

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРА И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
annaannaaver@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Теплообменные аппараты (ТОА) используются во многих сферах промышленности: энергетика, нефтегазовая, химическая, фармацевтическая, металлургическая отрасль. Их значительная доля участия в технологических процессах диктует необходимость тщательного контроля технического состояния во избежание создания аварийных ситуаций. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблемы, которые возникают при эксплуатации ТОА. Провести анализ существующих методов диагностики, выявить их плюсы и минусы. Предложить комплексный метод диагностики ТОА, заключающийся в совместном анализе тепловых и гидравлических характеристик для выявления коррозионных отложений, утечек теплоносителя и его перетечек в другой контур. Определить влияние наличия отложений, утечек теплоносителя и его перетечек в другой контур на температурный напор и гидравлическое сопротивление ТОА. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи использовался метод NTU (Number of Transfer Units), формула Дарси-Вейсбаха, а также программа Aspen Exchanger Design & Rating V12. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Составленная математическая модель и проведенные расчеты в Aspen Exchanger Design & Rating V12 показали, что наличие отложений увеличивает температурный напор и гидравлическое сопротивление, а наличие утечки теплоносителя или его перетечки в другой контур уменьшают температурный напор и гидравлическое сопротивление. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Совокупный анализ характеристик температуры и давления в процессе эксплуатации ТОА позволит диагностировать его техническое состояние, а полученные математические модели послужат алгоритмической базой для создания программно-аппаратного комплекса мониторинга в реальном времени. Мониторинг теплогидравлических параметров позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования.

Ключевые слова: теплообменный аппарат; гидравлическое сопротивление; температурный напор; контроль; диагностика.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям, договор № 3169ГССС15-L/100111 от 07.10.2024 г.

Для цитирования: Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В. Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов по изменению температурного напора и гидравлического сопротивления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 141-150. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150.

DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT BY CHANGES IN TEMPERATURE PRESSURE AND HYDRAULIC RESISTANCE

Litvinenko A.A., Vankov Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
annaannaaver@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* Industries such as power, oil and gas, chemical, pharmaceutical, and metallurgy use heat exchangers (HE). Their significant role in technological processes necessitates careful monitoring of their technical condition to prevent emergency situations. *THE PURPOSE.* To examine the problems that arise during HE operation. To analyze existing diagnostic methods and identify their pros and cons. To propose a comprehensive HE diagnostic method that utilizes a combined analysis of thermal and hydraulic characteristics to detect corrosion deposits, coolant leaks, and transfers to another circuit. To determine the impact of deposits, coolant leaks, and transfers to another circuit on the temperature difference and hydraulic resistance of HE. *METHODS.* To solve this problem, the Number of Transfer Units (NTU) method, the Darcy-Weisbach formula, and the Aspen Exchanger Design & Rating V12 software were used. *RESULTS.* The developed mathematical model and calculations performed in Aspen Exchanger Design & Rating V12 showed that the presence of deposits increases the temperature difference and hydraulic resistance, while coolant leaks or transfers to another circuit reduce the temperature difference and hydraulic resistance. *CONCLUSION.* A comprehensive analysis of the temperature and pressure characteristics during the operation of the thermal hydraulic system will enable diagnostics of its technical condition, and the resulting mathematical models will serve as an algorithmic basis for the creation of a real-time monitoring software and hardware system. Monitoring thermal hydraulic parameters will enable a transition from scheduled preventive maintenance to condition-based repairs, minimizing the risk of unexpected production shutdowns, reducing operating costs, and extending the equipment's service life.

Keywords: heat exchanger; hydraulic resistance; temperature head; control; diagnostics.

Acknowledgments: the work on which this article is based was supported by a grant from the Innovation Support Fund, contract No. 3169GSSS15-L/100111 dated 07.10.2024.

For citation: Litvinenko A.A., Vankov Y.V. Diagnostics of the technical condition of heat exchange equipment by changes in temperature pressure and hydraulic resistance. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 141-150. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-141-150.

