

АННОТАЦИЯ

В работе проведено исследование изменения характеристик ТЭЦ, в состав тепловой схемы которой интегрирован абсорбционный бромисто-литиевый тепловой насос для утилизации ВЭР. На основе методов планирования пассивного эксперимента и численного исследования тепловой схемы получены аппроксимирующие регрессионные зависимости, с помощью которых просто и быстро возможно определить электрический КПД и удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении на ТЭЦ. Проанализированы полученные результаты с помощью двухмерных сечений. Определена величина утилизируемого потока, на который необходимо выбирать мощность АБТН исходя из технико-экономической целесообразности. Показано изменение термодинамической эффективности энергосистемы для характерных условий работы после внедрения АБТН на крупных ТЭЦ страны.

ANNOTATION

The CHP characteristics changes when lithium bromide absorption heat pump for the utilization of the waste heat is integrated into flow diagram are presented in the article. Based on passive methods of experiment planning and numerical studies of the flow diagram the approximating regression dependence were obtained, through which it is possible to determine the electrical efficiency and specific power output at CHP quickly and easily. The obtained results were analyzed using the two-dimensional sections. The value of heat wastes for choosing absorption heat pump (ABHP) capacity was identified, according to technical and economic feasibility study. The change of the thermodynamic efficiency of the State power system was shown for specific operating conditions when ABHP are the installed at major State CHPs.

Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы

В. Н. Романюк, д. т. н., профессор,

А. А. Бобич, м. т. н., РУП «БЕЛТЭИ», БНТУ

Введение

Общепризнана необходимость повышать эффективность использования природного газа на ТЭС, и в связи с этим осуществляется переход к парогазовым технологиям (ПГУ) [1–7]. Дальнейшее повышение степени использования природного газа на ТЭЦ возможно за счёт снижения рассеяния энергии в тепловых схемах ТЭЦ, например, теплоты охлаждения циркуляционной воды. Проще всего указанное рассеяние блокировать за счёт применения тепловых насосов, а наибольший эффект достигается при использовании абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН) [8–11]. Кроме того, в условиях ОЭС Беларуси с вводом атомной электростанции установка АБТН на ТЭЦ способствует регулированию графика генерации электроэнергии в энергосистеме [12].

Для анализа работы ТЭЦ и выбора характеристик АБТН для интеграции в её состав необходимо иметь энергетические характеристики ТЭЦ, которые, как правило, рассчитываются с помощью громоздких математических моделей, что усложняет оптимизацию параметров тепловой схемы с целью определения экстремумов функций цели. Упрощение нахождения характеристик ТЭЦ актуально для решения обозначенной задачи выбора параметров использования АБТН в составе тепловой схемы ТЭЦ. В представленной работе предлагается решение на основе регрессионных зависимостей, аппроксимирующих громоздкую математическую модель расчёта тепловой схемы ТЭЦ, полученных в результате планирования и реализации пассивного эксперимента. Для осуществления названного исследования предлагается использовать данные режимных карт турбоагрегатов, далее на их базе в результате численных расчётов по математической модели тепловой схемы ТЭЦ определяются значения функций

цели, необходимых для получения соответствующих аппроксимирующих регрессионных зависимостей.

Общие сведения о методах планирования пассивного эксперимента

При пассивном эксперименте значение целевой функции устанавливается из существующих наборов «влияющие факторы – функции цели», которые имеются в реальных, сложившихся условиях эксплуатации конкретных ТЭЦ при существующих тепловых нагрузках. Выбор значений факторов и диапазона их изменений для нахождения соответствующих откликов целевых функций в этом случае имеет место для реальных условий. Последнее обстоятельство и определило выбор типа эксперимента, поскольку создать адекватную экспериментальную установку, требуемую для проведения соответствующего активного эксперимента, невозможно.

Для определения эффекта воздействия конкретного параметра на целевую функцию при проведении пассивного эксперимента согласно литературным данным достаточно 10–15 значений на каждый исследуемый фактор [13]. При этом планирование, проведение и обработка результатов эксперимента состоит из следующих стадий [14]:

- ♦ выбор факторов;
- ♦ кодирование факторов;
- ♦ составление матрицы планирования эксперимента;
- ♦ рандомизация порядка определения и реализация точек плана эксперимента;
- ♦ проверка воспроизводимости опытов и адекватности модели;
- ♦ оценки значимости коэффициентов регрессии.

Выбор критериев оптимизации и определяющих факторов. Выбор функций цели и влияющих факторов

В качестве целевых функций предстоящего численного эксперимента принимаются электрический КПД ТЭЦ и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

Задача планирования эксперимента на первом этапе связана прежде всего с необходимостью сокращения влияющих факторов, число которых, как правило, велико, но вес которых в контексте влияния на функции цели различен. Необходимо отсеять незначимые факторы и оставить те, влияние которых сильное, что сокращает число аргументов

и облегчает весь дальнейший процесс проведения исследований с применением математических методов планирования и анализа как активного, так и пассивного эксперимента [13–15]. Необходимо определить минимальное количество факторов, при котором достигается решение поставленных задач, поскольку с ростом числа факторов сложность моделирования, как известно, растёт в степенной зависимости. Эта задача решается на основании интуиции и опыта исследователя, поскольку нет формальных критериев, на основании которых тот или иной фактор игнорируется или принимается к рассмотрению.

В состав набора аргументов, влияющих на энергетические характеристики выбора АБТН для работы в составе тепловой схемы ТЭЦ, можно включить: тип турбоагрегата; теплофикационную и производственную нагрузки; расход пара в конденсатор; давление пара в производственном отборе; количество теплофикационных отборов; давление в теплофикационных отборах; относительный внутренний КПД паровой турбины; наличие уплотнённой диафрагмы цилиндра низкого давления; температуры прямой и обратной сетевой воды. Из перечисленного набора наиболее значимыми, на наш взгляд, являются:

- ♦ отопительный коэффициент, который определяется, с одной стороны, оборудованием конкретного производителя АБТН, с другой — зависит от соотношения температур утилизируемого и нагреваемого потоков АБТН, обеспечиваемых условиями работы ТЭЦ;
- ♦ величина утилизируемого потока;
- ♦ отопительная нагрузка;
- ♦ производственная нагрузка.

