

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья

УДК 536.27

doi: 10.28983/asj.y2024i12pp180-187

**Безразборная оценка технического состояния теплообменных аппаратов
транспортных энергетических установок**

Алексей Дмитриевич Росляков¹, Сергей Александрович Петухов¹, Максим Павлович Ерзамаев²,
Дмитрий Сергеевич Сазонов², Евгений Сергеевич Нестеров³, Лейла Салимовна Курманова¹

¹Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Россия

²Самарский государственный аграрный университет, г. Кинель, Россия

³Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова,
г. Саратов, Россия

e-mail: erzamaev_mp@mail.ru

Аннотация. Применение стационарного метода теплопроводности к двухслойной плоской стенке позволило разработать расчетный и экспериментальный подход для диагностики отложений в водяном теплообменнике тепловоза. Определение реального состояния теплообменников в процессе эксплуатации приобретает особую актуальность, поскольку это дает возможность принимать обоснованные решения о необходимости технического обслуживания, текущего ремонта или продолжения эксплуатации тепловоза на основе его технического состояния. Обнаружено, что разница температур по толщине стенки составляет всего 0,09 °С, и при отсутствии накипи температура стенки со стороны воздуха близка к температуре воды с погрешностью 1,8 %. Расчет показал, что температуру стенки со стороны воздуха необходимо измерять в процессе эксплуатации при разных толщинах слоя накипи. Результаты расчетов использовали для создания номограммы, позволяющей определить толщину накипи в зависимости от температуры воды и температуры стенки со стороны воздуха. Рекомендуется проводить измерения температуры в начале эксплуатации и затем периодически через определенные интервалы времени в соответствии с регламентом мониторинга параметров. Применение расчетного и экспериментального подходов расширяет возможности диагностики транспортных энергетических установок, и этот метод может быть использован при разработке и внедрении системы эксплуатации по техническому состоянию.

Ключевые слова: двухслойная стенка; стационарная задача теплопроводности; аналитическое решение; толщина отложений

Для цитирования: Росляков А. Д., Петухов С. А., Ерзамаев М. П., Сазонов Д. С., Нестеров Е. С., Курманова Л. С. Безразборная оценка технического состояния теплообменных аппаратов транспортных энергетических установок // Аграрный научный журнал. 2024. № 12. С. 180–187. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp180-187>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Non-selective assessment of the technical condition
of heat exchangers of transport power plants**

Alexey D. Roslyakov¹, Sergey A. Petuhov¹, Maxim P. Erzamaev²,
Dmitry S. Sazonov², Evgeniy S. Nesterov³, Leila S. Kurmanova¹

¹Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia

²Samara State Agrarian University, Samara, Russia

³Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: erzamaev_mp@mail.ru

Abstract. The application of a stationary method of thermal conductivity to a two-layer flat wall made it possible to develop a calculated and experimental approach for diagnosing deposits in the water heat exchanger



of a diesel locomotive. Determination of the real state of heat exchangers during operation becomes especially relevant, since this makes it possible to make informed decisions about the need for maintenance, current repair or continued operation of the diesel locomotive based on its technical condition. It was found that the temperature difference across the wall thickness is only 0.09 °C, and in the absence of scale, the wall temperature on the air side is close to the water temperature with an error of 1.8 %. The calculation showed that the wall temperature on the air side should be measured during operation with different thicknesses of the scale layer. The results of the calculations were used to create a nomogram that allows to determine the thickness of the scale depending on the temperature of the water and the temperature of the wall from the air. It is recommended to carry out temperature measurements at the beginning of operation and then periodically at regular intervals in accordance with the procedure for monitoring parameters. The use of computational and experimental approaches expands the diagnostic capabilities of transport power plants, and this method can be used in the development and implementation of a technical condition operation system.

Keywords: two-layer wall; stationary thermal conductivity problem; analytical solution; sediment thickness

For citation: Roslyakov A. D., Petuhov S. A., Erzamaev M. P., Sazonov D. S., Nesterov E. S., Kurmanova L. S. Non-selective assessment of the technical condition of heat exchangers of transport power plants. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(12):180–187. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp180-187>.