Введение (Introduction)

Эффективное использование энергетических ресурсов является одной из ключевых задач современной промышленности. Важнейшую роль в решении этой задачи играют теплообменные аппараты (ТОА), которые представляют собой устройства для передачи тепла между двумя или более средами. Они находят широчайшее применение в различных отраслях народного хозяйства, таких как энергетика (в котлах, турбинах, системах охлаждения), химическая и нефтехимическая промышленность (в реакторах, ректификационных колоннах, системах конденсации и испарения), жилищно-коммунальное хозяйство (в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения), а также в пищевой, металлургической и многих других отраслях.

Конструктивное разнообразие теплообменных аппаратов обусловлено спецификой технологических процессов, в которых они задействованы. Наиболее распространенными типами ТОА являются [1]:

– *Кожухотрубные (кожухотрубчатые) теплообменники* – отличаются высокой надежностью и универсальностью, применяются для работы при высоких давлениях и температурах.

– *Пластинчатые теплообменники* – характеризуются компактностью и высоким коэффициентом теплопередачи благодаря развитой поверхности теплообмена, что делает их чрезвычайно эффективными.

– Теплообменники типа «труба в трубе» – представляют собой конструкцию, состоящую из двух труб разного диаметра, вмонтированных одна в другую, применяются при небольших расходах теплоносителей.

– Спиральные теплообменники – эффективны для работы с вязкими и загрязненными средами.

Независимо от типа и сферы применения, поддержание теплообменного оборудования в исправном техническом состоянии является критически важным для обеспечения бесперебойной и экономичной работы всего технологического комплекса. В процессе эксплуатации ТОО подвергаются различным процессам, таким как образование отложений, зарастание рабочих каналов, коррозия и эрозия материалов, а также механические повреждения [1, 2]. Эти факторы приводят к значительному снижению коэффициента теплопередачи, росту гидравлического сопротивления, перерасходу энергоресурсов и, в конечном счете, к снижению производительности и выходу аппарата из строя [3, 4].

В этой связи актуальной научно-практической задачей является разработка и совершенствование методов и средств оперативной диагностики технического состояния теплообменных аппаратов. Своевременное выявление дефектов позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования. Таким образом, эффективная диагностика представляет собой не только инструмент технического обслуживания, но и значительный экономический резерв для промышленных предприятий.

Для количественной оценки эффективности и технического состояния теплообменного аппарата в процессе эксплуатации предлагается использовать два фундаментальных критерия: *температурный напор* и *гидравлическое сопротивление*. Эти параметры являются характеристиками, позволяющими судить о протекающих внутри аппарата тепловых и гидродинамических процессах.

Температурный напор, являясь движущей силой процесса теплопередачи, напрямую определяет производительность аппарата. Для проектного расхода теплоносителей и их начальных температур расчетное значение температурного напора является фиксированной величиной. Однако в реальных условиях эксплуатации его фактическая величина может изменяться. Снижение температурного напора при сохранении постоянных расходов и входных температур свидетельствует о возникновении дополнительного термического сопротивления. Наиболее частой причиной этого является загрязнение теплообменных поверхностей, которое выступает в роли изолятора, ухудшающего теплопередачу [5].

Гидравлическое сопротивление — это второй ключевой диагностический параметр. Его значение для данного типа аппарата и режима работы также определяется проектом. Отклонение фактического гидравлического сопротивления от паспортного или базового значения является важным индикатором проблем. Рост гидравлического сопротивления на одном из контуров (при неизменном расходе) однозначно указывает на ухудшение проходного сечения каналов. Это может быть вызвано теми же отложениями, частичным засорением трубок или межпластинчатых зазоров посторонними предметами, шламом или продуктами коррозии. Напротив, падение гидравлического сопротивления может сигнализировать о более опасных дефектах, таких как обход потоков через поврежденные уплотнения в пластинчатых теплообменниках или течи в трубной системе, когда часть теплоносителя уходит из контура.

Цель исследования заключается в определении влияния отложений, наличия утечек из-за нарушения герметичности уплотнений и наличия утечек вследствие коррозионного или эрозионного износа на температурный напор и гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата.

Научная значимость данного исследования заключается в развитии методологии оценки технического состояния теплообменных аппаратов на основе комплексного анализа их рабочих параметров. В работе предлагается системная модель, устанавливающая взаимосвязь между изменением температурного напора и гидравлического сопротивления с одной стороны, и конкретными видами процессов (загрязнение, коррозия, утечка теплоносителя) — с другой.