Другие факторы либо имеют незначительное влияние, либо не поддаются изменению и фиксируются на постоянном уровне, например, относительный внутренний КПД турбины и ему подобные, зависящие лишь от конструктивных особенностей оборудования.

В итоге для обеих функций цели в общем виде имеет место зависимость:

$$y = f(D_k, Q_r, Q_n, \mu), \quad (1)$$

где D_k — расход пара в конденсатор, который в основном определяет поток утилизации, и выбор степени его использования определяет мощность АБТН, $t/ч$;

Q_r — теплофикационная нагрузка, $ГДж/ч$;

Q_n — производственная нагрузка, $ГДж/ч$;

μ — отопительный коэффициент АБТН.

Порядок перечисления факторов в соотношении (1) соответствует их значимости, ранжирование проведено исходя из стоящей задачи нахождения наилучшего значения утилизируемого потока при различных тепловых нагрузках и характеристиках АБТН с учётом накопленного опыта при выполнении технико-экономических обоснований модернизации различных ТЭЦ. Наиболее значимым определён расход пара в конденсатор, который является внутренним фактором, допускающим активное изменение, количественное влияние которого на функции цели необходимо установить. Менее значимыми определены отопительная и производственная нагрузки ТЭЦ. Замыкает перечень отопительный коэффициент АБТН. Последние три фактора относятся к пассивным, значения которых определяются внешними условиями.

На следующем шаге эксперимента осуществляется переход от абсолютных значений факторов к относительным, т. е. необходимо преобразовать «...координаты факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку с выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов». Для этого перехода используется соотношение [15]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где x_i — кодированное значение фактора (безразмерная величина);

X_i, X_{oi} — натуральное значение фактора (текущее и на нулевом уровне);

ε_i — натуральное значение интервала варьирования фактора.

Следующим шагом проведения эксперимента является выбор математической модели, который чаще всего осуществляется переходом от простого к сложному, т. е. от линейной зависимости к нелинейной [14]. В нашем случае математическая модель характеризуется нелинейностью исследуемых зависимостей и на основании имеющейся информации аппроксимируется полиномом второго порядка. В этом случае для четырёхфакторного эксперимента уравнение регрессии для отыскания выбранных значений целевых функций имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4, \quad (3)$$

где x_1 — фактор, соответствующий утилизационной нагрузке D_x ;

x_2 — фактор, соответствующий производственной нагрузке Q_n ;

x_3 — фактор, соответствующий теплофикационной нагрузке Q_f ;

x_4 — фактор, соответствующий отопительному коэффициенту АБТН.

Диапазон изменения факторов

Диапазон изменения факторов определён из следующих обстоятельств:

- ♦ тепловые нагрузки обеспечиваются из отборов турбин ПТ-60-130, что характерно для подавляющего числа крупных ТЭЦ Беларуси. Из имеющихся статистических данных их осреднённые значения за отопительный период находятся в диапазоне:

- теплофикационные нагрузки — 50–90 Гкал/ч;

- производственные нагрузки — 60–70 т/ч, что исходя из теплового эквивалента пара производственного отбора соответствует 36–42 Гкал/ч;

- ♦ расход пара в конденсатор для турбин ПТ-60-130 с уплотнённой диафрагмой на техническом минимуме составляет 12 т/ч, максимальный расход имеет место при отключенных П- и Т-отборах и равен 160 т/ч. В реальных условиях эксплуатации ТЭЦ в нормальных режимах работают с минимальными расходами пара в конденсатор, что вполне понятно. Кроме того, при выборе максимального значения данного фактора необходимо учитывать ряд технических ограничений на его величину. При использовании АБТН для нагрева сетевой воды происходит вытеснение нагрузки теплофикационного отбора и снижение расхода пара на турбину. В итоге снижается мощность турбоагрегата, которая ограничена минимальным допустимым значением. С учётом последнего и принятых тепловых нагрузок максимальное значение расхода пара в конденсатор как фактора определён величиной 20 т/ч, а диапазон изменения рассматриваемого фактора составляет 12–20 т/ч;

- ♦ величина отопительного коэффициента АБТН зависит от соотношения температур циркуляционной и сетевой воды и для условий, имеющих место на ТЭЦ Беларуси в отопительный период, находится в диапазоне 1,4–1,8 (рис. 1).

Значение факторов, соответствующее нулевому уровню X_{oi} , определяется как среднее значение фактора в выбранном для него диапазоне. Натуральное значение интервала варьирования фактора ε_i

определяется в зависимости от выбранных границ изменения факторов и плана проведения эксперимента [15, 16].

Выбор плана проведения эксперимента

На практике трудно найти план, который одновременно удовлетворял бы нескольким критериям оптимальности, поэтому в каждом конкретном случае необходим индивидуальный подход. Используются опыт, рекомендации и подобная имеющаяся информация. Как правило, при планировании эксперимента используются планы, которые не требуют большого числа опытов и позволяют получить максимальную информацию в наихудшей возможной ситуации [15]. Рекомендуются ортогональные планы второго порядка, которые позволяют достичь нужного эффекта при умеренном числе опытов. Используемые так называемые звёздные точки значения факторов не должны выходить за границы допустимого диапазона изменения значений факторов. При четырёхфакторном эксперименте для ортогонального плана, который в нашем случае принят к использованию, общее число опытов составляет 25, а величина плеча «звёздных точек» — 1,414 [15]. С учётом последнего определяется натуральное значение интервала варьирования фактора ϵ_i как разница между его значением на нулевом уровне и на границах диапазона, разделённая на плечо «звёздных точек». Уровни варьирования факторов приведены в табл. 1.

