

3 38

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

---

Аспирант Н. Д. ЗАХАРОВ

На правах рукописи

**Термодинамический анализ  
рабочих процессов топливных  
электростанций**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
д-р техн. наук, профессор ГОХШТЕЙН Д. П.

ОДЕССА  
1966

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

---

Аспирант Н. Д. ЗАХАРОВ

На правах рукописи

Термодинамический анализ  
рабочих процессов топливных  
электростанций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
д-р техн. наук, профессор ГОХШТЕЙН Д. П.

Переучет 19.88

V 001521  
С.В. 1521

Одесский технологический  
институт  
им. М. В. Ломоносова

ОДЕССА  
1966

---

---

---

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам автореферат диссертационной работы аспиранта Н. Д. Захарова на тему «Термодинамический анализ рабочих процессов топливных электростанций», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится „27“ мая 1966 г.

Ваши отзывы и замечания в 2-х экз. просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, 112, Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета  
института, инженер

(Л. А. Запорожец)

На современном этапе развития энергетики большое значение приобретает постоянное повышение уровня эксплуатации электрических станций, которое во многом определяется качеством применяемой методики контроля и анализа экономичности.

Пока еще не отработана удобная система коэффициентов, единообразно характеризующих совершенство рабочих процессов отдельных звеньев сложных энергосистем. Достаточно сказать, что термодинамический анализ даже конденсационных электрических станций с развитой регенерацией, основанный на использовании только энергетических балансов, сопряжен с известными трудностями. Они в значительной мере возрастают, когда речь идет об установках с комбинированным производством электроэнергии и тепла.

В результате, в среде энергетиков до сих пор нет единого мнения относительно наиболее целесообразной системы технико-экономических показателей ТЭЦ.

Объективной основой унификации термодинамических характеристик процессов и установок является совместное применение обоих начал термодинамики. Новый термодинамический метод исследования, известный под названием эксергетического, предоставляет в этом плане широкие возможности.

## **1. Основы термодинамического анализа процессов и установок**

Хотя основные теоретические положения эксергетического метода были развиты Клаузиусом и Гюи еще в конце прошлого века (1876 и 1889 гг.), только в последнее десятилетие он получил довольно широкое распространение, в первую очередь, благодаря работам Кинана Дж., Гохштейна Д. П., Андрищенко А. И., Бродянского В. М., Ранга З., Грассмана П. и др.

Существуют два направления в эксергетическом методе, связанные с различными областями исследования.

Анализ разомкнутых процессов основан на использовании понятия эксергии (работоспособности) рабочего тела

$$Ex = I_1 - I_0 - T_0(S_1 - S_0)$$

и понятия эксергетической потери

$$P = T_0 \Delta S_c.$$

Здесь  $T_0$  — температура окружающей среды;

$I_1$  и  $S_1$  — энтальпия и энтропия тела в исходном состоянии;

$I_0$  и  $S_0$  — то же при равновесии с окружающей средой;

$\Delta S_c$  — изменение энтропии адиабатически изолированной системы, включающей рассматриваемое рабочее тело и окружающую среду.

По смыслу эксергия является максимально возможной полезной работой в процессе **обратимого** достижения рабочим телом состояния равновесия с окружающей средой, а эксергетическая потеря эквивалента работе, недополученной вследствие **необратимого** протекания процесса.

При анализе циклов используется понятие эксергии количества тепла

$$Ex_Q = Q - T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q}{T},$$

которая представляет собой работу полностью **обратимого** цикла с холодным источником — окружающей средой.

Строгое разграничение предпочтительных областей исследования позволит всегда сохранить простоту и чистоту анализа.

В этой связи уместно остановиться на т. н. методе потоков эксергии, основоположником которого является Кинан Дж. Метод оперирует исключительно понятием эксергии рабочего тела. Его характерной чертой является обязательное отображение происходящего в силу разных причин изменения эксергии всех материальных потоков в тепломеханической установке. Диаграммы потоков эксергии часто отличаются повышенной сложностью.

Анализ той же установки с помощью метода потерь, развитого проф. Гохштейном Д. П., сводится к сопоставлению эксергии подведенного тепла и потерь возможной работы в отдельных элементах. Изменение эксергии рабочего тела выпадает из рассмотрения, что значительно упрощает расчетную сторону анализа и делает его очень наглядным.

Широкое внимание к эксергетическому методу, как средству термодинамического исследования процессов и установок, обуславливается следующими причинами.

Анализ реальных процессов по эксергетическим показателям заключается в сравнении их с предельно совершенными, обратимыми процессами в тех же граничных условиях. В результате такого сравнения удается просто оценить степень недоиспользования энергетических ресурсов системы из-за наличия необратимостей. Одно это делает эксергетические показатели наиболее важными в термодинамическом и практическом смысле.

Второе ценное свойство эксергетических характеристик заключается в их универсальности, которая позволяет единообразно анализировать самые различные процессы и установки, включая теплоэлектроцентрали.

В-третьих, эксергетический метод дает возможность, используя свойство аддитивности энтропии, подробно изучать отдельные этапы процессов или элементы установок и выявлять основные очаги эксергетических потерь. Тем самым он способствует выбору наиболее рациональных путей совершенствования рабочих процессов.