Практическая значимость настоящего исследования заключается в непосредственном применении полученных результатов для создания средств технического диагностирования и автоматизации управления теплообменным

оборудованием. Полученные зависимости послужат алгоритмической базой для создания программно-аппаратного комплекса мониторинга в реальном времени. Эта система будет осуществлять непрерывный сбор данных с штатных датчиков температуры и давления, автоматически рассчитывать текущие значения температурного напора и гидравлического сопротивления и сравнивать их с эталонными (чистыми) характеристиками [6].

Литературный обзор (Literature Review)

Для проведения диагностики технического состояния ТОВА наибольшее практическое применение нашли методы диагностики тепловых характеристик. В работах В.С. Орбис-Дияса [7] предлагают измерять температуры на входе и выходе греющей и нагреваемой среды и рассчитывать мощность теплового потока, коэффициент теплопередачи, объемные расходы холодного и горячего теплоносителей, а далее сравнивать опытные характеристики пластинчатого теплообменного аппарата с паспортными данными. Способ позволяет установить наличие отложений в аппаратах, отклонение тепловых режимов от расчетных, разработать технические решения по оптимизации режимов и модернизации теплотехнических схем. В работах Демина А.М. [8] для контроля теплообменной поверхности на предмет отложений предлагают устанавливать датчики температуры всех входящих и выходящих потоков и сравнивать разность температур потоков на горячей стороне теплообменника в текущий момент времени и в момент, когда поверхность теплообмена была чистой. Применение программы мониторинга теплообменных аппаратов в режиме реального времени позволяет подбирать оптимальный срок чистки трубных пучков с точки зрения сопоставимости затрат на дополнительно потребляемое топливо и на чистку. В работе Ефимова А.Н. [9] предлагается вести анализ наличия отложений по контролю температур на входе и выходе греющей и нагреваемой среды. Автоматическая система управления (АСУ) рассчитывает температурный напор при первом вводе в эксплуатацию ТОВА или после проведение технического обслуживания и принимает его за эталонное значение, затем в процессе эксплуатации АСУ рассчитывает текущие значения температурного напора и сравнивает их с эталонными. Система предупредит оператора о необходимости очистки, если отклонение превысит допустимое значение. В работе Бударина П.А. [10] наличие отложений и их толщину предлагают определять по перепаду давления, устанавливая датчики давления на входе и выходе ТОВА.

Вышеуказанные работы предлагают анализировать или тепловые, или гидравлические характеристики, а диагностика ТОВА направлена только на обнаружение наличия отложений на теплообменной поверхности. Но, кроме отложений существуют и другие проблемы, возникающие в ходе эксплуатации ТОВА: утечки теплоносителя и его перетечки из одного контура в другой. Существующие методы либо не чувствительны к таким дефектам, либо для их выявления требуются сложные, дорогостоящие и часто локальные процедуры (например, ультразвуковой контроль, теческанирование при остановке оборудования), которые не позволяют вести мониторинг в режиме реального времени. На данный момент имеются работы только по оценке влияния отложений на коэффициент теплопередачи [11], температурный напор [12,13] и гидравлическое сопротивление [14,15].

Материалы и методы (Materials and methods)

Проанализируем влияние на температурный напор и гидравлическое сопротивление наиболее часто встречающиеся случаи при эксплуатации ТОВА:

- наличие отложений на теплообменной поверхности (накипь, коррозионные отложения, биологические отложения, механические загрязнения);
- утечка теплоносителя во внешнюю среду. Причинами нарушения герметичности соединений, приводящие к утечке теплоносителя становятся: механические повреждения, термическое старение и износ при превышении рабочих температур теплоносителя, химическая деградация под воздействием коррозионно-активных сред.
- перетечка теплоносителя из одного контура в другой. Причиной взаимного перетока теплоносителей между контурами, приводящего к смешению рабочих сред становятся: некорректный монтаж уплотнительных прокладок (в случае пластинчатых теплообменников), сквозная коррозия разделительных поверхностей.

Наличие отложений на теплообменной поверхности.

Коэффициент теплопередачи для чистой теплообменной поверхности определяется:

$$K_{\text{ч}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи греющей среды Вт/(м²·°С), $R_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенки, (м²·°С)/Вт, α_2 – коэффициент теплоотдачи нагреваемой среды Вт/(м²·°С).

