

Воловик Юрий Иванович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Киев, Украина, Киев-70, пер. Зелинского, д.8, кв.7, тел. 044 425 49 62, E-mail: yu-i-volovik@yandex.ua

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗДЕРЖЕК НА ТОПЛИВО ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Предложена методология разделения издержек на топливо при выработке электрической и тепловой энергии комбинированным способом. Показано, что преимущества комбинированного способа выработки электрической и тепловой энергии не реализуются в настоящее время полностью из-за несогласованности энергетической и экономической сторон комбинированного производства. Принципиальные трудности связаны с разделением расхода топлива между вырабатываемыми видами продукции, без чего нельзя определить их себестоимость. Это не позволяет обосновано формировать тарифы на выпускаемую продукцию, что приводит к снижению конкурентоспособности комбинированных производств и не способствует их техническому совершенствованию. Проблемы, имеющие место при комбинированном использовании тепловой энергии, обусловлены несовершенством теоретических основ экономики теплоэнергетики. Это относится к установлению стоимости тепловой энергии после частичной реализации ее в форме работы. Применяемые в теплоэнергетике предпосылки для установления стоимости джоулей тепловой энергии, неоднозначны и не обоснованы. Они исходят из положений термодинамики и не связаны с экономикой производства. Показано, что основывающиеся на таких предпосылках методы разделения расхода топлива (физический, эксергетический, нормативный и др.) не могут быть использованы при установлении себестоимости энергетической продукции, вырабатываемой комбинированным способом. В статье предложен научно обоснованный метод разделения издержек, понесенных на топливо, который может быть использован при расчетах себестоимости электрической и тепловой энергии, вырабатываемой комбинированным способом. Показано, что разделение издержек, понесенных на топливо, и разделение расхода топлива фактически это одна и та же проблема. Проведено углубленное изучение ее с позиций экономики.

Ключевые слова: тепловая и электрическая энергия; когенерация; издержки на топливо; себестоимость.

Воловик Юрій Іванович, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Київ, Україна, Київ-70, пров. Зелінського, б.8, кв.7, тел. 044 425 49 62, E-mail: yu-i-volovik@yandex.ua

РОЗДІЛЕННЯ ВИТРАТ НА ПАЛИВО ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Запропоновано методологію до розділення витрат на паливо при виробництві електричної і теплової енергії комбінованим способом, де собівартість теплової енергії, її властивості та термодинамічний процес її використання розглядаються у взаємозв'язку. Вказано, що переваги комбінованого способу вироботки електричної та теплової енергії не реалізуються в наступний час повністю тому, що неузгоджені енергетична та економічна сторони комбінованого виробництва. Принципові труднощі пов'язані з розділенням споживання палива між видами продукції, без чого неможливо встановити їх собівартість. Це не дозволяє обґрунтовано формувати тарифи на продукцію, що приводить до зниження конкурентоспроможності комбінованих виробництв. Проблеми, що мають місце при комбінованому використанні теплової енергії, обумовлені недосконалістю теоретичних основ економіки теплоенергетики. Це відноситься до встановлення вартості теплової енергії після часткової реалізації її в формі роботи. Це відноситься до встановлення вартості теплової енергії після часткової реалізації її в формі роботи. Застосовувані в теплоенергетиці передумови для встановлення вартості джоулів теплової енергії, неоднозначні і не обґрунтовані. Вони виходять з положень термодинаміки і не пов'язані з економікою виробництва. Показано, що ґрунтуються на таких передумовах методи поділу витрат палива (фізичний, ексергетичний, нормативний і ін.) не можуть бути використані при встановленні собівартості енергетичної продукції, що виробляється комбінованим способом. У статті запропоновано науково обґрунтований метод поділу витрат, понесених на паливо, який може бути використаний при розрахунках собівартості електричної і теплової енергії, що виробляється комбінованим способом. Показано, що поділ витрат, понесених на паливо, і поділ витрат палива фактично це одна і та ж проблема. Проведено поглиблене вивчення її з позицій економіки.

Ключові слова: тепла та електрична енергія; когенерация; витрати на паливо; собівартість.

Volovik Yuriy Ivanovich, Cand. Sc. (Eng), SRF,

Kyiv, Ukraine, Kyiv-70, lane Zelinskoho, b.8, f.7, tel: 044 425 49 62, E-mail: yu-i-volovik@yandex.ua

DIVISION OF FUEL COST IN COGENERATION OF ELECTRICAL AND THERMAL ENERGY

The proposed methodology of separating the costs of the fuel while generating electricity and thermal energy combined method. It is shown that the advantages of the combined method of generating electrical and thermal energy are not implemented currently completely because of inconsistencies of energy and economic sides combined. Fundamental difficulties associated with the division of fuel consumption between produced products, without which it is impossible to determine their cost. It does not allow a feasible forming of tariffs on manufactured products, which leads to lower competitiveness of the combined production and does not contribute to technical improvement. The problems of combined use of thermal energy caused by the imperfection of the theoretical foundations of Economics of the power system. It refers to the establishment of cost of thermal energy after the partial implementation of it in the form of work. Used in the heat of the preconditions for establishing the value of the Joule heat energy is ambiguous and is not justified. It is based on the regulations of thermodynamics and are not related to production Economics. It is shown that based on these assumptions the methods of separation of fuel flow (physical, energetic, regulatory, etc.) can not be used when establishing the cost of energy products produced by the combined method. In the article the scientific method of separating the costs incurred for fuel, which can be used in the calculation of cost of electrical and thermal energy generated by the combined method. It is shown that the division of costs incurred for fuel, and the separation of the fuel consumption in fact it is one and the same problem. Conducted in-depth study of it from the standpoint of economyt.