Применение эксергетического метода для анализа работы электрических станций в первую очередь предполагает правильную оценку первичных ресурсов, которыми чаще всего является эксергия топливно-воздушной смеси. Расчет последней, если используется газообразное топливо, производится по формуле:

$$Ex = I_1 - I_0^* - T_0(S_1 - S_0^*) + \Phi_0^* - \Phi_0,$$

где

$I_0^*$ ,  $S_0^*$  и  $\Phi_0^*$  — энтальпия, энтропия и изобарно-изотермический потенциал системы топливо—воздух при термомеханическом равновесии с окружающей средой, являющиеся величинами аддитивными;  $\Phi_0$  — изобарно-изотермический потенциал системы после завершения всех химических реакций и вторичных процессов (выпадение росы, кислотообразование и др.).

Как правило, эксергия системы газообразное топливо—воздух, находящейся в термомеханическом равновесии с окружающей средой, меньше низшей теплоты сгорания, причем в некоторых случаях расхождение может достигать 10%. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание, тем более, что некоторые авторы рекомендуют считать эксергию такой системы равной  $Q_H^c$ .

Для расчета эксергии системы твердое топливо—воздух можно предложить следующую схему. Вначале компоненты системы без перемешивания и химического взаимодействия обратимо приводятся в состояние равновесия с окружающей

средой по температуре и давлению. Максимально возможная полезная работа на этом этапе равна

$$L'_1 = \int_{T_0}^{T_{\text{тл}}} c dT - T_0 \int_{T_0}^{T_{\text{тл}}} \frac{cdT}{T} + G_0 [i_1 - i_0 - T_0 (s_1 - s_0)],$$

где

$c$  — истинная теплоемкость топлива;  
 $T_{\text{тл}}$  — исходная температура топлива;  
 $G_0$  — теоретический расход воздуха.

Затем с помощью полупроницаемых перегородок Вант—Гоффа производится обратимое разделение воздуха на кислород и азот, сопровождающееся затратой работы

$$L'_2 = G_0 T_0 R \sum r_i \ln r_i.$$

На третьей стадии процесса происходят обратимые изобарно-изотермические реакции взаимодействия горючих элементов топлива с чистым кислородом. Поскольку механизм такого взаимодействия в настоящее время изучен совершенно недостаточно, приходится в первом приближении принимать схему Дюлонга, согласно которой топливо представляет собой механическую смесь элементов, а кислород полностью связан с водородом. Тогда

$$L'_3 = 0,01 \left[ C^p \Delta \Phi_C + \left( H^p - \frac{O^p}{8} \right) \Delta \Phi_{H_2} + S_{op}^p \Delta \Phi_S + Fe S_2^p \Delta \Phi_{FeS_2} \right]$$

При осуществлении реакций предполагается, что свободный водород топлива, соединяясь с кислородом, образует воду. Далее в системе возможны следующие процессы:

— взаимодействие сернистого ангидрида с водой с образованием сернистой кислоты, обратимая работа которого пренебрежимо мала;

— испарение воды в количестве, необходимом для образования насыщенной смеси азота, углекислоты и водяного пара при температуре и давлении окружающей среды, с минимальной затратой работы

$$L'_4 = G_{H_2O}^{\text{макс}} \Delta \Phi_{\text{исп}};$$

— смешение газообразных компонентов системы с получением обратимой работы

$$L'_5 = -G_{\text{см}} T_0 R_{\text{см}} \sum r_i \ln r_i;$$

— растворение газов в избытке воды и взаимодействие минеральной части топлива с сернистой кислотой. Обратимая работа этих процессов также пренебрежимо мала.

Эксергия топливно-воздушной смеси равна сумме работ на отдельных этапах

$$Ex = \Sigma L'_i.$$

Проведенные по этой методике расчеты дают расхождение с эмпирическими рекомендациями Ранга, достигающие для влажных топлив 2%.

Простое периодическое определение обобщенного показателя, каким является эксергетический к. п. д. станции, еще не является достаточным средством контроля экономичности. Сравнение качества эксплуатации по этому показателю затруднено из-за того, что станции, как правило, имеют разное оборудование и работают в неодинаковых условиях (по топливу, графику нагрузки и т. д.). С этой точки зрения необходимо прибегнуть к более глубокому анализу структуры эксергетического к. п. д. с тем, чтобы выявить влияние разных факторов на достигнутый уровень экономичности. Такой анализ невозможен без исследования эксергетических потерь при переменных режимах работы оборудования, которое практически до настоящего времени никем не проводилось.

## 2. Эксергетические потери в турбогенераторной установке

Анализ потерь в турбогенераторной установке начинается с турбинной ступени, для которой

$$П = T_0 \Delta S = \frac{T_0}{T_m} [(1 - \eta_{oi}) E_0 - (1 - \xi_{bc}) h_{bc}] \quad (1)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\eta_{oi}}{\eta_{oi} + \frac{T_0}{T_m} \left[ 1 - \eta_{oi} - (1 - \xi_{bc}) \frac{h_{bc}}{E_0} \right]} \quad (2)$$

В этих формулах

$T_m$  — среднетермодинамическая температура концов обратимого и необратимого расширения пара в ступени;

$E_0$  — располагаемая энергия ступени;

$\xi_{bc}$  — коэффициент использования выходной скорости в последующей ступени;

$h_{bc}$  — потеря с выходной скоростью.

