

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ ГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Ленькова А.В.¹

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77), e-mail: lenkova_av@rambler.ru

Предложена методология разработки энергоэффективных топливных систем предприятий газового комплекса, базирующаяся на декомпозиции объекта, агрегировании элементов, разработке математических моделей и программно-информационного обеспечения. Разработанные математические модели и базы данных по основному и вспомогательному оборудованию реализованы в прикладных программах, что позволило научно обосновать показатели эффективности топливопотребления и генерации горючих технологических газов с учетом многочисленных влияющих факторов. Разработан комплекс энергетических, технологических, технико-экономических показателей, позволяющий с максимальной степенью интеграции определять потенциал повышения эффективности топливной системы в структуре энергетического комплекса предприятия и основные направления его технической реализации во взаимосвязи с внешними источниками энергоснабжения. Разработаны технические решения по повышению энергоэффективности топливных систем ряда установок и производств по подготовке и переработке углеводородного сырья.

Ключевые слова: топливная система, математическая модель, энергетический комплекс, энергоэффективность

THE DEVELOPMENT METHODOLOGY OF ENERGY EFFICIENT FUEL SYSTEMS OF GAS INDUSTRY ENTERPRISES

Lenkova A.V.¹

¹ Saratov State Technical University named after Gagarin U.A. (77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054), e-mail: lenkova_av@rambler.ru

The developed methodology of working out of energy efficient fuel system of gas industry enterprises is suggested. It is based on object decomposition, elements aggregation and a creation of mathematical models and software. The mathematics models of main and auxiliary equipment have been done and implemented in applied software. It allows us to confirm the indicators of efficiency of combustible process gases energy consumption/production with taking into account a lot of influencing factors. A complex of indicators was developed. They are energy, technology, techno-economic indicators. They allow to determinate potential energy efficiency of fuel system as a part of energy complex of enterprises with maximum degree of integration. Other than this complex enables to find and work out the main ways its technical implementation with relationships between external sources of energy supply. Technical solutions of energy efficiency of fuel systems of specific facilities and equipment of gas processing plants are worked out too.

Keywords: fuel system, mathematic model, energy complex, energy efficiency

Топливная система предприятий газового комплекса (ПГК) – добычи, подготовки и переработки углеводородного сырья (УВС) – включает в себя сети вырабатываемых в технологических процессах углеводородных газов дегазации, стабилизации, регенерации, и товарного газа, часть из которого используется в качестве топлива на собственные нужды. Потребление топливного газа (ТГ) определяется различными факторами, основными из которых являются составы и расходы сырьевых и продуктовых потоков, схема технологического процесса, мощности установок, режимы их эксплуатации, степень утилизации горючих отходов (ГО), техническое состояние оборудования, климатические условия региона. Например, удельное потребление газа на собственные нужды предприятий добычи газа и газового конденсата составляет в среднем около 20 м³ на 1000 м³ условной товарной продукции, а для

ПГК перерабатывающего профиля – 17–102 м³ на 1000 м³ сырьевого газа с тенденцией увеличения за последние годы [9]. На ПГК, перерабатывающих гетерогенное УВС и выпускающих разнообразную продукцию, топливная сеть представляет собой наиболее сложно структурированную систему и характеризуется многочисленными внутренними взаимосвязями с технологической системой (ТС) и энергетическим комплексом (ЭК) предприятия. Поэтому реализовать основные высокоэффективные направления развития топливной системы (далее – объекта) ПГК любой технологической топологии возможно только на основе общесистемного подхода и блочно-иерархического принципа.

Разработанная методология позволяет с максимальной степенью интеграции выполнить следующие этапы:

- системный анализ эффективности объекта на основании теоретических, экспериментальных и патентных исследований в области генерации, использования и нормирования потребления ТГ и энергоресурсов (ЭР) в действующих и проектируемых производствах и оборудовании, математического моделирования альтернативных вариантов структуры и режимов функционирования;
- разработка комплекса технических решений по повышению эффективности использования ТГ и ЭР и программы его реализации в соответствии с многофакторной системой показателей и критериев оценки;
- разработка, обоснование и внедрение инвестиционных проектов крупных ЭК в составе отдельных производств и предприятий.

Концепция первого этапа базируется на декомпозиционно-агрегативном подходе к формализации поставленных задач анализа и синтеза, предусматривающем последовательную декомпозицию объекта и выполняемых им функций, и синтез на соответствующих уровнях детализации вариантов структуры и оптимального управления потреблением ТГ и ЭР [1]. К основным задачам, решаемым на этом этапе, относятся:

- разработка операционно-описательных и иконографических моделей с идентификацией внутренних и внешних связей элементов по степени значимости и выделением детерминирующих элементов и связей;
- разработка математического описания компонентов и объекта в целом;
- проведение экспериментальных исследований;
- разработка рациональных алгоритмов расчета и программного обеспечения созданных информационно-аналитических моделей;
- определение оптимальных параметров подсистем ЭК ПГК и комплекса в целом с использованием разработанного программного обеспечения.