Введение. В рамках работ по совершенствованию систем для оценки технического состояния теплообменных аппаратов транспортных энергетических установок разработан расчетно-экспериментальный метод диагностики слоя отложений в водяном теплообменнике тепловоза.

Система охлаждения тепловоза функционально выполняет отвод тепла при работе дизеля, в т.ч. поддерживает в допустимом диапазоне температуру масла, а также элементов цилиндропоршневой группы и обеспечивает снижение температуры воздуха за турбокомпрессором. По мере увеличения срока службы теплообменника общий коэффициент теплопередачи уменьшается вследствие возрастания толщины отложений. Это приводит к повышению расхода энергии на привод вентиляторов в системе охлаждения [10, 17, 22, 23].

На российских тепловозах обычно используются двухконтурные системы охлаждения [11]. В первом контуре происходит циркуляция воды, которая охлаждает дизель, а во втором контуре – циркуляция жидкости, которая охлаждает воздух после турбокомпрессора и масло. Разница между одно- и двухконтурными системами заключается в том, что одноконтурные имеют упрощенную конструкцию системы циркуляции теплоносителя (например, один водяной насос, короткий трубопровод и т.д.). Недостаток одноконтурной системы состоит в невозможности отдельного регулирования температуры теплоносителей [5, 9, 15].

На рисунке 1 приведена одноконтурная система охлаждения двигателя. Вода из дизеля поступает по трубопроводу 5 в секции радиатора 1, далее в теплообменники 6 и 8 и непосредственно в дизель.

Датчики температуры на пультах управления обеих секций тепловоза контролируют температуру воды на выходе из дизеля. Эта температура должна находиться в диапазоне от 65 до 80 °C на большинстве тепловозов.

В процессе эксплуатации тепловоза полости теплообменных аппаратов загрязняются в основном накипью, которая уменьшает эффективность процессов теплопередачи.

Интенсивность образования накипи зависит от многих факторов, в т.ч. от температуры воды, наработки и от физико-химических свойств воды. Как правило, ограничиваются основными характеристиками воды, влияющими на скорость образования накипи, например, на алюминиевых поверхностях [4, 6, 16]:

- общая жесткость, мг/л, не более 0,2;
- содержание хлоридов, мг/л, не более 30;
- щелочность по фенолфталеину, мг/л, не допускается;
- щелочность по pH 7–8;
- содержание фосфорного ангидрида P_2O_5 , мг/л, 15–25;
- содержание хромового ангидрида CrO_3 , мг/л, 800–100;
- содержание азотистого натрия $NaNO_2$, мг/л, не допускается.

Для теплообменного оборудования из других материалов нормы на допустимое содержание примесей в воде различаются.



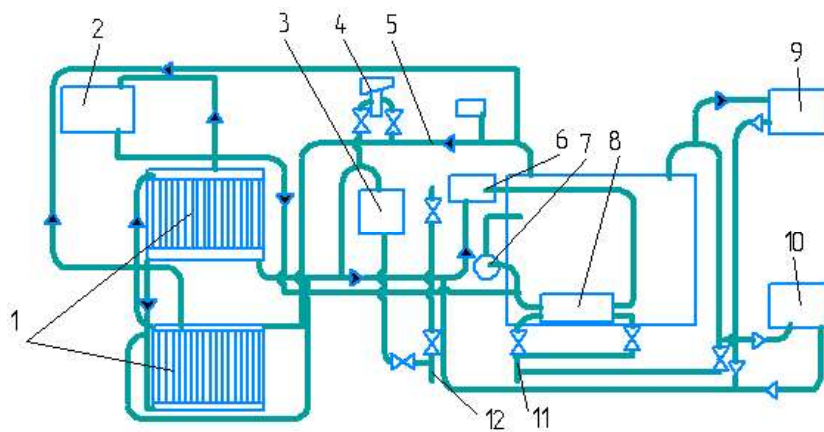


Рисунок 1 – Структура системы охлаждения дизельного двигателя тепловоза [11]:
1 – радиатор; 2 – расширительный бак; 3 – топливоподогреватель; 4 – термореле;
5 – трубопровод воды, выходящей из дизеля; 6 – воздухораспределитель; 7 – циркуляционный насос;
8 – маслоохладитель; 9 – бак умывальника; 10 – отопительно-вентиляционный агрегат;
11 – трубопровод для заправки воды в систему; 12 – трубопровод для слива воды из системы

