
**ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ
РЕСУРСОВ/WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTION SYSTEMS FOR WATER RESOURCES
PROTECTION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8>**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРУБОПРОВОДА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МАЛОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СТЕНДЕ**

Научная статья

Петербургский Д.А.^{1,*}, Орлов В.А.²¹ORCID : 0000-0001-6473-1281;²ORCID : 0000-0003-2615-0448;¹Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (piter.rus2[at]inbox.ru)

Аннотация

Представлены результаты натурных исследований по проведению экспериментов по определению коэффициента гидравлического трения λ трубопровода из полиэтилена ПЭ 80 PN 16 SDR 6 наружным диаметром 12 и внутренним $d=10$ мм на экспериментальной установке при различных температурах стенки трубопровода и стабильной начальной температуре транспортируемой по нему воды. Получены зависимости, характеризующие изменение потерь напора на испытуемом участке трубопровода с пересчетом их величин на значения коэффициентов гидравлического трения. Произведен анализ зависимостей коэффициента гидравлического трения от температуры стенки трубопровода, что позволило разработать методику расчета энергоэффективности работы трубопровода в зависимости от коэффициента гидравлического сопротивления и сопоставить расчеты со стандартной методикой расчета энергоэффективности через коэффициент удельного сопротивления. Показано, что использование предложенной методики, учитывающей температурный фактор, обеспечивает экономии электроэнергии при транспортировке воды при разработке проектов строительства и реконструкции трубопроводов, эксплуатируемых в различные сезоны года.

Ключевые слова: трубопровод, потери напора, местные сопротивления, температура, методика расчета, электроэнергия.

**EXPERIMENTAL STUDIES ON CHANGES IN THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A PIPELINE DUE
TO TEMPERATURE VARIATIONS ON A SMALL-SCALE HYDRAULIC TEST BENCH**

Research article

Peterburgskiy D.A.^{1,*}, Orlov V.A.²¹ORCID : 0000-0001-6473-1281;²ORCID : 0000-0003-2615-0448;¹Academy of the State Fire Service EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (piter.rus2[at]inbox.ru)

Abstract

The results of field studies are presented, involving experiments to determine the hydraulic friction coefficient λ of a PE 80 PN 16 SDR 6 polyethylene pipeline with an outer diameter of 12 mm and an inner diameter of 10 mm, conducted on an experimental rig at various pipeline wall temperatures and a constant initial temperature of the water transported through it. Dependencies were obtained characterising the change in head loss in the tested section of the pipeline, with their values converted into hydraulic friction coefficient ones. An analysis was carried out of the dependencies of the hydraulic friction coefficient on the pipeline wall temperature, which enabled the development of a method for calculating the energy efficiency of pipeline operation as a function of the hydraulic resistance coefficient, and allowed the calculations to be compared with the standard method for calculating energy efficiency via the specific resistance coefficient. It is demonstrated that the use of the suggested methodology, which takes the temperature factor into account, enables energy savings in water transport when designing projects for the construction and reconstruction of pipelines operated in different seasons of the year.

Keywords: pipeline, pressure losses, local resistance, temperature, calculation method, electricity.

Введение

На сегодняшний день эффективное управление потреблением электроэнергии в различных отраслях производства рассматривается как важнейший инструмент для достижения основных целей в области энергоэффективности [1]. В частности, при проектировании новых и реконструкции существующих напорных трубопроводных систем учитывается ряд ключевых аспектов, обеспечивающих их надежность, энергоэффективность и долговечность [2].

С появлением на строительном рынке новых материалов для строительства новых и реновации ветхих трубопроводных систем напорного водоснабжения возникает необходимость уточнения их гидравлических характеристик, значения которых непосредственно влияют на энергетические характеристики при транспортировке

воды. Так, например, существенный вклад в развитии данной тематики привносят работы, направленные на изучение внутренней шероховатости трубопроводов и ее трансформации в процессе эксплуатации трубопровода [3]. Продолжается вести работа по получению эмпирических зависимостей коэффициента гидравлического трения от относительной эквивалентной шероховатости стенок трубопровода и безразмерного числа Рейнольдса для разных областей турбулентной зоны гидравлических сопротивлений труб [4]. Имеются экспериментальные исследования кинематической структуры потока и гидравлического коэффициента трения напорных водоводов в зависимости от формы поперечного сечения [5]. Помимо этого, научным сообществом, особое внимание уделяется температурному фактору окружающей среды и транспортируемой воды [6].

