

УДК 621.039.553.34

К методике сопоставления ядерных энерготехнологических установок

ВЕРХИВКЕР Г. П., КРАВЧЕНКО В. П.

В ядерных энерготехнологических установках (ЯЭТУ) помимо электроэнергии предполагается вырабатывать различные продукты — восстановительные газы, тепло, синтетическое топливо и др. Сопоставление и выбор оптимального варианта и параметров схем таких комплексов весьма затруднительны, так как в каждом варианте вырабатываемые и затрачиваемые продукты могут находиться в различных сочетаниях. Обычно используемый в энергетике показатель — к.п.д. установки — неприменим в том случае, когда производятся различные виды продукции и энергии. Нельзя использовать для анализа и оценки совершенства тех или иных схем и удельный расход энергии на выработанную продукцию.

Термодинамическое сопоставление различных вариантов и схем может быть проведено по коэффициенту термодинамического совершенства установки. Этот показатель, введенный в энергетике для ТЭЦ Д. П. Гохштейном [1], может быть распространен и на ЯЭТУ. Основой является общий показатель качества различных энергоресурсов — их эксергия. Определение эксергии предложено Я. Шаргунтом [2] — «максимальная работа, которую данное вещество (материя или энергоресурс) может совершить в обратимом процессе с окружающей средой в качестве источника даровых тепла и веществ, если в конце этого процесса все участвующие в нем виды материи приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды». Используя это определение, можно вычислить эксергию всех видов полученной продукции и отнести ее к суммарной эксергии затраченных веществ. Это отношение и является коэффициентом термодинамического совершенства ЯЭТУ:

$$\eta_c = \frac{\sum_j E_{п, j}}{\sum_j E_{з, j}} \quad (1)$$

Хотя этот показатель может быть использован и для анализа схемы установки, различие в η_c еще не говорит об экономической целесообразности тех или иных вариантов схемы или параметров. Дело в том, что повышение η_c является следствием уменьшения необратимостей в схеме. Это зачастую связано с повышением капиталовложений и изменением количества получаемых либо затрачиваемых продуктов, имеющих различные стоимости, не связанные с их эксергетической ценностью.

Оценить экономическую целесообразность того или иного варианта ЯЭТУ можно, используя так называемый предельный метод определения

возможных капиталовложений, предложенный в работе [3] для одноцелевых АЭС. Этот метод может быть распространен и на ЯЭТУ, а предельные капиталовложения в тот или иной вариант можно связать с термодинамическим коэффициентом совершенства этого варианта. Метод основан на методе базовой точки [4].

Предположим, что ЯЭТУ вырабатывает электроэнергию, губчатое железо, водород, тепло в виде пара или горячей воды и вторичное топливо, потребляя первичное топливо, метан и железную руду.

Один вариант схемы назовем базовым и все показатели, относящиеся к нему, будем отмечать звездочкой. Показатели, относящиеся к текущему варианту, снабдим индексом i .

Технико-экономическим показателем установки, объединяющим капиталовложения и эксплуатационные расходы, являются годовые приведенные затраты, переменная часть которых для базового варианта составляет

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{пер}}^* = & (p + a) K^* + G_T^* C_T + G_M^* \varphi_M - G_{в.т}^* C_{в.т} + \\ & + G_P^* C_P + (1 + a_1) C_{\text{перс}}^* + p \mathcal{E}_{\text{об}}^*. \end{aligned} \quad (2)$$

Сопоставив текущий вариант с базовым, в общем случае можно записать:

$$\begin{aligned} K_i &= K^* + \Delta, & G_{в.т, i} &= G_{в.т}^* - \delta G_{в.т}; \\ G_{T, i} &= G_T^* - \delta G_T; & G_{в, i} &= G_{в}^* - \delta G_{в}; \\ G_{M, i} &= G_M^* - \delta G_M; & \mathcal{E}_{\text{об}, i} &= \mathcal{E}_{\text{об}}^* - \delta \mathcal{E}_{\text{об}}; \\ G_{P, i} &= G_P^* - \delta G_P; & Q_{\text{теп}, i} &= Q_{\text{теп}}^* - \delta Q_{\text{теп}}; \\ \mathcal{E}_i &= \mathcal{E}^* - \delta \mathcal{E}; & C_{\text{перс}, i} &= C_{\text{перс}}^* - \delta C_{\text{перс}}; \\ G_{ж, i} &= G_{ж}^* - \delta G_{ж}; \end{aligned} \quad (3)$$