Keywords: thermal and electrical energy; cogeneration; expenses on fuel; prime cost.

Введение

Преимущества комбинированного способа выработки электрической и тепловой энергии не реализуются в настоящее время полностью из-за несогласованности энергетической и экономической сторон комбинированного производства. Принципиальные трудности связаны с разделением расхода топлива между вырабатываемыми видами продукции, без чего нельзя определить их себестоимость. Незнание реальной себестоимости не позволяет обосновано формировать тарифы на выпускаемую продукцию, что приводит к снижению конкурентоспособности комбинированных производств и не способствует их техническому совершенствованию.

Проблемы, имеющие место при комбинированном использовании тепловой энергии, обусловлены несовершенством теоретических основ экономики теплоэнергетики. В частности, это относится к установлению стоимости тепловой энергии после частичной реализации ее в форме работы. Применяемые в теплоэнергетике предпосылки для установления стоимости джоулей тепловой энергии, неоднозначны и не обоснованы. Они исходят из положений термодинамики и не связаны с экономикой производства. Основывающиеся на таких предпосылках методы разделения расхода топлива (физический, энергетический, нормативный и др.), как следует из их детального анализа [1-2], не могут быть использованы при установлении себестоимости энергетической продукции, вырабатываемой комбинированным способом.

В последнее время складывается мнение, что объективный и универсальный метод разделения общего расхода топлива между видами энергии, вырабатываемыми комбинированным способом, не может быть создан [3]. Авторы этой работы предлагают отказаться от попыток определения себестоимости каждого из видов вырабатываемой продукции, и вопросы ценообразования решать только на базе экономических (рыночных) методов. В ряде других работ обосновывается целесообразность применения разных экономических методов разнесения расхода топлива, в зависимости от рыночной конъюнктуры в конкретных регионах [4-5]. Однако при таком подходе игнорируется специфика комбинированного производства и разрывается связь производства с экономикой, что препятствует техническому совершенствованию комбинированных производств и может привести к непредсказуемым последствиям.

Попытка, более полно учесть свойства тепловой энергии при установлении ее ценности, сделана в [6], где ценность тепловой энергии зависит от двух параметров состояния. Использование двух параметров позволяет учесть разные по физической природе свойства тепловой энергии рабочего тела, в связи с чем, такой подход представляется перспективным для дальнейшей разработки.

Основная часть

Разделение издержек, понесенных на топливо, и разделение расхода топлива, как будет показано ниже, фактически это одна и та же проблема. Изменение формулировки проблемы сделано с целью более углубленного изучения ее с позиций экономики, поскольку вопросы, связанные со стоимостью энергии, не являются предметом термодинамики. Цель данной работы – разработать научно обоснованный метод разделения издержек, понесенных на топливо, который использовать при расчетах себестоимости электрической и тепловой энергии, вырабатываемой комбинированным способом.

Отличия тепловой энергии от других видов энергии.

Надо отметить, что в Международной системе единиц СИ нет физической величины, называемой «тепловая энергия». В настоящее время этот исторически сложившийся термин рекомендуется использовать только как название товарной продукции. Использование термина «тепловая энергия» в данной работе имеет целью представить тепловую энергию во взаимосвязи со свойствами рабочего тела, поскольку применяемые в термодинамике физические величины «количество теплоты» и «энтальпия» однозначно реальную тепловую энергию не представляют и не могут быть предметом рассмотрения экономики.

В данной работе тепловая энергия рабочего тела рассматривается как внутренняя энергия, которая в зависимости от характера термодинамического процесса может быть по-разному реализована, как в форме работы, так и в форме теплоты, или, как это осуществляется в комбинированных производствах, часть ее – в форме работы, оставшаяся часть – в форме теплоты. Тепловая энергия, с такими свойствами используется в теплоэнергетике для выработки электрической энергии и тепловой энергии, реализуемой в тепловых процессах и при отоплении помещений. Потенциальные возможности тепловой энергии рабочего тела определяются двумя разными по своей физической природе способами обмена энергией: способностью к передаче теплоты и способностью к совершению работы (назовем их тепловыми и рабочими свойствами). Эти свойства проявляются в процессе реализации тепловой энергии. Количественно в удельных величинах они определяются энтальпией i и эксергией e рабочего тела.

Джоуль как единица измерения всех видов энергии определяет энергию только количественно. Разные по физической природе рабочие и тепловые свойства, которыми потенциально обладает тепловая энергия рабочего тела, нельзя одновременно учесть в одной единице измерения. Это является одной из причин, почему в Международной системе единиц СИ нет такой физической величины как тепловая энергия. С позиций экономики электрическая и тепловая энергия, вырабатываемые при комбинированной реализации исходной тепловой энергии, рассматриваются как разные виды энергетической товарной продукции, обладающие различной совокупностью полезных потребительских свойств. Эти виды продукции количественно измеряются в джоулях. Себестоимость их джоулей зависит от издержек, понесенных на их получение.