Сравнение эксергетических характеристик с общепринятым способом оценки экономичности турбинной ступени по величине относительного внутреннего к. п. д. приводит к ряду интересных выводов.  $\eta_{oi}$  как известно, определяется путем сопоставления действительного процесса расширения пара с обратимой адиабатой в том же интервале давлений. При

этом происходящее в ступени частичное преобразование кинетической энергии потока пара в тепловую форму движения полностью относится к потерям, хотя очевидно, что в результате такого преобразования энтальпия пара на выходе возрастает, и, поскольку изобары расходятся, появляется возможность получения дополнительной работы в последующих ступенях.

Подобная реализация части потерь в целом для турбины учитывается с помощью т. н. коэффициента возврата тепла, необходимость введения которого обусловлена заведомым завышением потерь в отдельно взятой ступени.

Эксергетический метод сразу учитывает возможность реализации части тепла трения, причем в тем большей степени, чем выше его потенциал. Поэтому эксергетические потери в ступени всегда меньше недоиспользованного перепада, что, между прочим, отчетливо видно и из выражения (1). Они имеют окончательный, безвозвратный характер и обладают свойством аддитивности. Это обстоятельство значительно упрощает анализ работы турбины, поскольку исключает рассуждения, связанные с явлением возврата тепла.

Если рассматривать совместно потери в ступени и в камере или в аксиальном зазоре, то выражения (1) и (2) приобретают вид

$$\Pi = \frac{T_0}{T_m} (1 - \eta_{oi}) E_0, \quad (3)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\eta_{oi}}{\eta_{oi} + \frac{T_0}{T_m} (1 - \eta_{oi})}. \quad (4)$$

Многочисленными работами, подтвержденными данными испытаний, показано, что располагаемый перепад и  $\eta_{oi}$  промежуточных ступеней конденсационных турбин от расхода пара не зависят. В турбинах с дроссельным регулированием, кроме того, практически не меняется и температура пара после ступеней. Из (3) и (4) следует, что такие ступени характеризуются постоянством удельных потерь и эксергетического к. п. д. Этот вывод относится также к ступеням, работающим в критическом режиме, и к регулирующей ступени турбины с качественным регулированием.

Сложнее обстоит дело с промежуточными докритическими ступенями в турбинах с регулируемым отбором пара, для которых отношение давлений, располагаемый перепад,  $\eta_{oi}$  и, следовательно,  $\eta_{ex}$  являются функциями от расхода пара. Ярко выраженными особенностями обладают также регулирующая ступень турбин с сопловым регулированием и последняя ступень конденсационных турбин.

Помимо трения в проточной части источниками эксергетических потерь в турбогенераторной установке являются дросселирование в стопорном и дроссельном или полностью открытом регулирующем клапане, внешние утечки, трение и турбулизация потока в выхлопном патрубке турбины, потери механические и в генераторе, необратимый теплообмен и дросселирование в системе регенеративного подогрева питательной воды и конденсаторе, неизоэнтропность сжатия в конденсатном, питательном и вспомогательных насосах и, наконец, эксергия охлаждающей воды, относящаяся к категории «внешних» потерь.

Из обобщенного эксергетического баланса конденсационной установки можно получить

$$P_{\Sigma} = Ex_1 - Ex_{пв} - (W_{э} - W_{сн}). \quad (5)$$

Для турбин с двумя регулируемым отборами

$$P_{\Sigma} = Ex_1 - Ex_{пв} - (W_{э} - W_{сн}) - (Ex_{пр} - Ex_{возв}^{пр} - Ex_{доб}^{пр}) - (Ex_{т} - Ex_{возв}^{т} - Ex_{доб}^{т}). \quad (6)$$

В этих формулах

$Ex_1$  — эксергия острого пара с учетом расхода на эжектор и пароохладитель по состоянию перед стопорным клапаном;

$Ex_{пв}$  — эксергия питательной воды;

$Ex_{пр}, Ex_{возв}^{пр}, Ex_{доб}^{пр}$  — эксергии потока пара на производство, возврата конденсата производственного отбора и добавки воды в схему, восполняющей потери конденсата производственного отбора;

$Ex_{т}, Ex_{возв}^{т}, Ex_{доб}^{т}$  — эксергия потока пара на теплофикацию по состоянию в камере теплофикационного отбора, эксергия конденсата теплофикационного отбора по состоянию в месте ввода в линию основного конденсата турбины и эксергия добавки воды в схему, восполняющей потери пара и конденсата теплофикационного отбора;

$W_{э}$  — выработанная электроэнергия;

$W_{сн}$  — расход электроэнергии на привод дренажных, конденсатных, циркуляционных и питательных насосов.

Выражение (5), если пренебречь кинетической энергией потоков и принять  $D_1 = G_{пв}$ , преобразуется следующим образом

$$P_{\Sigma} = Q_1 - (W_{э} - W_{сн}) - D_1 T_0 (s_1 - s_{пв}). \quad (7)$$

Расход пара и тепла на турбину определяется по типовой энергетической характеристике.

Энтропия питательной воды находится с помощью стандартного графика температур питательной воды при различных нагрузках.

Зависимость эксергетических потерь в конденсационном турбогенераторе при условиях характеристики от мощности на клеммах генератора, списываемая выражением (7), имеет практически линейный характер.

