

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ РАННИХ ПРИЗНАКОВ ПРОГАРА ЗМЕЕВИКОВ В МНОГОПОТОЧНЫХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧАХ

Матюшко Г.В., Уразметов Ш.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: закоксовывание змеевика, многопоточная трубчатая печь, методы обнаружения прогара, разностные уравнения, авторегрессия, индекс риска.

Аннотация. В данной статье приведена краткая статистика аварийных случаев на многопоточных трубчатых печах. Описаны существующие средства и системы управления. В основной части описана концептуальная модель существующей многопоточной трубчатой печи, предназначенная для нагрева тяжелого платформата, участвующего в производстве ароматических углеводородов. Рассчитаны и приведены разностные уравнения по входным и выходным параметрам, обеспечивающие анализ временных рядов с установки и подходящие для предиктивной аналитики. Выделен основной технологический параметр, в виде давления сырья на входе в печь, по которому можно оценить степень отложения кокса на внутренних поверхностях стенок труб змеевиков, и составлено уравнение зависимости. Описан индекс риска отложений кокса, в котором учитываются полученные разностные уравнения и зависимость степени наличия кокса от давления на входе в печь. Так же рассчитан индекс при двух разных условиях технологических параметров: нормальных и повышенных. Составлены итоговые отчеты по полученным графикам, которые подтвердили работоспособность составленного индекса риска отложений кокса. В оценке временных рядов и предиктивной аналитике использовалась рекуррентная нейронная сеть LSTM, обученная на реальных данных с установки.

A METHOD FOR DETECTING EARLY SIGNS OF COIL BURNOUT IN MULTI-STREAM TUBE FURNACES

Matyushko G.V., Urazmetov Sh. F.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa,

Keywords: coil coking, multi-tube tubular furnace, methods for detecting burn-through, difference equations, autoregression, risk index.

Abstract. This article presents a summary of accident statistics for multi-stream tube furnaces. Existing control systems and equipment are described. The main section describes a conceptual model of an existing multi-stream tube furnace designed to heat heavy platform fuel used in aromatic hydrocarbon production. Difference equations for input and output parameters are calculated and presented, enabling time-series analysis of the unit and suitable for predictive analytics. The key process parameter, feedstock pressure at the furnace inlet, is identified, allowing for the assessment of the degree of coke deposition on the inner walls of coil tubes, and a relationship equation is developed. A coke deposition risk index is described, taking into account the obtained difference equations and the dependence of the degree of coke presence on furnace inlet pressure. The index is also calculated under two different process parameter conditions: normal and elevated. Final reports based on the resulting graphs are compiled, confirming the validity of the developed coke deposition risk index. A recurrent neural network (LSTM) trained on real data from the installation was used for time series estimation and predictive analytics.

Введение

В трубчатых печах технологических установок осуществляется высокотемпературный нагрев и протекают реакции с жидкими и газообразными нефтепродуктами [1]. Согласно статистике, аварии на таких установках часто

приводят к пожарам, взрывам и выбросам опасных веществ. Исследования Академии государственной противопожарной службы МЧС России (табл. 1) показывают, что за период с 2007 по 2016 гг. на трубчатые печи приходилось 11,6% аварийных событий в нефтегазовой отрасли [2].

Табл. 1. Статистика аварийных ситуаций на предприятиях нефтегазовой отрасли

Оборудование	Количество аварий, %
1. Технологические трубопроводы	31,2
2. Насосные станции	18,7
3. Емкостные аппараты	15
4. Трубчатые печи	11,6
5. Колонны нефтепереработки	11,2
6. Промканализация	8,5
7. Резервуарные парки	3,8

Трубчатые печи сами по себе являются потенциальными источниками взрывоопасных смесей. Происходящие в них взрывы и пожары нередко вызывают разрушение соседнего технологического оборудования. Наиболее частой причиной аварий становится разгерметизация трубчатого змеевика, ведущая к попаданию продукта в топочное пространство. Разгерметизация обычно происходит из-за разрушения труб в зонах высоких механических напряжений или их прогара в местах внутренних отложений. Поэтому своевременная очистка змеевика имеет критическое значение.

Одним из распространенных методов обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей является внедрение систем аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) и противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) [3, 4]. Эти системы предназначены для предотвращения аварий, вызванных как человеческим фактором, так и сбоями в работе оборудования. АПС и ПАЗ используют сертифицированные датчики, исполнительные механизмы, измерительные приборы и программируемые логические контроллеры (ПЛК). ПЛК, как правило, имеют дублированную архитектуру, что повышает надежность и безопасность ведения технологического процесса. Контроллеры системы ПАЗ формируют управляющие команды для исполнительных устройств, чтобы ликвидировать возникшие нештатные ситуации.

