

Методика диагностирования эффективности змеевикового теплообменника на основе моделирования тепловых и гидродинамических процессов

А.В. Уткин¹, А.М. Гареев², А.Г. Гимадиев²

¹Научно-производственное предприятие «Гималаи», Заводское шоссе 13Б, Самара, Россия, 443022

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Известно, что на тепловых электростанциях тщательно контролируется качество теплоносителя с помощью специальных приборов, на вход которых подаётся охлаждённая змеевиковым теплообменником проба перегретого пара или конденсата. В процессе снижения температуры теплоносителя с 500 до 25 °С из-за содержания примесей в охлаждающей воде на наружной поверхности змеевика происходит образование накипных отложений, приводящих к снижению эффективности теплообменника и его отказу вследствие закупорки межтрубного пространства отложениями. Применение параметрического диагностирования эффективности теплообменника, основанной на измерении текущего коэффициента теплопередачи и сравнении его с коэффициентом теплопередачи теплообменника без отложений, позволит назначить рациональные сроки технического обслуживания теплообменника и снизить затраты, связанные с избыточным расходом охлаждающей воды. В работе представлена разработанная в Simcentr Amesim модель подсистемы двухпозиционного автоматического регулирования температуры пробы теплоносителя с функцией диагностирования эффективности змеевикового теплообменника. Модель включает в себя теплообменник, представленный в ячеечной форме, двухпозиционный регулятор, преобразователи температуры и расхода пробы теплоносителя и охлаждающей воды, а также блок управления. Полученные результаты моделирования с имитацией отложений показывают, что при увеличении толщины отложений коэффициент работоспособности теплообменника снижается практически по линейному закону, подтверждая достаточно высокую чувствительность предложенной методики диагностирования. Разработанная методика диагностирования может быть использована в системе подготовки пробы теплоносителя для мониторинга водно-химического режима тепловых электростанций.

1. Введение

Змеевиковый теплообменник благодаря своей простоте и высокой надёжности получил широкое распространение в теплоэнергетических системах, одной из которых является система подготовки пробы теплоносителя к химическому анализу на ТЭС [1]. В данной системе за счёт двухпозиционного или иного способа регулирования обеспечивается стабилизация температуры пробы на выходе змеевикового теплообменника на уровне 25° С, что обеспечивает нормальное функционирование приборов химического контроля.

Высокое содержание взвешенных примесей в охлаждающей воде, протекающей в межтрубном пространстве теплообменника, совместно с высокой температурой пробы

способствует интенсивному образованию на наружной поверхности змеевика слоя отложений. Отсутствие информации об их текущем количестве затрудняет назначение рациональных сроков технического обслуживания теплообменника, поэтому часто его эксплуатация ведётся до возникновения отказа, характеризующегося достижением недопустимого уровня эффективности или закупоркой межтрубного пространства отложениями.

В связи с указанной проблемой, внедрение диагностики эффективности теплообменника системы подготовки пробы теплоносителя позволит рационально настроить режим его чистки и снизить потребный расход охлаждающей воды.

Наиболее перспективной методикой диагностики эффективности теплообменника является параметрическая [2, 3], основанная на измерении коэффициента теплопередачи с помощью установленных датчиков расхода, температуры пробы и охлаждающей воды. Отслеживая текущий коэффициент теплопередачи и сравнивая его с коэффициентом теплопередачи теплообменника без отложений, можно с достаточной степенью точности определить степень эффективности работы теплообменника.

Несмотря на обширные научные исследования, направленные на изучение контроля отложений в теплообменном оборудовании, внедрение полученных результатов применительно к компактным змеевиковым теплообменникам системы подготовки пробы не осуществлено в полной мере.

2. Основные положения параметрического диагностирования

Принципиальная схема двухпозиционной подсистемы автоматического регулирования температуры пробы с функцией диагностирования эффективности теплообменника представлена на рисунке 1. При минимальной тепловой нагрузке для поддержания температуры пробы достаточно расхода охлаждающей воды, протекающей через регулирующий клапан К. При возрастании тепловой нагрузки дополнительный расход охлаждающей воды обеспечивается открытием электромагнитного клапана ЭМК, который установлен байпасно регулируемому клапану.