Figure 1 – Structure of the diesel engine cooling system of a diesel locomotive [11]:
1 – radiator; 2 – expansion tank; 3 – fuel heater; 4 – thermostatic switch; 5 – pipeline of water coming out of diesel;
6 – air distributor; 7 – circulation pump; 8 – oil cooler; 9 – washbasin tank; 10 – heating and ventilation unit;
11 – pipeline for filling water into the system; 12 – pipeline for draining water from the system

Охлаждающая жидкость в процессе эксплуатации теплотехнического оборудования в процессе циркуляции изменяется в части концентрации примесей. При эксплуатации в процессе выполнения различных работ по ТОиТР в лабораториях проверяют концентрации примесей. Если параметры охлаждающей жидкости по вышеуказанным браковочным признакам не соответствуют допустимым значениям, производят восстановление качества или заменяют охлаждающую жидкость в соответствии с технической документацией [3, 13, 20].

Опыт эксплуатации тепловозов показывает, что имеет место образование накипи в радиаторах теплообменников разной толщины и с низким коэффициентом корреляции в зависимости от наработки. Этот факт усложняет задачу перевода эксплуатации тепловозов по техническому состоянию.

Один из способов решения этой проблемы – создание метода неразрушающего контроля технического состояния теплообменников локомотива, который позволит оценить общую работоспособность теплообменников и отдельных компонентов системы. Выявить функциональный элемент, для которого необходимо провести техническое обслуживание, возможно при использовании контрольно-диагностической системы мониторинга.

В разных областях науки и техники набирает обороты применение цифровых технологий [2, 7, 14]. К современным системам контроля и диагностирования относятся специальные программные обеспечения и измерительные устройства.

Комплексное диагностирование включает разработку системы контроля и диагностики для мониторинга текущего состояния компонентов и систем тягового подвижного состава в процессе эксплуатации.

Во время работы тепловозов необходимо решить следующие важные задачи:

- контролировать режимы движения поездов;
- предварительно диагностировать текущее рабочее состояние систем и узлов с определением соответствия критериям «норма» или «не норма», т.е. сравнивать фактические параметры с допустимыми значениями;
- обнаруживать потенциальные отказы систем и узлов тепловозов;
- оперативно принимать меры для определения возможности дальнейшего использования тепловоза или планировать техническое обслуживание и ремонт неисправных компонентов;
- рассчитывать объем работ по ремонту и техническому обслуживанию узлов тепловоза и отправлять поврежденные узлы в соответствующие ремонтные цеха;
- формировать и передавать отчеты о состоянии систем и узлов тепловозов в ремонтные депо;
- оперативно информировать руководство ремонтных депо о потенциальном отказе или уже случившейся неисправности узла или системы тепловоза во время его эксплуатации.



В связи с вышеизложенным, задача определения действительного технического состояния теплообменных аппаратов тепловоза в эксплуатации представляется актуальной.

Материалы и методы. Для постановки задачи по теплообмену между твердыми телами и окружающей средой необходимо рассмотреть ее в соотношении «причина – следствие». Обычно к причинным характеристикам относят: теплофизические свойства, параметры граничных условий и геометрические характеристики тела/системы. При этом к следствию относят тепловое состояние, определяемое полем исследуемого объекта [2, 7, 18].