испарители, камеры сгорания, котлы, теплообменное оборудование, паровые турбины, электродвигатели.

Анализ приведенной блочно-иерархической структуры (рис.1) показывает, что топливная система ПГК характеризуется наибольшим числом взаимосвязей с ТС и ЭК в процессе генерации и потребления ТГ и ЭР, что нашло отражение в разработанных матричных моделях взаимосвязи газовых потоков и отдельных производств с учетом использования в огнетехнических агрегатах ПГК в качестве топлива как природного газа из сети предприятия, так и некондиционных газовых смесей переменного состава [7].

Общая схема взаимосвязей объекта, его блочно-иерархическая структура и матрица соответствия газовых потоков преобразованы в схему энерготехнологического баланса (ЭТБ) ПГК, отражающую процессы конверсии УВС, рециркуляцию полупродуктов, утилизацию ГО и вторичных энергоресурсов (ВЭР), выработку тепловой и электрической энергии.

Разработанные структурные модели позволили решить ряд последующих задач первого этапа – выполнить математическое описание объекта в соответствии с методологией системного анализа, разработать комплекс показателей (критериев) эффективности и программы их расчета на соответствующих уровнях иерархии.

Математическое описание включает модели функций объекта и модели данных. Функциональные модели представлены так называемыми фазовыми диаграммами состояния объекта, позволяющими формировать оптимальные ЭТБ для ПГК любой технологической топологии. Модели данных – математическое описание потребляющих ТГ огнетехнических и энерготехнологических агрегатов ТС и ЭК. В общем виде модели данных представлены взаимосвязанными программными модулями из логически законченных блоков расчета – гидродинамики, свойств материальных потоков, кинетики процессов, тепло- массообмена, горения и другими – с соответствующими информационными соотношениями.

Разработанные математические модели и базы данных по технологическим печам, факельным установкам, котлам, огневым подогревателям, испарителям были реализованы в прикладных программах [2, 4], что позволило научно обосновать показатели эффективности топливопотребления и генерации горючих технологических газов с учетом многочисленных влияющих факторов [3].

В качестве обобщающего критерия оптимальности структуры и режимов эксплуатации топливной системы ЭК ПГК, а также целевой функции системы управления потреблением / генерацией ТГ принята алгебраическая сумма ранжированных по степени значимости энергетических, технологических, технико-экономических показателей эффективности альтернативных вариантов, приведенных к единому сопоставительному уровню ПГК по производительности, линейке выпускаемой продукции, климатическим и другим условиям [3].

В системе показателей энергетической эффективности использования ТГ и ЭР основными являются удельная энергоёмкость, системная и относительная экономия топлива на выработку тепловой и электрической энергии во внешних источниках энергоснабжения. Удельная приведенная (обобщенная) энергоёмкость $E_{УД}$:

$$E_{УД} = \sum_{j=1}^m \left(E_j - \sum_{n=1}^N \delta_{nj} \cdot E_{nj} \right) / V, \quad (1)$$

где E_j – потребление ТГ и всех видов ЭР при переработке УВС, определяемое из ЭТБ производства j , т у. т.; m – число производств в структуре ПГК; N – число используемых видов ГО и ВЭР; E_{nj} , δ_{nj} – объем ГО и ВЭР, отходящих от производства j , т у. т., и доля их использования в соответствующем варианте структуры ЭК ПГК; V – объем УВС за расчетный период, тыс. м³ или тыс. т.

Энергетическая системная эффективность объекта, ΔB , при его интеграции в ЭК ПГК с электростанциями собственных нужд (ЭСН), с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии, определяется как разность:

$$\Delta B = (B_{\text{сис}} + B_{\text{кот}}) - B_{\text{ТЭЦ}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{сис}}$, $B_{\text{кот}}$, $B_{\text{ТЭЦ}}$ – абсолютные расходы топлива на выработку электроэнергии и теплоты при раздельном производстве электроэнергии в энергосистеме, технологического пара в котельной, комбинированном способе производства электроэнергии и теплоты на ТЭЦ, т у. т.;

$$B_{\text{сис}} = B_{\text{КЭС}} = \mathcal{E}_{\text{выр}} / (\eta_5^{\text{КЭС}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}); \quad (3)$$

$$B_{\text{кот}} = Q_{\text{выр}} / (\eta_{\text{кот}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}); \quad (4)$$

$B_{\text{КЭС}}$ – расход топлива на выработку электроэнергии на тепловой станции конденсационного типа, т у. т.; $\mathcal{E}_{\text{выр}}$, $Q_{\text{выр}}$ – соответственно выработка электрической и тепловой энергии за расчетный период, МДж; $\eta_5^{\text{КЭС}}$, $\eta_{\text{кот}}$ – электрический КПД КЭС и КПД котельной; $Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$ – теплота сгорания условного топлива, МДж/т у. т.