Вычисление потерь в турбинах с регулируемыми отборами пара удобно производить с помощью диаграмм режимов по расходу пара и графиков температуры питательной воды и энтальпии пара в регулируемых отборах. По условиям характеристики конденсат производственного и теплофикационного отборов возвращается полностью, а расход питательной воды равен расходу свежего пара. Тогда выражение (6) можно переписать следующим образом:

$$P_{\Sigma} = D_1 [i_1 - i_{пв} - T_0 (s_1 - s_{пв})] - (W_{\Sigma} - W_{сн}) - D_{пр} [i_{пр} - i_{пр}^{возв} - T_0 (s_{пр} - s_{пр}^{возв})] - D_T [i_T - i_T^{возв} - T_0 (s_T - s_T^{возв})].$$

Для любого сочетания  $D_1$ ,  $D_{пр}$  и  $D_T$  по диаграмме режимов и вспомогательным графикам легко определить  $W_{\Sigma}$ , а также параметры питательной воды и пара в регулируемых отборах и рассчитать величину эксергетических потерь.

В эксплуатации условия работы турбогенератора, как правило, отличаются от принимаемых при построении диаграмм режимов или диаграмм эксергетических потерь. Наиболее часто случаются отклонения начальных параметров пара, давления в камерах регулируемых отборов, противодавления, температуры охлаждающей воды, температуры и количества конденсата производственного отбора,  $\cos \phi$  и т. д. Эти отклонения вызывают изменение мощности турбогенератора и величины потерь, учитываемое с помощью графиков поправок.

При построении графиков поправок к эксергетическим потерям на отклонение условий характеристики последовательно анализируется, как общепринято, влияние каждого фактора на величину потерь при всех остальных неизменных. Поправка определяется как разность

$$\Delta P = P - P_x,$$

где  $P$  — эксергетические потери при новых условиях, рассчитываемые по общему выражению (5) или (6). При этом действительная мощность турбогенератора  $W_{\Sigma}$  находится суммированием мощности при условиях характеристики и поправки на отклонение исследуемого параметра, определяемой по типовым графикам. Изменение параметров питатель-

ной воды и пара в регулируемых отборах оценивается после детального или упрощенного пересчета процесса расширения.

В реферируемой работе приведены построенные таким образом диаграмма эксергетических потерь и графики поправок на отклонение основных условий характеристики для турбогенератора ВПТ-25-3, которые дают полное представление об эксергетических потерях при переменных режимах.

### 3. Эксергетические потери в парогенераторе

Отсутствие методики расчета отдельных составляющих эксергетических потерь в парогенераторе вынуждает подробнее остановиться на этом вопросе.

При вычислении эксергии топливно-воздушной смеси предполагалось, что реакции окисления горючих элементов топлива кислородом воздуха происходят обратимо. В обычных топочных устройствах, однако, горение топлива является типично необратимым процессом. Сопутствующая потеря определяется как разность эксергии системы топливо—воздух и эксергии образующихся продуктов сгорания:

$$П_1 = Ex_{т-в} - Ex_{пр. сг.}$$

Расчет последней производится по теоретической температуре горения с учетом диссоциации  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $SO_2$ . Предварительный подогрев воздуха до температур порядка  $3000-3200^\circ K$  приводит к уменьшению потери от необратимости горения.

Вторым основным источником эксергетических потерь в парогенераторе является теплообмен с большой разностью температур между продуктами сгорания, с одной стороны, и водой, паром и воздухом, с другой. Потеря от неравновесного теплообмена вычисляется по формуле

$$П_2 = Q_p \eta_{кв} \frac{T_0}{T_{1\text{ ср}}} + \alpha G_0 T_0 \int_{T_{хв}}^{T_{гв}} c_p \frac{dT}{T} - G_{пр. сг} T_0 \int_{T_{ух}}^{T_m} c_p \frac{dT}{T},$$

где

$T_{1\text{ ср}}$  — среднетермодинамическая температура подвода тепла к воде и пару;

$\alpha$  — коэффициент избытка воздуха в воздухоподогревателе;

$G_{пр. сг}$  — количество продуктов сгорания.

Уменьшение потерь от необратимого теплообмена достигается, главным образом, повышением  $T_{1\text{ ср}}$ , т. е. повышением параметров перегретого пара и температуры питательной воды.

Методически удобно определять совместно  $P_2$  и потерю  $P_3$ , вызываемую гидравлическими сопротивлениями движению рабочих тел:

$$P_2 + P_3 = \Delta E_{x_{\text{пр. сг}}} - (\Delta E_{x_{\text{H}_2\text{O}}} + \Delta E_{x_{\text{в}}}).$$

Значения  $\Delta E_x$  подставляются в формулу с учетом падения давления в пароводяном контуре и газоздушном тракте.

Категорию «внешних» потерь в парогенераторе составляют потоки не утилизируемой эксергии.

