

### О ВОЗМОЖНЫХ ПУТЯХ СОХРАНЕНИЯ ВЫСОКИХ К.П.Д. КЭС ПРИ ДЕШЕВОМ ТОПЛИВЕ

И. Н. БУТАКОВ

Всякий шаг к увеличению экономического к. п. д. КЭС приходится рассматривать с точки зрения дополнительных капиталовложений, причем эти новые дополнительные вложения дают возможность реализации все меньшего относительного повышения к. п. д. установки. В пределе это соответствует максимальному к. п. д, равному единице, реализация которого требует бесконечно больших средств. Понятно, что при полном отсутствии вложения средств в основные фонды, т. е. когда КЭС фактически отсутствует, к. п. д. будет, конечно, равным нулю. Если обозначить через  $K_k$  отчисления в рублях на амортизацию и текущий ремонт (капитализационный фактор), то схематически зависимость  $K_k = f(\eta_k)$  можно изобразить в виде кривой на рис. 1, которую позволительно принять за гиперболу вида

$$\eta_k = 1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2 \cdot f_1(\eta_k)} \quad (1)$$

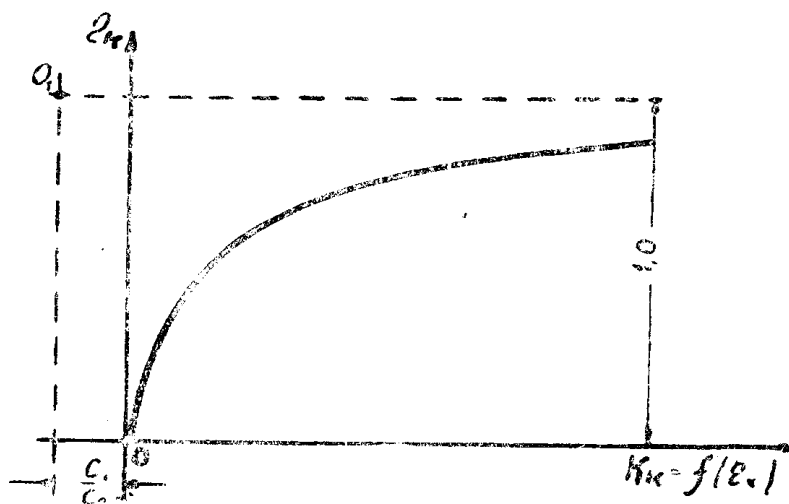


Рис. 1.

При  $f(\eta_k) = \infty$  к. п. д.  $\eta_k = 1,0$ , т. е. асимптота, как на рис. 1. При  $\eta_k = 0$  вторую асимптоту определяем из условия  $C_1 + C_2 f_1(\eta_k) = 0$ ,

т. е.  $f_1(\eta_{\text{к}}) = C_1/C_2$ . Если  $\eta_{\text{к}} = 0$ , то и  $f_1(\eta_{\text{к}}) = 0$ , как на рис. 1. Если такова общая зависимость между к. п. д.  $\eta_{\text{к}}$  и капитализационным фактором  $K_{\text{к}}$ , то для определения конкретного значения к. п. д.  $\eta_{\text{к}}$  применительно к данным местным факторам, влияющим на  $\eta_{\text{к}}$ , надо исходить из условия получения минимального значения себестоимости квтч, которая может быть изображена так:

$$S = S_{\text{к}} + S_{\text{топл}} + \alpha S, \quad (2)$$

где  $S_{\text{к}}$  — капитализационное слагаемое,  $S_{\text{топл}}$  — топливная составляющая, а  $\alpha S$  — остальные слагаемые (зарплата персонала, прочие расходы). Выражение (2) можно представить в ином виде

$$S(1 - \alpha) = \frac{f_1(\eta_{\text{к}})}{8760 \cdot f \cdot \Sigma N_{\text{э}}} + \frac{R_{\text{топл}} \cdot 860}{\eta_{\text{к}} \cdot 10^6} =$$

$$= \frac{f_1(\eta_{\text{к}})}{8760 \cdot f \cdot \Sigma N_{\text{э}}} + \frac{R_{\text{топл}}}{1160 \cdot \eta_{\text{к}}}. \quad (3)$$