Относительная экономия топлива в системе при интеграции объекта с ЭСН ПГК определяется отношением

$$\Delta \beta = \Delta B / B_{\text{ТЭЦ}}. \quad (5)$$

Из множества технологических показателей эффективности объекта и ЭК ПГК в целом выбраны удельные и относительные параметры, характеризующие ЭТБ, утилизацию горючих отходов и стоков, водный баланс.

Коэффициент рационализации ЭТБ, $K_{p\text{ЭТБ}}$, характеризует возможности его совершенствования за счет использования ГО, ВЭР и сокращения удельного приведенного потребления ЭР от внешних источников

$$K_{p\text{ЭТБ}} = 1 - (E_{\text{удР}}/E_{\text{удБ}}), \quad (6)$$

где $E_{\text{удР}}, E_{\text{удБ}}$ – приведенные удельные энергоемкости для сравниваемых вариантов объекта – оптимального и базового, определяемые по (2).

Аналогичным образом определяются коэффициенты рационализации потребления / генерации отдельных видов ресурсов – топлива ($K_{p\text{В}}$), тепловой ($K_{p\text{Q}}$) и электрической ($K_{p\text{Э}}$) энергии, а также водопотребления ($K_{p\text{W}}$) и водоотведения ($K_{p\text{S}}$), характеризующие возможности организации замкнутых циклов с максимальной утилизацией ГО и сточных вод.

Технико-экономическая эффективность оптимального варианта топливной системы ПГК и технические решения по ее структуре и режимам эксплуатации оцениваются по значениям сравнительного интегрального социально-экономического эффекта (ΔZ_{Σ}) или чистого дисконтированного дохода (ЧДД) и дисконтированному сроку окупаемости инвестиций ($T_{\text{ок}}$). Максимум интегрального эффекта достигается при достижении оптимального значения вектора оптимизирующих переменных \bar{Y} , соответствующего оптимальной структуре топливной системы и ЭК ПГК и оптимальным режимам эксплуатации

$$\Delta Z_{\Sigma} = \sum_{\tau=0}^T (\Delta Z_{\tau}^{\text{пр}} + \Delta Z_{\tau}^{\text{п}} + \Delta Z_{\tau}^{\text{н}} + \Delta Z_{\tau}^{\text{с}}) \cdot (I + E)^{T_0 - \tau} + \Delta \Phi_T \cdot (I + E)^{-T} \xrightarrow{\bar{Y} \rightarrow \text{opt}} \max, \quad (7)$$

где $\Delta Z_{\tau}^{\text{пр}}, \Delta Z_{\tau}^{\text{п}}$ – соответственно, экономия затрат на ПГК при производстве и потреблении ТГ, ЭР, водоснабжении и водоотведении в τ -й год эксплуатации; $\Delta Z_{\tau}^{\text{н}}$ – стоимостная оценка эффекта при сравнении вариантов обеспечения ПГК ЭР от сторонних и собственных источников, отличающихся уровнем надежности технологических потребителей в τ -й год; $\Delta Z_{\tau}^{\text{с}}$ – стоимостная оценка социального эффекта в τ -й год сравниваемых вариантов; $\Delta \Phi_T$ – разность остаточной стоимости основных фондов вариантов на конец расчетного периода времени T ; E – коэффициент приведения затрат и эффектов к единому времени.

С использованием перечисленных показателей (1)–(7) проведен анализ ряда установок, производств и ПГК, который показал, что потенциал повышения эффективности топливных систем составляет 30–40 % от величины потребления ТГ на собственные нужды, а основные направления развития энергоэффективных топливных систем связаны с максимальным использованием технологических горючих газов собственного производства и ГО,

оптимизацией потребления ТГ в ТС и ЭК ПГК, снижением потребления товарного газа в качестве топлива собственных нужд, максимальным использованием ТГ для обеспечения ПГК тепловой и электрической энергией от собственных источников.