Если в процессе горения принимают участие воздух в количестве, меньшем теоретически необходимого, то в уходящих газах наряду с  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  могут содержаться  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и различные углеводороды. При расчете эксергии системы топливо—воздух ее состав в конечном состоянии после обратимого проведения всех химических реакций не должен отличаться от состава, получаемого необратимым путем. Так как максимально возможная полезная работа реакции  $\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}$ , например, при 1 физ. атм и  $298,15^\circ\text{K}$  составляет только 32808 кал/моль по сравнению с 94285 кал/моль для реакции окисления аморфного углерода в углекислоту, то эксергия системы твердое топливо—воздух при наличии химического недожога меньше эксергии смеси со стехиометрическим соотношением. Эксергетическая потеря от химического недожога равна

$$P_4 = (E_{x_{\text{т-в}}})_{\alpha=1} - (E_{x_{\text{т-в}}})_{\alpha<1}.$$

С небольшой погрешностью  $P_4$  можно рассчитывать по формуле

$$P_4 = 0,01(\text{CO} \cdot \Delta\Phi_{\text{CO}} + \text{H}_2 \Delta\Phi_{\text{H}_2} + \text{CH}_4 \Delta\Phi_{\text{CH}_4} + \\ + \sum C_m \text{H}_n \Delta\Phi_{C_m \text{H}_n}) V_{\text{с. г}},$$

где

$V_{\text{с. г}}$  — объем сухих продуктов сгорания;

$\Delta\Phi$  — изменение изобарно-изотермического потенциала для реакций дожигания при давлении и температуре окружающей среды.

Значения  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $C_m \text{H}_n$  определяются по объемному анализу сухих продуктов сгорания.

При наличии механического недожога состояние равновесия системы топливо—воздух (стехиометрическая смесь) с окружающей средой характеризуется присутствием в продуктах сгорания, включая золу, свободного кислорода и некоторого количества горючих элементов топлива. Эксергия такой системы меньше нормальной эксергии топливно-воздушной смеси на величину потерь от механического недожога

$$P_5 = \frac{100 C_3}{C^p} Ex_{T \rightarrow B}^0 - \Sigma L'_{\text{макс}},$$

где

- $C_3$  — содержание углерода в золе;  
 $Ex_{T \rightarrow B}^0$  — нормальная эксергия системы топливо—воздух, находящейся в термомеханическом равновесии с окружающей средой;  
 $\Sigma L'_{\text{макс}}$  — сумма обратимых работ вторичных процессов: дополнительного испарения влаги в количестве, необходимом для образования насыщенной смеси газов; смешения полученного водяного пара, избытка воздуха и продуктов сгорания.

Ярко выраженной «внешней» потерей является эксергия уходящих газов

$$P_6 = I_{yx} - I_0 - T_0(S_{yx} - S_0).$$

При приведенной величине уноса золы из топки  $1000 \times \frac{a_{ун} A^p}{Q_n^p} > 6$  в потерю  $P_6$  следует включать эксергию уноса

$$Ex_{ун} = \frac{a_{ун} A^p}{100} \left( \int_{T_0}^{T_{yx}} c_3 dT - T_0 \int_{T_0}^{T_{yx}} c_3 \frac{dT}{T} \right),$$

где

- $a_{ун}$  — доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания;  
 $c_3$  — истинная теплоемкость золы.

Потери тепла в окружающую среду вызывают дополнительное понижение температуры уходящих газов и некоторое снижение температуры перегретого пара. Если потеря от необратимости теплообмена определена в чистом виде, т. е. по состояниям пара и уходящих газов без учета теплоотдачи в окружающую среду, то при сведении эксергетического баланса парогенератора необходимо принять во внимание потерю от излучения, равную

$$P_7 = Q_5 - T_0 \left( \frac{Q_{огр}}{T_{yx}} + \frac{Q_{п}}{T_{не}} \right),$$

где

- $Q_{огр}$  — потери тепла через ограждения котла;  
 $Q_{п}$  — потери тепла паропроводами, коллекторами и т. п.

При сухом шлакоудалении для топлив с  $A^p > \frac{Q_n^p}{100}$  к «внешним» потерям следует относить эксергию шлаков

$$P_8 = \frac{a_{шл} A^p}{100} \left( \int_{T_0}^{T_{шл}} c_{шл} dT - T_0 \int_{T_0}^{T_{шл}} c_{шл} \frac{dT}{T} \right),$$

где

$a_{\text{шл}}$  — доля золы топлива, выходящая в шлак;

$T_{\text{шл}}$  — температура шлака;

$c_{\text{шл}}$  — истинная теплоемкость шлака.

При жидком шлакоудалении потеря  $P_8$  учитывается для всех топлив.

Типичный эксергетический баланс парогенератора представлен в табл. 1. Первичными ресурсами являются эксергия топливно-воздушной смеси, рассчитываемая по коэффициенту избытка воздуха за дутьевым вентилятором при условии, что в исходном состоянии смесь находится в равновесии с окружающей средой, и электроэнергия для привода механизмов собственных нужд (вентилятора, дымососа, ШБМ, мельничного вентилятора и т. д.). Основные потери вызываются необратимостью горения (23,2%) и теплообмена (26,5%). Далее идут гидравлические сопротивления (1,63%), уходящие газы (1,07%), механический недожог (0,98%) и целый ряд более мелких потерь.