В связи с этими обстоятельствами изучение новых строительных материалов для трубопроводных сетей и, в частности, широкое применение полимерных материалов приобретает первостепенное значение для практики обеспечения надежного водоснабжения [7].

Важнейшим элементом в данных исследованиях является достижение эффекта энергосбережения при транспортировке воды, которое может быть оценено посредством ряда факторов, включая плотность воды, ее расход, коэффициент гидравлического сопротивления соответствующего материала трубопровода, коэффициент полезного действия насосной установки [8].

Традиционной формулой для расчета потребления электроэнергии Θ при транспортировке воды в трубопроводе соответствующего диаметра является представленная ниже (1):

$$\Theta = (\rho g Q H / 1000 \eta_p) 24 \cdot 365, \quad [\kappa\Gamma \cdot \text{м}^2 \cdot \text{у}/\text{с}^3 = \kappa\text{Вт} \cdot \text{у}] \quad (1)$$

где A_i — коэффициент удельного сопротивления материала стенок трубопровода $\text{с}^2/\text{м}^6$; l — протяженность трубопровода, м

Окончательный вид формулы для определения потребления электроэнергии при транспортировке воды с учетом температурного фактора приобретает вид (3):

$$\Theta_A = [9,81 Q^3 (A_i \cdot l) / \eta_p] \cdot 24 \cdot 365 \quad (2)$$

где A_i — коэффициент удельного сопротивления материала стенок трубопровода $\text{с}^2/\text{м}^6$; l — протяженность трубопровода, м

Окончательный вид формулы для определения потребления электроэнергии при транспортировке воды с учетом температурного фактора приобретает вид (3):

$$\Theta_\lambda = 0,81 \cdot Q^3 \cdot l \cdot \lambda \cdot 24 \cdot 365 / (d^5 \cdot \eta_p) \quad (3)$$

Целью данного исследования является установление зависимости величины энергопотребления от коэффициента линейного гидравлического сопротивления при неизотермических условиях движения воды, с учетом современных материалов, используемых в трубопроводных системах. Используя представленные формулы, проводится сопоставление эффекта энергопотребления при транспортировке воды по трубопроводам при различных температурах окружающей среды и воды.

Методы и принципы исследования

В качестве установки для проведения гидравлических экспериментов с использованием операций по нагреву трубопровода из полиэтилена ПЭ 80 PN 16 SDR 6 наружным диаметром 12 и внутренним $d=10$ мм и определения соответствующих зависимостей потерь напора и коэффициента гидравлического трения использовался малогабаритный стенд, компоновочная схема которого изображена на рисунке 1.

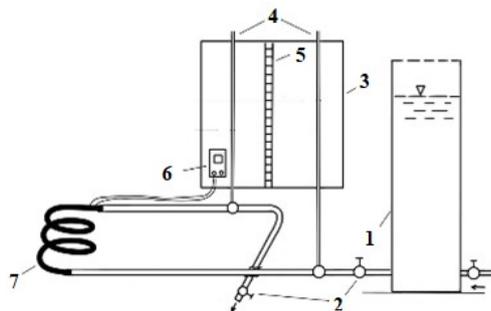


Рисунок 1 - Модель исследуемого малогабаритного стенда, выполненного в виде скрученного в виток полиэтиленового трубопровода малого диаметра, резервуара, панно для пьезометров, терморегулятора:

1 - резервуар с жидкостью определенной температуры; 2 - задвижки; 3 - панно для пьезометров; 4 - прозрачные трубки-пьезометры; 5 - линейка для определения отметок поднятия жидкости; 6 - терморегулятор (электронный МПРТ-11); 7 - скрученный виток полимерный трубопровод в греющем кабеле, обмотанным в специальную защитную пленку

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.1>



Малогабаритная гидравлическая установка представляет систему, включающую перечисленные выше элементы, где в качестве транспортируемого в системе материала используется жидкость (водопроводная вода) неизменной температуры $t_{ж}$.