Анализ термодинамических методов разделения расхода топлива.

Неясность с тепловой энергией и единицей ее измерения является причиной того, что все термодинамические методы разделения расхода топлива в комбинированных производствах за тепловую энергию принимают только одно из ее свойств, игнорируя другое. Чтобы обосновать такой подход и как-то согласовать энергетические и экономические показатели комбинированного производства, в методах принимаются

принципиально разные предпосылки относительно ценности тепловой энергии. Примером тому могут служить физический и эксергетический методы разделения расхода топлива, где за тепловую энергию принимают, соответственно, энтальпию и эксергию рабочего тела.

Согласно физическому методу ценность джоулей тепловой энергии не зависит от эксергии. Себестоимость джоулей энтальпии s_{i1} и джоулей всех других видов продукции, вырабатываемых из исходной тепловой энергии, одинакова и рассчитывается исходя из издержек, понесенных на топливо, по формуле:

$$s_{i1} = \psi_1 / i_1, \quad (1)$$

где ψ_1 – издержки, понесенные на топливо для придания килограмму рабочего тела начальной энтальпии i_1 .

Изменение себестоимости джоулей тепловой энергии в процессе выработки из нее механической энергии в данном методе не рассматривается.

В физическом методе себестоимость исходной тепловой энергии определяется стоимостью топлива, затраченного на ее получение. Метод не учитывает, что себестоимость вырабатываемой механической (электрической) энергии определяется не стоимостью топлива, а стоимостью работы, совершаемой тепловой энергией.

В эксергетическом методе считается, что ценность исходной тепловой энергии определяется только ее эксергией. Себестоимость одного джоуля эксергии s_{e1} согласно эксергетическому методу определяется из формулы:

$$s_{e1} = \psi_1 / e_1. \quad (2)$$

Эксергетический метод оценивает только рабочие свойства тепловой энергии. В этом случае полезный выход, который можно получить от комбинированной реализации тепловой энергии и реализации ее на ТЭС, в обоих случаях будет одинаков, что не отвечает многолетнему опыту эксплуатации когенерационных установок.

Практика показывает, что термодинамические методы не могут быть использованы для установления топливных составляющих себестоимости электрической и тепловой энергии, вырабатываемых комбинированным способом. Так, при использовании физического метода сильно занижаются цены на электрическую энергию, а эксергетического – на теплоту [1]. Несовершенство физического и эксергетического методов побудило к разработке ряда других термодинамических методов, в которых вводятся разного рода поправки, направленные на устранение указанных недостатков. Однако анализ показывает, что эти поправки не имеют научного обоснования [1]. Предлагаемые методы дают разные результаты, и ни один из них не может служить основой при калькуляции себестоимости продукции комбинированных производств. Некорректность термодинамических методов связана с подменой тепловой энергии рабочего тела одним из ее параметров состояния, который пытаются связать со стоимостью. Один параметр не определяет однозначно тепловую энергию как товарную продукцию. Параметру нельзя установить стоимость, и он не может быть объектом экономики.

Экономический подход к разделению издержек на топливо.

Поскольку получение тепловой энергии связано с денежными затратами, тепловая энергия является также объектом изучения экономики. Экономика рассматривает тепловую энергию, как товарную продукцию и приписывает ей такие атрибуты, как потребительские свойства и себестоимость. В данной работе под термином себестоимость имеется в виду только топливная составляющая себестоимости вырабатываемых видов энергии. Издержки на топливо в калькуляции себестоимости комбинированного производства представляют суммарную топливную составляющую себестоимости произведенной продукции.

Издержки на топливо I_0 , складывающиеся из стоимости закупленного количества топлива, затрат на погрузку, транспортировку, разгрузку, относят на количество топлива B_0 , доставленного на комбинированное производство. Удельная себестоимость топлива s_T для производства рассчитывается по формуле: $s_T = I_0 / B_0$.

При комбинированном способе выработки электрической и тепловой энергии топливо не разделяют. Его сжигают, а полученную исходную тепловую энергию передают рабочему телу. Количество исходной тепловой энергии Q , полученной от сжигания B килограмм топлива и преобразуемой в турбине в другие виды энергии, равно: $Q = BQ_H^P \eta_T$, где Q_H^P - теплотворная способность топлива, η_T - к.п.д. топки.

Издержки I , понесенные на B килограмм топлива, после его сжигания относят на тепловую энергию Q . Себестоимость одного джоуля исходной тепловой энергии s_{i1} составляет: $s_{i1} = I / Q$.

Себестоимость исходной тепловой энергии, содержащейся в одном килограмме рабочего тела ψ_{i1} , рассчитывается по формуле: $\psi_{i1} = i_1 I / Q$.

Издержки на топливо, расход топлива и количество исходной тепловой энергии, – пропорциональные величины. Связь между ними имеет вид: $I = s_T B = s_{i1} Q$.