При расчете коэффициента теплопередачи в процессе эксплуатации в формулу (1) добавляется термическое сопротивление накипи $R_{\text{н}}$:

$$K_{\text{н}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{\text{ст}} + R_{\text{н}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

Из сравнения коэффициента теплопередачи с чистой поверхностью (1) и поверхностью с отложениями (2) получается, что $K_{\text{ч}} > K_{\text{н}}$.

Из уравнения теплопередачи (3) следует, что если количество теплоты Q и площадь поверхности теплопередачи F остаются неизменными, а коэффициент теплопередачи падает до $K_{\text{н}}$, то для сохранения прежнего теплового потока требуется увеличить разность температур между теплоносителями:

$$Q = K_{\text{ч}} F \Delta T_{\text{ч}} = K_{\text{н}} F \Delta T_{\text{н}} \quad (3)$$

Так как $K_{\text{ч}} > K_{\text{н}}$, то $\frac{K_{\text{ч}}}{K_{\text{н}}} > 1$, а значит $\Delta T_{\text{н}} > \Delta T_{\text{ч}}$.

Гидравлическое сопротивление ΔP определяется по формуле Дарси-Вейсбаха (4):

$$\Delta P = \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{G^2}{2\rho S^2} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8G^2}{\rho\pi^2} \quad (4)$$

где, λ — коэффициент гидравлического трения, L – длина участка, м, D – внутренний диаметр трубы, м, ρ – плотность теплоносителя, кг/м³, G – расход теплоносителя, кг/с, S – площадь поперечного сечения, м².

Отложения, образующиеся на стенках канала, уменьшают эффективное сечение канала, сужая диаметр для прохождения среды, т.е. $D_{\text{с.отлож.}} < D_{\text{без.отлож.}}$; увеличивают коэффициент гидравлического трения, т.е. $\lambda_{\text{с.отлож.}} > \lambda_{\text{без.отлож.}}$; уменьшают площадь поперечного сечения, т.е. $S_{\text{с.отлож.}} < S_{\text{без.отлож.}}$;

Зная, что $\frac{\lambda_{\text{с.отлож.}}}{\lambda_{\text{без.отлож.}}} > 1$, $\frac{D_{\text{без.отлож.}}}{D_{\text{с.отлож.}}} > 1$, $\frac{S_{\text{без.отлож.}}}{S_{\text{с.отлож.}}} > 1$, то получим, $\frac{\Delta P_{\text{с.отлож.}}}{\Delta P_{\text{без.отлож.}}} > 1$, а

следовательно гидравлическое сопротивление контура с отложениями больше гидравлического сопротивления контура без отложений $\Delta P_{\text{с.отлож.}} > \Delta P_{\text{без.отлож.}}$.

Утечка теплоносителя во внешнюю среду.

Влияние утечки теплоносителя на гидравлическое сопротивление, также выразим через формулу Дарси-Вейсбаха (4), запишем формулу гидравлического сопротивления для случая теплообменного аппарата без утечки $\Delta P_{\text{без.ут.}}$ (5) и в случае утечки $\Delta P_{\text{с.ут.}}$ (6):

$$\Delta P_{\text{без.ут.}} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8G^2}{\rho\pi^2} \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{с.ут.}} = \frac{\lambda L}{D^5} \cdot \frac{8(G_{\text{вх}} - g_{\text{ут}})^2}{\rho\pi^2} \quad (6)$$

где, $G_{\text{вх}}$ – расход теплоносителя на входе в контур, кг/с, $g_{\text{ут}}$ – расход утечки, кг/с. Произведя над уравнениями (5) и (6) математические операции деления и сокращения

одинаковых множителей, получим, что $\frac{\Delta P_{\text{с.ут.}}}{\Delta P_{\text{без.ут.}}} < 1$, а следовательно гидравлическое

сопротивление контура в котором происходит утечка теплоносителя меньше гидравлического сопротивления без утечки $\Delta P_{\text{с.ут.}} < \Delta P_{\text{без.ут.}}$.

