,6\%$ .

На рисунке 3 изображены графики потерь давления на трение по длине трубопровода при его пропускной способности:  $n = 0,33$ ;  $n = 0,67$ ;  $n = 1$ .

Среднеквадратичные отклонения экспериментальных данных от расчетных значений давления воздуха  $p$ , Па, при объеме выборки  $N = 9$  составили (рис. 3): для пропускной способности  $n = 1 - \sigma = 0,40$  Па; для  $n = 0,67 - \sigma = 0,36$  Па; для  $n = 1 - \sigma = 0,61$  Па.

Экспериментально-расчетные результаты показали, что в диапазоне средних скоростей потока воздуха на участке прямолинейного трубопровода от 3 до 10 м/с (число Рейнольдса находится соответственно в диапазоне от  $1,561 \cdot 10^4$  до  $4,732 \cdot 10^4$ , область смешенного трения) значение коэффициента гидравлического трения остается практически без изменений в указанном интервале значений  $Re$  и равным  $\lambda \approx 0,031$ .

### Выводы

Представлена методика определения потерь давления на трение в прямолинейном трубопроводе круглого сечения.

Выполнено экспериментальное определение потерь давления на трение на исследуемом участке трубопровода и проведено сравнение полученных результатов с аналитическими данными графиков И.И. Никурадзе.

Авторы исследований планируют продолжить научные изыскания в области гидравлики и гидромеханики, так как для выявления причин потерь и падений давления в трубопроводе необходимо учитывать ряд таких факторов, как внутренний диаметр трубопровода, скорость движения жидкости в системе, индивидуальные характеристики материала, из которого изготовлен трубопровод и его протяженность.

### References

1. Shterenliht D.V. Gidravlika: uchebnik. 5-e izd., ster. SPb.: Izd-vo «Lan», 2015. 656 s.
2. Tyanin A.N. Gidravlika sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: uchebnoe posobie. Vologda: Vologodskij gosudarstvennyj universitet, 2021. 87 s.
3. Paliivets M.S. Gidravlicheskiy raschet truboprovoda s uchetom dlin vliyaniya mestnyh soprotivlenij i ih interfeentsii // Prirodoobustrojstvo. 2022. № 1. S. 102-108.
4. Prodous O.A., Terekhov L.D., Smolin E.S. Analiz zarubezhnyh i otechestvennyh raschetnyh zavisimostej dlya opredeleniya poter napora v truboprovodah iz polimernyh materialov // Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2019. № 1. S. 56-60.
5. Akimenko A.V., Anikeev E.A., Voronin V.V. Metodika i algoritm rascheta linejnyh poter napora zhidkosti v truboprovodah // Modelirovanie sistem i protsessov. 2022. T. 15. № 2. S. 7-12.

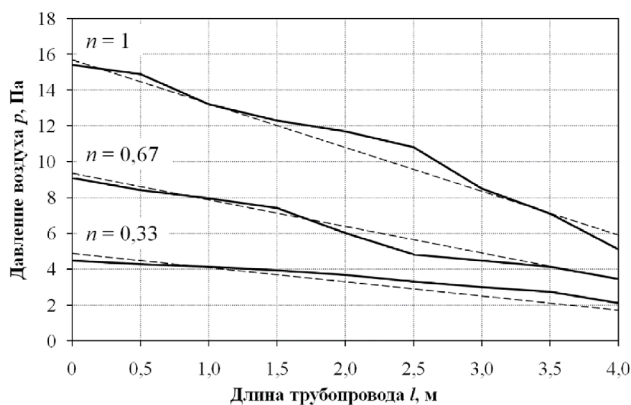


Рис. 3. Результаты сравнения графиков потерь давления на трение по длине трубопровода:

сплошная линия – экспериментальные данные;  
пунктирная линия – расчетные данные

Fig. 3. Results of comparison of graphs of friction pressure losses along the pipeline length:  
solid line – experimental data;  
dashed line – calculated data

### Список использованных источников

1. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник. 5-е изд., стер. СПб.: Изд-во «Лань», 2015. 656 с.
2. Тянин А.Н. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: учебное пособие. Вологда: ВГУ, 2021. 87 с.
3. Палиивец М.С. Гидравлический расчет трубопровода с учетом длин влияния местных сопротивлений и их интерференции // Природообустройство. 2022. № 1. С. 102-108.
4. 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.
5. Акименко А.В., Анিকেев Е.А., Воронин В.В. Методика и алгоритм расчета линейных потерь напора жидкости в трубопроводах // Моделирование систем и процессов. 2022. Т. 15, № 2. С. 7-12.