Длина испытуемого гибкого полиэтиленового трубопровода (ПЭ 80 PN 16 SDR) наружным диаметром 12 и внутренним $d=10$ мм была принята равной $l=7,5$ м. При использовании в экспериментах электронного терморегулятора МПРТ-11 для сохранения и поддержания стабильной температуры по всей длине трубопровода и обеспечения компактности потребовалось скрутить его в виток (диаметром 0,5 м) и поместить в греющий кабель с дополнительной обмоткой специальной защитной липкой пленкой (скотчем), препятствующей потерям теплового излучения и поддержания тем самым стабильной температуры стенки трубопровода в период проведения экспериментов при соответствующих температурах. Причем скрутка полимерного трубопровода в виток осуществлялась при сохранении его круглого живого сечения, т.е. без смятия по всей длине трубы. Таким образом, после скрутки образовалась конструкция из 5-ти одинаковых соприкасающихся друг с другом витков (рисунок 2).



Рисунок 2 - Образец скрученного трубопровода в витки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.2>

На рисунках 3–5 представлены соответственно: фрагменты терморегулятора, греющего кабеля и защитного кожуха.

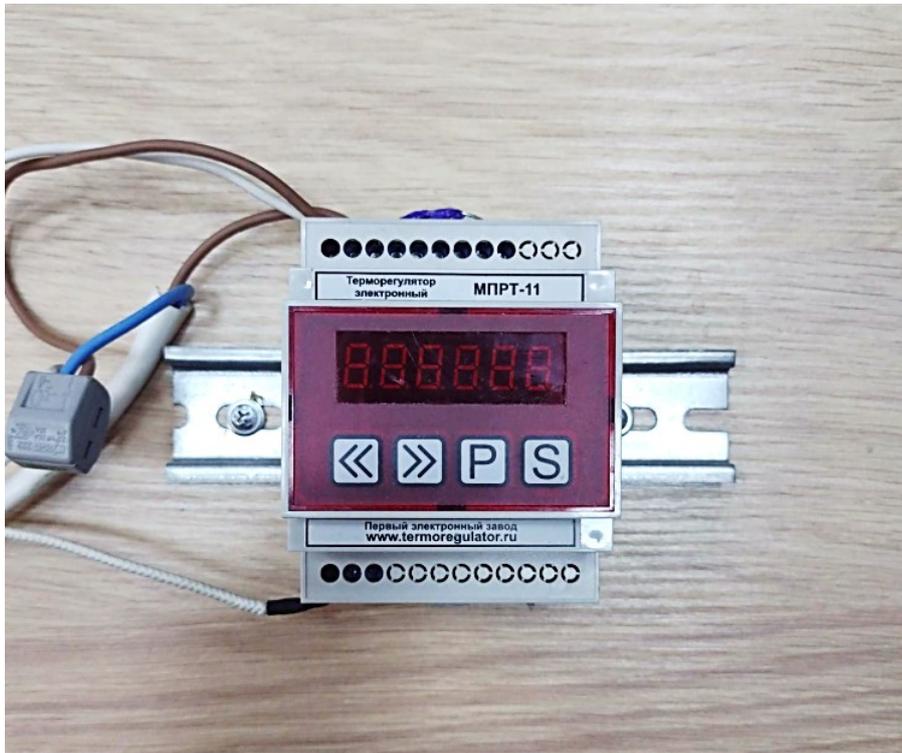


Рисунок 3 - Фрагмент терморегулятора МПРТ-11
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.3>



Рисунок 4 - Фрагмент греющего кабеля от терморегулятора
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.4>



Рисунок 5 - Фрагмент защитного кожуха для витков
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.5>

Малогабаритная установка гидравлического стенда с описанными выше техническими аксессуарами представлена на рисунке 6.

