

Комбинированная энергия ТЭЦ*

В предлагаемой статье авторами поставлена цель доступным языком рассказать об уникальных свойствах комбинированной тепловой и электрической энергии ТЭЦ, а также, применяя «школьные» знания и основы термодинамики, показать, что тарифы на тепло от ТЭЦ (для населения, теплиц, отрасли ЖКХ и др.) по топливной составляющей искусственно завышаются от четырёх до 20 раз — с реальных 8–40 кг у.т./Гкал до уровня «альтернативной котельной» (165 кг у.т./Гкал). Также авторами выдвинуты предложения по возрождению теплофикации России.

Авторы: А.Б. БОГДАНОВ, аналитик теплофикации (г. Омск); О.А. БОГДАНОВА, инженер-проектировщик ГК «ИНТЕХ» (г. Омск); Д.А. БОГДАНОВ, начальник планово-экономического отдела (ПЭО) ОП СФ 000 «ИнтерРАО — Инжиниринг» (г. Омск)

* Примечание редакции: приведённый в статье анализ публикуется в авторской редакции и отражает исключительно личное мнение авторов по рассматриваемым вопросам.

Комбинированная энергия («комбиэнергия») — это не только широко известная теплофикационная энергия ТЭЦ («электрическая энергия + тепловая энергия»), неразрывно произведённая и потреблённая в едином технологическом цикле, без отвода бросового тепла турбин в окружающую среду. Комбиэнергия — это ещё и широко известные виды генерации энергии: теплофикация (когенерация), тригенерация, «квадрогенерация», прохлады абсорбционных тепловых насосов, сезонная аккумуляция тепла в грунте. Это любое повторное использование энергии отработанного продукта: утилизированное тепло охлаждения силовых трансформаторов, утилизированное тепло холодильных установок, давно забытые паровые молоты, утилизированное тепло производства технического углерода, тепло котлов утилизаторов, тепло рекуператоров вытяжной вентиляции, тепло схем регенеративного подогрева ТЭС и т.д.

Окружающий нас мир насковзь пропитан энергией и комбиэнергией. Подробнее о экономике энергетики с применением эксергии и анергии изложено в [1, 2].



❖ Расширенный вариант данной статьи (с дополнительными иллюстрациями) представлен на сайте журнала СОК по ссылке

Отличительной особенностью комбиэнергии ТЭЦ является чрезвычайно высокая энергетическая эффективность производства, достигающая КПД использования топлива 85–95 % — вместо традиционных 35–55 % при раздельном производстве тепловой энергии в котельной и раздельной конденсационной электрической энергии ГРЭС.

Внедрение нового вида рыночного товара под брендом «комбитепло» с затратами топлива 8–40 кг у.т./Гкал позволяет не только обеспечить население, теплицы и отрасль ЖКХ теплом в три-восемь раз дешевле, чем от котельных, но и кардинально (до 4–10 раз, при температуре

Производство и потребление «комбиэнергии» неразрывно во времени и в пространстве:

$$\text{Энергия} = \text{КомбиЭнергия} = \text{Эксергия} [\text{работа}] + \text{Анергия} [\text{тепло в окружающую среду}], \quad (1)$$

$$\text{КомбиЭнергия} = \text{КомбиЭлектро} + \text{КомбиТепло} + \text{КомбиПрохлада}, \quad (2)$$

$$\text{КомбиРабота} = \text{КомбиЭлектро} + \text{КомбиДвижение} + \text{КомбиПоложение}. \quad (3)$$

Что такое «эксергия» и «анергия»

Эксергия — предельное (наибольшее или наименьшее) значение энергии, которое может быть использовано (получено или затрачено) полезным образом в термодинамическом процессе (с учётом ограничений, накладываемых законами термодинамики), то есть это максимальная работа, которую может совершить макроскопическая система при квазистатическом переходе из заданного состояния в состояние равновесия с окружающей средой (эксергия процесса положительна), или же та минимальная работа, которую необходимо затратить на квазистатический переход системы из состояния равновесия с окружающей средой в заданное состояние (эксергия отрицательна). **Анергия** — та часть энергии, которая не может быть преобразована в эксергию (разность между изменением энергии в процессе и эксергией процесса). Из закона сохранения энергии следует, что при любом преобразовании энергии сумма эксергии и анергии процесса остаётся неизменной.

Иными словами, **эксергия** и **анергия** — это неразрывные составные части энергии.

Эксергия — это условно «высококачественная», легко превращаемая в полезную работу часть энергии, например, солнечная или электроэнергия, энергия органического топлива, механическая энергия вращения ротора турбины, энергия излучения и т.д., она может выполнять механическую работу (крутить вал турбины), передаваться на расстояние и т.п.

Анергия — это «низкокачественная», не превращаемая часть энергии, переходящая в тепло окружающей среды, например, тепло дымовых газов котла, сгоревшей спички, океана и т.д., для превращения которой в другие (полезные) виды энергии требуется затратить часть эксергии. Анергия отработанного пара турбин ТЭЦ, хотя и содержит 50 % тепла сожжённого топлива, уже не может совершать механическую работу. Энергия подчиняется закону сохранения, но закона сохранения эксергии не существует, то есть в замкнутой системе все виды «высококачественной», работоспособной эксергии превращаются в «низкокачественную», неиспользуемую анергию — тепло окружающей среды.

горячей воды до 40 °С) снизить выбросы углекислого газа в городах (провести настоящую декарбонизацию), создать инвестиционно привлекательные направления с применением новейших технологий топливосбережения: абсорбционные тепловые насосы, системы централизованного хладоснабжения и кондиционирования, замена пиковых котельных на сезонные аккумуляторы тепловой энергии в грунте, низкотемпературный подогрев тротуаров и дорожек, снеготаялок и ливнеотстоков с крыш и т.п.

В этой статье мы поговорим непосредственно о комбиэнергии ТЭЦ.

Игра в статистическую отчётность

Вот уже более 72 лет, начиная с 10 января 1950 года, в энергетике нашей страны проходит непрерывная эстафета по передаче от поколения к поколению «красивой», но недостоверной статистической отчётности об эффективности работы ТЭЦ. Путём организации скрытого перекрёстного субсидирования топливом отрасли электроэнергетики, за счёт потребителей отработанного тепла ТЭЦ и ГРЭС, происходит необоснованное, двукратное удешевление комбинированной электроэнергетики от ТЭЦ за счёт трёх- и четырёхкратного удорожания комбинированной тепловой энергии от ТЭЦ. Именно бездарное игнорирование законов термодинамики в отечественной энергетике с 1990-х годов привело к массовому отключению тепловых потребителей от ТЭЦ, к прекращению строительства магистральных тепловых сетей, строительству квартальных, крышных, «альтернативных» котельных.