Как известно, изменение выработки электроэнергии или тепла либо потребления органического топлива на данном объекте компенсируется соответствующим изменением на замещаемом объекте. Понятие «замыкающих затрат» на электроэнергию, тепло и топливо прочно вошло в технико-экономические расчеты. Представляется, что это понятие может быть распространено и на другую продукцию ЯЭТУ — водород, железо и др. Действительно, увеличение выработки этих продуктов на одной установке должно привести к снижению их выработки на других, менее экономичных, «замыкающих» установках. Вероятно, целесообразно разработать показатели замыкающих затрат на эти виды продукции. С учетом изложенного переменная часть приведенных затрат в те-

кущий вариант схемы ЯЭТУ может быть записана так:

$$\begin{aligned} Z_{\text{пер}, i} = & (p+a)K^* + (p+a)\Delta + (G_T^* - \delta G_T)C_T - \\ & - (G_{\text{в.т}}^* - \delta G_{\text{в.т}})C_{\text{в.т}} + (G_M^* - \delta G_M)\varphi_M + \\ & + (G_P^* - \delta G_P)C_P + (1+a_1)(C_{\text{перс}}^* - \delta C_{\text{перс}} + \\ & + p(Z_{\text{об}}^* - \delta Z_{\text{об}}) + \delta \Delta \varphi_{\text{э}} + \delta Q_{\text{теп}} \varphi_{\text{теп}} + \\ & + \delta G_{\text{в}} \varphi_{\text{в}} + \delta G_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (2) — (4) приняты следующие обозначения: K — капиталовложения в установку; Δ — дополнительные по сравнению с базовым вариантом капиталовложения (значение Δ может быть и отрицательным); G_T, G_M, G_P — годовые расходы первичного топлива, метана, железной руды; $\Delta, Q_{\text{теп}}, G_{\text{в}}, G_{\text{в.т}}, G_{\text{ж}}$ — годовой выход электроэнергии, тепла, водорода, вторичного топлива и железа соответственно; $Z_{\text{об}}$ — оборотные средства; $C_T, C_{\text{в.т}}, C_P$ — стоимость единицы первичного и вторичного топлива и руды; $\varphi_M, \varphi_{\text{ж}}, \varphi_{\text{э}}, \varphi_{\text{теп}}, \varphi_{\text{в}}$ — замыкающие затраты на метан, железо, электроэнергию, тепло и водород; $C_{\text{перс}}$ — годовые затраты на персонал; p — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; a — суммарная норма амортизационных отчислений, расходов на текущий ремонт, и прочих расходов для ЯЭТУ; a_1 — норма отчислений от расходов на заработную плату; δ — в сочетании с определенным обозначением указывает на разницу между соответствующими расходами или затратами в базовом и текущем вариантах. Этот вариант будет иметь такой же экономический эффект, как и базовый, при равенстве переменной части приведенных затрат:

$$Z_{\text{пер}, i} = Z_{\text{пер}}^*. \quad (5)$$

Примем, что для упрощения сопоставления вариантов годовые затраты на персонал равны. Подставив в равенство (5) выражения (2) — (4), после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{(p+a)} (\delta G_T C_T + \delta G_M \varphi_M - \delta G_{\text{в.т}} C_{\text{в.т}} + \delta G_P C_P + \\ & + p Z_{\text{об}} - \delta \Delta \varphi_{\text{э}} - \delta Q_{\text{теп}} - \delta G_{\text{в}} \varphi_{\text{в}} - \delta G_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}}). \end{aligned} \quad (6)$$

При положительном значении Δ сопоставляемый с базовым вариант будет целесообразным, если дополнительные капиталовложения в него не превысят Δ . При отрицательном значении Δ конкурентоспособность сопоставляемого варианта обеспечивается при капиталовложениях, меньших, чем у базового, на Δ .