Электронный терморегулятор, входящий в состав стенда, обеспечивает требуемую температуру стенки полиэтиленового трубопровода на каждом этапе проведения опытов. В начале и конце скрученной полиэтиленовой трубы (непосредственно перед и после выхода из греющего кабеля) размещены патрубки для отбора статического давления, которые соединены с трубками-пьезометрами, расположенными на панно (рисунок 7).



Рисунок 6 - Малогабаритный гидравлический стенд с терморегулятором, трубками-пьезометрами
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.6>



Рисунок 7 - Выборочные фрагменты малогабаритного гидравлического стенда с скрученным и помещенным в защитный кожух трубопровод и панно с мерной линейкой
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.7>

В качестве метода экспериментальных исследований по определению коэффициента гидравлического трения λ , как конечного результата опытов на стенде, применен методический подход, реализованный в следующей последовательности:

– определение местных потерь напора h_m как разницы показаний пьезометров в начале и конце трубопровода, по которому поступает вода из резервуара с жидкостью в мерную емкость, где определяются величины ее расхода Q и скорости течения V ;

– расчет местных сопротивлений ξ_m по формуле Вейсбаха [9]:

$$h_m = \xi_m \frac{V^2}{2g},$$

– перерасчет полученных значений местных сопротивлений ξ_m на потери напора по длине λ , т.е. использование так называемой «эквивалентной длины местного сопротивления» (участка данного трубопровода диаметром d и длиной $l_{\text{экв}} = 7,5$ м, где потери напора по длине равны местным потерям напора $\lambda = \xi_m$) в виде следующих математических выражений:

$$h_m = \xi_m \frac{V^2}{2g} = h_{\text{дл. экв}} = \lambda \cdot l_{\text{экв}} \cdot V^2 / (2gd),$$

$$l_{\text{экв}} / d = \xi_m / \lambda,$$

Из последнего соотношения определяется величина λ :

$$\lambda = \xi_m \cdot d / l_{\text{экв}}$$

Описанный подход к определению гидравлических показателей оправдан, так как совокупная потеря напора в системе, состоящей из 5-ти одинаковых по длине и конфигурации витков скрученного трубопровода, фактически исчисляется путем простого суммирования местных потерь напора в каждом из витков, как если бы каждое местное сопротивление в витке существовало самостоятельно и независимо от других сопротивлений. Таким образом,

примененный метод простого суммирования или принцип наложения потерь позволяет получить объективные доверительные результаты.

Эксплуатация опытной малогабаритной гидравлической системы включает операции по определению величин потери давления (напора) в скрученном трубопроводе h_m , что отражается в виде разницы подъема воды на двух трубках-пьезометрах. Определение величины расхода воды Q , поступающего из резервуара по скрученному трубопроводу, производилось, как указывалось ранее, объемным способом, а регулирование расхода малогабаритным вентилем.

Конечным результатом экспериментов являлось построение соответствующих графиков зависимости $h_m=f(Q)$ в различных условиях изменения расходов Q и температур стенки трубопровода, а также зависимости $\lambda=f(t')$ при тех же значениях расходов и температур.

Результаты и дискуссия

В результате исследований были опробованы соответствующие специальные подходы, которые позволили выявить тенденции изменения гидравлических характеристик потока, проходящего через греющую кабель. В частности, из резервуара к полиэтиленовому трубопроводу направлялась вода с температурой в интервале $t_{ж}=14-18^{\circ}\text{C}$ (в среднем 16°C). Такая относительно стабильная температура $t_{ж}$ и давление воды в период проведения натуральных исследований в течение всего цикла экспериментов обеспечивалась регулярным поступлением водопроводной воды в резервуар. Контроль за соответствующей температурой стенки скрученного в витки трубопровода в период всех опытов осуществлялся с использованием датчиков, а температура воды контролировалась термометром. Контроль расхода воды, как упоминалось выше, осуществлялся объемным методом.

Основной задачей проводимых экспериментальных исследований являлось подтверждение принципиальной гипотезы, заключающейся в том, что нагрев стенки трубы оказывает влияние на гидравлическое сопротивление трубопроводов, что может быть объяснено определенным соотношением величин динамических вязкостей, которые относятся соответственно к температуре окружающей среды (в данном случае стенки трубопровода, например, находящегося в помещении при соблюдении стабильных температур транспортируемой воды).