Согласно ортогональному плану выбирается соответствующая матрица планирования.

Табл. 1. Уровни варьирования факторов

Факторы	Уровни варьирования				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
x_1 — D_k — расход пара в конденсатор, т/ч	12	13,2	16	18,8	20
x_2 — Q_t — теплофикационная нагрузка, Гкал/ч	50	55,9	70	84,1	90
x_3 — Q_n — производственная нагрузка, Гкал/ч	30	31,8	36	40,2	42
x_4 — μ — отопительный коэффициент АБТН	1,4	1,46	1,6	1,74	1,8

Табл. 2. Очередность нахождения точек плана

Номер расчёта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
№ точки плана	3 ₁	15 ₁	11 ₁	23 ₁	18 ₁	21 ₁	20 ₁	19 ₁	13 ₁	17 ₁	7 ₁	16 ₁	10 ₁	25 ₁	12 ₁	4 ₁	24 ₁	8 ₁	2 ₁	5 ₁	14 ₁
Номер расчёта	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
№ точки плана	9 ₁	22 ₁	6 ₁	1 ₁	5 ₂	12 ₂	14 ₂	4 ₂	22 ₂	6 ₂	24 ₂	20 ₂	10 ₂	2 ₂	18 ₂	21 ₂	1 ₂	17 ₂	11 ₂	23 ₂	7 ₂
Номер расчёта	43	44	45	46	47	48	49	50													
№ точки плана	9 ₂	15 ₂	8 ₂	19 ₂	25 ₂	3 ₂	13 ₂	16 ₂													

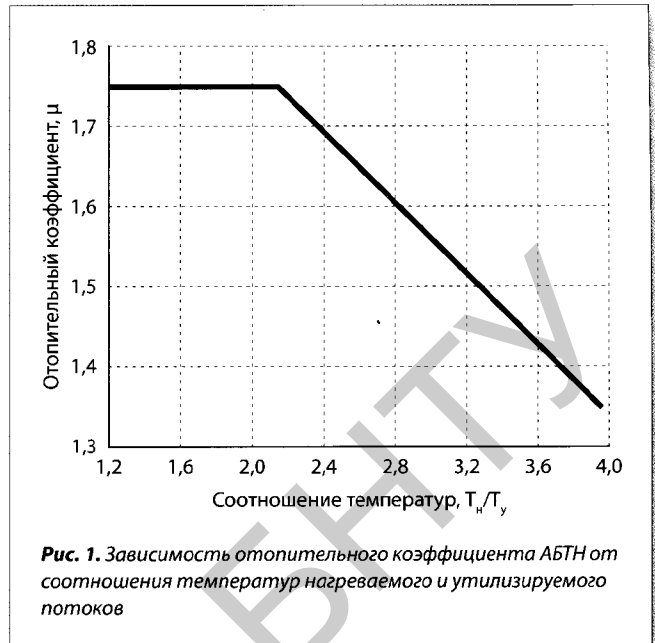
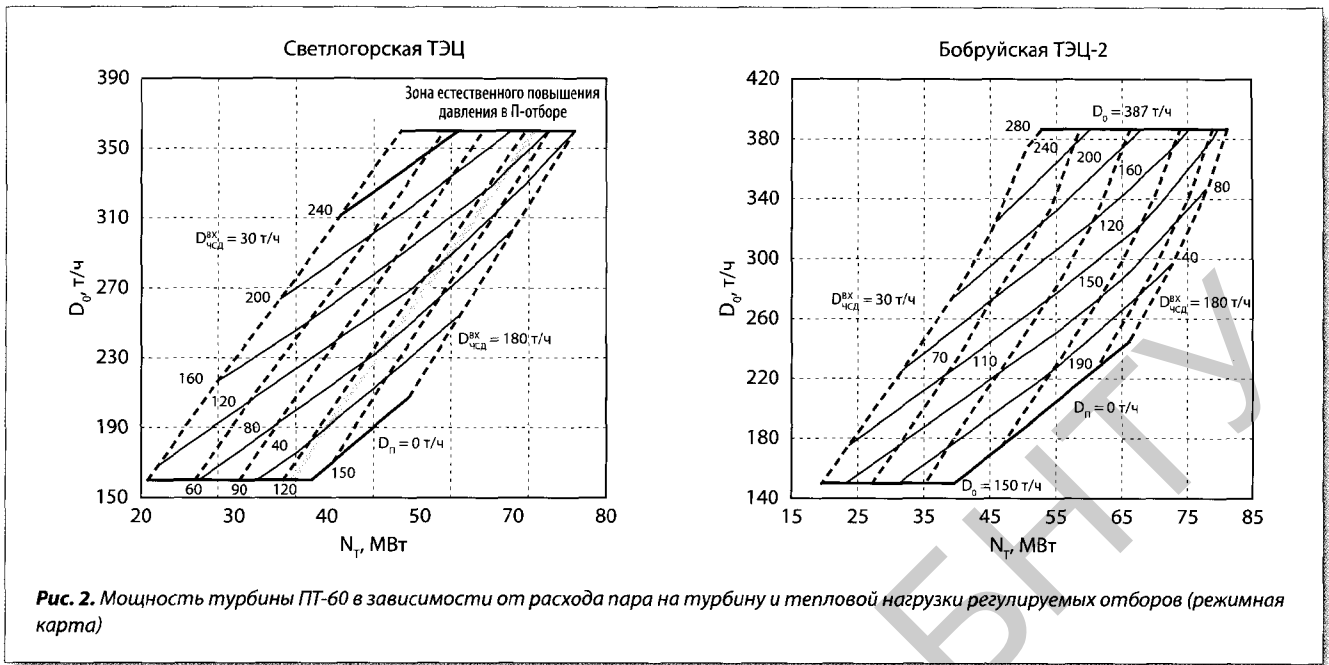


Рис. 1. Зависимость отопительного коэффициента АБТН от соотношения температур нагреваемого и утилизируемого потоков

Нахождение точек плана и коэффициентов уравнений регрессии

Для устранения систематических неучтённых ошибок нахождение точек плана рандомизировалось во времени и проводилось в очередности, устанавливаемой порядком появления номера точки плана в ряду случайных чисел, определяемого соответствующим генератором. Расчёты функций отклика с помощью математической модели и на основе режимных карт в каждой точке плана дублировались для исключения возможных случайных ошибок. Очередность расчетов приведена в табл. 2.