Для анализа влияния утечки теплоносителя во внешнюю среду на температурный напор применим метод *NTU*. Метод *Number of Transfer Units (NTU)* позволяет анализировать эффективность теплообменника через безразмерные параметры. Число единиц переноса *NTU* определяется как:

$$NTU = \frac{UF}{C_{\min}} \quad (7)$$

где, U – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C), F – площадь теплообмена, м², C_{\min} – минимальная потоковая теплоемкость, Вт/°C, $C_{\min} = \min(C_1; C_2)$, $C_{\max} = \max(C_1; C_2)$. Потоковая теплоемкость горячего C_1 и холодного C_2 теплоносителя: $C_1 = G_1 c_{p1}$, $C_2 = G_2 c_{p2}$, где G_1, G_2 – расход горячего и холодного теплоносителя, кг/с, c_{p1}, c_{p2} – удельная теплоемкость горячего и холодного потока, кДж/(кг·°C).

Температурный напор определяется:

$$\Delta T = \frac{Q}{UF} = \frac{\varepsilon C_{\min} \Delta T_{\max}}{UF} = \frac{\varepsilon}{NTU} \Delta T_{\max} \quad (8)$$

где, ε – эффективность ТОА, $\Delta T_{\max} = T_1^{ex} - T_2^{ex}$ – максимально возможная разность температур.

При анализе обоих возможных случаев (первый случай – потоковая теплоемкость холодной среды изначально была больше, второй случай – потоковая теплоемкость горячей среды изначально была больше), получим, что при наличии утечки теплоносителя во внешнюю среду температурный напор уменьшается.

Перетечка теплоносителя из одного контур в другой.

Аналогично формулам (5) и (6), введя новые переменные для случая перетечки теплоносителя из одного контура в другой $\Delta P_{\text{без пер.}}$ и $\Delta P_{\text{с пер.}}$, получим, что $\frac{\Delta P_{\text{с пер.}}}{\Delta P_{\text{без пер.}}} < 1$,

т.е. гидравлическое сопротивление контура в котором происходит перетечка уменьшается, а гидравлическое сопротивления контура в который происходит перетечка – увеличивается.

Аналогично формулам (7) и (8), анализируя изменение расходов теплоносителей в горячем и холодном контурах, теплоемкости потоков, получим, что при наличии перетечки теплоносителя из одного контур в другой, температурный напор ТОА уменьшается.

Смоделируем вышеуказанные случаи в программе *Aspen Exchanger Design & Rating V12 (Aspen EDR)* в режиме *Simulator*. Для расчетов примем теплообменный аппарат ТТР-27-10, соответственно, использованы его геометрические исходные данные, для расчета принят программный пакет «*STEAMNBS*», греющий и нагреваемый теплоноситель – вода.

Наличие отложений на теплообменной поверхности.

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от термического сопротивления отложений (толщины), в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей среды T_1 , нагреваемой среды T_3 и расход теплоносителей, а *Aspen EDR* рассчитает температуры на выходе T_2, T_4 и температурный напор ΔT . Рассмотрим два случая: 1 – отложения образуются только со стороны греющего теплоносителя, 2 – отложения образуются с обеих сторон теплоносителей. Термическое сопротивление отложений со стороны греющего теплоносителя R_1 и нагреваемого R_2 будем задавать в диапазоне от 0 до 0,01 м²·°C/Вт.

Полученные значения температур на выходе греющей и нагреваемой среды и температурный напор занесены в таблицу 1.

Таблица 1
Table 1

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии отложений на теплообменной поверхности
Calculation of the outlet temperature of the heating and heated media and the temperature pressure in the presence of deposits on the heat exchange surface

$R_1, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	$R_2, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	$T_1, \text{ °C}$	$T_2, \text{ °C}$	$T_3, \text{ °C}$	$T_4, \text{ °C}$	$\Delta T, \text{ °C}$
0	0	47,5	45,8	42,63	44,34	3,17
0,0001	0	47,5	45,97	42,63	44,16	3,34
0,0001	0,0001	47,5	46,12	42,63	44,02	3,485
0,0005	0	47,5	46,42	42,63	43,72	3,785
0,0005	0,0005	47,5	46,7	42,63	43,43	4,07
0,001	0	47,5	46,7	42,63	43,43	4,07

0,001	0,001	47,5	46,98	42,63	43,15	4,35
0,005	0	47,5	47,25	42,63	42,89	4,61
0,005	0,005	47,5	47,63	42,63	42,77	4,73
0,01	0	47,5	47,36	42,63	42,77	4,73
0,01	0,01	47,5	47,73	42,63	42,7	4,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Утечка теплоносителя во внешнюю среду.