Регуляторы энергетики страны навязали обществу парадоксальное представ-



Фото: ПАО «Мосэнерго», mosenergo.gazprom.ru

ление о том, что сбросное тепло паровых турбин ТЭЦ, бесплатно выбрасываемое в окружающую среду ($B_{т/э.сброс} = 0,0$ кг у.т./Гкал), для всех потребителей (населения, теплицы, отрасли ЖКХ) должно продаваться по цене «альтернативной котельной» ($B_{т/э.нас} = 165$ кг у.т./Гкал).

Как бороться с навязанным **массовым конформизмом** и **беспринципно лукавой** («сколько надо, столько и нарисуем») **статистической отчётностью** в теплоэнергетике страны?

Регулирование декарбонизации энергетики России?

Последние пять лет на слуху у различных руководителей и регуляторов энергетики на разных симпозиумах появилось «экс-клюдивные», «модные» направления по

развитию российской энергетики: декарбонизация, водородная энергетика, гелио-энергетика, а также ветровая, геотермальная энергетика и т.д. А вот такое понятие, как «теплофикация», которая без дополнительных, огромных затрат автоматически снижает энергоёмкость энергетики на 20–40%, полностью исчезло из национальных программ России. Госплан СССР превратился в Минэкономразвития, потребность в знаниях нюансов работы крупных энергетических систем заменилась на умение манипулировать навыками — умением составлять нужную статистическую отчётность.

Декарбонизация энергетики — это прежде всего снижение выбросов углекислого газа (CO_2) на единицу поставляемой тепловой и электроэнергии [3]. Представляется очевидным, что давно пора применять объективный качественный анализ, программу реального снижения карбонатных выбросов в атмосферу, но делать это надо на основе объективных показателей энергоёмкости производства и потребления комбиэнергии ТЭЦ.

В отличие от декарбонизации, в энергетике России с 1924 года, вот уже почти 100 лет, существует более ёмкое понятие «теплофикация», которая в неразрывном процессе производства и потребления равного с раздельным производством количества тепловой и электрической энергии, обеспечивает не только уменьшение карбонатных выбросов в атмосферу на 20–40%, но уменьшение всех выбросов от сжигания топлива и, соответственно, снижение всех видов загрязнений атмосферы: углерода (CO_x), азота (NO_x), серы (SO_x), золы, термического загрязнения водных ресурсов, атмосферы и т.д.

Что такое конформизм

Конформизм — политическое и морально-психологическое явление, обозначающее «приспособленчество», пассивное принятие существующего социального порядка, политического режима и т.д., а также готовность соглашаться с господствующими мнениями и взглядами, общими настроениями, распространёнными в обществе и т.д.



PR-менеджеры Минэнерго, Минэкономразвития и других регуляторов на симпозиумах всегда говорят правильные лозунги: «О да, мы знаем, что теплофикация (когенерация) — это правильно, мы безусловно “за”...», однако на деле это пустые слова. Примером расхождения слов с делом, вызывающего сопутствующий рост выбросов CO₂, является современное строительство мощных районных котельных вообще без теплофикации. «Регуляторы энергетики» и «начальники декарбонизации» в наше время легко соглашутся отказать от теплофикации, хотя отказ от производства соответствующей комбинированной электрической энергии на ТЭЦ приводит к перерасходу топлива и, соответственно, к росту выбросов углекислого газа не менее чем на 40 % [3].

В Дании, например, королевским законом запрещено строительство котельных мощностью более 1 МВт без теплофикации [4]. В пункте 6.1.4 этого закона говорится: «...любое предприятие свыше 1 МВт будет преобразовано для комбинированного производства тепловой и электрической энергии». А в России теплофикация «де факто» исключена из национальных программ развития энергетики и экологии окружающей среды.

Отечественные регуляторы энергетической и экологической политики РФ, пришедшие вместо Госплана (Минэкономразвития, Минэнерго, ФАС, Минэкологии), по-видимому, не имеют комплексного видения проблем энергетики России и упорно не хотят перенимать знания и передовой опыт других стран.

Этот опыт включает следующее: применение понятий «эксергия» и «анергия» [5]; метод Вагнера; метод «эквивалентной



Фото: ГАО «Мосэнерго», mosenergo.gazprom.ru

ГРЭС» (США); 50-летний опыт применения маржинальных тарифов концерном EDF во Франции [6]; 40-летний датский опыт [4], включающий снижение в три-четыре раза ниже топливной составляющей тарифа от ТЭЦ, и т.д.

Давно назрела необходимость реорганизации Минэкономразвития в «Министерство анергии», которое в комплексе формировало бы топливосберегающую стратегию России по конкретным численным показателям и отвечало бы за регулирование как экономики, так и экологии нашей страны [7]. Именно в комплексе с синергетическим эффектом, а не по разобранному кусочкам, когда отдель-

но кто-то отвечает только за электроэнергетику, а кто-то — «на другом этаже» — за тепловую энергетику и т.д.

Для понимания сути теплофикации рассмотрим три различных инженерных методов анализа энергоёмкости «комбитепла»: а) «школьный» — простой, наглядный метод из программы школьной физики; б) «студенческий» — метод, включающий знание законов термодинамики; в) «профессиональный» — метод, требующий серьёзных, профессиональных знаний проектировщиков турбин, разрабатывающих диаграммы режимов работы паровых турбин.

«Школьная» энергоёмкость отработанного пара

Анализ теплотехнических свойств воды и водяного пара [8] наглядно показывает, что для нагрева 1 кг насыщенного пара от 40 до 115 °С требуется в 2,52 раза меньше тепла, чем при нагреве 1 кг воды от 40 до 115 °С. Для нагрева 1 кг воды от 40 до 115 °С требуется количество энергии

$$\Delta h' = h'_{115} - h'_{40} = 482 - 167 = 315 \text{ кДж/кг},$$

где 167 и 482 кДж/кг — энтальпия кипящей воды при 40 и 115 °С, соответственно. А для нагрева 1 кг пара от 40 до 115 °С требуется количество энергии

$$\Delta h'' = h''_{115} - h''_{40} = 2699 - 2574 = 125 \text{ кДж/кг},$$

где 2574 и 2699 кДж/кг — энтальпия насыщенного пара при 40 и 115 °С, соответственно (рис. 1).

Может показаться, что ничего полезного из этого нельзя. Однако нет! Именно данное свойство водяного пара позволяет в 2,5–8 раз сократить потребность в первичном топливе, при догреве низкопотенциального, бросового пара (с температурой 20–40 °С) до пара с температурой 60–150 °С — для круглогодично потребления тепла с использованием перспективных технологий сезонного аккумулирования энергии в грунте.