Поэтому, если разделять расход топлива, исходя из положений термодинамики, или разделять издержки на топливо согласно положениям экономики, в обоих случаях соответствующие безразмерные отдельные составляющие расхода топлива и издержек на топливо должны иметь одинаковые значения, что является условием согласования экономической и энергетической сторон комбинированного производства. Если значения не совпадают, то из этих методов разделения выбирают более обоснованный. В турбине исходная тепловая энергия Q , совершая работу W , преобразуется в механическую (электрическую) энергию и тепловую энергию заданных параметров Q_1 . Полученные виды энергии характеризуются количеством и себестоимостью. Если пренебречь потерями тепла в окружающую среду через корпус турбины, то суммарное количество их энергии равно количеству исходной тепловой энергии Q . Их общая себестоимость равна себестоимости исходной тепловой энергии I . Расход топлива разделяют пропорционально количеству энергии в выработанных видах продукции, а издержки на топливо пропорционально себестоимости каждого из этих видов продукции.

Если исходить из положений термодинамики, где работа и все виды энергии измеряются в джоулях и рассматриваются только количественно, можно записать:

$$Q = W + Q_1. \quad (3)$$

Из уравнения (3) определяются отдельные составляющие W/Q и Q_1/Q , по которым разделяют расход топлива B , и понесенные на топливо издержки I . Если подходить к проблеме с экономической стороны, то разделению подлежат издержки на топливо.

Исходная тепловая энергия в процессе адиабатного расширения за счет внутренней энергии совершает работу W , вырабатывая механическую энергию. При этом имеет место перераспределение эксергии между вырабатываемыми видами продукции. Совершенная работа имеет стоимость, которую следует отнести на произведенную механическую (электрическую) энергию. Себестоимость оставшейся тепловой энергии уменьшается. Поскольку при этом дополнительных денежных затрат не требуется, себестоимость исходной тепловой энергии перераспределяется между произведенными видами продукции

уже в качестве их себестоимости. При полной реализации рабочих свойств исходной тепловой энергии остающаяся энергия не имеет стоимости.

Издержки, понесенные на топливо, на разных этапах комбинированного производства можно представить в виде:

$$I = s_T B = s_{i1} Q = s_W W + s_{Q1} Q_1. \quad (4)$$

Здесь s_W и s_{Q1} – себестоимость джоулей, соответственно, работы и тепловой энергии, передаваемой в тепловые производства. Их значения, которые пока неизвестны, отличаются от значений s_{e1} и s_{i1} .

Из уравнения (4) рассчитываются отдельные составляющие $s_W W / s_{i1} Q$ и $s_{Q1} Q_1 / s_{i1} Q$, по которым следует разделять понесенные на топливо издержки и расход топлива.

Совместный анализ уравнений (3-4) показывает, что они не согласуются между собой. Раздельные топливные составляющие себестоимости электрической и тепловой энергии и соответствующие им составляющие расхода топлива, рассчитанные исходя из положений термодинамики и экономики, имеют разные значения.

Анализ показывает, что причиной этому является некорректность предпосылок, принятых в теплоэнергетике относительно ценности тепловой энергии. В термодинамических методах не учитывается, что себестоимость вырабатываемой механической энергии определяется не себестоимостью соответствующего количества тепловой энергии, а стоимостью работы, совершаемой тепловой энергией рабочего тела, которую следует определить. Поэтому при установлении энергетических и экономических показателей комбинированного производства следует исходить из уравнения (4).

Метод разделения издержек на топливо при выработке электрической и тепловой энергии комбинированным способом.

В предлагаемом методе изменение себестоимости исходной тепловой энергии в процессе выработки механической энергии рассматривается в зависимости от изменения двух ее параметров – энтальпии и эксергии. Соответственные значения этих параметров на разных стадиях совершения работы определяются экспериментально или устанавливаются из анализа термодинамических процессов, имеющих место в турбине.

Метод разделения издержек на топливо основывается на построении математической модели термодинамического процесса реализации исходной тепловой энергии в форме работы, в которой тепловые и рабочие свойства тепловой энергии рассматриваются во взаимосвязи. Метод представлен в упрощенной форме, но его легко уточнить для конкретных когенерационных установок различного типа.

Рассматривается процесс комбинированного использования тепловой энергии в когенерационной установке простого цикла, в которой часть исходной тепловой энергии в форме работы передается на выработку механической энергии, а оставшаяся часть используется в тепловых процессах. Все переменные представлены в удельных величинах.

Исходная тепловая энергия рабочего тела представляется как совокупность рабочих и тепловых свойств, количественно определяющихся, соответственно, эксергией e_1 и энтальпией i_1 . В процессе совершения тепловой энергией работы значения этих параметров изменяются одновременно. Исходные (i_1, e_1) и конечные (i, e) параметры состояния тепловой энергии и ее начальная себестоимость ψ_1 известны.

Себестоимость тепловой энергии после выработки заданного количества механической энергии определяется не столько ее новыми параметрами, сколько

изменением их величины относительно начальных значений: i/i_1 и e/e_1 . Связь между разными по природе величинами (себестоимостью, энтальпией, эксергией) проще установить, представив их в безразмерном виде: $\psi/\psi_1, i/i_1, e/e_1$.