Таблица 1

Эксергетический баланс парогенератора ТП-170

№№ п. п.	Приходная часть	%	№№ п. п.	Расходная часть	%
1.	Эксергия топливно-воздушной смеси	99,47	1.	Повышение эксергии воды и пара	45,10
2.	Электроэнергия для привода механизмов собственных нужд	0,53	2.	Эксергетические потери, в т. ч.	54,90
			а)	от необратимости горения	23,20
			б)	от необратимости теплообмена	26,50
			в)	от гидравлических сопротивлений	1,63
			г)	с уходящими газами	1,07
			д)	от механического недожога	0,98
			е)	в сушильно-мельничной установке	0,83
			ж)	от присосов холодного воздуха	0,25
			з)	излучением в окружающую среду	0,19
			и)	со шлаком	0,15
			к)	в дымососе и дутьевом вентиляторе	0,10
	Итого:	100		Итого:	100

Эксергетический к. п. д. парогенератора составляет 45,1%, что гораздо ниже общепринятого к. п. д. брутто.

Суммарные эксергетические потери могут быть определены из выражения

$$P_{\Sigma} = Bex_{т-в} + W_{сн} - D\Delta ex_{H_2O},$$

где

$B$  — расход топлива;

$D$  — паропроизводительность,

а с учетом продувки, используемой в технологической схеме станции, и отбора насыщенного пара на собственные нужды

$$P_{\Sigma} = Bex_{т-в} + W_{сн} - D\Delta ex_{H_2O} - G_{пр}\Delta ex_{пр} - D_{нас}\Delta ex_{нас}. \quad (8)$$

Если пренебречь кинетической энергией, изменение эксергии потоков определяется по формуле

$$\Delta ex_j = i_j - i_{пв} - T_0(s_j - s_{пв}),$$

где

$T_0$  — температура охлаждающей воды на входе в конденсатор турбины.

Выражение (8) может быть использовано для построения диаграмм эксергетических потерь в парогенераторах и поправочных графиков на отклонение условий характеристики. Эти материалы для парогенератора ТП-170 приведены в реферируемой работе.

#### 4. Эксергетические показатели тепловых электрических станций

Основным показателем экономичности электрических станций является эксергетический к. п. д.

Для КЭС,

$$\eta_{ex}^{КЭС} = \frac{W_{сеть}}{Bex_{т-в}},$$

а для ТЭЦ

$$\eta_{ex}^{ТЭЦ} = \frac{W_{сеть} + \Delta Ex_{пр} + \Delta Ex_{т}}{Bex_{т-в}},$$

где

$W_{сеть}$  — электроэнергия, отпущенная в сеть;

$\Delta Ex_{пр}$  — отпуск эксергии производственным потребителям;

$\Delta Ex_{т}$  — отпуск эксергии на теплофикацию и горячее водоснабжение.

Более содержательна следующая единообразная запись, очевидность которой вытекает из уравнений эксергетических балансов,

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\Sigma \Pi}{Bex_{т-в}} = 1 - \Sigma \Omega. \quad (9)$$

Входящая в (9) сумма эксергетических потерь определяется комплексом конструктивных и режимных факторов.

Эксергетический к. п. д. машинного зала конденсационной станции равен

$$\eta_{ex}^{т.ц} = \frac{W_э - W_{сн}^{т.ц}}{\Delta Ex_{перв}},$$

а теплоэлектроцентрали

$$\eta_{ex}^{т.ц} = \frac{W_э - W_{сн}^{т.ц} + \Delta Ex_{пр} + \Delta Ex_{т}}{\Delta Ex_{перв}}.$$

Здесь

$W_{сн}^{т.ц}$  — расход электроэнергии на собственные нужды машзала, включая привод питательных насосов;  
 $\Delta Ex_{перв}$  — первичная эксергия, введенная в машинный зал.

В простейшем случае, когда расход пара равен расходу питательной воды,

$$\Delta Ex_{перв} = D[i_{пе} - i_{пв} - T_0(s_{пе} - s_{пв})].$$

Эксергетический к. п. д. котельного цеха вычисляется по формуле

$$\eta_{ex}^{кот} = \frac{\Delta Ex_{перв}}{Bex_{т-в} + W_{сн}^{кот}}.$$

Расход электроэнергии на собственные нужды состоит из расхода на пылеприготовление, тягу, дутье, топливоподачу, включая дробление топлива, нефтехозяйство, освещение, вентиляцию и т. д.

Между эксергетическими показателями цехов и стационарным к. п. д. существует следующая связь

$$\eta_{ex}^{кэс} = \frac{\eta_{ex}^{т.ц} \eta_{ex}^{кот} \eta_{ex}^{э.ц}}{1 + x(1 - \eta_{ex}^{т.ц} \eta_{ex}^{кот})}$$

$$\eta_{ex}^{тэц} = \frac{(y + \eta_{ex}^{э.ц}) \eta_{ex}^{т.ц} \eta_{ex}^{кот}}{1 + x(1 - \eta_{ex}^{т.ц} \eta_{ex}^{кот}) + y},$$

где

$x = \frac{W_{сн}^{кот}}{W_э - W_{сн}}$  — относительная доля собственных нужд котельного цеха;

$y = \frac{\Delta Ex_{пр} + \Delta Ex_{т}}{W_э - W_{сн}}$  — режимный фактор, характеризующий соотношение между электрической и тепловой нагрузкой.