Отечественные регуляторы энергетической и экологической политики, по-видимому, не имеют комплексного видения проблем энергетики России и упорно не хотят перенимать знания и передовой опыт других стран

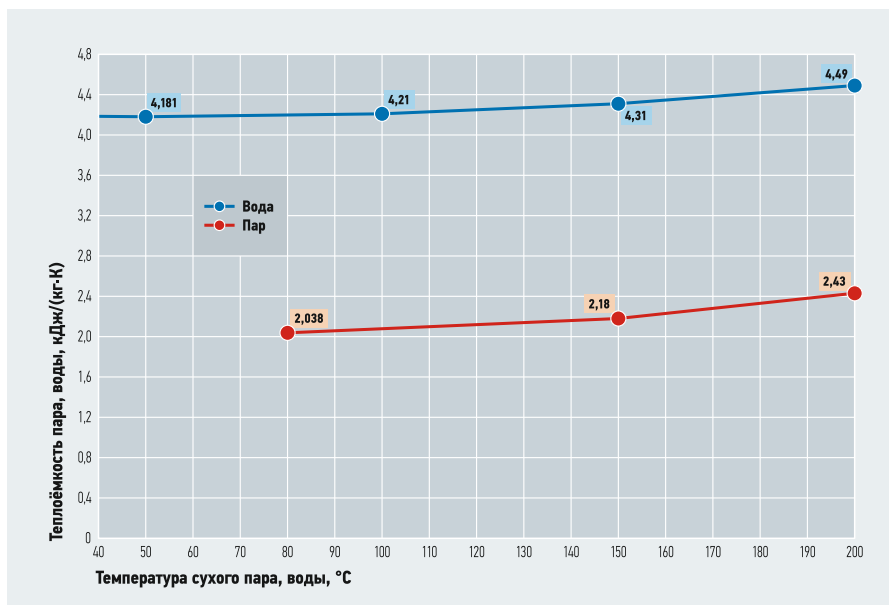


Рис. 1. Для нагрева пара требуется тепловой энергии в 2,5 раза меньше, чем для нагрева воды

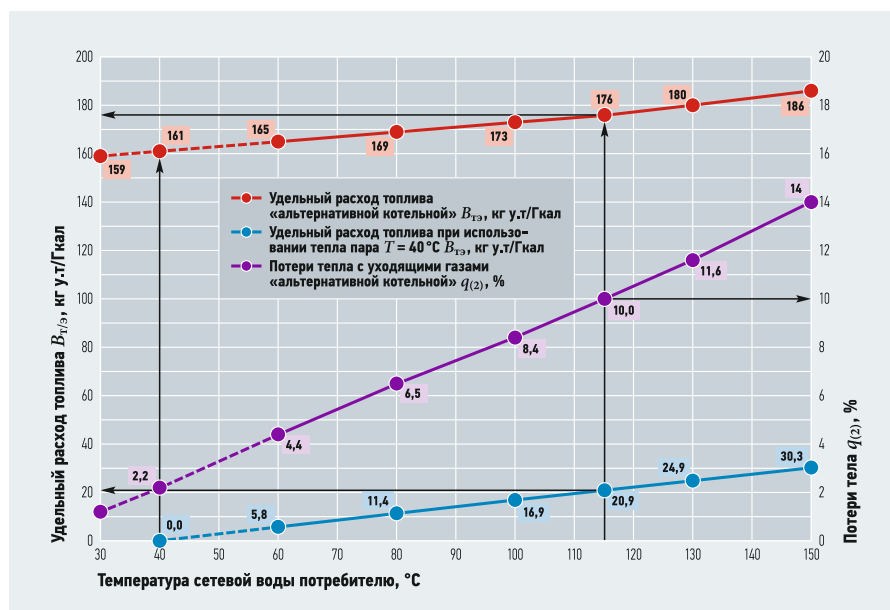


Рис. 2. «Школьный анализ»: удельный расход топлива на догрев «комбитепла» комбинированного (отработанного) пара (от 40 до 60–150 °С) в сравнении с нагревом от котельной

Разница при отводе тепла от пара и от воды отличается в восемь раз

Анализ данных, приведённых в [8], наглядно показывает, что количество выделяемого тепла при охлаждении с конденсацией 1 кг пара от 115 °С до воды с температурой 40 °С — в восемь раз больше энергии, чем при охлаждении 1 кг воды от 115 до 40 °С. При охлаждении 1 кг воды от 115 до 40 °С выделяется тепло

$$\Delta h_1 = 482 - 167 = 315 \text{ кДж/кг.}$$

При охлаждении и конденсации 1 кг пара от 115 до 40 °С воды выделяется тепла в восемь раз больше, чем при охлаждении воды от 115 до 40 °С:

$$\Delta h_2 = 2699 - 167 = 2532 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, коэффициент использования скрытой теплоты парообразования составит $k_{\text{скр.т}} = 2532/315 = 8,04$ раза.

Удивительный вывод

Использование скрытой теплоты парообразования — это самый эффективный и самый легко исполнимый способ реального топливосбережения и декарбонизации энергетики России. Коэффициент трансформации тепла — отношение отводимого тепла потребителю к подводимому высокопотенциальному теплу — с использованием скрытой теплоты парообразования составит:

$$k_{\text{тр}} = Q_{\text{отв}}/Q_{\text{подв}} = 2532/125 = 20,2 \text{ раза.}$$

Затратив дополнительно минимальное количество первичной высокотемпературной энергии («эксергии») в виде топлива (электроэнергии, механической энергии) на догрев отработанного пара турбин от 40 до 115 °С в размере 125 кДж/кг, можно получить в 20,2 раз больше энергии — низкопотенциального тепла конденсации

для конечного потребителя тепла с температурой 115 °С!

Именно это свойство водяного пара является главной «изюминкой», позволяющей в восемь раз эффективнее использовать скрытую теплоту парообразования сбросного пара 20–40 °С (выбрасываемую в окружающую среду от паровых турбин ТЭЦ, ГРЭС) для нагрева (по сути, недоохлаждения) бесплатного пара.



Для понимания этого свойства водяного пара не требуется проведения сложных теплотехнических и термодинамических расчётов. Достаточно знаний программы школьной физики.

Экономия топлива 96–83 %!

Экономия первичного топлива при использовании сбросного тепла паровых турбин ТЭЦ с температурой 40 °С против «альтернативной котельной» составляет 96–83%. Изменение удельного расхода топлива для «альтернативной котельной» приведено на рис. 2. Удельный расход топлива зависит от таких факторов, как температура наружного воздуха, температура уходящих газов, температура сетевой воды, избытки воздуха для горения воз-

духа, собственных электрических нужд на тепло. Это комплексный и сложный график, построение которого выходит далеко за рамки данной статьи, поэтому и «школьникам», и даже подготовленным «аудиторам» и «регуляторам энергетики» он пока недоступен. Нужна специальная подготовка, нужно «учиться, учиться и ещё раз учиться». Поэтому ниже приведём только итоговые выводы.