Для статистической оценки результатов, получаемых в ходе пассивного эксперимента, необходимо в каждой точке плана иметь не менее двух наблюдений. Режимные карты для одного типоразмера турбоагрегатов имеют естественные отличия для любых двух данного типоразмера, что связано с индивидуальными особенностями оборудования. В связи с этим для выполнения требуемого условия по обеспечению более одного значения функций отклика каждой точке плана использовались режимные карты работы турбоагрегатов ПТ-60–130 двух ТЭС: Светлогорской и Бобруйской ТЭС-2 (рис. 2). На базе соответствующих данных по их турбоагрегатам с помощью общепринятой математической модели находились значения функций отклика в каждой точке плана. Коэффициенты регрессии определяются по выражениям [15]:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^{18} x_i \cdot \bar{y}_i}{20}, b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{16} x_i \cdot x_j \cdot \bar{y}_i}{16}, b_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^{25} x_i^2 \cdot \bar{y}_i}{8}, \quad (4)$$

$$b'_i = \frac{\sum_{i=1}^{25} \bar{y}_i}{25}, b_0 = b'_0 - (b_{11} - b_{22} - b_{33} - b_{44}). \quad (5)$$

С помощью соотношений (4–5) рассчитываем искомые коэффициенты уравнений регрессии. Уравнение регрессии для электрического КПД ТЭС:

$$\eta = 0,62 + 0,00276 \cdot x_1 + 0,0112 \cdot x_2 + 0,00465 \cdot x_3 + 0,00062 \cdot x_4 - 0,000039 \cdot x_1^2 - 0,00105 \cdot x_2^2 - 0,000232 \cdot x_3^2 - 0,0000335 \cdot x_4^2 - 0,00136 \cdot x_1 \cdot x_2 +$$

$$+ 0,000201 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,00137 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,00307 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,00103 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,000456 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (6)$$

Уравнение регрессии для удельной выработки электроэнергии ТЭС:

$$\omega_q = 387 - 1,45 \cdot x_1 + 22,3 \cdot x_2 - 2,06 \cdot x_3 + 6,5 \cdot x_4 + 0,268 \cdot x_1^2 - 1,07 \cdot x_2^2 + 0,165 \cdot x_3^2 - 1,34 \cdot x_4^2 - 0,99 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,235 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,58 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1,66 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,02 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,51 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (7)$$

Статистический анализ результатов эксперимента

Оценка коэффициентов уравнений регрессии на значимость осуществлялась по методике [15], где последовательно определяется:

- ♦ среднее арифметическое значение критерия оптимизации в точке опыта:

$$\bar{y}_u = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ui}}{n}, \quad (8)$$

где y_{ui} — значение критерия оптимизации для отдельного наблюдения; n — количество наблюдений;

- ♦ дисперсия воспроизводимости:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}, \quad (9)$$

где N — число опытов плана;

- ♦ дисперсия для оценки ошибки среднего:

$$S_{\{\bar{y}\}}^2 = \frac{S_{\{y\}}^2}{n}, \quad (10)$$

♦ дисперсии ошибок коэффициентов регрессии:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\{y\}}^2}{\sum_1^N x_{ij}^2}, \quad (11)$$

где $\sum_1^N x_{ij}^2$ — сумма квадратов в столбцах матрицы планирования.

Доверительный интервал при 95-процентной значимости можно определять [16]:

$$\Delta b_i = \pm 2 \cdot S_{b_i}. \quad (12)$$

Коэффициент считается статистически незначимым, если его значение находится в границах доверительного интервала, и в дальнейших расчётах его значение приравнивается нулю. В результате получены следующие уравнения регрессии:

♦ для электрического КПД:

$$\eta_s = 0,62 + 0,00276 \cdot x_1 + 0,0112 \cdot x_2 + 0,00465 \cdot x_3 - 0,00307 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (13)$$

♦ для удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении:

$$\omega_q = 387 - 1,45 \cdot x_1 + 22,3 \cdot x_2 + 6,5 \cdot x_4. \quad (14)$$

Оценка адекватности (пригодности) модели проводилась с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (15)$$

где S_{ad}^2 — дисперсия адекватности.

Величина дисперсии адекватности определяется из выражения:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N n \cdot (\bar{y}_{ui} - y_{up})^2}{N - \frac{(k+2)(k+1)}{2}}, \quad (16)$$

где y_{up} — значение критерия по уравнению регрессии.

Оценка на адекватность показала, что модель с доверительной вероятностью 95 % пригодна для использования, так как табличное значение критерия Фишера при числе степеней свободы для меньшей дисперсии (25) и для большей дисперсии (10) равно 2,27. Расчётные значения данного критерия по итогам статистической обработки меньше табличного, что требуется для подтверждения адекватности, и равны:

- ♦ 0,983 — для уравнения регрессии электрического КПД;
- ♦ 2,07 — удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Оценка ошибок для точек плана расчётных значений функций отклика показала, что результаты расчётов по математической модели и по аппроксимирующим уравнениям регрессии различаются

на величины, не превышающие в относительном выражении 2,4 % для электрического КПД и 5,2 % для удельной выработки электроэнергии, что соответствует погрешности исходных данных и использованной математической модели. Кроме того, выявлялась ошибка результатов для 15 точек, лежащих в исследуемой области, положение которых определялось с помощью генератора случайных чисел.