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от величины утечки теплоносителя, в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей T_1 и нагреваемой среды T_3 , а Aspen EDR рассчитает температуры на выходе T_2 , T_4 и температурный напор ΔT . Изменяемые параметры – расход греющей G_1 и нагреваемой G_2 среды.

Строка 1 таблицы 2 – утечка отсутствует, строка 2 – утечка горячего теплоносителя составляет 0,05 кг/с, строка 3 – утечка горячего теплоносителя составляет 0,08 кг/с, строка 4 – утечка холодного теплоносителя 0,05 кг/с, строка 5 – утечка холодного теплоносителя 0,08 кг/с.

Таблица 2

Table 2

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии утечки теплоносителя во внешнюю среду

Calculation of the outlet temperature of the heating and heated medium and the temperature pressure in the presence of leakage of the coolant into the external environment

№ п/п	G_1 , кг/с	G_2 , кг/с	T_1 , °C	T_2 , °C	T_3 , °C	T_4 , °C	ΔT , °C
1	0,25	0,25	47,5	45,8	42,63	44,34	3,17
2	0,2	0,25	47,5	45,57	42,63	44,18	3,12
3	0,17	0,25	47,5	45,39	42,63	44,07	3,09
4	0,25	0,2	47,5	45,95	42,63	44,57	3,12
5	0,25	0,17	47,5	46,07	42,63	44,75	3,08

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Перетечка теплоносителя из одного контура в другой

Рассмотрим, как меняется температурный напор в зависимости от величины перетечки теплоносителя из одного контур в другой, в расчетах неизменными останутся параметры температуры на входе греющей T_1 и нагреваемой среды T_3 , а Aspen EDR рассчитает температуры на выходе T_2 , T_4 и температурный напор ΔT . Изменяемые параметры – расход греющей G_1 и нагреваемой G_2 среды.

Строка 1 таблицы 3 – перетечка отсутствует, строка 2 – перетечка горячего теплоносителя в холодный составляет 0,03 кг/с, строка 3 – перетечка горячего теплоносителя в холодный составляет 0,05 кг/с, строка 4 – перетечка холодного теплоносителя в горячий составляет 0,03 кг/с, строка 5 – перетечка холодного теплоносителя в горячий составляет 0,05 кг/с.

Таблица 3

Table 3

Расчет температуры на выходе греющей и нагреваемой среды и температурного напора при наличии перетечки теплоносителя в другой контур

Calculation of the temperature at the outlet of the heating and heated medium and the temperature pressure in the presence of a coolant overflow into another circuit

№ п/п	G_1 , кг/с	G_2 , кг/с	T_1 , °C	T_2 , °C	T_3 , °C	T_4 , °C	ΔT , °C
1	0,25	0,25	47,5	45,8	42,63	44,34	3,17
2	0,22	0,28	47,5	45,59	42,63	44,14	3,16
3	0,2	0,3	47,5	45,45	42,63	44	3,14
4	0,28	0,22	47,5	46	42,63	44,55	3,15
5	0,3	0,2	47,5	46,13	42,63	44,7	3,14

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и Обсуждение (Results and Discussions)

В ходе исследования был проведен анализ влияния трех эксплуатационных дефектов на теплогидравлические характеристики теплообменного аппарата: 1) образование отложений на теплообменных поверхностях; 2) утечка теплоносителя во внешнюю среду; 3) перетечка теплоносителя между контурами. Влияние на тепловые характеристики были описаны через уравнение теплопередачи и метод *NTU*, а влияние на гидравлические характеристики описано через формулу Дарси-Вейсбаха. Для проверки достоверности выявленных математических зависимостей были проведены расчеты в *Aspen Exchanger Design & Rating*.

Исходя из анализа Таблицы 1 можно сделать вывод, что наличие слоя отложений снижает тепловую эффективность и увеличивает гидравлическое сопротивление. Образование накипи создает дополнительное термическое сопротивление, что напрямую снижает коэффициент теплопередачи. Для сохранения требуемой тепловой мощности при постоянном расходе теплоносителей системе необходимо компенсировать падение коэффициента теплопередачи увеличением среднелогарифмического температурного напора. Параллельно с этим, отложения, уменьшая живое сечение каналов и повышая их шероховатость, вызывают рост гидравлического сопротивления аппарата. В случае постоянного массового расхода рост сопротивления описывается уравнением 4, вытекающим из формулы Дарси-Вейсбаха, где потери давления обратно пропорциональны диаметру канала в пятой степени.

