



DOI 10.37539/2949-1991.2023.4.4.022

УДК 628.14

Твардовская Екатерина Андреевна, магистрант
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Неслер Светлана Игоревна, магистрант
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Ильченко Анастасия Алексеевна, магистрант
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Кошелева Анастасия Яновна, студентка
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Научный руководитель:

Терехов Лев Дмитриевич, профессор, д.т.н., профессор кафедры
«Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОВОДА ПО НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ВНУТРЕННИМ ОБЛЕДЕНЕНИЕМ

Аннотация. Приведена сравнительная оценка расхода топлива на подогрев воды при транспортировании её по водоводам надземной прокладки применительно к районам вечномерзлых грунтов. Рассмотрены две технологии



подачи воды: первая – в соответствии с нормативными документами, другая – по новой технологии с допущением внутреннего обледенения трубопровода. Новая технология подачи воды позволяет экономить тысячи тонн угля в год на одном водоводе.

Ключевые слова: водовод, вечная мерзлота, топливо, внутреннее обледенение, экономическая эффективность.

С точки зрения водоснабжения главной задачей северных районов страны является создание таких условий, которые бы обеспечивали надежную и экономичную эксплуатацию водоводов с учетом выполнения существующих нормативных требований [1-3]. При эксплуатации водоводов зимой необходимо поддерживать температуру воды в конце трубопровода не менее $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из этого условия назначается необходимая толщина теплоизоляции [4]. Помимо этого, согласно проведенным исследованиям [5-8], при транспортировании воды в условиях низких температур возможно использовать режим внутреннего обледенения трубопровода. Такой способ в свою очередь позволяет снизить эксплуатационные затраты, поскольку эквивалентная шероховатость стальных труб с учетом эксплуатации составляет $\Delta_{\text{Этр}}=1,2\text{ мм}$, а поверхности льда в 120 раз меньше и составляет $\Delta_{\text{Эл}}=0,01\text{ мм}$ [9]. В случае работы трубопровода в режиме внутритрубного обледенения температуру воды в конце водовода можно уменьшать до $+0,1\div 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при работе по этой технологии значительно снижается степень подогрева воды в начале трубопровода и, следовательно, существенно экономится топливо.

Для оценки эффективности эксплуатации водовода с пониженным значением температуры транспортируемой воды выполнены сравнительные многовариантные расчеты водовода с различными диаметрами и толщиной теплоизоляции в определенном диапазоне температур воды наружного воздуха. Расчеты производились для горизонтальных водоводов надземной прокладки



(таблица 1) применительно к климатическим условиям центрального участка БАМа (г. Тында), при следующих условиях:

- диаметры трубопроводов $d_y = 300, 500$ мм;
- толщина теплоизоляции $\delta = 0, 50, 100, 150$ мм;
- температура наружного воздуха $\theta =$ минус 10, 20, 30, 40, 50 °С;
- температура воды в конце водовода $t_k = 0,1; 1; 3^0$ С;
- скорость ветра $\omega = 10$ м/с;
- скорость движения воды $V = 1$ м/с;
- коэффициент теплопроводности стенки трубы $\lambda_m = 46$ Вт/м град;
- коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_{из} = 0,05$ Вт/м град;
- длина водовода $L = 5\ 000$ м.

Таблица 1

Основные геометрические и гидравлические параметры водоводов

Параметры	Диаметр условного прохода	
	300 мм	500 мм
Внутренний диаметр трубопровода, d_1 , м	0,311	0,516
Наружный диаметр трубопровода, d_2 , м	0,325	0,530
Расход воды, Q , м ³ /с	0,0760	0,2091
Гидравлический уклон, i м	0,0050	0,0026

Расчет проводится по следующим зависимостям. Теплотери трубопровода, Вт, определяются по формуле:

$$q = c \cdot \rho \cdot Q \cdot (t_n - t_k), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость воды, Дж/кг град;

ρ – плотность жидкости, кг/м³

t_n, t_k – температура воды в начале и конце водовода, °С.

Температура воды в начале водовода, °С, определяется по формуле [10]:

$$t_n = \theta + \frac{q_{тр}}{k} + \left(t_k - \theta - \frac{q_{тр}}{k} \right) \cdot e^{\frac{k \cdot L}{c \cdot \rho \cdot Q}}, \quad (2)$$



где θ – температура наружного воздуха, °С.