Преобразование уравнений регрессии, построение двухмерных сечений и их анализ

Для лучшего восприятия результатов при проведении дальнейшего анализа осуществлён переход к именованным величинам с помощью следующих соотношений:

1) для свободного члена:

$$\delta_0 = b_0 - \sum_{i=1}^4 \frac{b_i c_i}{\varepsilon_i} + \sum_{i=1, j=1}^4 \frac{b_{ij} c_i c_j}{\varepsilon_i \varepsilon_j}, \quad (17)$$

2) для коэффициентов линейных членов:

$$\delta_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} - 2b_{ii} \frac{b_i}{\varepsilon_i^2} - \sum_{i, j=1+1}^4 \frac{b_{ij} c_j}{\varepsilon_i \varepsilon_j}, \quad (18)$$

3) для коэффициентов нелинейных членов:

$$\delta_{ij} = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_j}. \quad (19)$$

где $1 \leq i \leq j \leq 4$.

В результате определяются уравнения регрессии в именованных величинах для расчёта:

♦ электрического КПД:

$$\eta_s = 0,382 + 0,00098 \cdot D_k + 0,00263 \cdot Q_r + 0,00467 \cdot Q_n - 0,000051 \cdot Q_r \cdot Q_n; \quad (20)$$

♦ удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении:

$$\omega_q = 211 - 0,51 \cdot D_k + 1,57 \cdot Q_r + 45,7 \cdot \mu. \quad (21)$$

Анализ полученных соотношений для аппроксимации целевых функций наиболее удобно осуществить с помощью двумерных сечений гиперповерхности, представленных уравнениями регрессии. Для построения двумерных сечений гиперповерхностей изменяются значения двух выбранных факторов, при этом оставшиеся факторы фиксируются на тех или иных значениях числовых комбинаций. Для соответствующих расчётов и построений использовались стандартные функции пакета Mathcad (рис. 3–5).

Из полученных двухмерных сечений регрессионных зависимостей следует, что электрический КПД и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении интерпретируется достаточно простой гиперповерхностью, более простой, чем предполагалось на начальном этапе.

В отношении электрического КПД доминирующим фактором является теплофикационная нагрузка,

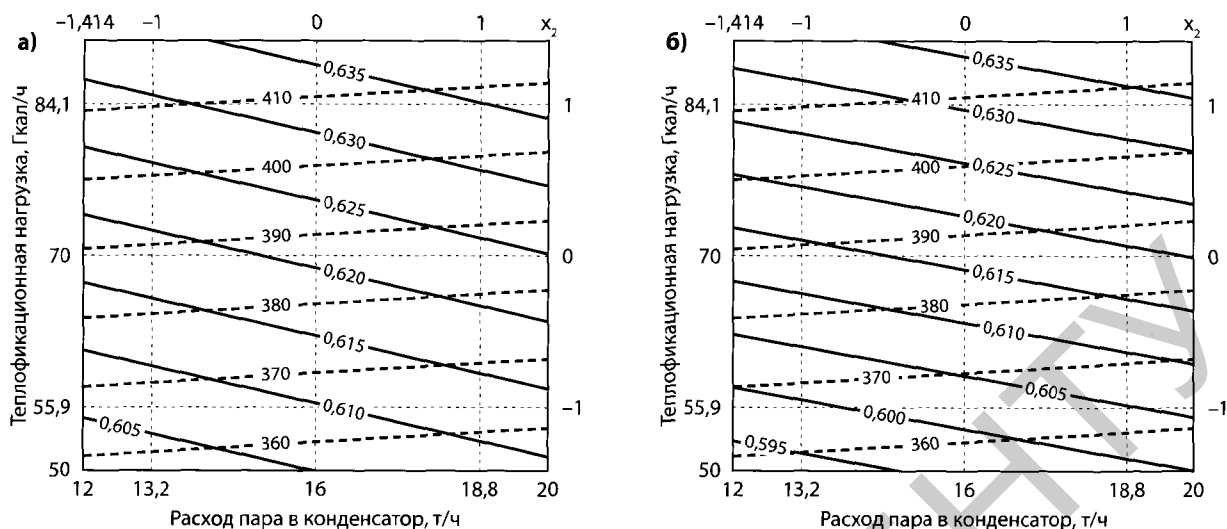


Рис. 3. Изолинии изменения электрического КПД и УВЭ при постоянных производственной нагрузке и отопительном коэффициенте АБТН: а) $Q_n = 36$ Гкал/ч ($x_3 = 0$), $\mu = 1,6$ ($x_4 = 0$); б) $Q_n = 31,8$ Гкал/ч ($x_3 = -1$), $\mu = 1,6$ ($x_4 = 0$)