Для установления такой связи используем математический аппарат факторного анализа. Тепловые и рабочие свойства, представленные в безразмерном виде (i/i_1 и e/e_1), интерпретируем как частные показатели стоимости тепловой энергии. Эти два частных показателя вместе определяют себестоимость тепловой энергии, передаваемой в тепловые производства.

Относительное изменение себестоимости ψ/ψ_1 тепловой энергии представляется как функция изменения ее частных показателей стоимости: $\psi/\psi_1 = f(i/i_1; e/e_1)$.

Если тепловая энергия используется только в тепловых процессах, то в самом простом виде эту функцию можно записать как $\psi_i/\psi_1 = i/i_1$. При этом изменение себестоимости пропорционально изменению энтальпии (физический метод).

При реализации только рабочих свойств исходной тепловой энергии функция имеет вид: $\psi_e/\psi_1 = e/e_1$, что согласуется с эксергетическим методом.

В комбинированных производствах электрической и тепловой энергии одновременно реализуются, как тепловые, так и рабочие свойства исходной тепловой энергии.

Каждое из свойств тепловой энергии имеет свой вес в топливной составляющей себестоимости. В исходной тепловой энергии вес свойств не определен. Значения веса зависят от того, как тепловая энергия реализована. Принимая значение веса тепловых свойств в себестоимости выработанной тепловой энергии за x , можно записать:

$$\psi/\psi_1 = (i/i_1)^x (e/e_1)^{1-x}. \quad (5)$$

Вес рабочих и тепловых свойств (эксергии и энтальпии) в себестоимости исходной тепловой энергии ψ_1 для исследуемого режима работы когенерационной установки простого цикла определяется из следующих соображений:

Если себестоимость исходной тепловой энергии ψ_1 после выработки механической энергии стала ψ , то вес тепловых свойств, x , в ее новой себестоимости будет составлять ψ/ψ_1 , а вес рабочих свойств определится как $(1 - \psi/\psi_1)$. Количество оставшейся тепловой энергии рабочего тела при этом совпадает с конечным значением энтальпии.

Подставляя значения весов каждого из свойств тепловой энергии в уравнение (5), получаем зависимость, связывающую тепловую энергию после частичной реализации в форме работы с ее себестоимостью. Записанная в удельных величинах, она имеет вид:

$$\frac{\psi}{\psi_1} = \left(\frac{e}{e_1}\right)^{1-\frac{\psi}{\psi_1}} \left(\frac{i}{i_1}\right)^{\frac{\psi}{\psi_1}} = \frac{e}{e_1} \left(\frac{i e_1}{i_1 e}\right)^{\frac{\psi}{\psi_1}}. \quad (7)$$

Искомая зависимость удовлетворяет следующим требованиям: себестоимость тепловой энергии после частичного ее преобразования в механическую энергию зависит от всех частных показателей стоимости; себестоимость равна нулю, если один из частных показателей равен нулю; вес частных показателей в общей себестоимости тепловой энергии зависит от режима работы когенерационной установки.

Уравнение (6) представляет математическую факторную модель процесса реализации тепловой энергии. Насколько эта модель отвечает действительности, устанавливается при ее практической апробации.

Отношение ψ / ψ_1 можно трактовать как долю издержек на топливо, приходящуюся на вырабатываемую тепловую энергию. Топливная составляющая в калькуляции себестоимости тепловой энергии, передаваемой в тепловые процессы, определяется как $I\psi / \psi_1$, а расход топлива, относящийся на ее выработку, составляет $B\psi / \psi_1$.

Потерю себестоимости тепловой энергии, составляющую в относительных величинах $(1 - \psi / \psi_1)$, относят на произведенную работу и выработанную механическую энергию.

В уравнении (6) значение ψ неизвестно. Уравнение решается методом последовательных приближений на компьютере.

Значение ψ / ψ_1 можно определить и графическим методом. Для этого уравнение логарифмируют:

$$\ln(\psi / \psi_1) = \ln(e / e_1) + (\psi / \psi_1) \ln(i e_1 / i_1 e).$$

На графике в координатах $[(\psi / \psi_1), y]$ строятся логарифмическая кривая $y = \ln(\psi / \psi_1)$ и прямая $y = \ln(e / e_1) + (\psi / \psi_1) \ln(i e_1 / i_1 e)$, в точке пересечения которых определяется искомое значение топливной составляющей себестоимости тепловой энергии ψ / ψ_1 , передаваемой в тепловые производства.

Если не учитывать потери энергии в окружающую среду через корпус турбины, то количество энергии, передаваемой в форме работы, численно равно разности энтальпий рабочего тела в начале и конце процесса выработки механической энергии. Себестоимость джоулей, передаваемых в форме работы на выработку электрической энергии, рассчитывается по формуле:

$$s_e = (\psi_1 - \psi) / (i_1 - i). \quad (7)$$

Формула для определения себестоимости джоулей энергии, передаваемой в тепловые производства, имеет вид:

$$s_i = \psi / i. \quad (8)$$

При определении топливных составляющих себестоимости джоулей, вырабатываемых электрической и тепловой энергии необходимо учитывать, соответственно, КПД электромеханических процессов и КПД системы утилизации тепла.

Зная топливные составляющие ψ / ψ_1 и $(1 - \psi / \psi_1)$, по общепринятым методикам можно установить все экономические и энергетические показатели комбинированного производства.