Необходимо обратить внимание на то, что указанные системы предотвращают аварийные ситуации, то есть те случаи, когда авария на установке уже произошла, поэтому важной задачей является обнаружение ранних этапов коксоотложения в трубах змеевиков по временным рядам. В дальнейшем, сделать подобный анализ позволит применение современных технологий в виде рекуррентных нейронных сетей.

Основная часть

Модель концептуального уровня приведена на рисунке 1 и имеет 2 входных параметра и 5 выходных. Между входными и выходными параметрами присутствует корреляционная связь.

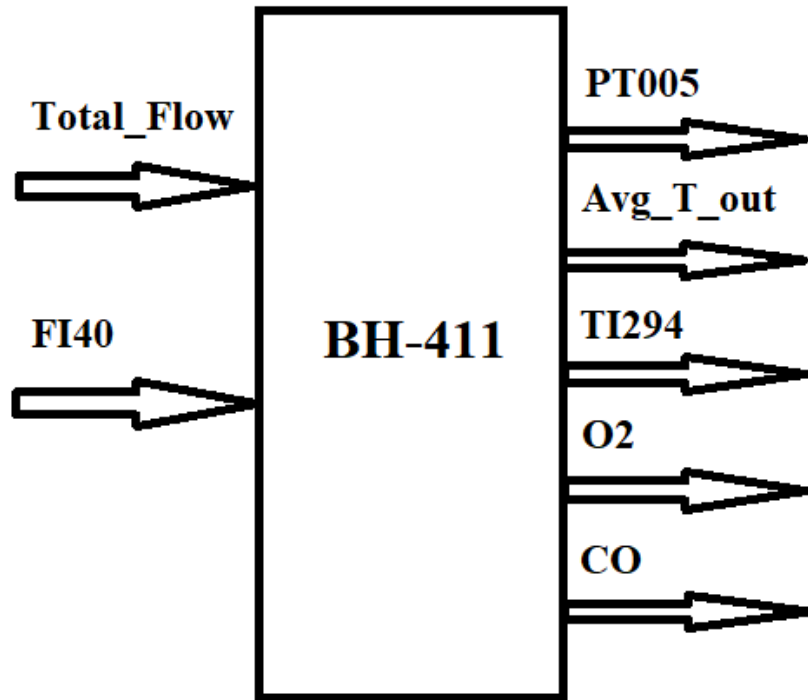


Рис. 1. Модель концептуального уровня печи BH-411

Входные параметры:

Total_Flow – общий расход (сумма шести потоков), м³/ч;

FI40 – расход топливного газа на установку, м³/ч;

Выходные параметры:

Avg_T_out – общая температура сырья (сумма шести потоков), °С;

TI294 – температура дымовых газов на входе в камеру конвекции, °С;

PT005 – давление на входе в печь, МПа;

O2 – содержание кислорода O₂, %;

CO – СО печи, %.

По входным и выходным параметрам, были получены разностные уравнения. Для этого за основу была взята модель авторегрессии [5], представленной формулой 1:

$$y_t = \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \dots + \beta_n y_{t-n} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где параметры β_i ($i = 1, \dots, n$) модели оцениваются при помощи метода наименьших квадратов (МНК).

1) Уравнение авторегрессии для Avg_t_out:

$$T_i(k) = a_{i1} \cdot T_i(k-1) + a_{i2} \cdot T_i(k-2) + b_{i1} \cdot F(k) + b_{i2} \cdot F(k-1) + c_{i1} \cdot P_{\text{BX}}(k) + c_{i2} \cdot P_{\text{BX}}(k-1) + d_{i1} \cdot G(k) + d_{i2} \cdot G(k-1) + e_i \cdot (T_{i-1}(k-1) - T_i(k-1)) + f_i \cdot (T_{\text{дым.вх}}(k-1) - 680) + g_i \cdot O_2(k-1) + \varepsilon_i(k). \quad (2)$$

2) Уравнение авторегрессии для PT005:

$$P(k) = a_{i1} \cdot P_{\text{BX}}(k-1) + a_{i2} \cdot P_{\text{BX}}(k-2) + b_{i1} \cdot F(k)^2 + b_{i2} \cdot F(k-1)^2 + c_i \cdot \eta + d_i \cdot P_{\text{насос}} + e_i \cdot (F(k) - F(k-1)). \quad (3)$$