Анализируя таблицы 2, 3, уравнения 5, 6 получим, что наличие утечки теплоносителя во внешнюю среду приводит к снижению расхода потока через аппарат, уменьшение расхода ведет к снижению коэффициента теплопередачи и температурного напора. Гидравлическое сопротивление контура в котором происходит утечка уменьшается, т.к. оно пропорционально квадрату расхода, гидравлическое сопротивление второго контура остается неизменным. Наличие перетечки теплоносителя из одного контура в другой приводит к нарушению теплового и материального баланса, из-за дисбаланса расходов уменьшается температурный напор. Гидравлическое сопротивление контура в котором происходит перетечка уменьшается, гидравлическое сопротивление второго контура увеличивается.

Установлено, что процессы загрязнения теплообменных поверхностей и утечки/перетечки теплоносителя оказывают разнонаправленное влияние на рабочие параметры: загрязнения увеличивают температурный напор и гидравлическое сопротивление, в то время как утечки и перетечки приводят к их снижению. Выявленная зависимость послужит алгоритмической базой для программирования автоматической системы диагностики технического состояния ТОО [6]. Принцип функционирования системы заключается в непрерывном диагностировании технического состояния ТОО. На этапе первичного запуска, после проведения технического обслуживания или ремонта, система фиксирует эталонные значения температурного напора и гидравлического сопротивления. В дальнейшем, в режиме реального времени, осуществляется расчет текущих значений указанных параметров и их сравнение с эталонными. Если разница между текущими и эталонными значениями превысит заданный порог, то система отправит оператору аварийное сообщение с описанием неисправности ТОО.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Совокупный анализ характеристик температуры и давления в процессе эксплуатации ТОО позволит диагностировать его техническое состояние, как на наличие отложений на теплообменной поверхности, так и разного рода утечки теплоносителя, вызванные механическими повреждениями, сквозной коррозией, термическим старением уплотнительных прокладок или их неправильной установкой.

Мониторинг теплогидравлических параметров позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что минимизирует риск внезапных остановок производства, сокращает эксплуатационные расходы и продлевает ресурс оборудования.

Литература

1. Litvinenko A.A., Vankov Y.V., Timershin A.R., Sharafiev D.E., Ponomarev R.A. The Method of Obtaining Deposits on the Heat Exchange Surface of Heat Exchangers. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2025. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970875
2. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях

теплообменного оборудования методом свободных колебаний. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>

3. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>

4. Корнеев С.В., Демин А.М., Демин М.А., Сорокин В.Н., Кабаков А.Н. Повышение эффективности работы теплообменников компрессорного и технологического оборудования / Вестник СибАДИ, выпуск 3 (25), 2012. – С. 18-21

5. Интернет-ресурс: <https://teploobmennik.ridan.ru/articles/protechki-vteploobmennike-vidy-prichiny-diagnostika/>

6. Пат. №2808982, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа», №2808982, опубл. 05.12.2023

7. Орбис-Дияс В.С., Адамова В.А. К диагностике технического состояния теплообменных аппаратов по параметрам эксплуатации // Энергосбережение, №2, 2005. – С. 24.

8. Демин А.М., Науменко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив / Омский научный вестник, №4, 2019. – с. 85

9. Пат. 2771269, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики состояния рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург», № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022

10. Бударин П.А. Основные концепции в параметрическом диагностировании теплообменных аппаратов на наличие в них загрязнений / Бударин П.А., Бубликов И.А., Кравец С.Б. // Вестник АГТУ, №6, 2007. – С. 79-82.

11. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017)

12. Elistratova, Yulia & Seminenko, Artem & Uvarov, Valeriy & Minko, Vsevolod. (2023). Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers. *Vestnik MGSU*. 737-746. 10.22227/1997-0935.2023.5.737-74

13. Anipko, Oleh & Kots, Ivan & Snisarchuk, Dmytro. (2025). ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEPOSITS ON HEAT EXCHANGE SURFACES ON HEAT EXCHANGE EFFICIENCY. *Modern technology, materials and design in construction*. 37. 171-180. 10.31649/2311-1429-2024-2-171-180.