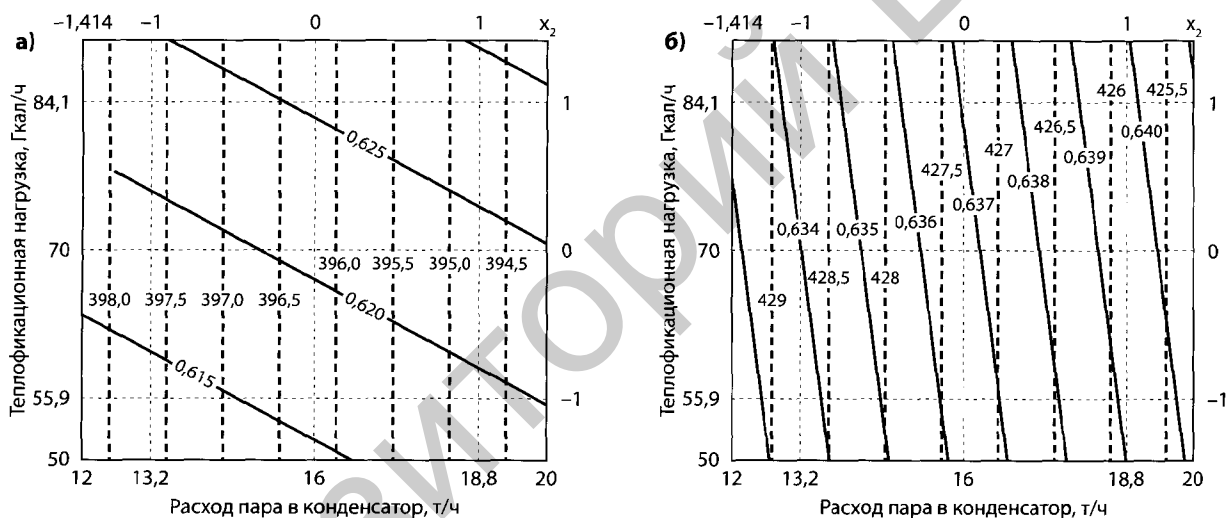


Рис. 4. Изолинии изменения электрического КПД и УВЭ при постоянной теплофикационной нагрузке и отопительном коэффициенте АБТН: а) $Q_m = 70$ Гкал/ч ($x_2 = 0$), $\mu = 1,8$ ($x_4 = 1,414$); б) $Q_m = 90$ Гкал/ч ($x_2 = 1,414$), $\mu = 1,8$ ($x_4 = 1,414$)

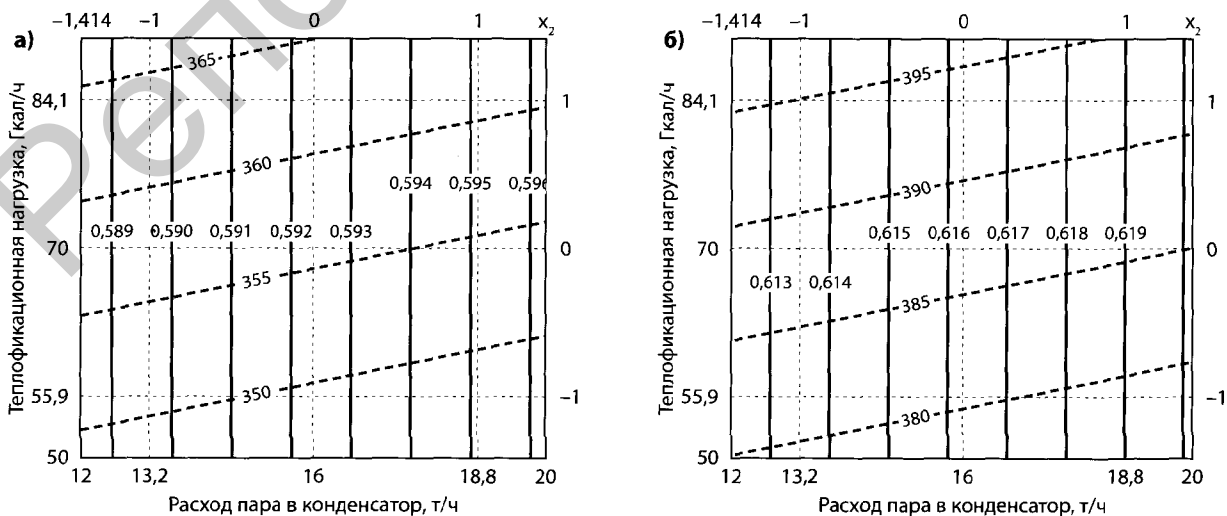


Рис. 5. Изолинии изменения электрического КПД и УВЭ при постоянных теплофикационной и производственной нагрузках ТЭЦ: а) $Q_m = 50$ Гкал/ч ($x_2, x_3 = -1,414$), $Q_n = 30$ Гкал/ч; б) $Q_m = 70$ Гкал/ч ($x_2 = 0$), $Q_n = 31,8$ Гкал/ч ($x_3 = -1$)

несколько меньшее влияние оказывает изменение производственной нагрузки и величины утилизируемого потока. Вклад отопительного коэффициента АБТН менее значим. Во всех случаях увеличение потока утилизации обеспечивает рост электрического КПД (снижение УРТ), которые при одинаковом утилизируемом потоке тем больше, чем выше теплофикационная и производственная нагрузки. При снижении производственных нагрузок и умеренной отопительной нагрузке влияние утилизируемого потока максимально, и в этой зоне особенно важно для уменьшения расхода топлива стремиться к максимальному увеличению утилизируемого потока. Можно отметить монотонность изменения КПД с ростом всех факторов, при этом влияние отопительного коэффициента АБТН практически не зависит от нагрузок и теплоты потока утилизации.

Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении практически не зависит от потока утилизации при фиксированной производственной нагрузке и определяется в основном теплофикационной нагрузкой. Если же производственная нагрузка изменяется, то синхронно с ней необходимо изменять и поток теплоты утилизации: снижение нагрузки должно сопровождаться ростом потока теплоты утилизации для сохранения удельной выработки, и наоборот. Соотношение влияний зависит от уровня теплофикационной нагрузки. При постоянных малых и умеренных производственных нагрузках утилизируемый поток практически не влияет на удельную выработку и зависит от величины теплофикационной нагрузки.

Эффект от внедрения АБТН на ТЭЦ

Поскольку ТЭЦ является неотъемлемой частью энергосистемы и изменение её характеристик влечёт за собой изменение работы и показателей всей системы, определение эффективности установки АБТН необходимо проводить с учётом результатов сопоставления системной экономии топлива и капиталовложений в реализацию проекта.