Предлагаемый метод применим для разных типов когенерационных установок.

При разделении издержек на топливо в когенерационной установке с несколькими отборами пара (a, b, \dots) разных параметров, ее условно разделяют на соответствующее количество установок простого цикла, работающих параллельно в разных режимах. Для каждой из них известны расход рабочего тела (D_a, D_b, \dots) , а также начальные $(i_1; e_1)$ и конечные $(i_a, e_a; i_b, e_b; \dots)$ параметры тепловой энергии.

Установка с двумя отборами пара рассматривается как две когенерационные установки простого цикла. Для этих условных установок значения топливных составляющих себестоимости энергии, передаваемой в тепловые производства, составляют: $\psi_a D_1 / \psi_1 D_a$ и $\psi_b D_1 / \psi_1 D_b$. Расчетные уравнения записываются в виде:

$$\frac{\psi_a D_1}{\psi_1 D_a} = \left(\frac{e_a}{e_1}\right)^{1-\frac{\psi_a D_1}{\psi_1 D_a}} \left(\frac{i_a}{i_1}\right)^{\frac{\psi_a D_1}{\psi_1 D_a}} \quad \text{и} \quad \frac{\psi_b D_1}{\psi_1 D_b} = \left(\frac{e_b}{e_1}\right)^{1-\frac{\psi_b D_1}{\psi_1 D_b}} \left(\frac{i_b}{i_1}\right)^{\frac{\psi_b D_1}{\psi_1 D_b}}.$$

Решая эти уравнения, находим значения топливных составляющих себестоимости тепловой энергии в отборах пара разных параметров ψ_a / ψ_1 и ψ_b / ψ_1 . Топливная составляющая себестоимости тепловой энергии, передаваемой в форме работы в когенерационной установке с двумя отборами пара, определяется как $[1 - (\psi_a + \psi_b) / \psi_1]$.

Для когенерационной газотурбинной установки простого типа, содержащей воздушный компрессор, камеру сгорания, газовую турбину, утилизатор теплоты, предполагаются известными следующие данные: энтальпия и эксергия рабочего тела на входе i_1, e_1 и выходе из турбины i, e ; издержки на топливо I_1 и расход топлива B_1 на один килограмм рабочего тела; совершаемая 1 кг рабочего тела работа W , которая складывается из передаваемой потребителям полезной работы W_1 и внутренних затрат работы W_2 .

С учетом внутренних затрат работы себестоимость исходной тепловой энергии ψ_{i1} , содержащейся в одном килограмме рабочего тела, рассчитывается по формуле: $\psi_{i1} = I_1 + s_w W_2$. Здесь s_w – себестоимость 1 кДж работы, совершаемой когенерационной установкой. При подстановке ψ_{i1} в (6) получаем уравнение с двумя неизвестными – ψ_i и s_w . Задаваясь значениями s_w и решая уравнение (6) методом последовательных приближений, определяют значение ψ_i / ψ_{i1} , обозначим его как A , которое с допустимой погрешностью Δs_w удовлетворяет неравенству:

$$s_w - \frac{I_1 (1 - A)}{W - W_2 (1 - A)} < \pm \Delta s_w.$$

Значение s_w принимается за себестоимость 1 кДж совершаемой работы.

Себестоимость 1 кДж вырабатываемой тепловой энергии определяется из формулы: $s_{i2} = A \psi_{i1} / i_2$. Издержки на топливо I_1 распределяются между выработанными видами продукции: $I_1 = s_{i2} i_2 + s_w W_1$. Раздельные топливные составляющие себестоимости вырабатываемых видов энергии U_Q и U_W рассчитываются по формулам: $U_Q = s_{i2} i_2 / I_1$; $U_W = s_w W_1 / I_1$.

Предлагаемый метод разделения издержек применим для одиночных когенерационных установок, работающих в стационарном режиме. На его основе может быть разработана методика определения себестоимости вырабатываемой продукции на ТЭЦ, где одновременно работает группа турбоустановок разного типа.

Характер изменения стоимостных показателей тепловой энергии в зависимости от режима работы когенерационной установки.

Рассматривая термодинамический процесс выработки электрической энергии конденсационной турбиной, можно симитировать все возможные режимы работы когенерационной установки и установить характер изменения стоимостных показателей тепловой энергии, реализуемой в форме работы и теплоты.

В качестве примера рассматривается процесс выработки электрической энергии в идеальной турбине. Параметры рабочего тела на входе турбины: $i_1 = 3300$ кДж/кг; $e_1 = 1300$ кДж/кг. Уравнение процесса в переменных $(i / i_1, e / e_1)$ определено зависимостью: $i / i_1 = 0,6 + 0,4(e / e_1)$.

На рис. 1 в графической форме представлены зависимости, характеризующие стоимостную сторону процесса выработки электрической энергии в когенерационной установке простого цикла для идеализированных условий.