3) Уравнение авторегрессии для TI294:

$$T_{\text{дым.вх}}(k) = a_{i1} \cdot T_{\text{дым.вх}}(k-1) + a_{i2} \cdot T_{\text{дым.вх}}(k-2) + b_i \cdot \left(\frac{\Sigma F(k)}{500} \right) + \quad (4)$$

$$+c_i \cdot \left(\frac{G(k)}{1300} \right) + d_i \cdot O_2(k-1) + e_i \cdot (\Sigma P_{\text{вх}}(k) - 4,92).$$

4) Уравнение авторегрессии для O_2 :

$$O_2(k) = a_{i1} \cdot O_2(k-1) + a_{i2} \cdot O_2(k-2) + b_{i1} \cdot \left(\frac{G(k)}{1300} \right) + b_{i2} \cdot \left(\frac{\Delta G(k)}{1300} \right) + c_i \cdot P_{\text{газ}}(k-1) + d_i \cdot Position + e_i \cdot (\Sigma P_{\text{вх}}(k) - 4,92). \quad (5)$$

5) Уравнение авторегрессии для 40QIA5411-2:

$$CO(k) = a_{i1} \cdot CO(k-1) + a_{i2} \cdot (CO(k-1) - 0,1) + b_i \cdot (2,5 - O_2(k))^2 + c_i \cdot \left(\frac{G(k)}{1300} \right) + d_i \cdot \left(\frac{T_{\text{дым.вх}}(k)}{800} \right) + e_i \cdot (4,5 - \Sigma P_{\text{вх}}(k)). \quad (6)$$

где $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, \varepsilon_i$ – параметры модели, которые будут уникальны для каждого уравнения и определяются с помощью МНК, упомянутые в формуле (1); T_i – температура i -го потока сырья на выходе из печи; $T_{\text{дым.вх}}$ – температура дымовых газов на входе в камеру конвекции; $T_{\text{дым.вых}}$ – температура дымовых газов на выходе в камеру конвекции; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе в печь; $P_{\text{газ}}$ – давление основного газа; O_2 – содержание кислорода O_2 ; CO – CO печи; G – влияние газа; $P_{\text{насос}}$ – давление насоса; η – вязкость сырья; F – расход сырья; $Position$ – регулирование положением шибера.

Полученные разностные уравнения (2)-(6) участвуют в определении индекса риска образования кокса.

При помощи формулы Дарси-Вейсбаха (7) можно описать процесс коксоотложения [6], основанный на потерях давления в связи с гидравлическими сопротивлениями:

$$\Delta P(t) = \lambda \frac{L \rho \omega^2}{2d}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – текущий внутренний диаметр; ω – скорость потока (растет при уменьшении d); L – длина участка; ρ – плотность жидкости.

Аппроксимируя уравнение (7) при помощи МНК, было получено:

$$\Delta P(t) = A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0, \quad (8)$$

где A – коэффициент, зависящий от давления на входе $P_{\text{вх}}$.

Полученное уравнение (8) позволяет оценить скорость образования отложений кокса и так же будет участвовать в определении индекса риска отложений кокса.

Рост индекса закоксованности (coking risk index, CRI) зависит от технологических параметров, как и в целом процесс отложения кокса, поэтому выведенные ранее уравнения (2)-(6) будут участвовать в его расчете. С увеличением коксоотложения будет расти индекс, так же на него влияют исторические отклонения параметров. Чем дальше параметры вне нормы, тем выше риск. При нормальных условиях индекс CRI будет равен 1, так как даже при таких условиях имеется риск закоксованности.

$$CRI(t) = 1 + \int_0^t \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot f_i(x_i(\tau)) \cdot e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau, \quad (9)$$

где t – текущее время; τ – переменная интегрирования (прошедшее время); $x_i(\tau)$ – значение i -го параметра в момент τ ; f_i – вектор-функция штрафов; ω_i – веса параметров; λ_i – коэффициент забывания; $(t - \tau)$ – сколько времени прошло.

Для учета временных рядов и прогнозирования процесса будет использована рекуррентная нейронная сеть (РНС) LSTM, обучающаяся на исторических данных.

За счет уравнений (2)-(6), (8) и истории процесса будет проводиться расчет индекса по уравнению (9).

Индекс имеет несколько пороговых значений, где:

- 1) норма: $CRI < 3,5$;
- 2) внимание: $CRI \geq 3,5$;
- 3) опасно: $CRI \geq 4,5$;
- 4) критически: $CRI \geq 5$.

Приведен расчет индекса CRI при нормальных условиях (рис. 2) и при повышенных технологических показателях (рис. 3).