Практическая реализация теоретических положений системного анализа и синтеза оптимальных вариантов объекта (второй этап разработки энергоэффективных топливных систем ПГК) осуществлена для предприятий по подготовке и переработке УВС.

Эффективность разработанных технических решений по модернизации структуры и режимов эксплуатации оборудования в системах генерации и использования ТГ в некоторых производствах ПГК иллюстрируется следующими примерами.

Для блоков регенерации абсорбента установок осушки газа реализация предложенной в [5] установки с утилизацией ГО позволит снизить на 34 % удельное потребление топливного газа (в расчете на 1000 м³ осушаемого газа). Для установки производительностью 43,3 тыс. т/год по регенерируемому абсорбенту интегральный эффект от внедрения предложенных технических решений составит около 2 млн. руб. при сроке окупаемости, не превышающем двух лет [8].

Долгосрочные перспективные проекты модернизации топливных систем связаны, в основном, с созданием ЭСН. В рамках таких проектов предложена система энерго- и водоснабжения (СЭВС) с максимальной утилизацией ГО и стоков [6]. Как показали результаты имитационного моделирования, реализация всей схемы СЭВС на крупном ПГК перерабатывающего профиля позволяет снизить удельный годовой расход топлива в системе на выработку 1 МВт тепловой и электрической энергии на 12–14 % [10].

Сопоставительный анализ вариантов топливной системы в структуре СЭВС выполнен по частным критериям эффективности для действующих предприятий подготовки и переработки газа. В результате получены следующие показатели: $K_{p_{ЭТБ}}=0,217-0,316$; $K_{p_{В}}=0,881-0,998$; $K_{p_{W}}=0,902-0,916$; $K_{p_{S}}=0,97-0,974$; $\Delta B=302,5-343,7$ т у. т./МВт·год.

Интегральный эффект, определенный за 10 лет в расчете на 1 МВт суммарной электрической и тепловой мощности в зависимости от типа ПГК составит 8,06–18,01 млн. руб./МВт, срок окупаемости инвестиций – 7,8–9,0 лет.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о целесообразности модернизации топливной системы с внедрением в структуру ЭК ПГК перерабатывающего профиля разработанных установок и СЭВС с утилизацией горючих отходов и стоков.

Выводы:

1. Разработана методология разработки энергоэффективных топливных систем предприятий газового комплекса, базирующаяся на декомпозиции объекта, агрегировании элементов, разработке математических моделей и программно-информационного обеспечения.

2. Предложен комплекс энергетических, технологических, технико-экономических показателей, позволяющий с максимальной степенью интеграции определять потенциал повышения эффективности топливной системы в структуре энергетического комплекса предприятия и основные направления его технической реализации во взаимосвязи с внешними источниками энергоснабжения.

3. Разработаны технические решения по повышению энергоэффективности топливных систем ряда установок и производств подготовки и переработки углеводородного сырья.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК 14.740.11.0107)

Список литературы

1 Концепция повышения эффективности топливной системы энергетического комплекса предприятий добычи, подготовки и переработки газа/ А.В. Ленькова, Е.А. Ларин, И.В. Долотовский// Проблемы теплоэнергетики: сб. науч. трудов. Вып. 2. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2012. – С. 177-182.

2 Ларин Е.А., Долотовский И.В., Долотовская Н.В. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353. 2010.

3 Моделирование и оптимизация технических решений по утилизации горючих отходов установок подготовки и переработки углеводородного сырья/ И.В. Долотовский, А.В. Ленькова, Е.А. Ларин// Вестник СГТУ. – 2012. – №1 (63). Выпуск 1. – С. 64-68.

4 Патент РФ №2011147445/08, 22.11.2011.

5 Патент РФ №2011148186/05, 25.11.2011.

6 Патент РФ №2012109097/06, 11.03.2012.

7 Повышение эффективности систем утилизации горючих ВЭР установок подготовки и переработки углеводородного сырья/ И.В. Долотовский, А.В. Кульбякина// Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 6. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. – С. 147-151.

8 Установка регенерации абсорбента с утилизацией горючих отходов/ А.В. Ленькова, И.В. Долотовский// Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2013. - №8. - С.17-19.

9 Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 440 с.

10 Эффективные системы энерго- и водообеспечения предприятий добычи, подготовки, переработки газа и газового конденсата/ И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, А.В. Ленькова, Н.В. Долотовская// Вестник СГТУ. – 2012. – №3 (67). – С. 127-131.

Рецензенты:

Семенов Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (Министерство науки и образования РФ), г.Саратов.

Хрусталеv В.А., д.т.н., профессор кафедры «Тепловые и атомные электрические станции» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (Министерство науки и образования РФ), г.Саратов.