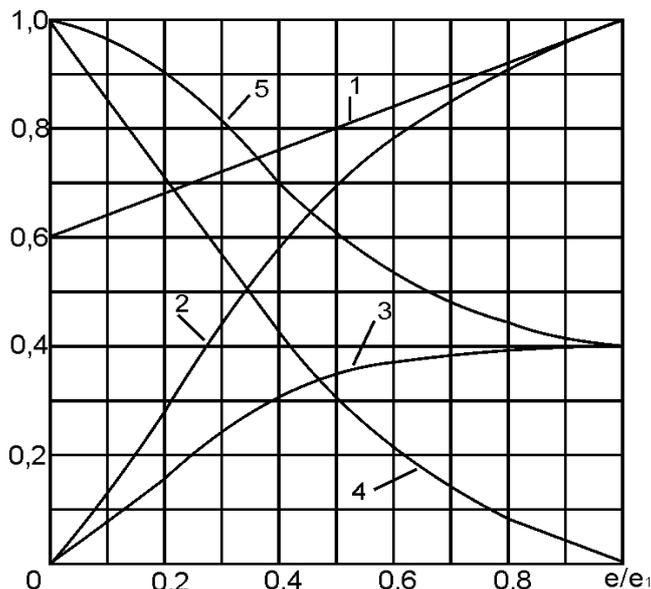


Рис. 1. Идеальная турбина. Характер изменения показателей:

$$1 - i / i_1; 2 - \psi / \psi_1; 3 - s_i / s_{e1}; 4 - (1 - \psi / \psi_1); 5 - s_e / s_{e1}.$$

Кривые на рис.1 отображают характер изменения параметров тепловой энергии и ее стоимостных показателей в зависимости от режима турбины. Режимы турбины определяются значениями e / e_1 , при которых тепловая энергия передается в тепловые процессы.

Линия термодинамического процесса выработки электроэнергии в идеальной турбине представлена кривой 1. По ней для различных режимов работы когенерационной установки определяются значения i / i_1 , соответствующие значениям e / e_1 .

Кривая 2 воспроизводит характер изменения себестоимости тепловой энергии ψ / ψ_1 , передаваемой в тепловые производства. Она построена по значениям ψ / ψ_1 , рассчитанным из уравнения (6) для различных режимов работы когенерационной установки.

Изменение топливной составляющей себестоимости джоулей тепловой энергии s_i / s_{e1} по ходу процесса выработки электрической энергии показано кривой 3, которая построена с использованием формул (2) и (8).

Характер изменения себестоимости энергии, передаваемой в форме работы, $(1 - \psi / \psi_1)$, в зависимости от режима турбины представлен кривой 4.

По кривой 5 можно определить, как изменяется себестоимость джоулей, передаваемых в форме работы, в зависимости от режима работы установки. Так, для режимов ($e / e_1 > 0,9$) их себестоимость близка к себестоимости джоулей передаваемых в тепловые производства. По мере уменьшения работоспособности тепловой энергии себестоимость джоулей, передаваемых на выработку электрической энергии, увеличивается до значения s_{e1} . Кривая (5) рассчитывается по формулам (2) и (7).

Аналогичные кривые для такой же когенерационной установки, где условно учтено трение, приведены на рис. 2. Уравнение процесса представлено зависимостью: $i / i_1 = 0,7 + 0,3(e / e_1)$.

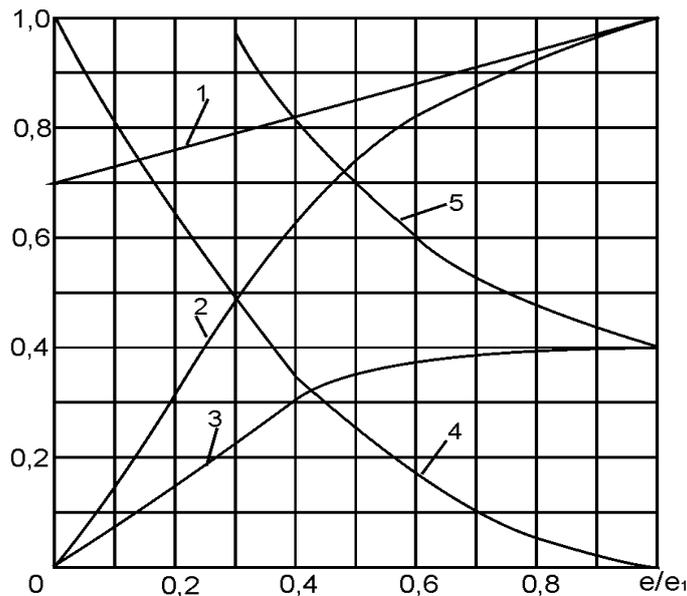


Рис. 2. Турбина с трением. Характер изменения показателей:

$$1 - i / i_1; 2 - \psi / \psi_1; 3 - s_i / s_{e1}; 4 - (1 - \psi / \psi_1); 5 - s_e / s_{e1}.$$

В реальной турбине из-за трения часть рабочих свойств тепловой энергии тратится в самой турбине на нагрев рабочего тела. В результате количество джоулей работы, передаваемых на выработку электрической энергии меньше, чем в идеальной турбине. Степень снижения выработки электрической энергии зависит от технического совершенства турбины. Из сравнения кривых 5 на рис.1 и рис. 2 можно заключить, что трение существенно влияет на себестоимость джоулей, передаваемых на выработку электрической энергии.