Ниже представлены результаты натуральных исследований, выполненных на малогабаритном стенде при следующих условиях: температурах трубопровода $t = 17, 30$ и 35°C и средней температуре воды в период проведения экспериментов $t_{ж}=16^{\circ}\text{C}$.

В качестве примера результаты исследований при температуре стенки трубы 30°C приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Выборочные результаты натуральных исследований на малогабаритном стенде при температуре воды 16°C и стенки трубы 30°C

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.8>

Расход Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Скорость течения воды V , м/с	Показания на пьезометре, см		Разница в показаниях пьезометро в $h=1-2$, см	Расчетная величина ξ_m	Расчетная величина λ
		1	2			
0,000006	0,07643	38,6	37,8	0,8	26,84	0,0357
0,0000081	0,1032	38,6	36,3	2,3	42,32	0,0564
0,00000833	0,106	38,5	36,2	2,3	40,12	0,053
0,00001475	0,188	37,3	31,1	6,2	34,38	0,0458
0,00002075	0,264	35,3	26,6	8,7	24,46	0,0326
0,0000315	0,401	32,9	17,6	15,3	18,65	0,0248
0,000021	0,267	32,0	23,0	9,0	24,74	0,0329
0,000035	0,445	36,8	20,6	16,2	16,03	0,0213
0,00001375	0,175	35,7	31,4	4,5	28,8	0,0384
0,000006	0,07643	40,2	39,1	1,1	36,91	0,0492

Полученные по результатам экспериментов зависимости $h=f(Q)$ для трех температур стенки трубопровода в виде графиков представлены на рисунке 8.

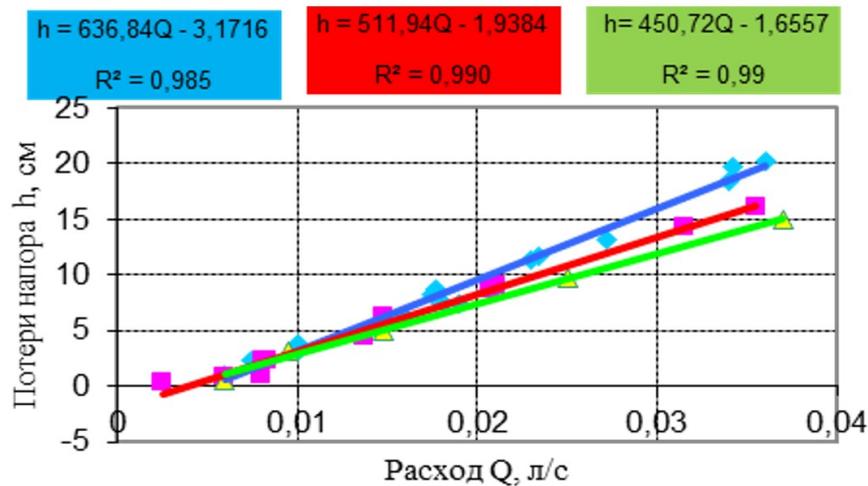


Рисунок 8 - Графики изменения потерь напора h транспортируемой воды от ее расхода Q для при разных температурах t стенки трубы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.9>

Примечание: синяя для 17°C , красная 30°C и зеленая 35°C

Проводя анализ характера графических зависимостей, представленных на рисунке 8, можно сделать выводы:

- при разных температурных условиях окружающей среды (трубопровода) достигается определенный эффект влияния температуры на потери напора;
- выявлен линейный характер изменения потерь напора и установлена определенная связь: чем больше температура трубопровода, тем меньше становятся потери напора в нем;
- полученные зависимости свидетельствуют о том, что изменение величины динамической вязкости жидкости (за счет увеличения температуры стенки трубы) способствует изменению гидравлических сопротивлений трубопровода, чем в практической деятельности необходимо воспользоваться специалистам при проектировании трубопроводных систем для отличающихся во времени температурных параметров их эксплуатации.