Эксергетический к. п. д. электростанции можно представить в виде

$$\eta_{ex} = 1 - (\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3).$$

Здесь

$\Omega_1$  — сумма абсолютных коэффициентов эксергетических потерь в отдельных агрегатах при условиях характеристики;

$\Omega_2$  — сумма абсолютных коэффициентов отклонений эксергетических потерь по объективным причинам;

$\Omega_3$  — сумма абсолютных коэффициентов отклонений эксергетических потерь по вине персонала.

Типичные отклонения по объективным причинам вызываются:

1) изменением давления в регулируемых отборах турбин по требованию тепловых потребителей;

2) потерями конденсата за пределами станции и переохлаждением конденсата у потребителей и в обратных трубопроводах;

3) изменением температуры циркуляционной и технической воды;

4) изменением соотношения между активной и реактивной нагрузкой, характеризуемого  $\cos \varphi$ ;

5) переменной марки топлива и т. д.

Отклонения по вине персонала случаются из-за:

1) неэкономичного распределения нагрузки между агрегатами;

2) изменения параметров свежего пара и давления в камерах регулируемых отборов;

3) изменения давления отработавшего пара (повышенные присосы воздуха, загрязнение конденсаторов, плохая работа эжекторов);

4) заноса проточной части турбин;

5) наличия химического недожога;

6) зашлакования и загрязнения поверхностей нагрева парогенераторов и т. д.

Эксергетические потери в основных агрегатах станции при условиях характеристики находятся по специально разработанным диаграммам, а поправки к потерям на отклонение условий характеристики по объективным и субъективным причинам — с помощью графиков или из сопоставления диаграмм эксергетических потерь в отдельных агрегатах. Зная суммарный расход топлива по станции и удельную эксергию топливно-воздушной смеси, нетрудно вычислить  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$ . Таким образом исключительно четко устанавливается влияние на эксергетический к. п. д. станции характеристик установленного оборудования, местных объективных условий и, что особенно важно, качества эксплуатации.

Возможность непосредственного выделения составляющей потерь, зависящей от работы персонала, является ценным преимуществом эксергетического метода анализа, позволяющим оперативно контролировать качество обслуживания буквально на каждом рабочем месте. Это преимущество должно быть использовано для внедрения обоснованной системы премирования эксплуатационного персонала. Целесообразно с учетом уже достигнутого уровня эксплуатации на лучших электростанциях установить норму относительного перерасхода топлива по вине персонала

$$b = \frac{\Delta B_{\text{перс}}}{B_x} \cdot 100\%,$$

где

$\Delta B_{\text{перс}}$  — абсолютный перерасход топлива;

$B_x$  — расход топлива электростанцией при условиях характеристики.

$\Delta B_{\text{перс}}$  и  $B_x$  определяются по данным подробного анализа структуры эксергетических потерь в отдельных цехах электростанции.

Если фактическое значение показателя « $b$ » окажется меньше нормативного, то соответствующая экономия топлива, достигнутая обслуживающим персоналом, просто подсчитывается по выражению:

$$\mathcal{E} = \frac{B_x(b_n - b)}{100}.$$

Определенная часть стоимости сэкономленного топлива отчисляется в премиальный фонд станции. Распределение премиального фонда между цехами и агрегатами производится в соответствии с долей их участия в общей экономии топлива.

Построенная на подобных принципах премиальная система должна способствовать повышению культуры обслуживания и достижению оптимальных показателей.

Использование эксергетического метода позволяет решить давно обсуждаемый вопрос о себестоимости различных видов продукции ТЭЦ. Поскольку отпущенные электроэнергия и эксергия с паром и всдой являются качественно равноценными, логично все производственные затраты, включая расход топлива, распределять между ними пропорционально. Другими словами, следует рассчитывать себестоимость единицы сопоставимой продукции, равной  $W_{\text{сеть}} + \Delta E x_{\text{пр}} + \Delta E x_{\text{т}}$ .

Себестоимость отпущенного тепла определяется путем умножения себестоимости единицы сопоставимой продукции на коэффициент ценности тепла  $\kappa = \frac{\Delta E x_{\text{отп}}}{Q_{\text{отп}}}$ , т. е. связы-

вается с заключенной в нем эксергией. Таким образом устраняется крупнейший недостаток т. н. «физического» метода распределения затрат, по которому себестоимость тепла острого пара практически не отличается от себестоимости низкопотенциального тепла, отпускаемого с горячей водой.

Методика эксергетического анализа опробована на второй очереди одной из южных ТЭЦ, оборудованной турбогенераторами ВПТ-25-3 и парогенераторами ТП-170. При этом получены весьма показательные результаты.

Эксергетический к. п. д. очереди составляет —28,4%  
 Эксергетический к. п. д. турбинного цеха —64,7%  
 Эксергетический к. п. д. котельного цеха —44,4%

Подробный анализ структуры эксергетического к. п. д. проведен на примере турбогенератора № 5 и парогенератора № 9 (табл. 2).

Таблица 2

Структура эксергетического к. п. д. турбогенератора № 5  
 и парогенератора № 9  
 (1 января 1965 г.)