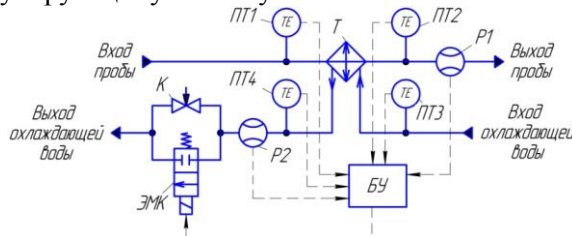


Рисунок 1. Принципиальная схема двухпозиционной подсистемы автоматического регулирования температуры пробы с функцией диагностирования эффективности теплообменника: БУ – блок управления; К – клапан регулирующий; ПТ1...ПТ4 – преобразователи температуры; Р1, Р2 – расходомеры; Т – теплообменник; ЭМК – электромагнитный клапан.

В процессе эксплуатации теплообменника, используя показания установленных датчиков температуры и расхода по обеим средам, можно определить текущий коэффициент теплопередачи $K_{тек}$, отражающий состояние теплообменника с учётом наличия отложений:

$$K_{тек} = Q_{cp}^r (\pi l \Delta \bar{t})^{-1},$$

где Q_{cp}^r – среднее количество теплоты; l – длина трубки змеевика; $\Delta \bar{t}$ – среднелогарифмический температурный напор.

Среднее количество теплоты Q_{cp}^m определяется по формуле:

$$\bar{Q}_{cp}^r = [\bar{Q}_{np} \rho_{np} C_{np} (\bar{T}_{np.вх} - \bar{T}_{np.вых}) + \bar{Q}_{охл} \rho_{охл} C_{охл} (\bar{T}_{охл.вых} - \bar{T}_{охл.вх})] / 2,$$

где \bar{T} – средняя температура; \bar{Q}_{np} , $\bar{Q}_{охл}$ – средние значения расходов; ρ – плотность; C – теплоёмкость; индексы «np», «охл» – означают отношения параметров к пробе, охлаждающей воде, индексы «вх», «вых» – означают вход и выход теплообменника.

Среднелогарифмический температурный напор $\Delta \bar{t}$ рассчитывается по выражению:

$$\Delta \bar{t} = \left(\bar{T}_{np,ex} - \bar{T}_{охл,вых} - \bar{T}_{np,вых} + \bar{T}_{охл,ex} \right) / \ln \frac{\bar{T}_{np,ex} - \bar{T}_{охл,вых}}{\bar{T}_{np,вых} - \bar{T}_{охл,ex}}$$

С другой стороны, при тех же значениях $\bar{T}_{np,ex}, \bar{T}_{охл,ex}, \bar{Q}_{np}, \bar{Q}_{охл}$ на теплообменнике без отложений, коэффициент теплопередачи $K_{чист}$ был бы более высоким, а его значение определялось бы по формуле:

$$K_{чист} = \left[\frac{1}{\alpha_{np} d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \left(\frac{d_{нар}}{d_{вн}} \right) + \frac{1}{\alpha_{охл} D_z} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стенки змеевика; $\alpha_{np}, \alpha_{охл}$ – коэффициенты теплоотдачи по пробе и охлаждающей воде; D_z – гидравлический диаметр межтрубного пространства.

Входящие в формулу (1) коэффициенты теплоотдачи α_{np} и $\alpha_{охл}$ для змеевикового теплообменника вычисляются по формулам [4]:

$$\alpha_{np} = 0,023 Re_{np}^{0,85} Pr_{np}^{0,4} \left(1 + 3,6 \frac{d_{вн}}{D_z} \right) \frac{\lambda_{np}}{d_{вн}}; \quad \alpha_{охл} = 0,569 Re_{охл}^{0,471} Pr_{охл}^{0,2} \frac{\lambda_{охл}}{D_z};$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Таким образом, эффективность змеевикового теплообменника можно отследить при помощи коэффициента работоспособности β , равного отношению текущего коэффициента теплопередачи $K_{тек}$ к коэффициенту теплопередачи чистого теплообменника $K_{чист}$.