Таким образом, полученные результаты натуральных экспериментов подтверждают гипотезу о влиянии температурных условий на изменение гидравлических сопротивлений [10].

Обобщая представленные выше результаты по проведенным экспериментальным исследованиям, можно сделать вывод, что средние значения коэффициентов гидравлического трения составляют следующие величины: при температуре 17°C $\lambda_{cp} = 0,045$; при температуре 30°C $\lambda_{cp} = 0,039$; при температуре 35°C $\lambda_{cp} = 0,0345$. Таким образом, была выявлена тенденция уменьшения коэффициента гидравлического трения при повышении температуры стенки трубы, т.е. $\lambda_{cp}=f(t^0)$, которые представлены в графическом виде ниже в исследуемом диапазоне $17\text{-}35^{\circ}\text{C}$ (рисунок 9).

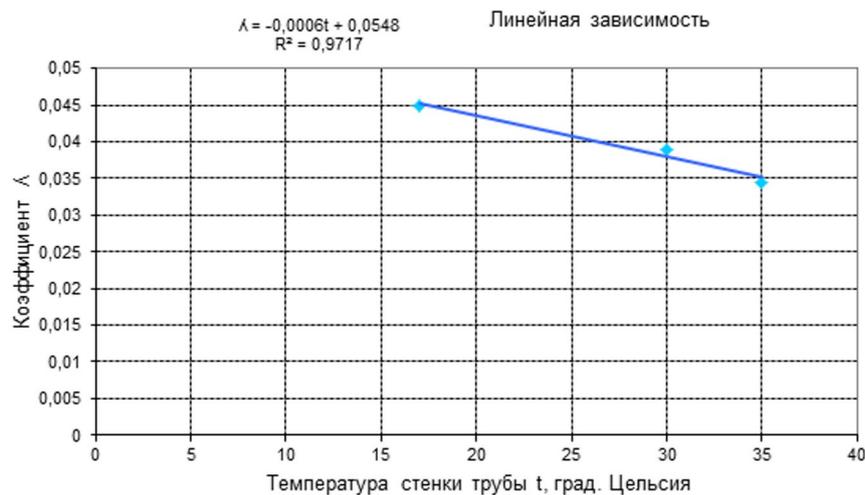


Рисунок 9 - Зависимость коэффициента гидравлического трения от температуры стенки трубы $\lambda=f(t)$
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.8.10>

Подводя промежуточные итоги, можно отметить, что согласно расчетам при температурах стенки трубы от 17 до 35^oC среднее значение коэффициента гидравлического трения снижается с $\lambda_{cp. 17} = 0,045$ до $\lambda_{cp. 35} = 0,0345$. Таким образом, при повышении температуры стенки на 18^oC (от 17 до 35^o) снижение величины гидравлического сопротивления λ_{cp} составит 23,3%. Другими словами, при повышении температуры стенки трубы на 1^oC величина коэффициента гидравлического трения снижается на $23,3/18=1,29\%$ для данного типа материала трубопровода из полиэтилена ПЭ 80 PN 16 SDR наружным диаметром 12 и внутренним $d=10$ мм.

Промежуточным выводом из полученных результатов является заключение о том, что, варьируя величинами температуры стенки трубы при неизменной температуре транспортируемой воды, целесообразно использование для расчета гидравлических параметров, а также значений величин энергопотребления разработанный авторами автоматизированный комплекс [11]. Для этого в автоматизированную программу, алгоритм которой включает формулы (2) и (3), вводятся параметры протяженности и диаметра трубопровода, расхода транспортируемой воды, температур воды и стенки трубопровода, коэффициента удельного сопротивления A для соответствующего материала трубопровода и к.п.д. насосной установки.