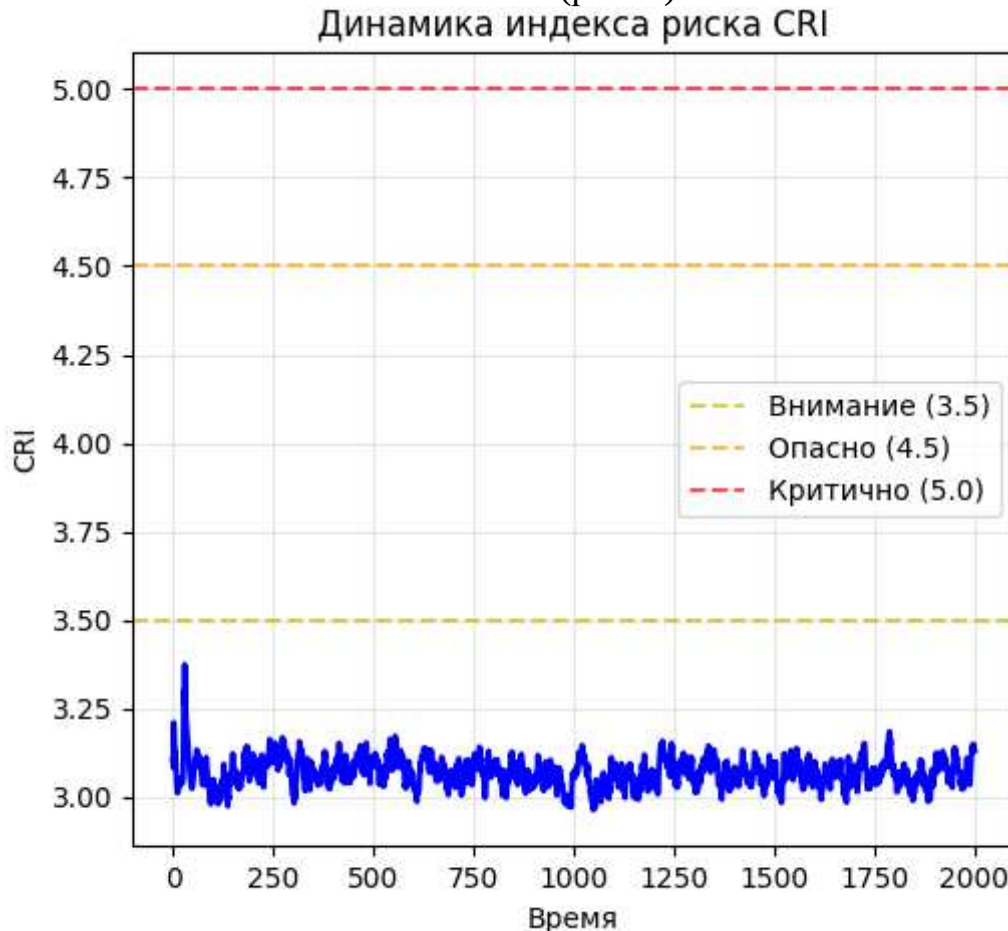


Рис. 2. График расчета CRI при нормальных показателях

Итоговый отчет по рисунку 2 составил:

- текущий CRI: 3,13;
- максимальный CRI: 3,37;
- средний CRI: 3,07.