$q_{тр}$ – количество тепла, выделяемое при движении воды, Вт/м:

$$q_{тр} = g \cdot \rho \cdot Q \cdot i \quad (3)$$

k – линейный коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле:

$$k = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\pi \cdot \alpha \cdot d_3} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где d_3 – наружный диаметр трубопровода вместе с теплоизоляцией, м;

α – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубопровода в атмосферу, определяемый по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu_B \cdot \lambda_B}{d_3}, \quad (5)$$

где Nu_B – критерий Нуссельта для воздуха;

λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха:

$$\lambda_B = 2,44 \cdot 10^{-2} - 8 \cdot 10^{-5} \cdot (-\theta). \quad (6)$$

Критерий Нуссельта для воздуха находится по формуле:

$$Nu_B = 0,32 \cdot Re_B^{0,63} \quad (7)$$

где Re_B – число Рейнольдса для воздуха, находится по формуле:

$$Re_B = \frac{\omega \cdot d_3}{\nu_B} \quad (8)$$

где ν_B – кинематическая вязкость воздуха, определяемая по формуле:

$$\nu_B = [13,248 - 8,27 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta) + 5 \cdot 10^{-5} \cdot (-\theta)^2] \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

Результаты определения температуры воды в начале водовода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные значения температуры воды в начале водовода t_H

$\theta, ^\circ\text{C}$	$t_H, ^\circ\text{C}, \text{ при } t_K, ^\circ\text{C}$		
	+0,1	+1	+3
при $d_y=300$ мм, $\delta=0$ мм			
-10	16,1	18,4	23,6
-20	32,4	34,8	40,4

$\theta, ^\circ\text{C}$	$t_H, ^\circ\text{C}, \text{ при } t_K, ^\circ\text{C}$		
	+0,1	+1	+3
при $d_y=500$ мм, $\delta=0$ мм			
-10	6,2	7,6	10,8
-20	12,3	13,8	17,0



$\theta, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}, \text{ при } t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$		
	+0,1	+1	+3
-30	49,3	51,7	56,9
-40	66,8	69,2	74,5
-50	85,1	87,5	92,9
при $d_y=300$ мм, $\delta=50$ мм			
-10	0,225	1,141	3,178
-20	0,407	1,324	3,360
-30	0,590	1,506	3,542
-40	0,772	1,688	3,725
-50	0,954	1,871	3,907
при $d_y=300$ мм, $\delta=100$ мм			
-10	0,145	1,054	3,074
-20	0,247	1,156	3,177
-30	0,349	1,259	3,279
-40	0,452	1,361	3,381
-50	0,554	1,463	3,484
при $d_y=300$ мм, $\delta=150$ мм			
-10	0,117	1,024	3,039
-20	0,192	1,099	3,114
-30	0,268	1,174	3,189
-40	0,343	1,250	3,265
-50	0,418	1,325	3,340

$\theta, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}, \text{ при } t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$		
	+0,1	+1	+3
-30	18,6	20,1	23,3
-40	25,1	26,6	29,8
-50	31,9	33,4	36,6
при $d_y=500$ мм, $\delta=50$ мм			
-10	0,173	1,082	3,102
-20	0,275	1,184	3,204
-30	0,377	1,286	3,306
-40	0,479	1,388	3,408
-50	0,581	1,490	3,511
при $d_y=500$ мм, $\delta=100$ мм			
-10	0,126	1,031	3,042
-20	0,181	1,086	3,097
-30	0,237	1,142	3,153
-40	0,292	1,197	3,208
-50	0,348	1,253	3,264
при $d_y=500$ мм, $\delta=150$ мм			
-10	0,110	1,013	3,021
-20	0,149	1,053	3,061
-30	0,189	1,093	3,101
-40	0,229	1,132	3,140
-50	0,269	1,172	3,180

Для определения годового расхода топлива на подогрев воды воспользуемся зависимостью, предложенной [11]:

$$M_{\text{уг}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \tau_i}{q_{\text{сг}} \cdot \eta_{\text{кот}}} \quad (10)$$

где i – количество зимних месяцев с отрицательными средними температурами наружного воздуха;

q_i – средние теплотери трубопровода i -го месяца, рассчитываются для условий г.Тында по средним месячным температурам [12], Вт;

τ_i – продолжительность i -го месяца, сек;

$\eta_{\text{кот}}$ – КПД котельной установки на твердом топливе, $\eta_{\text{кот}} = 0,6$;

$q_{\text{сг}}$ – теплота сгорания угля, Дж/кг.



Для расчета в качестве топлива принимаем бурый уголь Райчихинского месторождения с низшей теплотой сгорания $q_{ст}=1,42 \cdot 10^7$ Дж/кг. По приведенным зависимостям для всех условий были произведены теплотехнические расчеты. Для удобства анализа результаты расчета представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Годовой расход угля на подогрев воды в тоннах

$t_k, ^\circ\text{C}$	Годовой расход угля, т, при толщине теплоизоляции, мм			
	0	50	100	150
для трубопровода диаметром 300 мм				
+3	31040,76	1665,22	1520,05	1470,62
+1	27435,62	266,09	131,90	86,21
+0,1	25813,31	0,00	0,00	0,00
для трубопровода диаметром 500 мм				
+3	34536,69	4233,83	4000,91	3921,91
+1	28440,14	414,70	199,38	126,35
+0,1	25696,70	0,00	0,00	0,00

Таблица 4

Количество сэкономленного топлива за счет снижения степени подогрева воды

$t_k, ^\circ\text{C}$	Экономия расхода угля, т/год, при толщине теплоизоляции, мм			
	0	50	100	150
для трубопровода диаметром 300 мм				
+1	3605,13	1399,12	1388,15	1384,41
+0,1	5227	1665,22	1520,05	1470,62
для трубопровода диаметром 500 мм				
+1	6096,55	3819,12	3801,53	3795,56
+0,1	8839,99	4233,83	4000,91	3921,91

Из таблицы 3 следует, что для трубопроводов диаметром 300 и 500 мм при рекомендуемых температурах воды в конце водовода, равных $+0,1^\circ\text{C}$, подогрев воды не требуется.



Результаты расчета значений температур воды в начале водовода (таблица 2) показали, что нагрев воды в трубопроводе без теплоизоляции в десятки раз превышает подогрев воды в водоводах, покрытых теплоизоляцией даже с минимальной толщиной 50 мм. Дальнейшее увеличение толщины теплоизоляции до 100 и 150 мм снижает величину подогрева воды в начале водовода, соответственно, на 20 - 15%. Для диаметров водоводов 300 - 500 мм увеличение толщины теплоизоляции до 100 - 150 мм позволяет уменьшить подогрев, соответственно, на 14 - 8%. Из этого следует, что на водоводах больших диаметров теплоизоляцию следует принимать малой толщины – 50 мм.

Годовой расход угля (таблица 3) снижается при увеличении толщины теплоизоляции, соответственно, на 8 - 2%.

Снижение подогрева воды также ведет к уменьшению расхода топлива. Так годовая потребность в топливе для водовода диаметром 300 мм с теплоизоляцией толщиной $\delta=50$ мм при подогреве, обеспечивающим температуру $+3^{\circ}\text{C}$ в конце водовода, составляет 1665 тонн, при подогреве до $+1^{\circ}\text{C}$ значительно меньше 266 тонн, а при температуре в конце водовода $+0,1^{\circ}\text{C}$ – подогрева вообще не требуется. Аналогичная ситуация наблюдается и для водоводов других диаметров.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Степень подогрева воды перед подачей в водовод без теплоизоляции в десятки раз превышает степень нагрева воды для водовода даже с минимальной толщиной теплоизоляции, поэтому для снижения расхода топлива на водоводах необходимо предусматривать теплоизоляционное покрытие.

2. Допуская значение температуры воды в конце водовода $+0,1^{\circ}\text{C}$, возможно при определенных значениях температуры воды в источнике и толщине теплоизоляции производить подачу воды по водоводам вообще без подогрева. Для водоводов диаметром 300 и 500 мм вполне достаточна теплоизоляция толщиной 50 мм.



3. Экономия топлива за счет применения новой технологии подачи воды в зависимости от производительности водозабора и вида теплоизоляции водовода может составлять от нескольких сот до нескольких тысяч тонн в год или в денежном выражении - десятки миллионов рублей в год.

4. Применяя многовариантные тепловые расчеты, можно подобрать параметры, обеспечивающие минимальные энергозатраты на транспортирование воды.

Работа выполнена при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Список литературы:

1. Терехов Л.Д., Акимов О.В, Танус А.Н. Повышение экономичности и надежности систем подачи воды на Севере. // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта Сибири и Дальнего Востока : сборник тезисов докладов. – Т. 2.1. – Хабаровск : ДВГУПС, 1997. – С. 50-51.

2. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.02.-84*.

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

4. Терехов Л.Д., Акимов О.В., Акимова Ю.М. Назначение оптимальной толщины теплоизоляции водовода. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (39). – С. 180-183.

5. Инерционность перемерзания водопроводных труб / Л. Д. Терехов, О. В. Акимов // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2019" : сборник материалов XII Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 186-190.



6. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум : сборник трудов. – 2021. – С. 161-164.

7. Твардовская Е.А., Терехов Л.Д. Определение оптимальной степени обледенения трубопровода, обеспечивающей увеличение пропускной способности // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2021. – С. 353-357.

8. Терехов Л.Д., Петров В.М., Акимов О.В. Продолжительность безопасной остановки движения воды в трубопроводе в зимний период // Водные ресурсы – основа устойчивого развития поселений Сибири и Арктики в XXI веке : сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 389-393.

9. Терехов Л.Д. О методике исследования шероховатости внутритрубного льда в водоводах / Л. Д. Терехов, О. А. Продоус, М. Ю. Юдин // Основные направления развития водоснабжения, водоотведения, очистки природных и сточных вод и обработки осадков : тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции / Госкомитет Сов. Министров СССР по науке и технике. Украинское республиканское управление. Харьков. – 1986. – С. 38-43.

10. Водоснабжение и водоотведение в северных климатических условиях: учебное пособие / Л.Д. Терехов, О.В. Акимов, Ю.М. Акимова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 124 с.

11. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга 1. / Р.В. Щекин и др. – Киев: Будивельник, 1976. – 416 с.

12. Климатические особенности зоны БАМ / Ответств. редактор Н.П. Ладейщиков. – Новосибирск: «Наука», 1979. – 144 с.