В качестве примера рассмотрен вариант транспортировки воды по трубопроводу из полиэтилена ПЭ 80 SDR 17 внутренним диаметром $d=0,0968$ м) при расходе воды $Q=0,008$ м³/с, к.п.д. насосной установки $\eta_p=0,95$, температур воды и стенки трубопровода при наземной прокладке трассы соответственно ($T_{в1}=10^o$ C) и ($T_{т1}=20^o$ C в ночные часы и $T_{т2}=30^o$ C в полдень), т.е. для региона с жарким климатом. В алгоритме автоматизированной программы задействована формула для определения коэффициента удельного сопротивления $A=0,0009d^{-5,2146}$ для полимерного трубопровода ПЭ 80 [12].

Для случая ночного времени суток при температуре стенок трубопровода $T_{т1}=20^o$ C потребление электроэнергии \mathcal{E}_λ , подсчитанное по формуле (3), составляет 7993,43 кВт.ч в год, а при $T_{т2}=30^o$ C 7613,03 кВт.ч в год. Разница в экономии электроэнергии при транспортировке воды в ночные часы составляет 4,75%. В то же время расчет потребления электроэнергии \mathcal{E}_λ по формуле (2) для ночного и дневного времени суток показывает идентичный результат (8094,99 кВт.ч в год), так как значение температурного фактора не учитывается.

Заключение

1. В результате стендовых гидравлических испытаний трубопровода заданной длины, изготовленного из полиэтилена ПЭ 80 PN 16 SDR 6 была подтверждена гипотеза о влиянии температурных условий на потери напора для трубопроводов, выполненных из полимерных материалов, а именно установлена зависимость изменения коэффициента линейного гидравлического сопротивления от температуры стенки трубопровода.

2. По результатам анализа полученных данных для полимерного трубопровода ПЭ 80 SDR 6, зафиксирована тенденция уменьшения коэффициента гидравлического трения на относительную величину, равная 1,29% при повышении температуры стенки трубы на 1^oC.