Здесь  $R_{\text{топл}}$  — цена в рублях одной *мккал* в топливе; коэффициент загрузки станции  $f = \frac{\Sigma N_{\text{х}}}{\Sigma N_{\text{э}}}$ ;  $\Sigma N_{\text{э}}$  — установленная мощность КЭС в *квт*, а  $\Sigma N_{\text{х}}$  — рабочая мощность. Минимум себестоимости квтч получаем из

$$\frac{ds}{d(\eta_{\text{к}})} = \frac{f_1'(\eta_{\text{к}})}{8760 \cdot f \cdot \Sigma N_{\text{э}}} - \frac{R_{\text{топл}}}{1160(\eta_{\text{к}})^2} = 0,$$

откуда

$$f_1'(\eta_{\text{к}}) \cdot (\eta_{\text{к}})^2 = 7,55 \cdot \Sigma N_{\text{э}} \cdot f \cdot R_{\text{топл}}. \quad (4)$$

Из (1) определяем значение

$$f_1(\eta_{\text{к}}) = \frac{C_1}{C_2} \left( \frac{1}{1 - \eta_{\text{к}}} - 1 \right) = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{1/\eta_{\text{к}} - 1} \quad (5)$$

и первую производную

$$f_1'(\eta_{\text{к}}) = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{(1 - \eta_{\text{к}})^2},$$

после чего выражение (4) преобразуется

$$f_1'(\eta_{\text{к}}) \cdot \eta_{\text{к}}^2 = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{(1 - \eta_{\text{к}})^2} \cdot \eta_{\text{к}}^2 = 7,55 \cdot \Sigma N_{\text{э}} \cdot f \cdot R_{\text{топл}}. \quad (6)$$

Отсюда получаем

$$1/\eta_{\text{к}} = 1 + \sqrt{\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{7,55 \cdot \Sigma N_{\text{э}} \cdot f \cdot R_{\text{топл}}}}. \quad (7)$$

При выбранной величине общей  $\Sigma N_{\text{э}}$  мощности КЭС и ее отдельных турбогенераторов с известными их начальными и конечными параметрами пара определяется и к. п. д.  $\eta_{\text{к}}$ . Известна также при этом стоимость *мккал*  $R_{\text{топл}}$  в топливе и задан коэффициент загрузки  $f$ . Тогда из (6) находим значение второй асимптоты

$$\frac{C_1}{C_2} = \left( \frac{1}{\eta_{\text{к}}} - 1 \right)^2 \cdot 7,55 \cdot \Sigma N_3 \cdot f \cdot R_{\text{топл}} \quad (8)$$

Из (8) видно, что положение вертикальной асимптоты  $\frac{C_1}{C_2}$  гиперболы (1) существенно зависит от  $R_{\text{топл}}$ , так что при дешевом топливе  $\frac{C_1}{C_2}$

будет заметно приближаться к оси ординат и, следовательно, гипербола (1) будет более круто подниматься к асимптоте  $\eta_{\text{к}} = 1,0$ , и, таким образом, значение  $K_{\text{к}} = f(\eta_{\text{к}})$  при известной величине  $\eta_{\text{к}}$  будет относительно малым, а значит, и допустимые капиталовложения могут оказаться недостаточными для возможности сооружения КЭС с высоким к. п. д. Известно, например, что при употреблении в качестве топлива природного газа стоимость КЭС удешевляется на 20—30 % из-за отсутствия на ТЭС обычного для угля топливного хозяйства. Удельная же стоимость сооружений КЭС, по данным ТЭП, 850 руб/квт для более высокосортных углей при агрегатах 200 мвт и  $\Sigma N_3 = 1200 \text{ мвт}$  при параметрах пара 130 ата, 565°/565°С, так что при природном газе  $850 \cdot 0,75 = 640 \text{ руб/квт}^1$ . Тогда допустимая удельная стоимость КЭС

$$\frac{S_{\text{ст}}}{\Sigma N_3} = \frac{f_1(\eta_{\text{к}})}{0,13 \cdot \Sigma N_3} = \frac{7,55 \cdot f \cdot R_{\text{топл}}}{0,13} \left( \frac{1}{\eta_{\text{к}}} - 1 \right) = 640, \quad (9)$$

откуда

$$1/\eta_{\text{к}} = 1 + \frac{640 \cdot 0,13 \cdot 7}{7,55 \cdot 0,8 \cdot 25} = 4,83$$

и, следовательно,  $\eta_{\text{к}} = 0,207$ . Здесь приняты отчисления на амортизацию оборудования 10 % и на текущий ремонт 3 %, т. е. по совокупности 0,13. Отсюда видно, что при стоимости 1 т у. т. 25 руб. к. п. д. КЭС на природном газе не превышает к. п. д. КЭС среднего давления (30—35 ата). Еще хуже положение окажется при использовании дешевых углей бесшахтной добычи, когда, например, при Ирша-Бородинском разрезе Красноярского края стоимость тонны условного топлива не будет превышать 10—15 руб., а топливное хозяйство КЭС здесь будет более крупным, чем при высокосортных углях, так что удельную стоимость капиталовложений можно ожидать при этом даже выше, чем 850 руб/квт.