Поскольку в открытом доступе трудно найти экспериментальные временные зависимости коэффициента теплопередачи теплообменника в условиях образования отложений, то для проверки работоспособности предложенного метода мониторинга разработана имитационная модель подсистемы двухпозиционного автоматического регулирования температуры пробы с функцией диагностики эффективности змеевикового теплообменника, реализованная в программном пакете Simcentr Amesim (рисунок 2).

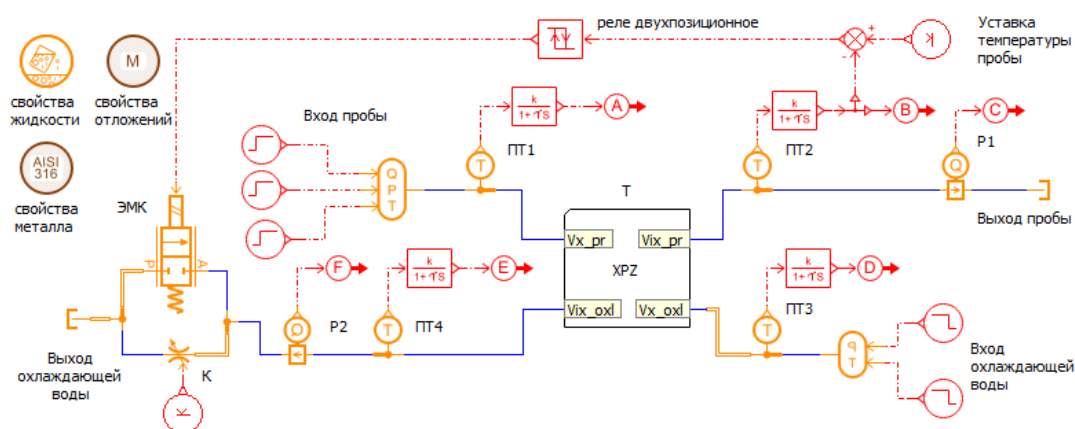


Рисунок 2. Имитационная модель подсистемы двухпозиционного автоматического регулирования температуры пробы с функцией диагностики эффективности теплообменника

Разработанная модель включает в себя блок математического описания змеевикового теплообменника, преобразователи температуры в виде аperiodических типовых звеньев, установленные на входе и выходе по обеим средам, а также расходомеры.

В качестве объекта исследования использован змеевиковый теплообменник ХПЗ-250.19-Н10Б, серийно использующийся в системах подготовки пробы к химическому анализу на ТЭС, геометрические размеры которого представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Теплообменник описан ячеечной моделью, сущность которой заключается в разбиении теплообменника на конечное число ячеек (рисунок 4) с принятием допущения о том, что температура пробы/охлаждающей воды на выходе из ячейки равна средней температуре в

ячейке. Отложения заданы как один из элементов многослойной змеевиковой трубки с назначаемыми толщиной и коэффициентом теплопроводности.

Таблица 1. Геометрические размеры моделируемого змеевикового теплообменника.

$D_{нар}$ (мм)	$D_{ср}$ (мм)	$D_{вн}$ (мм)	$d_{вн}$ (мм)	$d_{нар}$ (мм)	S (мм)	число витков
125	108	89	7	10	15	16

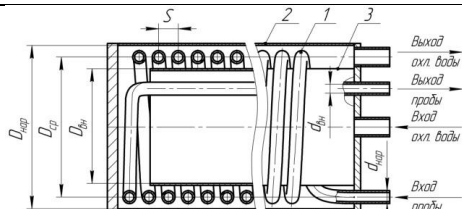


Рисунок 3. Конструктивная схема змеевикового холодильника: 1 – змеевик; 2 – корпус; 3 – дефлектор.