Тепловая мощность АБТН определяется значением мощности потока утилизируемой теплоты и отопительным коэффициентом. На рис. 6–8 приведены результаты расчёта изменения сроков окупаемости и годовой потребности в природном газе для энергосистемы и для ТЭЦ с турбоагрегатом ПТ-60–130 в случае установки на последней АБТН, тепловая мощность которого зависит от двух факторов: отопительного коэффициента и величины

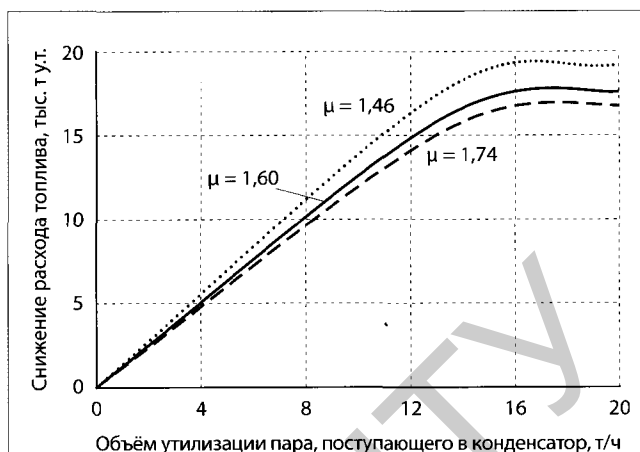


Рис. 6. Снижение годового расхода условного топлива на ТЭЦ в результате установки АБТН в зависимости от его основных характеристик

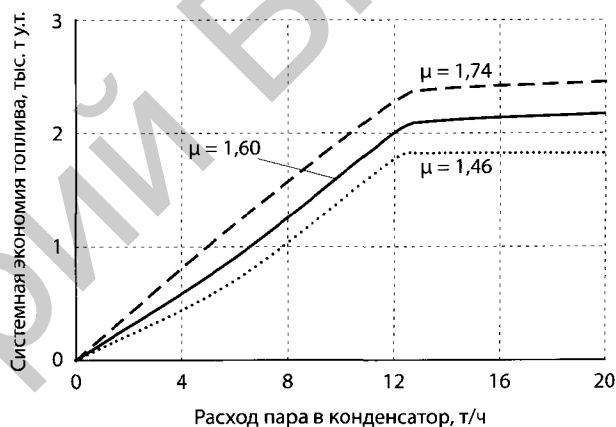


Рис. 7. Системная годовая экономия условного топлива в результате установки на ТЭЦ с ПТ-60–130 АБТН в зависимости от его основных характеристик при блоке ПГУ-400 в качестве замещающего системного источника

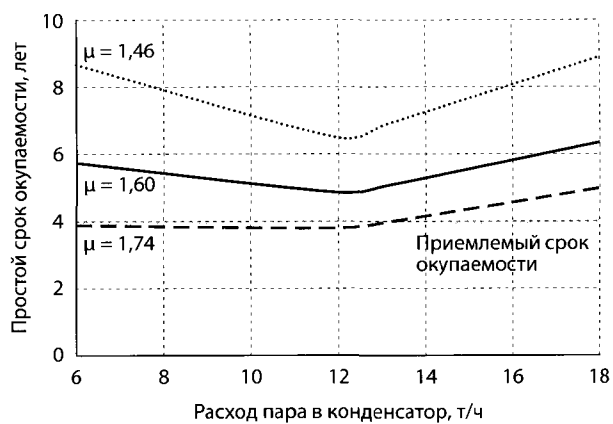


Рис. 8. Простой срок окупаемости установки на ТЭЦ с ПТ-60–130 АБТН в зависимости от его основных характеристик

утилизируемого потока охлаждения циркуляционной воды, которая в большой степени коррелируется с расходом пара в конденсаторе.

Из анализа приведенных результатов (рис. 6–8) следует, что для выполнения экономических требований АБТН должен выбираться с отопительным коэффициентом не ниже 1,7, и в качестве определяющего теплового потока утилизации необходимо принимать его величину, соответствующую пропуску пара в конденсатор ≈ 12 т/ч, что соответствует техническому минимуму расхода пара в конденсатор для рассматриваемого турбоагрегата.

Термодинамическая оценка энергоэффективности ОЭС Беларуси

В заключение остановимся на оценке термодинамической эффективности энергосистемы с помощью эксергетических показателей для различных характерных условий в настоящее время и ближайшей обозримой перспективе с ТЭЦ без утилизации и с утилизацией ВЭР с помощью АБТН.

В отношении источников преобразованных потоков вопрос энергетической оценки решён. С намного более сложным комплексом, каким является энергосистема страны, ситуация сложнее. Тем не менее решение может быть получено в количественном виде с помощью единственного показателя. Для подобных сложных систем целесообразно обратиться к термодинамической оценке с помощью эксергетических КПД [17–19]. Такой подход к оценке сложных систем известен, но в отношении энергосистемы Беларуси не применялся. Предлагается использовать термодинамическую оценку энергосистемы страны с помощью эксергетического КПД, рассмотрев её в развитии от текущей ситуации до ввода АЭС и возможного последующего совершенствования. Оценка энергетической эффективности энергосистемы может быть проведена с помощью термодинамического анализа на базе эксергетического КПД [17–21]:

$$\eta_e = \frac{\sum W_a + \sum E''_{\text{qp}} + \sum E''_{\text{qcv}}}{\sum E'} \quad (22)$$

где W_a — электроэнергия, полученная потребителями, ГВт·ч;

E''_{qp} , E''_{qcv} — соответственно эксергия потоков теплоты котельных и ТЭЦ энергосистемы, используемых внешними потребителями с паровым и водяным теплоносителями, ГВт·ч;

E' — эксергия топлив, определяемая в соответствии с общепризнанными методиками [17–21], ГВт·ч.

Эксергия потоков теплоты с паровым (E''_{qp}) и водяным (E''_{qcv}) теплоносителями определяется из выражения:

$$E''_q = Q \cdot \tau_c = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (23)$$

где Q — теплота, отпущенная с паровым или водяным теплоносителем, ГВт·ч;

τ_c — эксергетическая температурная функция;

T_0 — температура окружающей среды, °С;

T — средняя температура теплоносителя, °С.