Целью прямых задач является установление причинно-следственных связей. Им противопоставлены обратные задачи теплообмена, когда по информации о температурном поле требуется восстановить причинные показатели. Отличие обратной задачи от прямой – невозможность воспроизведения эксперимента в реальном времени. Поэтому постановка обратной задачи теплообмена является условно некорректной. Далее при математическом анализе она будет проявляться как математическая некорректность (неустойчивость решения). В данном случае на примере описанной обратной задачи имеем факторы, возникающие при диагностике и идентификации физических процессов, в которых требуется по измененным выходным следственным данным и характеристикам восстановить входные данные, такие как толщина накипи [1, 12, 19].

Для упрощения задачи рассмотрим решение прямой стационарной задачи теплопроводности для двухслойной плоской стенки и разработку номограммы для определения толщины накипи в зависимости от температуры воды и температуры стенки со стороны воздуха [8, 21].

Общая схема системы охлаждения дизеля тепловоза приведена на рисунке 1. На рисунке 2 приведена схема теплообмена через стенку воздушно-водяного теплообменника с обозначением некоторых типовых параметров теплообмена.

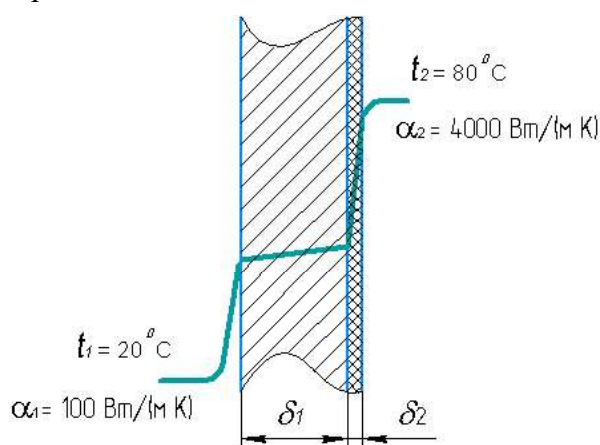


Рисунок 2 – Схема теплообмена через стенку воздушно-водяного теплообменника:
 δ – толщина; t_1 – температура воздуха; t_2 – температура воды;
 α_1 – коэффициент теплопередачи воздуха; α_2 – коэффициент теплопередачи воды

Figure 2 – Diagram of heat transfer through the wall of an air-water heat exchanger:
 δ – thickness; t_1 – air temperature; t_2 – water temperature;
 α_1 – air heat transfer coefficient; α_2 – water heat transfer coefficient

Чтобы продемонстрировать алгоритм применения нашего расчетного и экспериментального метода для определения толщины отложений в водяном теплообменнике, рассмотрим пример с теплофизическими характеристиками, соответствующими реальным условиям работы тепловозов.

Стенку теплообменника, как правило, изготавливают из алюминия или сплавов на основе алюминия. Коэффициент теплопроводности алюминия $\lambda = 203 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При эксплуатации на стенках теплообменника образуется накипь. Так, при температуре $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент теплопроводности $\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В контролируемой точке теплообменника толщина составляет 3 мм.

Среди основных факторов, от которых зависит толщина слоя накипи, отмечают следующие: температура воды, ее качество, чистота обработки поверхности стенок.

При расчетах воздействия воздуха и воды на коэффициент теплоотдачи проведены замеры температуры стенок теплообменника с двух сторон (со стороны воды и воздуха) как с накипью толщиной 0,5 мм, так и без нее.



Коэффициент теплопередачи для поперечного сечения, Вт/(м²·К), с учетом наличия накипи и без нее вычисляли по формуле (1). Этот коэффициент используется для расчета температурных распределений в различных компонентах системы охлаждения [19].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с внешней стороны стенки, Вт/(м²·К); $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – суммарное сопротивление каждого слоя стенки теплообменника, м²·°С/Вт; α_2 – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны стенки, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи без накипи в поперечном сечении, Вт/(м²·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0,003}{203} + \frac{1}{4000}} = 97,4.$$

Удельный тепловой поток, проходящий через перегородку от воды к воздуху, Вт/м², вычисляли с помощью уравнения для удельного теплового потока с учетом коэффициента теплопередачи.

$$q = k(t_2 - t_1) = k\Delta t = 97,4 (80 - 20) = 5845,$$

где q – удельный тепловой поток; k – коэффициент теплопередачи; t_2 – температура воды; t_1 – температура воздуха.