6. **Шарибзянов Н.М.** Изучение потерь напора по длине и определение коэффициента гидравлического трения при установившемся движении жидкости // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2020. С. 1429-1433.

7. **Повх А.В.** Снижение гидравлического трения в трубопроводах // Научный журнал. 2020. № 2 (47). С. 36-39.

8. **Рутковскій М.А., Шибекo А.С., Галыня К.И.** Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 6. С. 508-514.

9. **Паливец М.С.** Анализ и экспериментальная оценка местных гидравлических потерь в шаровом кране при регулировании // Природообустройство. 2020. № 5. С. 82-87.

10. **Фоминых А.В., Тельминов А.В., Ковшова Н.А.** Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2018. № 3(27). С. 79-82.

11. **Борзенко Е.И., Рыльцев И.А., Шрагер Г.Р.** Потери давления для течения степенной жидкости в трубе переменного сечения // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 1. С. 3-11.

12. **Паливец М.С.** Экспериментальная оценка потерь напора по длине в гидравлически короткой трубе системы водоснабжения // Инновации и инвестиции. 2020. № 9. С. 216-220.

13. **Seoev L.V., Drozdov D.A., Plotnikova K.M., Elkin A.V.** Study of hydraulic resistance in collapsible pipelines // IOP Conference Series: materials Science and Engineering, Khanty-Mansyisk, February 21-22, 2019. Khanty-Mansyisk, 2020. P. 012022.

#### Критерии авторства

Карпов Д.Ф. и Павлов М.В. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023

Одобрена после рецензирования 06.02.2023

Принята к публикации 08.02.2023

6. **Sharibzyanov N.M.** Izuchenie poter napora po dline i opredelenie koeffitsienta gidravlicheskogo treniya pri ustanovivshemysya dvizhenii zhidkosti // Nauchnye trudy studentov Izhevskoj GSKHA / FGBOU VO «Izhevskaya gosudarstvennaya selskhozaystvennaya akademiya». Izhevsk: Izhevskaya GSKHA, 2020. S. 1429-1433.

7. **Povh A.V.** Snizhenie gidravlicheskogo treniya v truboprovodah // Nauchnyj zhurnal. 2020. № 2(47). S. 36-39.

8. **Rutkovskij M.A., Shibeko A.S., Galynya K.I.** Gidravlicheskiy raschet mednyh truboprovodov sistem otopeniya i vnutrennego gazosnabzheniya // Nauka i tekhnika. 2018. T. 17. № 6. S. 508-514.

9. **Paliivets M.S.** Analiz i eksperimentalnaya otsenka mestnyh gidravlicheskih poter v sharovom krane pri regulirovaniy // Prirodoobustrojstvo. 2020. № 5. S. 82-87.

10. **Fominyh A.V., Teljminov A.V., Kovshova N.A.** Zavisimost koeffitsienta poter na trenie po dline truby v gidravlicheskih sistemah APK // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2018. № 3(27). S. 79-82.

11. **Borzenko E.I., Ryltsev I.A., Shrager G.R.** Poteri davleniya dlya techeniya stepennoj zhidkosti v trube perezmenogo secheniya // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza. 2021. № 1. S. 3-11.

12. **Paliivets M.S.** Eksperimentalnaya otsenka poter napora po dline v gidravlicheski korotkoj trube sistemy vodosnabzheniya // Innovatsii i investitsii. 2020. № 9. S. 216-220.

13. **Seoev L.V., Drozdov D.A., Plotnikova K.M., Elkin A.V.** Study of hydraulic resistance in collapsible pipelines // IOP Conference Series: materials Science and Engineering: Khanty-Mansyisk, February 21-22, 2019. Khanty-Mansyisk, 2020. P. 012022.

#### Criteria of authorship

Karpov D.F. and Pavlov M.V. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism. The authors declare that there are no conflicts of interest.

#### Contribution of authors

All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted to the editorial office 09.01.2023

Approved after reviewing 06.02.2023

Accepted for publication 08.02.2023