Связь предельных затрат с коэффициентом термодинамического совершенства установки можно получить следующим образом:

для базового варианта

$$\eta^* = \frac{\sum_j B_j^* l_j}{G_T^* l_T + \sum_j Z_{\text{э}, j}^* l_j}; \quad (7)$$

для сопоставляемого варианта

$$\eta_{\text{с}, i} = \frac{\sum_j B_j^* l_j - \sum_j \delta B_j l_j}{G_T^* l_T - \delta G_T l_T + \sum_j Z_{\text{э}, j}^* l_j - \sum_j \delta Z_{\text{э}, j} l_j}. \quad (8)$$

Здесь B_j^* — годовая j -я полезная продукция; $Z_{\text{э}, j}$ — годовые затраты материальных и энергетических ресурсов (руда, метан и пр.) за исключением первичного топлива; l_j — эксергия единицы соответствующих ресурсов; δB_j и $\delta Z_{\text{э}, j}$ — соответствующая разность между значениями базового и текущего вариантов.

Из выражений (7) и (8) путем несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \delta G_T = & \frac{1}{\eta_{\text{с}, i} l_T} \left[\left(\frac{\eta_{\text{с}, i}}{\eta^*} - 1 \right) \sum_j B_j^* l_j + \right. \\ & \left. + \sum_j \delta B_j l_j - \eta_{\text{с}} \sum_j \delta Z_{\text{э}, j} l_j \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставив уравнение (9) в формулу (6), расшифровав значения δB_j и $\delta Z_{\text{э}, j}$, получим

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{(p+a)} \left[\frac{C_T}{l_T \eta_{\text{с}, i}} \left(\frac{\eta_{\text{с}, i}}{\eta^*} - 1 \right) \sum_j B_j^* l_j + \right. \\ & + \sum_j \delta B_j \left(\frac{C_T l_j}{l_T \eta_{\text{с}, i}} - C_j \right) + p \delta Z_{\text{об}} - \\ & \left. - \sum_j \delta Z_{\text{э}, j} \left(\frac{C_T l_j}{l_T} - C_{\text{э}, j} \right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Однако определение Δ по выражению (10) не упрощает анализ, так как требуется вычислить те же стоимостные показатели, что и при определении Δ по формуле (6), и еще дополнительно η^* и $\eta_{\text{с}, i}$. Только для одноцелевых АЭС при постоянной тепловой мощности реактора выражение (10) может быть представлено в виде

$$\Delta = \frac{1}{(p+a)} \Delta^* \varphi_{\text{э}} \left(\frac{\eta_{\text{с}, i}}{\eta^*} - 1 \right). \quad (11)$$

В этом случае каждому значению $\eta_{\text{с}, i}$ соответствует определенное значение Δ .

Несмотря на подчиненность $\eta_{\text{с}}$ в сложных энерготехнологических установках, его использование оказывается целесообразным. Дело в том, что полезная эксергия определяется как разность между введенной эксергией и ее потерями в каждом узле установки [1]:

$$\sum_j E_{\text{п}, j} = \sum_j E_{\text{э}, j} - \sum_m \Pi_m. \quad (12)$$

Здесь Π_m — суммарная потеря эксергии в m -м узле установки, т. е. разность между суммарной эксергией входящих и выходящих энергоносителей в данный узел. Разделив эту потерю на $\sum_j E_{\text{э}, j}$,

можно получить относительное значение потери эксергии в каждом элементе схемы и таким образом выявить термодинамически наименее со-

вершенные узлы установки. Целесообразность соответствующей модернизации этих узлов, снижающей потерю эксергии в них и повышающей η_c , определяется по Δ .