Чем ниже температура теплоносителя от котла, отдаваемого потребителю, тем ниже удельный расход топлива. Но ниже, чем 161 кг у.т./Гкал, он недоступен в принципе. И если какой-либо менеджер известной зарубежной котельной фирмы заявляет о супервысокой экономичности котлов с КПД выше 88–90 %, он просто не владеет всем комплексом вопросов: пониманием климата региона, тепловой схемы производства, транспорта и распределения тепла, $\text{КПД}_{\text{котла}}^{\text{брутто}}$, $\text{КПД}_{\text{котла}}^{\text{нетто}}$ и т.д.

Менеджера понять можно — это его задача (показать «красиво упакованный» товар), но регулятора «коллективного оптимума» страны «понять и простить» за его неквалифицированную работу нельзя [1]. Реальный удельный расход топлива на тепло от «альтернативной котельной» находится на уровне 169–176 кг у.т./Гкал. Чем холоднее наружный воздух и выше температура уходящих газов, тем выше удельный расход топлива, вплоть до 186 кг у.т./Гкал. Расход топлива на подогрев пара от 40 до 115 °С (правильнее сказать «недоохлаждение» — от 115 до 40 °С) составляет всего 20,9 кг у.т./Гкал. В процентном отношении это не выше 11,9–16,3 % от количества тепла, отданного конечному потребителю:

- для 40 °С это $0,0/161 = 0,0\%$, откуда экономия топлива против «альтернативной котельной» — 100 %;
- для 60 °С это $5,8/165 = 3,5\%$, откуда экономия топлива против «альтернативной котельной» — 96,5 %;
- для 100 °С это $16,9/173 = 9,8\%$, откуда экономия топлива — 90,2 %;
- для 115 °С это $20,9/176 = 11,9\%$, откуда экономия топлива — 88,1 %;
- для 150 °С это $30,3/186 = 16,3\%$, откуда экономия топлива — 83,7 %.

Это — ясный и наглядный пример использования тепловой «комбиэнергии», которая оказывается в восемь раз эффективнее, например, чем использование геотермальной или солнечной энергии. При температуре сетевой воды к потребителю тепла 40 °С топливная составляющая в тарифе на тепло от паровых турбин ТЭЦ становится равной нулю. Берите бесплатно, сколько можете, и аккумулируйте, храните, преобразуйте!

Паровой тепловой насос

Эффект превращения бросовой теплоты скрытого парообразования отработанного пара 40°C в товарный продукт (пар), а затем в горячую воду с температурой до 115°C — это, по сути, паровой тепловой насос прямого действия (ПТН), который широко известен с 1940-х годов и описан как пароструйный эжектор [9].

Обладая неограниченным источником низкопотенциального пара с температурой 40°C (просто выбрасываемого в окружающую среду) и имея относительно небольшие затраты первичного топлива для нагрева пара от 40 до 115°C («недоохлаждения» пара от 115 до 40°C), можно получить с 1 кг насыщенного пара в восемь раз больше тепла, чем при охлаждении 1 кг кипящей воды, — то есть с эффектом $2532/315 = 8,04$ раз! Налицо эффект высокоэффективного парового теплового насоса (ПТН или пароструйного эжектора) с огромным коэффициентом трансформации тепла $K_{тр} \geq 8$ (вплоть до бесконечности) при температуре около 40°C!

К сожалению, это уникальное свойство водяного пара, как очевидное явление, никто из регуляторов энергетической политики не рассматривал при анализе конкурентных свойств ТЭЦ, даже не думая о «ТЭЦ как низкотемпературном тепловом насосе прямого действия».

Не разбираясь в сути термодинамических процессов, в тепловой схеме ТЭЦ, не владея графиком Россандера, не «чувствуя пальчиками» уникальные свойства воды и водяного пара, некоторые разработчики и изготовители тепловых насосов пытаются заменить явление высокоэффективного парового теплового насоса прямого действия с $K_{тр} = 20,2$ (на паровой турбине ТЭЦ) на применение в тепловой схеме ТЭЦ абсорбционных (компрессионных) тепловых насосов с дополнительной тройной трансформацией тепла $K_{тр}$ не выше 4–6. Это — абсолютно бездарное, тупиковое направление развития тепловых схем ТЭЦ!

«Студенческая» энергоёмкость отработанного пара турбин

Продолжим анализ свойств термодинамического цикла с изучением самого главного, самого эффективного, поистине уникального показателя теплофикации — удельной выработки электроэнергии на базе теплового потребления [МВт/Гкал]:

$$W = N_{тф}/Q_{тф},$$

которая характеризует высокую экономичность не только конкретной паровой турбины ТЭЦ, но и экономичность производства и потребления энергии в целом (ТЭЦ, района, города, всей страны).