Столь значительное снижение к. п. д.  $\eta_{\text{к}}$  обозначает увеличение удельного расхода условного топлива, что дает основание предполагать необходимость повышения температуры отходящих газов котельных агрегатов, порчу вакуума в турбинах, отказ от сверхвысоких параметров пара, от вторичного перегрева пара и т. д. Несомненно, это было бы регрессивной эволюцией в развитии теплосиловых установок. Тут должны быть найдены выходы, гармонирующие с достижениями передовой теплотехнической науки и техники.

Одним из таких выходов может быть удешевление оборудования, новая его конструкция, примерами чего в прошлом являлись водяные и воздушные экономайзеры, давшие более дешевые удельные поверхности нагрева, чем котельные. Этим обеспечивалась возможность сниже-

<sup>1)</sup> Удельные стоимости сооружения КЭС и цены 1 т у. т. даны в денежных знаках до 1961 г.

ния температуры отходящих газов. Сюда же надо отнести отказ от многобаранных котлов, внедрение экранов, создание прямоточных котлов и т. д. Никто не может утверждать, что творчество в направлении удешевления агрегатов исчерпалось. Несомненно, также большое значение имеет здесь и удешевление технологии изготовления агрегатов, их монтажа и строительства КЭС, а также работа металлургов и металлургов по удешевлению сортов металлов и в первую очередь изыскание новых путей для получения дешевых и более качественных сталей, а также изыскание химиками совершенно новых материалов типа полимеров. Таким путем мы подойдем к уменьшению капитализационного фактора  $K_k$ , размер которого определяется из гиперболы зависимости к. п. д.  $\eta_k$  от  $K_k$ , изображенной на рис. 1 настоящей статьи. Асимптота  $C_1/C_2$  этой гиперболы окажется ближе от начала координат, если мы захотим сохранить к. п. д.  $\eta_k$  таким, как при более дорогом топливе. Это же обусловит более энергичный подъем гиперболы и меньшее значение  $K_k$ , а значит, и меньшие допустимые капиталовложения. Итак, первый путь сохранения высоких к. п. д.  $\eta_k$  лежит в творчестве по созданию новых более дешевых агрегатов, в удешевлении сооружения КЭС.

Можно говорить и о втором пути, способном вести к той же цели. Путь этот — использование тепловых отходов электростанций. С применением дешевого топлива, как указано выше, должна повышаться температура отходящих газов котельных агрегатов. Естественным надо считать при этом установку, например, утилизационных экономайзеров низкого давления для целей теплофикации и особенно агротеплофикации, обеспечивающей возможность использования тепла таких экономайзеров даже летом для обогрева открытого грунта, чтобы выращивать теплолюбивые растения (дыни, арбузы, помидоры и др.)<sup>2)</sup>. Точно так же при менее глубоких вакуумах (0,05—0,07 атм) может оказаться целесообразной в условиях нашего сурового климата, когда в течение 7—8 месяцев в году вода в водоемах держится при температуре 0—2°C, утилизация тепла отработавшей в главных турбинах циркуляционной воды в вакуумных турбинах, работающих по принципу Клода и Бушера.

Понятно, что те или иные утилизационные установки должны быть оправданы экономически, условиями их собственной работы, исходя из того, что все потери тепла их остаются на счете главных агрегатов. Утилизационные же установки имеют на своем счете лишь ту часть тепла, которая ими действительно использована.

Утилизационные установки на отходящих газах котельных агрегатов получили у нас некоторое применение на практике и освещены в ряде напечатанных работ, например, статьи В. А. Комиссарова по экономайзерам низкого давления в журнале "Электрические станции", работы Д. А. Ермакова и Н. С. Васильева по котлам-утилизаторам на Каширской ГРЭС (Опыт эксплуатации Каширской ГРЭС, 1956, стр. 37—42). Хотя эти утилизационные установки трактовались вне связи с новым явлением — дешевизной в ряде случаев топлива, когда экономическое их обоснование будет выглядеть несколько иначе, тем не менее эти работы дают хороший материал для решения и последней задачи. Утилизационным же установкам по использованию тепла

---

<sup>2)</sup> При мощных КЭС крупные овощные комбинаты (20—100 га) должны находиться в ведении особых совхозов, предназначаясь для обслуживания соседних городов и населенных мест свежими овощами круглый год. За счет этих совхозов и следует отнести как стоимость сооружения, так и расходы по эксплуатации экономайзеров низкого давления.