3. Базируясь на результатах работы специального автоматизированного комплекса, рассмотрен вариант транспортировки воды по трубопроводу из полиэтилена ПЭ 80 SDR 17 при разных значениях температур стенки трубопровода и воды, где при прочих равных условиях экономия электроэнергии составила 4,75%.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. — Москва: Энергоатомиздат, 2006. — 359 с.
2. Примин О.Г. Утечки воды / О.Г. Примин. — Москва: МИСИ-МГСУ, 2022. — 168 с.
3. Продоус О.А. Повышение точности гидравлического расчета напорных трубопроводов из полимерных и металлополимерных труб / О.А. Продоус, П.П. Якубчик, Л.Д. Терехов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2024. — Т. 26. — № 1. — С. 140–151.
4. Палиивец М.С. Экспериментальная оценка потерь напора по длине в гидравлически короткой трубе системы водоснабжения / М.С. Палиивец // Инновации и инвестиции. — 2020. — № 9. — С. 216–220.
5. Палиивец М.С. К вопросу экспериментального определения гидравлического коэффициента трения в напорных водоводах квадратного сечения / М.С. Палиивец // Природообустройство. — 2016. — № 4. — С. 20–26.
6. Orlov V. Influence of temperature on the energy consumption of pressure pipelines. Network control systems for connected and automated vehicles / V. Orlov, D. Peterburgskiy // Lecture Notes on Networks and Systems. — Vol. 510. — P. 1471–1480. — DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1_151.
7. Примин О.Г. Надежность и экологическая безопасность водопроводных и водоотводящих трубопроводов / О.Г. Примин, Г.Н. Громов // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 4. — С. 54–61.
8. Продоус О.А. Зависимость энергозатрат насосов в напорных полиэтиленовых трубопроводах от величин их фактического внутреннего диаметра / О.А. Продоус. — URL: <https://isguru.ru/stati/vodosnabzhenie-i-vodootvedenie/6922-zavisimost-energozatr-at-nasosov-v-n/> (дата обращения: 15.11.2025).
9. Викулин П.Д. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: учебник / П.Д. Викулин, В.Б. Викулина; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. — Москва: МГСУ, 2015. — 248 с.
10. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. — Москва: Недра, 1982. — 224 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661754 Программа расчета гидравлических параметров напорных труб при изменении температурных режимов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ : № 2020661754 : опубликовано 30.09.2020 / Орлов В.А., Зоткин С.П., Иншакова М.А., Петербургский Д.А.
12. Орлов В.А. Бестраншейные технологии и энергосбережение / В.А. Орлов. — Москва: Издательство АСВ, 2021. — 123 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Leznov B.S. Energoberezhenie i reguliruemii privod v nasosnikh i vozdukhoduvnikh ustanovkakh [Energy saving and variable-speed drives in pump and blower systems] / B.S. Leznov. — Moscow: Energoatomizdat, 2006. — 359 p. [in Russian]
2. Primin O.G. Utechki vodi [Water leaks] / O.G. Primin. — Moscow: MISI-MGSU, 2022. — 168 p. [in Russian]
3. Prodous O.A. Povishenie tochnosti gidravlicheskogo rascheta napornikh truboprovodov iz polimernikh i metallopolimernikh trub [Improving the accuracy of hydraulic calculations for pressure pipelines made of polymer and metal-polymer pipes] / O.A. Prodous, P.P. Yakubchik, L.D. Terekhov [et al.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2024. — Vol. 26. — № 1. — P. 140–151. [in Russian]
4. Paliivets M.S. Eksperimental'naya otsenka poter napora po dline v gidravlicheski korotkoi trube sistemi vodosnabzheniya [Experimental assessment of head loss along the length of a hydraulically short pipe in a water supply system] / M.S. Paliivets // Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]. — 2020. — № 9. — P. 216–220. [in Russian]
5. Paliivets M.S. K voprosu eksperimental'nogo opredeleniya gidravlicheskogo koeffitsienta treniya v napornikh vodovodakh kvadratnogo secheniya [On the experimental determination of the hydraulic friction coefficient in square-section pressure water mains] / M.S. Paliivets // Prirodoobustroistvo [Environmental Engineering]. — 2016. — № 4. — P. 20–26. [in Russian]
6. Orlov V. Influence of temperature on the energy consumption of pressure pipelines. Network control systems for connected and automated vehicles / V. Orlov, D. Peterburgskiy // Lecture Notes on Networks and Systems. — Vol. 510. — P. 1471–1480. — DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1_151.
7. Primin O.G. Nadezhnost i ekologicheskaya bezopasnost vodoprovodnikh i vodootvodyashchikh truboprovodov [Reliability and Environmental Safety of Water Supply and Drainage Pipelines] / O.G. Primin, G.N. Gromov // Promishlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2021. — № 4. — P. 54–61. [in Russian]
8. Prodous O.A. Zavisimost energozatr-at nasosov v napornikh polietilenovikh truboprovodakh ot velichin ikh fakticheskogo vnutrennego diametra [The relationship between the energy consumption of pumps in high-pressure polyethylene pipelines and their actual internal diameter] / O.A. Prodous. — URL: <https://isguru.ru/stati/vodosnabzhenie-i-vodootvedenie/6922-zavisimost-energozatr-at-nasosov-v-n/> (accessed: 15.11.2025). [in Russian]



9. Vikulin P.D. *Gidravlika sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: uchebnik* [Hydraulics of Water Supply and Drainage Systems: Textbook] / P.D. Vikulin, V.B. Vikulina; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow State University of Civil Engineering. — Moscow: MSCU, 2015. — 248 p. [in Russian]

10. Altshul A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistance] / A.D. Altshul. — Moscow: Nedra, 1982. — 224 p. [in Russian]

11. *Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmi dlya EVM № 2020661754 Programma rascheta gidravlicheskiikh parametrov napornikh trub pri izmenenii temperaturnikh rezhimov. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmi dlya EVM* [Certificate of State Registration of Computer Software No. 2020661754: Software for calculating the hydraulic parameters of pressure pipes under varying temperature conditions. Certificate of State Registration of Computer Software] : № 2020661754 : published 30.09.2020 / Orlov V.A., Zotkin S.P., Inshakova M.A., Peterburgskii D.A. [in Russian]

12. Orlov V.A. *Bestransheinie tekhnologii i energosberezhenie* [Trenchless technologies and energy saving] / V.A. Orlov. — Moscow: Publishing House ASV, 2021. — 123 p. [in Russian]