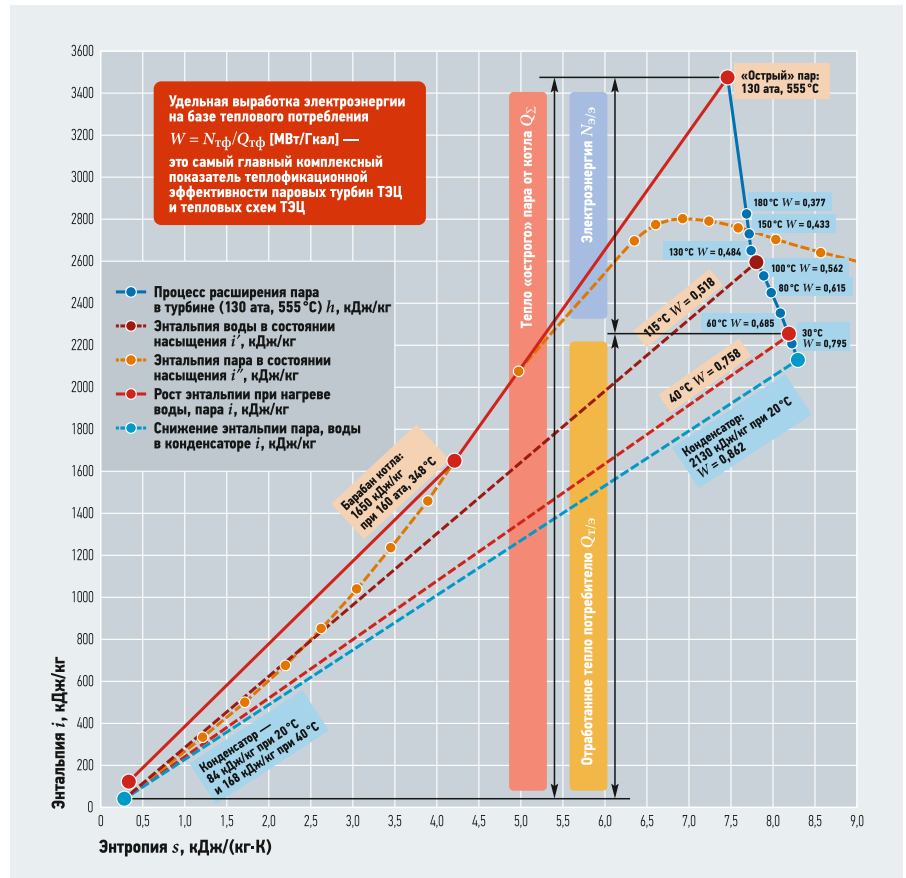


Рис. 3. Удельная выработка «комбиэлектроэнергии» W [МВт/Гкал] в зависимости от температуры комбинированного (отработанного) пара турбины

Такие показатели, как $W_{турб}$, $W_{ТЭЦ}$, $W_{города}$ и $W_{региона}$, представляют собой систему комплексных показателей энергетической эффективности комбинированной выработки, комбинированного потребления, не только какой-либо конкретной турбины, но в комплексе: всей ТЭЦ, города, региона, которая однозначно определяет реальный и конкретный вклад каждого участника производства, транспорта, потребления энергии.

К сожалению, нынешний регулятор энергетической политики нашей страны вообще исключил из статистической отчетности уникальный показатель $W_{ТЭЦ}$ (рис. 3). Подробнее о показателе W можно прочитать в серии статей «Теплофикация России и когенерация Европы» [2].

Показатели W образуют систему комплексных показателей энергоэффективности комбинированной выработки, комбинированного потребления, не только какой-либо конкретной турбины, но в комплексе: всей ТЭЦ, города, региона

Наглядно видно, что чем выше температура комбинированного пара, тем меньше можно выработать электроэнергии на базе 1 Гкал потребленного тепла. Так, при росте температуры отработанного пара с 40 до 115°C выработка электроэнергии («комбиэлектро») падает с 0,758 до 0,518 МВт/Гкал (рис. 3).

Простой, прозрачный и ясный расчёт наглядно показывает, что для паровой теплофикационной турбины (130 ата, 555°C) удельный расход топлива на электроэнергию будет на уровне самых лучших показателей конденсационных ГРЭС: 369–352 г у.т./кВт·ч при $KПД_{\text{нетто}} = 82\%$ (работа на угле) или 340–323 г у.т./кВт·ч при $KПД_{\text{нетто}} = 88\%$ (работа на газе) — рис. 4.

При равном экономичных показателях производства комбинированной электрической энергии ТЭЦ с конденсационной электроэнергией ГРЭС удельный расход топлива на комбинированное тепло («комбитепло») от паровых турбин ТЭЦ будет не выше, чем 56,6 кг у.т./Гкал при $KПД_{\text{нетто}} = 82\%$ (работа на угле) или 29,2,6 кг у.т./Гкал при $KПД_{\text{нетто}} = 88\%$ (работа на газе).

$$\text{КомбиЭнергия} = \text{КомбиТепло} + \text{КомбиЭлектро}, \quad (4)$$

$$S_{тф} = Q_{тф} + 0,86N_{тф} = Q_{тф} + W \cdot 0,86Q_{тф} = Q_{тф}(1 + 0,86W), \quad (5)$$

$$S_{\text{комби}} = Q_{\text{комби}} + 0,86N_{\text{комби}} = Q_{\text{комби}} + W \cdot 0,86Q_{\text{комби}} = Q_{\text{комби}}(1 + 0,86W). \quad (6)$$

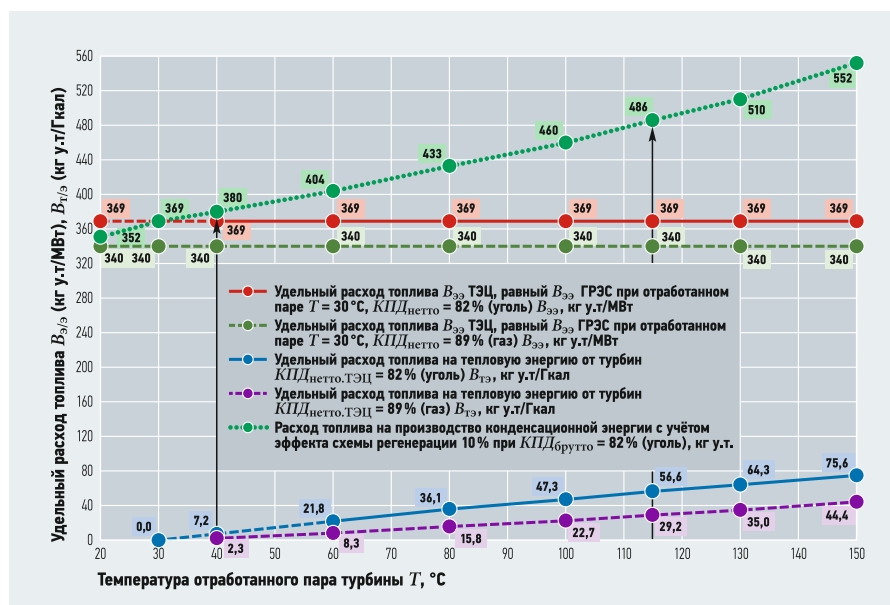


Рис. 4. «Студенческий анализ»: удельный расход топлива на догрев «комбитепла» отработанного пара турбины от температуры 40 °С до температуры сетевой воды 60–150 °С при равно экономичном удельном расходе топлива на электроэнергию

«Профессиональная» энергоёмкость

Этот раздел доступен для понимания только тех специалистов, кто знает, что такое комбинированная электроэнергия, произведённая на базе теплового потребления, понимает суть диаграмм режимов работы турбин, переменный режим работы теплофикационных паровых турбин. Это знания высококвалифицированных специалистов по турбинам, проектировщиков турбинных заводов, испытателей и наладчиков турбин, способных понимать и применять знания термодинами-

ки и вырабатывать собственное мнение на основе анализа первичных исходных данных работы котлов, паровых турбин.