14. Антипов А.И., Голубев Л.Г., Мухтаров Я.С. Влияние отложений в теплообменной аппаратуре на термические сопротивления и энергетические затраты на объектах промышленной подготовки нефти. *Проблемы энергетики*, 2003, №5-6. – С.28-35.

15. Интернет ресурс: <https://ateks38.ru/tpost/lc28ld4rmo-plastinchatie-apparati-delotonkoe-chast>

Авторы публикации

Литвиненко Анна Алексеевна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), *Email*: annaannaaver@gmail.com.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), *Email*: yvankov@mail.ru.

References

1. Litvinenko A.A., Vankov Y.V., Timershin A.R., Sharafiev D.E., Ponomarev R.A. The Method of Obtaining Deposits on the Heat Exchange Surface of Heat Exchangers. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2025. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970875

2. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the

method of free oscillations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(4):55-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>

3. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):106-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>

4. Korneev S.V., Demin A.M., Demin M.A., Sorokin V.N., Kabakov A.N. Improving the efficiency of heat exchangers of compressor and process equipment / *Bulletin of SibADI*, issue 3 (25), 2012. – P. 18-21

5. Internet resource: <https://teploobmennik.ridan.ru/articles/protechki-vteploobmennike-vidy-prichiny-diagnostika/>

6. Patent No. 2808982, Russian Federation, Method for Automatic Diagnosis of the Presence of Deposits on the Walls of a Recuperative Heat Exchanger / A. A. Averianova, JSC V. B. Shnepp Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors, No. 2808982, published December 5, 2023

7. Orbis-Diyas V.S., Adamova V.A. On diagnostics of the technical condition of heat exchangers based on operating parameters // *Energy Saving*, No. 2, 2005. – P. 24.

8. Demin A.M., Naumenko A.P. Diagnostics of heat exchange equipment based on the operating parameters of a diesel fuel hydrotreating unit / *Omsk Scientific Bulletin*, No. 4, 2019. – p. 85

9. Patent 2771269, Russian Federation, Method for Automatic Diagnostics of the State of Recuperative Heat Exchangers in Low-Temperature Gas Separation Units Operated in the North of the Russian Federation / Efimov A.N. Patent Holder Gazprom Dobycha Yamburg Limited Liability Company, No. 2021107549, filed March 22, 2021, published April 29, 2022

10. Budarin P.A. Basic concepts in parametric diagnostics of heat exchangers for the presence of contaminants in them / Budarin P.A., Bublikov I.A., Kravets S.B. // *Bulletin of ASTU*, No. 6, 2007. – pp. 79-82.

11. Galkovsky V.A., Chupova M.V. Analysis of the reduction in the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination // *Internet journal "SCIENCE STUDY"* Vol. 9, No. 2 (2017)

12. Elistratova, Yulia & Seminenko, Artem & Uvarov, Valeriy & Minko, Vsevolod. (2023). Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers. *Vestnik MGSU*. 737-746. 10.22227/1997-0935.2023.5.737-74

13. Anipko, Oleh & Kots, Ivan & Snisarchuk, Dmytro. (2025). ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEPOSITS ON HEAT EXCHANGE SURFACES ON HEAT EXCHANGE EFFICIENCY. *Modern technology, materials and design in construction*. 37. 171-180. 10.31649/2311-1429-2024-2-171-180.

14. Antipov, A.I., Golubev, L.G., and Mukhtarov, Ya.S. “The Effect of Deposits in Heat-Exchange Equipment on Thermal Resistances and Energy Consumption at Oil Field Treatment Facilities.” *Problemy Energetiki*, 2003, nos. 5–6, pp. 28–35.

15. Internet resource: <https://ateks38.ru/tpost/lc28ld4rmo-plastinchatie-apparati-delotonkoe-chast>

Authors of the publication

Litvinenko Anna Alekseevna – Kazan State Power Engineering University, *Email*: annaannaaver@gmail.com.

Vankov Yuri Vitalievich – Kazan State Power Engineering University, *Email*: yvankov@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Получено 26.10.2025 г.

Отредактировано 02.02.2026 г.

Принято 03.02.2026 г.