Экономическая эффективность рассматриваемого варианта по сравнению с базовым составит:

$$\Xi = \frac{1}{3^*} (3_{\text{пер}}^* - 3_{\text{пер}, i}) \cdot 100\%. \quad (13)$$

Подставив выражения (2) и (3), получим

$$\Xi = \frac{1}{3^*} [\delta G_{\text{т}} C_{\text{т}} + \delta G_{\text{м}} \Phi_{\text{м}} - \delta G_{\text{в. т}} C_{\text{в. т}} + \delta G_{\text{р}} C_{\text{р}} + (1 + a_1) \delta C_{\text{перс}} + p \delta Z_{\text{об}} - \delta \Xi_{\text{ф}_a} - \delta Q_{\text{теп}} \Phi_{\text{теп}} - \delta G_{\text{в}} \Phi_{\text{в}} - \delta G_{\text{ж}} \Phi_{\text{ж}} - \Delta_{\text{р}} (p + a)] \cdot 100\%. \quad (14)$$

Здесь $\Delta_{\text{р}}$ — реальные дополнительные капиталовложения в установку. Предлагаемая методика весьма удобна на стадии предпроектных проработок различных схем. Проиллюстрируем использование ее на следующем примере.

Предположим, что в базовом варианте ЯЭТУ $\eta^* = 54,82\%$. В установке вырабатывается губчатое железо (148,8 кг/с), потребителям выдается электрическая мощность 223 МВт и 8,0 МДж/с тепла с горячей водой в количестве 23 кг/с. Затрачено 20,2 кг/с метана, 212,7 кг/с железной руды и 60,55 кг/с воды. Тепловая мощность реактора составляет 1331 МВт. Для расчета эксергии принята температура окружающей среды 298 К. Рассчитанная по работе [2] эксергия метана, железа, руды и воды составляет 46,476; 6,962; 0,127 и 0,05 МДж/кг соответственно. Эксергия тепла, отбираемого от горячей воды, составляет 0,077 МДж/кг. Эксергия ядерного топлива принята равной полной энергии, выделяющейся при использовании топлива в реакторе. При анализе установлено, что максимальные потери эксергии происходят при выбросе части коалесцирующего газа в окружающую среду (газ содержит значительное количество метана и водорода), при превращении ядерной энергии в тепло, передаваемое теплоносителю, и в теплообменных аппаратах в связи с неравновесным теплообменом. Следовательно, достоинства схемы могут быть повышены, если использовать выбрасываемый газ либо изменить параметры теплоносителя и снизить температурные напоры в теплообменных аппаратах.

Эти мероприятия сопряжены с определенными затратами. В результате модернизации схемы (установка дополнительных теплообменников и некоторое изменение параметров) потери эксергии снизились, что привело к повышению электрической мощности до 230 МВт, увеличению выдачи тепла до 9 МДж/с и снижению затрат метана до 19,8 кг/с. Тепловая мощность ВТГР, расходы воды, руды и выход железа не изменились. Коэффициент совершенства установки повысился до 55,58%.

Для определения целесообразности модернизации рассчитаем максимально допустимые затраты. Для центра европейской части СССР примем замыкающие затраты на метан равными 70 руб./т, на электроэнергию — 1,5 коп./кВт·ч и на тепло — 0,15 коп./МДж; использование установленной мощности составляет 7850 ч/год, $p = 0,15$ и $a = 0,1$. Подставив эти значения в формулу (6), получим $\Delta = 6,63$ млн. руб. Таким образом, модернизация будет целесообразна, если капиталовложения на ее осуществление ($\Delta_{\text{р}}$) не превысят 6,6 млн. руб. Приближенная оценка реальных капиталовложений обычно не представляет труда. Экономическая эффективность модернизации может быть оценена по выражению (14). Отметим, что возможны случаи, когда экономически выгодно снижение η_c .

Выводы. Использование коэффициента термодинамического совершенства целесообразно для анализа процессов, проходящих в отдельных элементах сложных схем. Предлагается относительно простой, быстрый метод оценки экономической целесообразности того или иного варианта ЯЭТУ. Необходима разработка показателей замыкающих затрат на продукцию ЯЭТУ (водород, сталь и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гохштейн Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М., Энергия, 1969.
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М., Энергия, 1968.
3. Верхивкер Г. П. — Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 4, с. 293.
4. Арсеньев Ю. Д. Теория подобия в инженерных экономических расчетах. М., Высшая школа, 1971.

Поступила в Редакцию 13.05.80