№ п. п.	Наименование	Турбогенератор				Парогенератор			
		Смена			За сут-ки	Смена			За сут-ки
		I	II	III		I	II	III	
1	Эксергетический к.п.д., % . . . . .	68,1	68,7	68,5	68,5	46,65	46,81	46,85	46,77
2	Относительный коэффициент потерь при условиях характеристики, % . . . . .	27,53	27,12	27,63	27,42	49,51	49,84	50,22	49,86
3	Относительный коэффициент отклонений потерь по объективным причинам, % . . . . .	1,81	1,80	1,65	1,76	1,28	1,34	0,77	1,13
4	Относительный коэффициент отклонений потерь по вине персонала, % . . . . .	2,56	2,38	2,02	2,32	2,54	1,89	2,26	2,22
5	Невязка, % . . . . .	—	—	—	—	0,02	0,12	—0,10	0,02

Обращает на себя внимание значительная величина относительных коэффициентов отклонений эксергетических потерь по вине обслуживающего персонала, достигающая 2,56% для турбогенератора (I смена) и 2,54% для парогенератора (I смена). Минимальные значения  $\Omega_3$  соответственно равны 2,02% (III смена) и 1,89% (II смена). Суточный перерасход топлива по вине персонала в парогенераторе составляет 7,83 т или 1,9% от расхода при условиях характеристики, а в турбине—7,05 т.

Приведенные цифры свидетельствуют о наличии реальных возможностей существенной экономии топлива.

## 5. Основные выводы

1. Развитие энергетики привело к такому усложнению тепловых схем электрических станций, что их анализ с использованием только энергетических балансов стал недостаточным и часто затруднительным. Особенно остро это проявляется при попытках оценки степени термодинамического совершенства процессов в установках с совместным производством электроэнергии и тепла.

2. Термодинамически объективная универсальная система контроля и анализа экономичности электростанций может быть создана только лишь на базе эксергетического метода, учитывающего оба начала термодинамики.

3. Для расчета эксергетического к. п. д. электростанций необходимо правильно оценить первичные ресурсы, которыми чаще всего является эксергия топливно-воздушной смеси. Если станция работает на газе, исходная эксергия просто определяется с использованием изобарно-изотермических потенциалов. Эксергию твердого топлива и воздуха в настоящее время можно вычислить только ориентировочно, принимая по Дюлонгу механизм взаимодействия топлива с кислородом. По мере углубления знаний о физической и химической структуре угля результат будет уточняться.

4. Сравнение общепринятого способа оценки экономичности турбинных ступеней по величине  $\eta_{oi}$  с эксергетическими характеристиками показывает, что последние являются более строгими и удобными, а их применение снимает противоречие, связанное с явлением возврата тепла.

Эксергетический к. п. д. ступеней повторяет в общих чертах характер изменения  $\eta_{oi}$  в зависимости от расхода пара, но на более высоком уровне.

5. Эксергетические потери в турбогенераторной установке определяются комплексом конструктивных и режимных факторов. Существует тесная связь между эксергетическими и расходными характеристиками турбин, позволяющая построить диаграммы эксергетических потерь при ряде фиксированных условий и выяснить влияние отклонения эксплуатационных факторов на величину потерь.

6. Эксергетические балансы парогенераторов существенно отличаются от тепловых. Их характерной особенностью является отображение значительных потерь от необратимости горения и теплообмена, которые в конечном счете составляют основную причину перерасхода топлива на электрических станциях. Поскольку эксергетические потери в парогенераторе

определяются его теплотехническими характеристиками и режимом работы, имеется возможность построить диаграммы потерь и графики поправок на отклонение условий эксплуатации, которые в сильной степени упростят повседневный анализ.

7. Величина эксергетических потерь на электрических станциях в общем случае определяется характеристиками установленного оборудования, местными объективными условиями и качеством обслуживания. Анализ работы станции с помощью диаграмм потерь и графиков поправок дает возможность выделить три группы потерь в каждом агрегате, цехе и по станции в целом.

8. Относительный перерасход топлива по вине персонала является основным критерием качества обслуживания. С ним самым непосредственным образом должна быть связана система материального поощрения работников станции.

9. Использование эксергетических показателей дает возможность связать себестоимость отпускаемого с ТЭЦ тепла с его потенциалом. Дифференциация стоимости тепла вызовет устранение излишнего завышения параметров пара и воды и неоправданного дросселирования у тепловых потребителей.

10. Есть основание надеяться, что введение системы комплексного анализа работы электрических станций, основанной на эксергетических показателях, будет способствовать мобилизации всех внутренних ресурсов экономии топлива.

---

### Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1. Г о х ш т е й н Д. П., З а х а р о в Н. Д. Применение энтропийного метода для анализа работы турбинного цеха электростанции. Изв. высш. учебных заведений, Энергетика, № 1, 1966.

2. З а х а р о в Н. Д. Применение энтропийного метода для анализа показателей работы электростанций. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ, новым схемам и циклам энергетических установок, 1964.

3. З а х а р о в Н. Д. Применение энтропийного метода для анализа показателей работы электростанций. Тезисы докладов на XXVI научной конференции ОТИ им. Ломоносова, 1964.

---

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. На отраслевой научно-технической конференции по проблемам прикладной термодинамики, Одесса, 1962 г.
  2. На XXVI научной конференции ОТИ им. Ломоносова, Одесса, 1964 г.
  3. На Всесоюзной конференции «Теплофизические свойства веществ, новые схемы и циклы энергетических установок», Одесса, 1964 г.
  4. На XXVIII научной конференции ОТИ им. Ломоносова, Одесса, 1966 г.
-