Подчёркиваю, что именно первичных данных, а не вторичных (переработанных) результатов, взятых из политизированных отчётов предприятий по организации и рационализации районных электростанций и сетей (ОРГРЭС), подогнанных под методики статистической отчётности (3-тех, 6-тп, «альтернативная котельная»). Это и есть «момент истины», коренная причина системного кризиса советской энергетики «физического ме-

тода» 1950 года и российской «альтернативной котельной» 2017-го. Без этих знаний излагаемая в этом разделе информация недоступна для «формально дипломированных» инженеров и «формально остепенённых» учёных, и тем более для PR-менеджеров и регуляторов энергетической и тарифной политики России. Однако при прохождении специальной подготовки, выполнении целевого курсового проекта, сдачи технологического экзамена по данному, предыдущим и последующим разделам, безусловно, регуляторам раскроется технологический смысл и суть построения энергетической и тарифной политики в энергетике РФ.

Именно применение понятия «комби-энергия ТЭЦ» — $S_{тф}$ — позволяет разубить «гордиев узел» кризиса рыночной теплофикации, точно и однозначно рассчитать количество топлива, необходимое для производства комбинированной электрической энергии и комбинированной тепловой энергии.

Исторически сложилось так, что некоторые сильные и наглядные показатели эффективности работы теплоэнергетического оборудования где-то широко используются, а где-то игнорируются. Показателем пример эффективного использования понятия: для котла есть $KПД_{котла}$, а вот для теплофикационных турбин $KПД_{турбины}$ и тем более $KПД_{турбины}$ — такой показатель находился под запретом. Но это отдельная, очень интересная тема, поэтому приведём пока лишь один из конечных результатов: удельный расход топлива на производство «комбитепла» приведён на рис. 5 (рисунок представлен онлайн, ссылка в QR-коде на стр. 32).

Данный рис. 5 является самым информативным графиком, отражающим качественные и количественные зависимости энергоёмкости тепловой энергии в широком диапазоне электрических и тепловых нагрузок от температуры сетевой воды, поставляемой ТЭЦ потребителю.

Этот график принципиально совпадает с графиком «студенческого» метода анализа (рис. 4). Наглядно видно, что энергоёмкость отработанного пара 23,5–75,8 кг у.т./Гкал, рассчитанная «профессиональным» методом, однозначно совпадает с расчётом «студенческого» метода анализа — 21,8–75,6 кг у.т./Гкал.

О том, как рассчитывать $KПД_{турбины}$ и $KПД_{турбины}$, то есть «основу основ» для анализа удельных расходов топлива на тепло и электроэнергию паровых турбин ТЭЦ, здесь говорить не будем, просто приведём график $KПД_{турбины}$, показанный на рис. 6 (рисунок представлен онлайн, ссылка в QR-коде на стр. XX).

Парадоксы энергии. Почему для некоторых видов энергии «не надо» топлива?

У электриков существует понятие «полной электрической энергии» $S_{3/3}$ [мВА], неразрывно произведённой и состоящей из суммы: «высококачественной» активной электрической энергии $P_{3/3}$ [МВт] и комплексной реактивной электрической энергии $R_{3/3}$ [мВар]: $S_{3/3} = P_{3/3} + jR_{3/3}$. «Парадокс электриков»: хотя реактивная энергия $R_{3/3}$ может быть в разы больше активной энергии $P_{3/3}$, топлива на производство реактивной энергии на ТЭЦ, ГРЭС и ГЭС «не надо» — оно неразрывно «входит» в состав топлива, необходимого на производство активной энергии.

У теплофикаторов ТЭЦ также есть подобное понятие: «комбинированная энергия» («комбиэнергия» турбины) $S_{тф}$ [Гкал/ч], которая состоит из: неразрывно произведённой теплофикационной электрической энергии $N_{тф}$ [МВт] и неразрывно произведённой теплофикационной тепловой энергии $Q_{тф}$ [Гкал/ч], которая, так или иначе, всё равно была бы выброшена в окружающую среду:

$$S_{тф} = Q_{тф} + W \cdot 0,86 N_{тф} = Q_{тф} (1 + 0,86 W),$$

где W — удельная выработка электроэнергии на базе тепловой энергии («комби-электроэнергия»), МВт/Гкал. И также имеет место «парадокс тепловиков»: несмотря на то, что тепловая мощность отработанного пара турбин $Q_{тф}$ может быть в разы больше электрической мощности $N_{тф}$, топлива на производство отработанного тепла турбины «не надо», оно неразрывно «входит» в состав топлива, необходимого на производство электроэнергии. Именно непонимание и игнорирование регуляторами энергетики основного свойства энергии — неразрывности производства и потребления «комбинированной энергии ТЭЦ» — является главной причиной системного кризиса теплофикации России.



Фото: ГАО «Мосэнерго», mosenergo.gazprom.ru

Выводы

В данной статье рассмотрены три совершенно различных, но взаимодополняющих методики прямого расчёта расхода топлива на комбинированное тепло паровых турбин ТЭЦ: «школьная», «студенческая» и «профессиональная»:

1. «Школьная» методика, основанная на школьных знаниях физических свойств воды и водяного пара, показывает, что расход топлива на догрев отработанного пара, в зависимости от температуры воды в теплосети, составляет от 0 до 5,8–30,3 кг у.т/Гкал.
2. «Студенческая» методика, основанная на знаниях высшей школы, анализа $i-s$ -диаграмм работы паровых турбин, показывает, что, в зависимости от температуры сетевой воды в теплосети, расход топлива изменяется от 21,8 до 75,6 кг у.т/Гкал.
3. «Профессиональная» методика проектировщиков турбин, основанная на расчёте $KПД_{турбины}^{брутто}$, характеристик от-

носительных расходов топлива на основе анализа диаграммам режимов турбин, в зависимости от электрической, тепловой нагрузки турбины и температуры сетевой воды, показывает, что расход топлива на отработанное тепло паровых турбин — не выше 23,5–75,8 кг у.т/Гкал.

«Студенческая» и «профессиональная» энергоёмкость тепловой комбинизации недоступна для понимания регуляторам, менеджерам живущим по формально разработанным энергетическим характеристикам ТЭЦ, использующим метод «альтернативной котельной». Но при прохождении небольшой специальной подготовки, самостоятельного выполнения курсового проекта, сдачи технологического зачёта, «студенческая» и «профессиональная» энергоёмкость, безусловно, раскроет регуляторам энергетики технологический смысл и суть построения энергетической и тарифной политики в энергетике Российской Федерации.