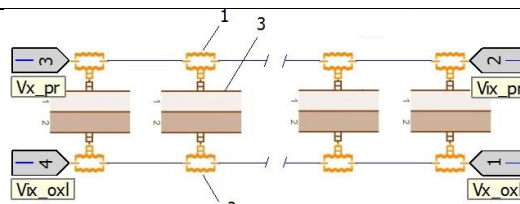


Рисунок 4. Расчётная схема теплообменника в Simcenter Amesim: 1, 2 – труба с трением и теплообменом (TFPHE01); 3 – многослойная стенка (THDYNWALL).

Результаты расчёта по созданной модели теплообменника показывают, что при увеличении эквивалентной толщины отложений с параметрами $\rho_{отл}=2400 \text{ кг/м}^3$ и $\lambda_{отл}=0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, распространённых на первые 8 витков теплообменника, увеличивается длительность работы ЭМК в открытом положении, повышая расход охлаждающей воды (рисунок 5). Коэффициент работоспособности снижается практически по линейному закону с $\beta=1$ до $\beta=0,57$ при увеличении толщины отложений до 0,8 мм (рисунок 6), что подтверждает достаточно высокую чувствительность предложенной методики диагностирования эффективности теплообменника.

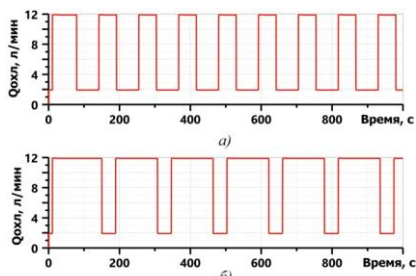


Рисунок 5. Временная зависимость расхода охлаждающей воды $Q_{охл}$, требуемого для поддержания температуры пробы 25 °C , при отсутствии отложений (а) и толщине 0,5 мм (б).

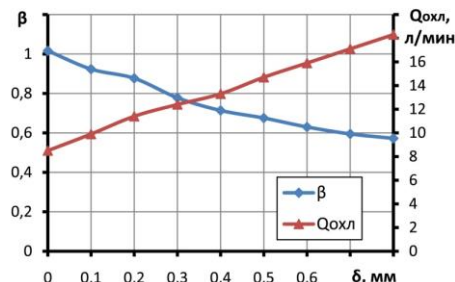


Рисунок 6. Зависимость коэффициента работоспособности β и расхода охлаждающей воды $Q_{охл}$ от толщины отложений δ .

На практике более полезным является наличие информации об оставшемся времени до отказа теплообменника, для нахождения которого помимо коэффициента работоспособности необходимо знать характер образования отложений во времени. Проведённый обзор технической литературы показал, что в подавляющем большинстве случаев рост отложений соответствует модели Керна-Ситтона [5]:

$$R(\tau) = R_{\max} [1 - \exp(-b\tau)],$$

где $R(\tau)$ – термическое сопротивление слоя отложений; R_{\max} – максимальное термическое сопротивление, возможное при данных условиях эксплуатации; b – коэффициент, определяющий степень роста отложений; τ – время от момента ввода чистого теплообменника в эксплуатацию (то есть начала образования отложений).

Параметры R_{\max} и b зависят от множества факторов: концентрации растворённых примесей, температуры и скорости теплоносителей и др., учёт которых на стадии проектирования в большинстве случаев невозможен. В связи с этим, алгоритм диагностирования эффективности

теплообменника может базироваться на первоначальных экспериментальных данных, полученных в результате эксплуатации на конкретном объекте.

Методика диагностирования эффективности змеевикового холодильника будет состоять из следующих этапов.

I) При вводе теплообменника в эксплуатацию запускается эпизодическое, например один раз в сутки, отслеживание коэффициента работоспособности (τ_i, β_i), который накапливается в блоке управления в виде массива данных ($\tau_1, \beta_1 \dots \tau_N, \beta_N$).