Количественная оценка термодинамической эффективности энергосистемы в существующем положении с пуском АЭС и электрокотлов и дальнейшего её развития в соответствии с рассмотренными вариантами совершенствования структурных схем крупных ТЭЦ Беларуси для межотопительного и отопительного периодов и за год в целом дана в табл. 3.

Табл. 3. Эксергетический КПД альтернативных вариантов в %

Варианты	Межотопительный период	Отопительный период	За год в целом
Существующий	39,4	37,7	38,3
АЭС + электрокотлы	38,3	36,2	37,0
АЭС + электрокотлы + АБТН	38,3	36,6	37,3

Из анализа данных табл. 3 следует, что ввод АЭС снижает термодинамическую эффективность энергосистемы с 38,3 до 37,0 %, что вполне понятно и показывает несовпадение термодинамического и экономического экстремумов, поскольку замещение дорогого природного газа ядерным топливом экономически целесообразно. Установка АБТН на ТЭЦ обеспечивает увеличение термодинамической эффективности энергосистемы на 0,3 %, с чем связано дальнейшее снижение потребления природного газа. Надо отметить, что имеет место комплексное решение, когда в дополнение к изложенному достигается снижение остроты проблемы вращающегося резерва и регулирования мощности генерации электроэнергии.

Выводы

1. На базе пассивного эксперимента получены уравнения регрессии, позволяющие определить электрический КПД и удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ с турбоагрегатами ПТ-60-130 в зависимости от тепловых нагрузок, теплоты утилизируемого потока и отопительного коэффициента АБТН.

2. Проведён численный анализ полученных моделей, позволивший определить монотонность изме-

нений указанных целевых функций в зависимости от тепловых нагрузок, теплоты утилизируемого потока и отопительного коэффициента АБТН: чем больший расход пара в конденсатор при прочих равных условиях, тем выше электрический КПД и меньше удельная выработка электроэнергии на отпускаемом потоке теплоты от ТЭЦ. Среди исследованных аргументов ключевым является отопительная нагрузка.

3. Установка на ТЭЦ АБТН целесообразна энергетически и экономически: простой срок возврата инвестиций не превышает четырех лет, что соответствует экономическим требованиям.

4. Установка АБТН на ТЭЦ отвечает требованиям энергосистемы к генерирующим источникам, а именно способствует улучшению условий для обеспечения графика её нагрузок за счёт уменьшения удельной выработки электроэнергии при сохранении тепловых нагрузок без передачи их пиковым источникам прямого сжигания топлива.

5. Проведённый термодинамический анализ работы энергосистемы страны с ТЭЦ без утилизации ВЭР и с их утилизацией с помощью АБТН указывает на улучшение термодинамической эффективности энергосистемы при установке на ТЭЦ АБТН. ■■■

Литература

1. Рукес, Б. Современные технологии и перспективы выработки энергии на основе органических топлив / Б. Рукес, Р. Тауд // Газотурбинные технологии. — 2003. — № 5. — С. 6–10.
2. Попырин, А. С. Эффективность технического перевооружения ТЭЦ на базе парогазовых установок / А. С. Попырин, М. Д. Дильман // Теплоэнергетика. — 2006. — № 2. — С. 34–39.
3. Воронин, В. П. Пути технического перевооружения электроэнергетики / В. П. Воронин, А. А. Романов, А. С. Земцов // Теплоэнергетика. — 2003. — № 9. — С. 2–6.
4. Новикова, Т. В. Масштабы внедрения ПГУ и ГТУ в среднесрочной перспективе / Т. В. Новикова, И. В. Ерохина, А. А. Хорошев // Газотурбинные технологии. — 2005. — № 9. — С. 6–9.
5. Ольховский, Г. Г. Масштабы и особенности применения газотурбинных и парогазовых установок за рубежом / Г. Г. Ольховский // Теплоэнергетика. — 2002. — № 9. — С. 72–77.
6. Ильин, Т. Е. Особенности выбора газовых турбин при реконструкции ТЭЦ / Т. Е. Ильин // Газотурбинные технологии. — 2007. — № 4. — С. 2–6.
7. Чубайс, А. Б. Энергетика: тормоз или локомотив развития экономики? / А. Б. Чубайс // Выступление и пресс-конференция Председателя Правления РАО «ЕЭС России» А. Б. Чубайса «Новая инвестиционная программа Холдинга РАО «ЕЭС России». — М.: 13. 02. 2007. — Режим доступа: <http://www.raoees.ru/ru/news/speech/confer/prez/130207abc.ppt>.
8. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и Менеджмент. — 2013. — № 4–5. — С. 7–10.
9. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина, А. А. Бобич и др. // Энергия и Менеджмент. — 2013. — № 1. — С. 14–19.
10. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. — 2015. — № 1. — С. 13–20.
11. Романюк, В. Н. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединённой энергосистемы Беларуси / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — 2015. — № 4. — С. 31–43.
12. Романюк, В. Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. — 2015. — № 6. — С. 2–7.
13. Долгов, Ю. А. Методы обработки результатов пассивного эксперимента: учеб. пособие / Ю. А. Долгов, Т. В. Шестакова. — К.: Кишиневский политехнический институт им. С. Лазо, 1989. — 32 с.
14. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов: учеб. пособие / В. Н. Шестаков. — Омск: СибАДИ, 2007. — 95 с.
15. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров — М.: Лёгкая индустрия, 1974. — 262 с.
16. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) / В. З. Бродский [и др.]. — М.: Металлургия, 1982. — 752 с.
17. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 288 с.
18. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. — М.: Энергия, 1973. — 296 с.
19. Сорин, М. В. Методика однозначного определения эксергетического КПД технических систем преобразования энергии и вещества / М. В. Сорин, В. М. Бродянский // Изв. вузов. Энергетика. — 1985. — № 3. — С. 78–88.
20. Сажин, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. — М.: Химия, 1992. — 208 с.
21. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела — М.: Энергия, 1968. — 273 с.