За почти 100 лет существования «теплофикации России» появилось более 20 методик и огромное количество (сотни) статей, посвящённых проблемам распределения топлива между комбинированной электрической и комбинированной тепловой энергией ТЭЦ: метод Гинтера (1924 год), физический «метод МЭС 1950 года» [10], энтропийный метод (1951), «компромиссный», «работоспособности», «эксергетический» метод (1968) [5, 11], аналог эксергетического, «рациональный», «пропорциональный», «тепловой», «котловой», «метод КПД отборов», действующий «метод коэффициентов», метод Вагнера (1968), «метод эквивалентной КЭС» (США), французский «метод предельных издержек» (1980) [6], используемый сейчас в России метод «альтернативной котельной» (2017 год) и т.д.

За почти 100 лет существования «теплофикации России» появилось более 20 методик и огромное количество статей, посвящённых проблемам распределения топлива между комбинированной электрической и комбинированной тепловой энергией ТЭЦ

Инженерный анализ с применением $KПД_{турбины}^{брутто}$ показывает однозначную правоту эксергетического метода, метода Вагнера (метода «эквивалентной КЭС») и их аналогов, где удельный расход топлива на комбинированную электроэнергию («комбизлектро») принимается на уровне самой лучшей «эквивалентной КЭС» (320–350 кг у.т./кВт·ч) с такими же начальными и конечными параметрами пара и на таком же топливе, а удельный расход топлива на комбинированное тепло «комбитепло» снижен в три-четыре раза (35–70 кг у.т/Гкал) — ниже самой лучшей «альтернативной котельной».

Почему же в российской энергетике до настоящего времени не находится однозначного решения по расчёту топлива на комбинированную тепловую энергию ТЭЦ? Краткий ответ здесь — «конформизм мышления». Для формирования «коллективного оптимума» [3] в энергетике России были назначены не специалисты, имеющие реальные знания и понимание принципов комбинированной энергии ТЭЦ, а люди, не вполне понимающие даже основы термодинамики и принимающие решения по каким-то иным, сиюминутным критериям, зачастую непонятным даже им самим.

Отсюда вывод: у регулятора энергетической политики страны нет мотивации к проявлению здравомыслия. Для плановой экономики СССР было неактуально, какому потребителю энергии ТЭЦ удешевлять топливную составляющую тарифа, ведь «народно-хозяйственный эффект» достигался в любом случае. Главная миссия Госплана — обеспечение синергетического эффекта — реализовывалась (строились ТЭЦ и магистральные тепловые сети).

Для того, чтобы в политическом соревновании с Западом значительно улучшить показатели работы отечественных электростанций, регуляторами советской энергетики — Министерством электростанций (МЭС), ВТИ, АН СССР — было принято политическое решение: всю выгоду от теплофикации относить к улучшению статистической отчётности электроэнергетики, чтобы *«соответствовать требованиям государственного планирования, в полной мере отражать народно-хозяйственную выгоду комбинированного производства тепловой и электрической энергии»* [10]. И вот, 10 января 1950 года, Академией наук СССР был рекомендован «физический» метод Министерства электростанций («метод МЭС»), который позволил искусственно (в статистических отчётах, «на бумаге») поднять КПД комбинированной электроэнергетики с приблизительно 35 % до примерно 80 %.

С переводом книги авторов Я. Шаргута и Р. Петелла «Эксергия» [5] в 1968 году были предложены принципы формирования адекватного тарифа на комбинированную энергию ТЭЦ по методу Вагнера. Однако академическая наука, чувствуя свою ответственность за многолетнюю недостоверную отчётность, отказалась от продвижения и внедрения зарубежного опыта в отечественной энергетике.

В условиях Госплана Минэнерго СССР имела место прямая мотивация по занижению в два раза расхода топлива на электроэнергию, потребляемую ТЭЦ. Так, по правилам государственного планирования строительства ТЭЦ, финансирование электрической части ТЭЦ осуществлялось из федерального бюджета страны пропорционально топливной составляющей на электроэнергию. Финансирование же тепловой части ТЭЦ осуществлялось из регионального бюджета территории — по завышенным в три-четыре раза расходам топлива на тепловую энергию.

Со времён «реформаторов» российской энергетики начала 2000-х годов Минэнерго законодательно сняла с себя ответственность за развитие «теплофикации России», условно передав энергетическую сферу ТЭЦ в Минрегионразвития.



Фото: АО «ДГК», dngk.ru

В чём заключается беспринципность видов отчётности в энергетике?

Речь идёт, во-первых, о «ведомственной» отчётности, то есть виде организационной деятельности, основанной на «понятиях», презентациях, предназначенной для внутреннего потребления, для обеспечения видимости деловой, хозяйственной и научной деятельности. Устанавливается корпоративная, ведомственная форма отчёта, исполнители снизу доверху формально загружены с утра до вечера — они оставляют планы, отчёты мероприятия и отправляют их «наверх», где они без движения лежат на полках.

Во-вторых, для соответствия международной отчётности существует «научный» вид [12], основанный на знаниях, на объективных, высококачественных, численных методах инженерного анализа с применением естественных наук (математики, физики, термодинамики, логики и т.д.). Научная отчётность востребована там, где требуется реальное решение конкрет-

ных задач, численное, понимание топливо-энергетических характеристик тепловой энергетики, свойств теплофикационных турбин ТЭЦ.

«Политическая» отчётность осуществляется по принципу *«сколько надо, столько и нарисуем»*. Основные заказчики политической отчётности: Минэнерго, Минэкономразвития, Минэкологии. Возникает вопрос: кто мотивирован оформлением «политической» отчётности? Это академическая наука, ВТИ, РАН, которые молчаливо соглашаются и не отстаивают объективные инженерные знания.

Пример — мнение одного из учёных академической науки: *«В настоящее время Минэнерго России допускает три разных метода разделения этих затрат. Ясно, однако, что “трёх истинных религий не бывает”. Пора и нам стать на прагматическую позицию и поддерживать комбинированное производство электроэнергии и тепла там, где это в интересах общества и государства...»*



О конформизме академической науки

Приведём восемь примеров того, как слабость и конформизм академической науки проявились в вопросах научного сопровождения теплофикации России:

1. **1950 год** — академическая наука согласилась с позицией Министерства электростанций СССР по улучшению статистической отчётности производства электрической энергии.
2. **1968 год** — академическая наука отказалась от изучения и продвижения передового зарубежного опыта: «эксергия и анергия» (Польша), метода Вагнера [4].
3. **1992 год** — академическая наука оставила без внимания «Письмо в редакцию» В.М. Бродянского [11] о недопустимых ошибках статистической отчётности.
4. **2001 год** — на предложение авторов данной статьи обсудить методы анализа распределения топлива на электроэнергию и тепловую энергию ТЭЦ редакция журнала «Электрические станции» ответила: «Ваша статья... не представляет интереса для наших читателей».
5. **2007 год** — академическая наука отказала в реальной помощи ММП «Салют» сохранить новейшую отечественную технологию топливосбережения: «ПГУ-60 + теплонасосная установка» на ТЭЦ-28 — 80-мегаваттный турбогенератор с наработкой всего 700 ч превратили в чёрный и медный лом, включая котёл, контактный конденсатор и все системы. И никакие возражения (ни «Салюта», ни РАН, ни институтов) не были приняты во внимание.
6. **2011 год** — академическая наука молчаливо согласилась с противоречивой методикой Минэкономразвития по применению трёх методик разделения топлива на ТЭЦ.
7. **2017 год** — академическая наука снова безмолвно согласилась с сомнительной методикой Минэнерго «альтернативная котельная» по улучшению статистической отчётности федеральной электроэнергетики России.
8. Безусловно, в советское время были учёные, которые отстаивали научные принципы развития теплофикации в РФ (это школы Л.А. Мелентьева, А.И. Андрущенко, В.М. Бродянского, С.А. Чистовича, Е.Я. Соколова, С.Л. Прузнера и др.), но академиче-

ская наука не объединила и не сохранила этот потенциал знаний теплофикаторов. Ушли из жизни почти все специалисты, понимающие, что бросовое тепло паровых турбин с температурой 40°C должно быть бесплатным! С приходом «реформаторов энергетики» Россия осталась без школы теплофикаторов.

К большому сожалению, академическая наука (ВТИ, АН СССР) в 1930-х годах получила смертельные удары в виде «дела Промпартии» (и других), «когда бодрые данные рапортов и отчётов разительно расходились с реальным состоянием дел», и стала очень внимательно и трепетно оглядываться на требования политизированной отчётности, в связи с «приказом сверху» непременно «*быть впереди планеты всей*» [11]. С тех пор и до настоящего времени ведущая научная каста нашей страны молчаливо отстранялась от защиты научных принципов формирования статистической отчётности (3-тех, 6-ти) на основе объективных методов анализа технико-экономических показателей работы ТЭЦ и ГРЭС.

Заключение

В качестве заключения можно оформить следующие выводы и предложения:

1. Внедрение нового вида энергетического товара под брендом «комбиэнергия», с реальными затратами топлива на тепло 8–40 кг у.т./Гкал, позволяет обеспечить население городов, теплицы, отрасль ЖКХ теплом в три-восемь раз дешевле, чем от котельных, и кардинально (до 4–10 раз) снизить выбросы углекислого газа от систем централизованного отопления городов, то есть провести настоящую, подлинную декарбонизацию.
2. Применение трёх различных методик инженерного анализа энергоёмкости, карбонатной ёмкости комбиэнергии ТЭЦ («школьной», «студенческой» и «профессиональной») позволяет восстановить здравый смысл в формировании энергетической, экологической и тарифной политики в энергетике России.
3. Непонимание сути теплофикации и желание Минэкономразвития угодить всем породило три вида официальной отчётности: «ведомственная» («мусор» для внутреннего потребления); «науч-

ная» (для соответствия международной практике); «политическая» («сколько надо, столько и нарисуем»).

4. Для обеспечения объективности и независимости регулирования энергетики необходимо вернуть Госкомстат (ныне Росстат) из ведомственной подчинённости Минэкономразвития в независимый федеральный орган Правительства Российской Федерации.

5. Для обеспечения управляемости и повышения личной ответственности за экономическую и экологическую стратегию развития России провести реорганизацию Минэкономразвития в «Министерство Анергии» [7].

6. Поручить Российской академии наук вести надзор за научной достоверностью государственной статистической отчётности Госкомстата (Росстата) по вопросам энергоёмкости, карбонатной ёмкости энергетической продукции.

7. При формировании национального проекта «Возрождение теплофикации России» в «Схемах теплоснабжения городов, поселений...» принять следующие индикаторы энергоэффективности ТЭЦ:

- U — потенциал снижения энергоёмкости (декарбонизации) ТЭЦ, %;
- W — удельная выработка электроэнергии на базе тепловой энергии («комби-электроэнергия»), МВт/Гкал;
- $KPD_{турбины, КПД_{турбины, КПД_{турбины}}$ брутто, нетто ;
- $XOP_{тепло}$ — прирост расхода топлива на прирост тепловой энергии, $XOP_{э/э}$ — то же для прироста электроэнергии;
- энергоёмкость (карбонатная ёмкость) производства комбиэнергии ТЭЦ;
- энергоёмкость (карбонатная ёмкость) транспорта тепловой энергии от ТЭЦ;
- энергоёмкость (карбонатная ёмкость) транспорта электрической энергии от ТЭЦ, ГРЭС и др.

8. Поручить Минобразования создать «школы теплофикации» на основе современных знаний «эксергии и анергии», «комбиэнергии», принципов обеспечения коллективного оптимума общества и т.д.

9. В системе Минэкологии, Минобразования, мэрий городов необходимо организовать техническую учёбу по изучению собственных прав жителей, сферы ЖКХ, городов и поселков, потребителей отработанного тепла от паровых турбин ТЭЦ. ●

1. Богданов А.Б. Экономика энергетики с применением эксергии и анергии // НИПРЭ, 2015. №11. С. 41–53.
 2. Богданов А.Б., Богданов Д.А., Богданова О.А. Теплофикация России и когенерация Европы: подбери и различие в цифрах и графиках, для регулятора и не только [Электр. текст]. «Эксергия Богданов»: персон. сайт А.Б. Богданова. Режим доступа: exergy.narod.ru. Дата обраб.: 15.08.2022.
 3. Богданов А.Б. Декарбонизация российской энергетики на основе теплофикации // Энергосбережение, 2022. №1. С. 50–54.

4. The Heat Supply Act — Королевский закон Дании о теплоснабжении от 13.06.1990 №382.
 5. Шаргарт Я., Петела Р. Эксергия / Пер. с польск. В.М. Бродянского. — М.: Энергия, 1968. 278 с.
 6. Богданов А.Б. Управление тарифами и нагрузкой: французский опыт // Тепловая энергетика, 2014. №6.
 7. Министерство Анергии [Электр. текст]. «Эксергия Богданов»: персон. сайт А.Б. Богданова. Режим доступа: exergy.narod.ru. Дата обраб.: 10.08.2022.
 8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. 168 с.

9. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. — М.: Энергоатомиздат, 1989. 351 с.
 10. Вопросы определения КПД теплоэлектроцентралей: Сб. статей / Под общ. ред. А.В. Винтера. — М.: Госэнергоиздат, 1953. 118 с.
 11. Бродянский В.М. Письмо в редакцию // Теплоэнергетик, 1992. №9. С. 62–63.
 12. Методологические положения по расчёту энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой: Постановление Госкомстата России от 23.07.1999 №46.