II) При достижении критической величины коэффициента работоспособности $\beta_{\text{крит}}$, характеризующей невозможность поддержания теплообменником требуемой температуры пробы на выходе при (τ_N, β_N), производится определение коэффициентов уравнения экспоненциальной регрессии:

$$\beta = \exp(a_0 + a_1 \tau). \quad (2)$$

Входящие в равенство (2) коэффициенты a_0 и a_1 определяются согласно известным зависимостям:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \ln \beta_i - \frac{1}{N} a_1 \sum_{i=1}^{i=N} \tau_i; \quad a_1 = \frac{N \sum_{i=1}^{i=N} \tau_i \ln \beta_i - \sum_{i=1}^{i=N} \tau_i \sum_{i=1}^{i=N} \ln \beta_i}{N \sum_{i=1}^{i=N} \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{i=N} \tau_i \right)^2}.$$

III) На основе полученного уравнения экспоненциальной регрессии (2) на экране блока управления будет отражаться текущий коэффициент $\beta_{\text{тек}}$ работоспособности теплообменника, установленного вновь в систему подготовки пробы после его чистки от отложений, и время $\tau_{\text{ост}}$, оставшееся до наступления критического коэффициента работоспособности $\beta_{\text{крит}}$:

$$\tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{крит}} - \tau_{\text{тек}} = \frac{\ln \beta_{\text{крит}} - a_0}{a_1} - \tau_{\text{тек}}.$$

В процессе эксплуатации после истечения оставшегося времени $\tau_{\text{ост}}$ на табло блока управления системы подготовки пробы теплоносителя будет высвечиваться обозначение, указывающее на начало очередной чистки теплообменника и передаваться соответствующий сигнал на щит управления энергоблока тепловой электростанции.

3. Заключение

На основе моделирования тепловых и гидродинамических процессов в подсистеме регулирования температуры пробы теплоносителя доказана работоспособность предложенной методики параметрического диагностирования эффективности теплообменника в процессе его эксплуатации. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке систем подготовки пробы теплоносителя для мониторинга водно-химического режима тепловых электростанций.

4. Литература

- [1] Macherer, L. Pressurized piping: Sampling steam and water // Chemical Engineering, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: http://www.steamcycle.com/sampling_steam_and_water.pdf (25.12.2019).
- [2] Zahid, K. Development of a dynamic fouling model for a heat exchanger / K. Zahid, R. Patel, I. Mujtaba // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 1135-1140.
- [3] Gudmundsson, O. Fouling detection in a cross-flow heat exchanger based on physical modeling / O. Gudmundsson, O.P. Palsson, H. Palsson, S. Lalot // Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII. – 2009. – P. 447-454.
- [4] Gimadiev, A.G. Study of coil heat exchanger of mechatronic sample conditioning system / A.G. Gimadiev, A.V. Utkin // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 689-698.
- [5] Silva, C. Fouling models for real time heat exchanger fouling detection / C. Silva, L. Fabio, M.Q. Eduardo // 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, 2005. – P. 1-10.

Diagnostic method of a coil heat exchanger efficiency based on thermal and hydrodynamic processes modelling

A.V. Utkin¹, A.M. Gareev², A.G. Gimadiev²

¹Research and Production Enterprise «Gimalai» Ltd., Zavodskoe Shosse 13B, Samara, Russia, 443022

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The coolant quality is carefully monitored at thermal power plants using special devices, the input of which is a sample of superheated steam or condensate cooled by a coil heat exchanger. In the process of reducing the coolant temperature due to the content of impurities in the cooling water on the outer surface of the coil, scale deposits form, leading to a decrease in the efficiency of the heat exchanger and its failure due to blockage of the annulus by deposits. The use of parametric diagnostics of the heat exchanger efficiency, based on comparison of heat transfer coefficient of heat exchanger with and without deposits, will allow to set rational maintenance periods for the heat exchanger and reduce cooling water consumption. The paper presents a model for a subsystem of on-off automatic sample temperature control with a function for the heat exchanger efficiency diagnostic. The obtained simulation results with imitated deposits in the form of a multilayer coil wall show that with an increase in the thickness of deposits, the heat exchanger performance factor decreases almost linearly, confirming the rather high sensitivity of the proposed diagnostic method. The developed diagnostic method can be used in steam and water analyses system.