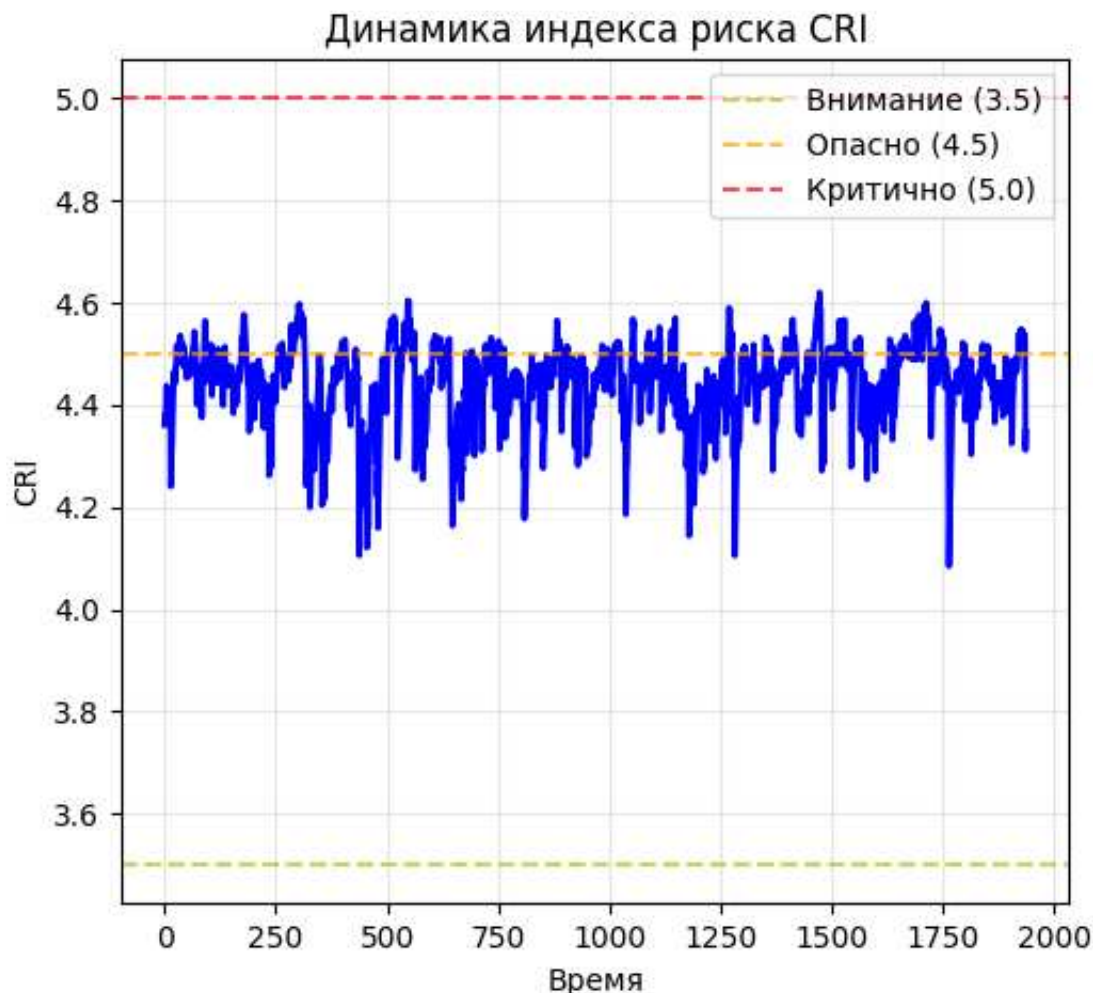


Рис. 3. График расчета CRI при повышенных показателях

Итоговый отчет по рисунку 3 составил:

- текущий CRI: 4,35;
- максимальный CRI: 4,62;
- средний CRI: 4,44.

Вывод

В данной работе рассчитаны и рассмотрены модели, участвующие в системе предиктивной аналитики обнаружения ранних признаков коксообразования и прогара труб змеевиков в многопоточных трубчатых печах. Получены разностные уравнения для выходных параметров, зависящие от входных. Составлено уравнение образования кокса на внутренних стенках труб змеевиков. Предложен метод оценки индекса риска отложений кокса на основании полученных разностных уравнений и уравнения скорости образования отложений кокса. Приведены расчеты индекса риска коксоотложения и построены графики, на основе реальных данных с установки, описывающие накопленный риск.

Список литературы

1. Ахметов С.А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р., Баязитов М.И. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учеб. пособие. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.
2. Матвеев Д.С. Диагностирование состояния элементов автоматизированных технологических комплексов на примере трубчатой печи: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 24 с.

3. Хафизов А.М., Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Аслаев Р.Р. Разработка системы «усовершенствованное управление» для оценки ресурса трубчатой печи и повышения эффективности противоаварийной автоматической защиты // Фундаментальные исследования. – 2015. – №12-3. – С. 536-539.
4. Хафизов А.М., Юхин Е.Г., Аслаев Р.Р. Разработка имитатора работы трубчатой печи для повышения безопасности технологического процесса и экономии энергоресурсов // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистров, аспирантов (Тольятти, 12-14 апреля 2016 года). – Тольятти: Изд-во ТГУ, – 2016. – С. 343-346.
5. Сурина А.В. Анализ временных рядов: учеб. пособие. – СПб., 2025 – 90 с.
6. Кузеев И.Р., Баязитов М.И., Куликов Д.В., Чиркова А.Г. Высокотемпературные процессы и аппараты переработки углеводородного сырья. – Уфа: Гилем, 1999. – 326 с.

Сведения об авторах:

Матюшко Герман Витальевич – магистрант;

Уразметов Шамиль Флюрович – к.т.н., доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии.