

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 681.5.015.23:658.264

Т.С. Добровольская, В.Ф. Ложечников

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА С ПЕРЕМЕННОЙ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Нефтеперерабатывающая промышленность является важной частью народно-хозяйственного комплекса Украины. В основе технологии нефтепереработки лежит ректификация и очистка сырой нефти, которая требует большого количества **острого** водяного пара [1]. Барабанные котлы, вырабатывающие необходимое количество пара, преимущественно работают на жидком или газообразном топливе с постоянной теплотворной способностью.

Для повышения эффективности нефтепереработки целесообразно использовать несертифицированное газообразное топливо, которое образуется на различных стадиях переработки сырой нефти. Однако, состав результирующей газовой смеси неоднороден из-за работы ректификационных установок на различных режимах. В результате этого теплотворная способность газового топлива изменяется во времени.

В рамках данной работы рассматривается возможность использования несертифицированного газообразного топлива для получения технологического пара. Помимо смеси газов, использованных ранее [1], предлагается использовать газообразные отходы — крекинг-колонны. Они представляют собой смесь водорода и легких углеводородов переменного состава. В настоящее время отсутствуют механизмы эффективного использования крекинг-газов и их утилизация сводится к сжиганию на факеле [1], что неэкономично и вредит окружающей среде.

Для решения этой сложной технико-экономической проблемы была синтезирована автоматизированная система управления сжиганием несертифицированного топлива в барабанных котлах. При этом достигаются две важные цели — обеспечивается утилизация крекинг-выбросов и дополнительно вырабатывается **острый пар**, необходимый в технологическом процессе переработки нефти. По предварительным расчетам такая система позволяет снизить затраты на выработку острого пара в два раза.

Для достижения поставленных целей был решен ряд научно-технических задач:

— усовершенствована математическая модель динамики барабанных котлов средней и малой мощности, за счет добавления дополнительного канала для оценки влияния изменения теплотворной способности топлива на общую паропроизводительность;

— определены режимы эффективного сжигания топлива с переменной теплотворной способностью за счет оптимального распределения общей нагрузки между группой барабанных котлов;

© Т.С. ДОБРОВОЛЬСКАЯ, В.Ф. ЛОЖЕЧНИКОВ, 2016

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2016, № 5*

— исследована эффективность разработанной системы в различных тепловых режимах работы.

В качестве типового объекта исследования рассматривается группа барабанных котлов типа ДКВР 20-13-250, работающих на общий паропровод. Предполагается, что на горелочные устройства барабанного котла с постоянной периодичностью поступает несертифицированное газообразное топливо с переменной теплотворной способностью. В свою очередь, группа барабанных котлов должна генерировать необходимое количество пара с постоянным давлением в главном паровом коллекторе в соответствии с заданной тепловой нагрузкой.

Математическая модель динамики данного технологического участка была построена на основе уравнений сохранения энергии и массы: $\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$ и $\sum G_{in} = \sum G_{out}$, где Q_{in} , Q_{out} — количество подводимой и отводимой энергии в системе, Вт; G_{in} , G_{out} — массовый расход вещества на входе и выходе рассматриваемого участка, кг/с, и уравнений теплопередачи энергии излучением и конвекцией: $Q_1 = k_1(T_{in}^2 - T_{out}^2)$ и $Q_2 = k_2 G^2(T_{in}^2 - T_{out}^2)$, где k_1 , k_2 — постоянные коэффициенты, Вт/К⁴ и Вт/((кг/с)0,6*К), соответственно; T_{in} , T_{out} — температура греющего и нагреваемого вещества, К; G — массовый расход нагреваемого вещества, кг/с. Для упрощения расчетов и линеаризации нелинейных зависимостей полученная математическая модель описывает отклонение регулируемых параметров от номинальных значений (номинального расхода пара, давления и др.) [2].

Для учета эффекта от сжигания топлива с переменной теплотворной способностью в математической модели предусмотрен дополнительный канал **по возмущению теплотворной способностью топлива**, которая оказывает влияние на объем дымовых газов (за счет изменения расхода общего воздуха на горелочные устройства), а также на тепловыделение в топочной камере, и, как следствие, изменение общей парогенерации. Эта зависимость представлена в виде обычных алгебраических уравнений:

$$\Delta M = k_{Mp} \Delta \rho_{fuel} + k_{Mf} \Delta Q_{fuel} + k_{MM} \Delta M_{air}, \quad (1)$$

$$\Delta Q_F = k_{QQ} \Delta Q_p^H + k_{Qp} \Delta \rho_{fuel} + k_{Qf} \Delta Q_{fuel} + k_{QM} \Delta M_{air}, \quad (2)$$

где k_{QQ} , k_{Mp} , k_{Qp} , k_{Mf} , k_{Qf} , k_{MM} , k_{QM} — постоянные коэффициенты, определяемые следующими соотношениями: $k_{Mp} = Q_{fuel}$; $k_{Mf} = \rho_{fuel}$; $k_{MM} = 1$; $k_{QQ} = Q_{fuel} \cdot \rho_{fuel}$; $k_{Qp} = Q_{fuel} \cdot Q_p^H + Q_{fuel} \cdot C_{fuel} \cdot \Delta T_{fuel}$; $k_{Qf} = \rho_{fuel} \cdot Q_p^H + \rho_{fuel} \times C_{fuel} \cdot \Delta T_{fuel}$; $k_{QM} = C_{air} \cdot \Delta T_{air}$, где ρ_{fuel} — плотность топлива, кг/м³, C_{fuel} , C_{air} — теплоемкость топлива и воздуха соответственно, Дж/(кг×К); ΔT_{fuel} (ΔT_{air}) — разность температур топлива (воздуха) и окружающей среды, К.

В [2] представлена усовершенствованная математическая модель барабанного котла малой мощности, которая легла в основу модели группы котлов, работающих на общий паропровод. Схема установки группы барабанных котлов малой мощности, работающих на общий паропровод, где К1, К2, ..., Ки, ..., Кn — котлы, с номерами $\bar{1}$, \bar{n} включительно представлена на рис. 1.

Математическая модель общего паропровода описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T_{out} \frac{d\Delta P_{out}}{d\tau} + \Delta P_{out} = k_{PMd} \Delta M_{steam} + \Delta P_{nomp} + k_{PAr} \Delta A_R, \quad (3)$$

где $P_{потр}$, P_{out} — давление пара от потребителя и на выходе паропровода соответственно, Па; $\Delta M_{steam} = \sum M_{steami}$, M_{steam} , M_{steami} — массовый расход пара на

выходе из системы и i -го котла соответственно, кг/с; A_R — проходное сечение регулирующего клапана, м²; T_{out} , k_{PMd} , k_{PAr} — поправочные коэффициенты, определяемые следующими соотношениями:

$$T_{out} = -\frac{M_{fuel}}{p} T \frac{2 \cdot k_R M_D}{A_R^2}; \quad k_{PMd} = -\frac{2 \cdot k_R M_D}{A_R^2}; \quad k_{PAr} = \frac{2 \cdot k_R M_D}{A_R^3}.$$

где p — номинальное давление в паропроводе, Па; M_{fuel} — номинальный массовый расход пара, кг/с; T — постоянная времени, с; $k_R = \frac{\xi_R}{2\rho}$, ξ_R — коэффициент сопротивления регулирующего органа, ρ — плотность пара, кг/м³; $k_L = \left(\frac{\lambda L}{D_{in}} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \times \frac{1}{2\rho S^2}$, L , D_{in} — длина и внутренний диаметр паропровода, м; S — площадь поперечного сечения паропровода, м²; ξ , λ — коэффициент сопротивления и трения по его длине.

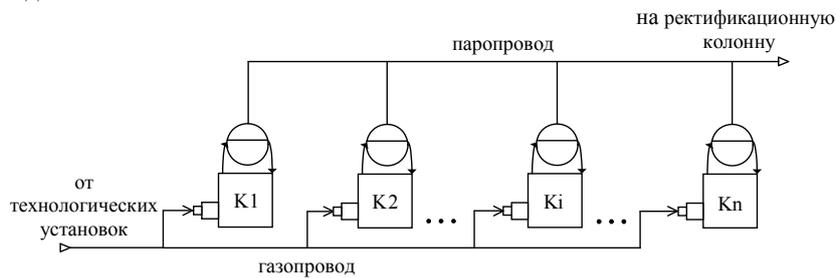


Рис. 1

На малом интервале времени Δt структуру объекта управления можно считать постоянной. На каждом из интервалов времени Δt общая нагрузка распределяется между группой котлов по оптимальному алгоритму [3]. При определении оптимального алгоритма учитываются технические характеристики оборудования: $Q(\tau)$ — вероятность отказа оборудования, $E(\tau)$ — эффективность преобразования энергии. Общая нагрузка распределяется между котлами по одному из трех алгоритмов: первый заключается в равномерном распределении нагрузки между всеми котлами; второй — в использовании одного котла в качестве резервного, при этом между остальными нагрузка распределяется равномерно; третий — в работе каждого последующего котла на максимально возможной нагрузке. Таким образом, распределение тепловой нагрузки между группой котлов для достижения оптимального соотношения эффективности работы всей системы и надежности ее использования при заданной паропроизводительности и переменной теплотворной способности топлива, является также актуальной задачей.

Согласно общепринятой теории вероятность отказа работы системы $Q(t)$ равна вероятности отказа каждой единицы системы $Q_t = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_i \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i$,

где $q_i = 1 - p_i$, вероятность безотказной работы i -го котла, $i = \overline{1, n}$. Нормированная величина отказа группы котлов имеет вид: $Q_n(N, \tau) = \prod_{i=1}^n (1 - p_i(\tau)) / p_{\max}^n$,

p_{\max} — максимально допустимая величина вероятности отказа одного котла. Вероятность безотказной работы i -го котла характеризуется постепенными и случайными величинами массовых явлений $F(\tau)$: $p_i(\tau) = e^{-\lambda \tau} \cdot F(\tau + \Delta \tau) / F(\tau)$, где λ — интенсивность отказов системы. $F(\tau) = 1 / \sigma \sqrt{2\pi} \cdot e^{-(t-M)^2 / 2\sigma^2}$, где t — время безотказной работы (независимая величина), с; M — математическое ожидание безотказной работы, с; σ — среднеквадратическое отклонение, с.

Принимая во внимание, что нагрузка котлов изменяется в течение времени, был введен поправочный коэффициент на рабочую нагрузку $K_N(N)$. Согласно экспериментальным данным эти величины составили $K_N(N) = 0,0375 \cdot e^{3,2842N}$.

Следующим параметром системы является нормируемая величина эффективности работы оборудования, определяющаяся из расчета преобразования энергии: $E_n(N, \tau) = 1 - \eta_e(\tau)$, где η_e — энергетический коэффициент преобразования энергоресурсов при текущей нагрузке каждого из котлов в полезное тепловыделение в топочной камере, рассчитанное с учетом входных E_{in} и выходных E_{out} потоков энергии: $\eta_e(t) = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{out}}{\sum_{i=1}^n E_i^{in}}$.

Обобщенный критерий определяется вектором γ в пространстве координат $(Q_n(N, \tau), E_n(N, \tau))$ с аргументами алгоритма распределения общей нагрузки между группой котлов за время τ : $J(N, \tau) = \sqrt{(w_Q \cdot Q_n(N, \tau))^2 + (w_E \cdot E_n(N, \tau))^2}$, где w_Q, w_E — экспериментально определенные весовые коэффициенты, равные по 0,5.

Для нахождения оптимального алгоритма распределения общей нагрузки между группой котлов необходимо соблюдать оптимальное соотношение в системе: минимизировать вероятность отказа оборудования при максимально возможной эффективности его использования. Для получения оптимального решения необходима минимизация целевой функции: $J(N, \tau) \rightarrow \min_{N \in N_i, \tau \in T}$. Для реше-

ния данной задачи применяется метод динамического программирования Беллмана. Оптимальное распределение общей нагрузки между котлами представлено в виде последовательности нагрузок. На каждом интервале моделирования Δt применяется один из трех алгоритмов распределения нагрузки. В качестве входных параметров используется общая нагрузка системы, а также теплотворная способность поступающего топлива на вход группы котлов.

В результате решения оптимизационной задачи получен набор условий и режимов для управления процессом сжигания топлива с переменной теплотворной способностью, что позволяет реализовать оптимальное распределение тепловой нагрузки для группы барабанных котлов малой мощности.

В результате решения задачи оптимизации были найдены оптимальные алгоритмы распределения нагрузки между группой котлов. Для сертифицированного топлива был использован алгоритм III, заключающийся в том, что котлы работают при максимально возможной нагрузке (задействованы два котла на 80% и 40%). Показатели вероятности отказа оборудования и эффективности его работы составили соответственно $R_n(t) = 1,0732$ и $E_n(t) = -0,016$. Оптимальный критерий составил 1,00739. Для углеводородного топлива достаточно было задействовать один котел **с высокой нагрузкой** (80%), при этом был применен алгоритм III. Показатели вероятности отказа оборудования и эффективности его работы составили соответственно $R_n(t) = 1,0652$ и $E_n(t) = -0,011$. Оптимальный критерий составил 1,00735. Для водородосодержащего топлива был применен алгоритм I (общая нагрузка между котлами составила 220%). Показатели вероятности отказа оборудования и эффективности его работы составили соответственно $R_n(t) = 1,033$ и $E_n(t) = -0,00096$. Оптимальный критерий составил 1,00579.

На рис. 2 показаны затраты топлива на выработку 29 т пара в час. На графике представлены три вида топлива: 1 — сертифицированный газ — природ-

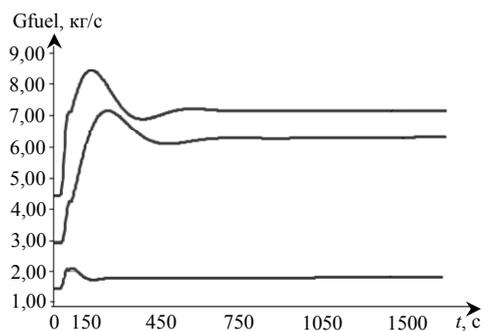


Рис. 2

определить экономию сертифицированного топлива. Так из графика видно, что используя расход 7 кг/с несертифицированного топлива можно добиться экономии 6,25 кг/с сертифицированного природного газа. При работе установки в режиме 20 часов в сутки и 25 дней в месяце, можно добиться экономии 11250 т сертифицированного топлива.

ный газ с теплотворной способностью 35,83 МДж/кг; 2 — несертифицированное углеводородное топливо — 46,31 МДж/кг и 3 водородосодержащее несертифицированное топливо — 78,27 МДж/кг.

На рис. 2 показан вывод системы на оптимальный технологический режим, который начинается после 1200 с непрерывной работы установки. Далее с помощью графика можно

Т.С. Добровольська, В.Ф. Ложечников

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА ЗІ ЗМІННОЮ ТЕПЛОТВОРНОЮ ЗДАТНІСТЮ ДЛЯ НАФТОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Наведено синтезовану автоматизовану систему керування спалюванням несертифікованого палива у барабанних котлах, що працюють на загальний паропровід. Теплове навантаження між групою котлів розподілялось за оптимальним алгоритмом, в основі визначення якого є такі показники як ймовірність безвідмовної роботи обладнання та ефективність використання енергоресурсів. Наведено результати моделювання.

T.S. Dobrovol'ska, V.F. Lozhechnikov

THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE BURNING FUEL PROCESS WITH A VARIABLE CALORIFIC CAPACITY FOR THE REFINING INDUSTRY

A method of solving the optimization problem of the urban district heating is present. Control is carried out on the basis of such elements as: the reliability and efficiency of the used equipment, and the cost of energy. The automated control system of the burning non-certified fuel in the drum boilers that work at the common steam line was synthesized. The heat load is distributed among a group of boilers according to the optimal algorithm. The results of numerical modeling are presented.

1. *Коршаков А.А., Шаммазов А.М.* Основы нефтегазового дела. — Дизайнполиграфсервис, 2005. — 544 с.
2. *Максимов М.В., Ложечников В.Ф., Добровольская Т.С., Бондаренко А.В.* Математическая модель сжигания несертифицированных видов топлива // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — 2.8(68). — С. 44–52.
3. *Добровольская Т.С.* Определение оптимального алгоритма работы оборудования методом динамического программирования // Там же. — 2014. — 5/8(71). — С. 53–58.

Получено 30.12.2015
После доработки 26.05.2016