Температура стенки со стороны воздуха, °С:

$$t_{C1} = t_1 + \frac{q}{\alpha_1} = 20 + \frac{5845}{100} = 20 + 58,45 = 78,45.$$

Температура стенки со стороны воды, °С:

$$t_{C2} = t_2 - \frac{q}{\alpha_2} = 80 - \frac{5845}{4000} = 80 - 1,46 = 78,54.$$

Перепад температуры по толщине стенки составляет 0,09 °С, и в варианте без накипи температура стенки со стороны воздуха равна температуре воды с погрешностью 1,8 %. Для повышения точности измерения температуры по температуре стенки эту погрешность можно учесть.

Коэффициент теплопередачи с учетом слоя накипи, Вт/(м²·К) [19]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0,003}{203} + \frac{0,0005}{1} + \frac{1}{4000}} = 92,9.$$

Удельный тепловой поток через стенку от воды к воздуху, Вт/м², принимая во внимание наличие накипи:

$$q = k(t_2 - t_1) = k\Delta t = 92,9 (80 - 20) = 5573,7.$$

Температура стенки со стороны воздуха, °С:

$$t_{C1} = t_1 + \frac{q}{\alpha_1} = 20 + \frac{5573,7}{100} = 20 + 55,74 = 75,74.$$

Температура стенки со стороны воды, °С:

$$t_{C2} = t_2 - \frac{q}{\alpha_2} = 80 - \frac{5573,7}{4000} = 80 - 1,39 = 78,61.$$

Исходя из вышеизложенного, в математической модели процесса охлаждения можно принять со стороны воды граничные условия первого рода и принимать температуру стенки со стороны воды равной температуре воды, которая измеряется штатными датчиками температуры при эксплуатации тепловозов.

Результаты исследований. По вышеприведенным зависимостям выполнен расчет измеренной температуры стенки со стороны воздуха, которую предлагается измерять в процессе эксплуатации при различных толщинах слоя накипи. Результаты расчета приведены в таблице 1 и на номограмме рисунка 3.



Таблица 1 – Толщина накипи в зависимости от измеренных температур стенки, контактирующей с воздухом, и температур воды

Table 1 – Scale thickness depending on the measured temperatures of the wall in contact with air and water temperatures

Температура воды, °С	Температура стенки, °С											
	58	60	62	65	68	70	72	74	76	76,4	78	
65	1,54	1,00	0,46									
68	2,17	1,67	1,17	0,42								
70		2,07	1,59	0,86	0,14							
72			1,98	1,29	0,59	0,13						
74			2,34	1,67	1,00	0,55	0,11					
76				2,03	1,38	0,95	0,52	0,09				
78					1,74	1,33	0,91	0,49	0,08	0		
80							1,26	0,86	0,46	0,38	0,06	

В основе расчетно-экспериментального метода диагностирования слоя отложений в водяном теплообменнике тепловоза лежат измерения температуры стенки канала со стороны воздуха при эксплуатации.