Из анализа графических зависимостей, приведенных на рисунках 1 и 2, следует, что в комбинированных производствах себестоимость джоулей работы, возрастает с увеличением количества их выработки, притом себестоимость джоулей, передаваемых в тепловые процессы, уменьшается. Отношение s_e / s_i увеличивается.

Значения топливных составляющих себестоимости тепловой энергии, передаваемой в тепловые производства, рассчитанные по физическому, предлагаемому и эксергетическому методам сильно отличаются. Так для рассматриваемой турбины с трением, работающей в режиме ($e/e_1=0,5$), они соответственно составляют: 0,85; 0,74; 0,5.

При равных условиях себестоимость джоулей, передаваемых на выработку электрической энергии, рассчитанная по предлагаемому методу, в комбинированных производствах меньше, чем на тепловых электростанциях (ТЭС), а себестоимость тепловой энергии меньше, чем в котельных. Для примера: на рис. 2 при режиме ($e/e_1=0,5$) себестоимость джоулей тепловой энергии, реализуемых в форме работы и теплоты, составляет относительно начальной себестоимости джоулей эксергии, соответственно: $s_e / s_{e1}=0,7$ и $s_i / s_{e1}=0,34$.

Надо отметить, что знание себестоимости вырабатываемой энергетической продукции еще не решает всех проблем комбинированных производств. Себестоимость джоулей электрической и тепловой энергии, вырабатываемых комбинированным способом, может быть разной и зависит от стоимости топлива, начальных параметров тепловой энергии, режима турбины, ее конструктивных особенностей. Управление этими факторами при выработке энергетической продукции комбинированным способом может способствовать успешной ее реализации на рынке энергии.

Для установления оптимальных режимов работы когенерационных установок на ТЭЦ, требуется разработка экономических методов, где оптимизация режимов имеющегося оборудования осуществляется исходя из спроса и рыночных цен на каждый из видов вырабатываемой продукции. Разработка таких экономических методов существенно упрощается при знании себестоимости продукции.

Выводы

Представлена методология, связывающая издержки, понесенные на топливо при получении исходной тепловой энергии, с процессом реализации тепловой энергии. На ее основе разработан универсальный метод разделения издержек, понесенных на топливо при выработке электрической и тепловой энергии комбинированным способом, где энергетическая и экономическая стороны такого производства согласованы.

Метод разделения издержек изложен с использованием упрощенных примеров, но его легко уточнить для конкретных типов когенерационных установок. В случае успешной апробации метод можно использовать для установления технико-экономических показателей когенерационных установок. Он применим при определении себестоимости каждого из видов энергетической продукции, вырабатываемой комбинированным способом. Метод может быть основой для разработки экономических методов оптимизации работы ТЭЦ в рыночных условиях.

Список использованной литературы

1. Хрилев Л. С., Малафеев В. А., Хараим А. А., Лившиц И. М. Сравнительная оценка отечественных и зарубежных методов разделения расхода топлива и формирования тарифов на ТЭЦ // Теплоэнергетика.– 2003.– № 4.– С. 45–54.
2. Славина Н. А., Косматов Э. М., Барыкин Е. Е. О методах распределения затрат на ТЭЦ. Электрические станции. – 2001. – № 11. – С. 14–17.
3. Малафеев В. А., Смирнов И. А., Хараим А. А., Хрилев Л. С., Лившиц И. М. Формирование тарифов на ТЭЦ в рыночных условиях. Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – С. 55–63.
4. Жарков С. В. К вопросу о разделении затрат на ТЭЦ // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010. – № 1. – С. 24–28.
5. Роголев Н. Д., Зубкова А. Г., Мастерова И. В. Экономика энергетики, Издательство МЭИ, 2005. – Москва. – 288 с.
6. Воловик Ю. И. Экономические аспекты оценки эффективности работы ТЭЦ. Теплоэнергетика– 2007. – №2. – С. 39–44.

References:

1. Khrylev L. S., Malafeev V. A., Kharaym A. A., Lyvshyts Y. M. Sravnitel'naya otsenka otechestvennykh y zarubezhnykh metodov razdeleniya raskhoda toplyva y formyrovaniya taryfov na TETs. Teploenerhetyka.– 2003.– № 4.– S. 45–54.
2. Slavyna N. A., Kosmatov Э. М., Barykyn E. E. O metodakh raspredeleniya zatrat na TETs. Elektrycheskiye stantsyy. – 2001. – № 11. – S. 14–17.
3. Malafeev V. A., Smyrnov Y. A., Kharaym A. A., Khrylev L. S., Lyvshyts Y. M. Formyrovaniye taryfov na TETs v rynochnykh usloviyakh. Teploenerhetyka. – 2003. – № 4. – S. 55–63.
4. Zharkov S. V. K voprosu o razdelenyy zatrat na TETs. Enerhyia: ekonomyka, tekhnika, ekolohyia. – 2010. – № 1. – S. 24–28.
5. Rohalov N. D., Zubkova A. H., Masterova Y. V. Ekonomyka enerhetyky. – Yzdatelstvo MEY, 2005. – Moskva. – 288 s.
6. Volovyk Yu. Y. Ekonomycheskiye aspekty otsenky effektivnosti raboty TETs. Teploenerhetyka– 2007. – №2. – S. 39–44.

Принята до друку 25. 11. 2019 р.