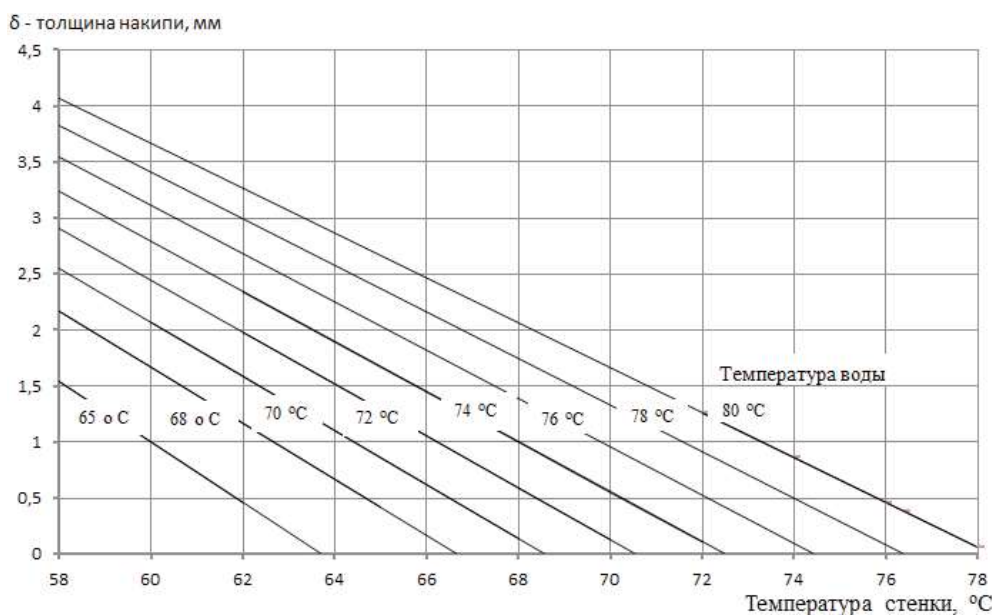


Рисунок 3 – График зависимости толщины накипи от температуры воды и температуры стенки, контактирующей с воздухом

Figure 3 – Graph of the dependence of the scale thickness on the temperature of the water and the temperature of the wall in contact with the air

Для повышения точности оценки толщины накипи и обеспечения возможности автоматизации этого процесса целесообразно заменить визуальный метод определения толщины накипи по графику методом аналитического определения по трендам, полученным из графика зависимости толщины накипи от температуры воды и температуры стенки, контактирующей с воздухом (таблица 2).

Таблица 2 – Тренды зависимости толщины накипи от температуры стенки, контактирующей с воздухом, по некоторым значениям температуры воды

Table 2 – Trends in the dependence of the scale thickness on the temperature of the wall in contact with air, according to some values of the water temperature

t воды, °С	Тренд – толщина накипи от температуры стенки, мм
65	$\delta = -0,2700t + 17,200$
68	$\delta = -0,2500t + 16,670$
70	$\delta = -0,2415t + 16,560$
72	$\delta = -0,2315t + 16,334$
74	$\delta = -0,2232t + 16,180$
76	$\delta = -0,2155t + 16,035$
78	$\delta = -0,2077t + 15,862$
80	$\delta = -0,2000t + 15,660$



Рассмотрим пример определения толщины накипи по трендам, приведенным в таблице 2. Например, измеренные температуры воды (t_b) и стенки (t_c) равны 75 °С и 62 °С соответственно. Следовательно определяем толщину накипи для температуры воды $t_b = 74$ °С и $t_b = 76$ °С.

$$\delta = -0,2232t + 16,18 = -0,2232 \cdot 62 + 16,18 = 2,34 \text{ мм.}$$

$$\delta = -0,2155t + 16,035\delta = -0,2155 \cdot 62 + 16,035 = 2,67 \text{ мм.}$$

Методом интерполяции получаем толщину накипи $\delta = 2,51$ мм.

Измерение температуры происходит в начале периода эксплуатации, а затем регулярно в соответствии с графиком мониторинга параметров. Если требуется, расчетная номограмма корректируется на основе результатов замера температуры в начале эксплуатации, учитывая особенности конструкции и характеристики системы охлаждения.

Заключение. Рассмотренный метод позволяет проводить неразборный контроль и оценку толщины отложений на внутренних поверхностях каналов на основе измерений температуры внешней поверхности стенки. Путем использования расчетно-экспериментального подхода расширяются возможности диагностирования, в т.ч. метод может быть использован при разработке и внедрении системы эксплуатации по техническому состоянию.

С учетом возможности определения толщины накипи путем аналитического определения по трендам разработанный метод может быть использован в цифровых технологиях мониторинга накопления накипи в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
2. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селиверстов В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 276 с.
3. Бакыт Г. Б., Сагатбеков Д. С., Баубеков Е. Е. Обзор работы системы охлаждения тепловозных дизелей // Инновационное развитие и потенциал современной науки: материалы Междунар. (заочной) науч.-практ. конф. Прага, 14 февраля 2022 года. Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2022. С. 37–40.
4. Балагин О. В., Балагин Д. В., Родина Д. Е. Исследование гидравлических характеристик системы охлаждения тепловоза // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 4(120).
5. Балагин О. В. Контроль загрязнения радиаторных секций тепловозов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск: Филиал Иркутского гос. ун-та путей сообщения, 2005. С. 55.
6. Балагин О. В. Определение максимально допустимого количества загрязненных радиаторных секций в системе охлаждения тепловоза // Молодежь, наука, творчество – 2005: материалы науч.-практ. конф. Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2005. С. 234.
7. Белоглазов А. К., Носков В. О., Чулков А. В. Влияние температуры окружающей среды на работу системы охлаждения тепловоза и его агрегатов // Известия Транссиба. 2015. № 4(24). С. 11–17.
8. Васильев В. Я. Метод оценки эффективности теплообменников, их поверхностей теплообмена, рациональной интенсификации теплообмена в каналах // Наука и практика – 2018: материалы Всерос. междисциплинарной науч. конф., Астрахань, 18–23 июня 2018 года. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2018. С. 44.
9. Диагностическая система оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза / В. П. Перевртов [и др.] // Промышленный транспорт Казахстана. 2022. № 2(75). С. 46–56.
10. Куликов Ю. А. Системы охлаждения силовых установок тепловозов. М.: Машиностроение, 1988. 286 с.
11. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи, 2-е изд., стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
12. Носов А. Н. Повышение эксплуатационной надежности элементов системы охлаждения дизелей тепловозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2004. 23 с.
13. Овчаренко С. М., Ринг И. С. Исследование распределения температурных полей по узлам тепловоза // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Омск, 18 ноября 2022 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 474–479.
14. Овчаренко С. М., Ринг И. С., Овчаренко С. С. Исследование температурных режимов работы систем охлаждения тепловозов в процессе эксплуатации // Известия Транссиба. 2022. № 2(50). С. 116–123.
15. Овчаренко С. М., Балагин О. В., Балагин Д. В. Повышение эффективности работы системы охлаждения тепловозов в эксплуатации // Известия Транссиба. 2017. № 1(29). С. 27–35.
16. Перспективы развития сервисного обслуживания тепловозов: материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. И. К. Лакина. М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014 г. 308 с.
17. Петухов С. А., Курманова Л. С., Мазанов А. С. Перспективность применения аккумуляторной системы топливopодачи для дизелей тепловозов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Омск, 14 ноября 2019 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. С. 338–345.
18. Пушкарев И. Ф., Пахомов Э. А. Контроль и оценка технического состояния тепловозов. М.: Транспорт, 1985. 160 с.



19. Росляков А. Д. Теплообмен в двигателях внутреннего сгорания. Самара: СамГАПС, 2004. 157 с.
20. Сковородников Е. И., Михеев В. А. Моделирование системы охлаждения тепловозов с целью оптимизации количества параметров контроля // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 1(11). С. 61–66.
21. Ткаченко Л. А., Репина А. В. Теория теплообмена / под общ. ред. Н. Ф. Кашапова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. 151 с.
22. Тэттер В. Ю. Диагностирование подвижного состава и его связь с направлением цифровизации железных дорог // Национальные приоритеты России. 2018. № 3(30).

REFERENCES

1. Alifanov O. M. Inverse problems of heat transfer . Moscow: Mechanical engineering, 1988. 280 p. (In Russ.).
2. Bazhan P. I., Kanevets G. E., Seliverstov V. M. Reference book on heat exchangers. Moscow, 1989. 276 p. (In Russ.).
3. Bakyt G. B., Sagatbekov D. S., Baubekov E. E. Review of the cooling system of diesel locomotives. *Innovative Development and Potential of Modern Science: Materials of International (Offline) Scientific and Practical Conference*, Prague, February 14, 2022. Neftekamsk, 2022:37–40. (In Russ.).
4. Balagin O. V., Balagin D. V., Rodina D. E. Study of hydraulic characteristics of the cooling system of a diesel locomotive. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2021;4(120). (In Russ.).
5. Balagin O. V. Control of pollution of radiator sections of diesel locomotives. *Materials of the All-Russian Scientific Practical Conference with International Participation*. Krasnoyarsk: Branch of the Irkutsk State University of Communications, 2005:55. (In Russ.).
6. Balagin O. V. Determination of the maximum permissible number of contaminated radiator sections in the cooling system of a diesel locomotive. *Molodezh, Nauka, Tvorchestvo – 2005: Materials of Scientific and Practical Conference*. Omsk: Omsk State Institute of Service, 2005:234. (In Russ.).
7. Beloglazov A. K., Noskov V. O., Chulkov A. V. Influence of the temperature of the environment on the work of the cooling system of a diesel locomotive and its aggregates. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2015;4(24):11–17. (In Russ.).
8. Vasilyev V. Y. Method of assessing the effectiveness of heat exchangers, their surfaces of heat exchange, rational intensification of heat transfer in canals. *Nauka i Praktika – 2018: Materials of the All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference, Astrakhan, June 18–23, 2018*. Astrakhan: Astrakhan State Technical University, 2018:44. (In Russ.).
9. Diagnostic system for optimizing the operating modes of the diesel locomotive cooling system / V. P. Perevertov, N. V. Chertykovtseva, M. M. Abulkasimov, M. O. Akaeva. *Promyshlennyj Transport Kazahstana*. 2022;2(75):46–56. (In Russ.).
10. Kulikov Yu. A. Cooling systems for diesel locomotive power plants. Moscow: Mechanical Engineering, 1988; 286 p. (In Russ.).
11. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of heat transfer. 2nd edition. Moscow, 1977. 344 p. (In Russ.).
12. Nosov A. N. Rolling stock of railways, traction of trains and electrification: PhD diss. abstract. Samara, 2004; 23 p. (In Russ.).
13. Ovcharenko S. M., Ring I. S. Investigation of the distribution of temperature fields in the nodes of a diesel locomotive. *Operational Reliability of the Locomotive Park and Improving the Effectiveness of Traction of Trains: Materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, Omsk, November 18, 2022*. Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2022:474–479. (In Russ.).
14. Ovcharenko S. M., Ring I. S., Ovcharenko S. S. Investigation of temperature modes of operation of diesel locomotive cooling systems during operation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;2(50):116–123. (In Russ.).
15. Ovcharenko S. M., Balagin O. V., Balagin D. V. Improving the efficiency of the cooling system of diesel locomotives in operation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2017;1(29):27–35. (In Russ.).
16. Prospects for the development of diesel locomotive maintenance. *Materials of the First International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2014. 308 p. (In Russ.).
17. Petukhov S. A., Kurmanova L. S., Mazanov A. S. The prospects of using a battery fuel supply system for diesel locomotives. *Technological Support for Repair and Improvement of Dynamic Qualities of Railway Rolling Stock. Materials of the V All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, Omsk, November 14, 2019*. Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2019:338–345. (In Russ.).
18. Pushkarev I. F., Pakhomov E. A. Control and assessment of the technical state of diesel locomotives. Moscow: Transport, 1985. 160 p. (In Russ.).
19. Roslyakov A. D. Heat transfer in internal combustion engines. Samara, 2004. 157 p. (In Russ.).
20. Skovorodnikov E. I., Mikheev V. A. Modeling of the cooling system of diesel locomotives with the purpose of optimizing the number of control parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2009;1(11):61–66. (In Russ.).
21. Tkachenko L. A., Repina A. V. Theory of heat transfer / under the general editorship of N. F. Kashapov. Kazan: Kazan Publishing House of University, 2017; 151 p. (In Russ.).
22. Tatter W. Y. Diagnostics of rolling stock and its connection with the direction of digitalization of railways. National Priorities of Russia. 2018;3(30):87–93. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.04.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 25.05.2024.
The article was submitted 13.04.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 25.05.2024.