циркуляционной воды у нас уделялось внимания мало, если не считать статью проф. И. Н. Бутакова в „Известиях Томского политехнического института“, т. 63, 1944.

При вакууме в главных турбинах  $P_2 = 0,05 \text{ ата}$  дар суровой нашей природы ( $1^\circ - 2^\circ$ ) в водоемах для крупных КЭС порядка 1,2 млн *квт* дает возможность иметь мощность утилизационной установки, определяемую из следующих соображений. Примем удельный расход пара мощных турбогенераторов в 200 *мвт* при вакууме 0,035 *ата* и температуре охлаждающей воды  $10^\circ\text{C}$  порядка 2,8 *кг/квтч*. Применение дешевых сортов топлива вынуждает портить вакуум до 0,05–0,06 *ата*, что обусловит или увеличение удельного расхода пара, или при сохранении части высокого давления турбин неизменной поведет к уменьшению мощности главных турбин при прежнем общем расходе пара. В последнем случае при кратности охлаждения 60, температуре охлаждающей воды  $15^\circ\text{C}$ , считая, что в конденсаторы будет попадать лишь 70 % от общего расхода пара, получим секундный расход воды, проходящий через конденсаторы главных турбин, при шести турбогенераторах

$$\frac{6 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2,8 \cdot 60 \cdot 0,7}{3600} = 39000 \text{ литров/сек.}$$

Используя формулу Шамбадала [1], получим при трехступенчатом испарении при  $T_0 - T_2 = 25^\circ - 7^\circ = 18^\circ\text{C}$  максимальную работу в *ккал* на один литр воды, нагретой в конденсаторах главных турбин,

$$W_{\text{макс}} = 0,00252 - \frac{0,00221}{0,877 + 3} \cdot 18^{1,8675} = 0,425 \frac{\text{ккал}}{1 \text{ л. воды}}$$

так что мощность брутто утилизационной установки

$$N_{\text{брутто}} = \frac{39000 \cdot 0,425 \cdot 427 \cdot 0,6}{75 \cdot 1,36} = 41500 \text{ квт.}$$

Полагая, что на собственные нужды этой установки (подача охлаждающей воды в смешивающий конденсатор, экстракция воздуха из последнего) будет затрачиваться около 30 % от мощности брутто, можно ожидать получить мощности нетто порядка 29000 *квт*, которые и надо обратить на удовлетворение собственных нужд основных агрегатов КЭС с расчетом покрыть около 1/3 их потребности в электроэнергии. Благодаря этому выдача электроэнергии в сеть главных турбогенераторов КЭС увеличится на эту величину.

Считая далее, что себестоимость киловатт-часа на крупной КЭС при дешевом топливе (25 руб. т у. т.), вакууме 0,05 *ата* будет порядка 2,1 коп., найдем, что утилизационная установка при такой себестоимости киловатт-часа способна за год дать

$$\frac{2,1 \cdot 29000 \cdot 5000}{100} = 3,05 \cdot 10^6 \text{ руб.}$$

Как указано выше, на счет утилизационной установки следует отнести лишь тепло в топливе, которое она употребляет полезно. Общая стоимость последнего, следовательно,

$$\frac{29000 \cdot 860 \cdot 5000 \cdot 25}{7000 \cdot 1000} = 0,445 \cdot 10^6 \text{ руб/год,}$$

т. е. на 1 *квтч* 0,31 коп. Прочие расходы для КЭС 130 *ата*, 565°/565 С на газе с 6 агрегатами по 200 *мвт* составляют 0,15 коп/*квтч* [2]. Так как утилизационная установка не имеет котельной с ее топливным хозяйством и, кроме того, у ней будет общая с машинным залом техническая администрация, то прочие расходы для нее можно оценить 0,1 коп/*квтч*, так что годовой расход по статье „Прочие расходы“ составит  $0,1 \cdot 29000 \cdot 5000 = 0,145 \cdot 10^6$  руб. На амортизацию, таким образом, остается  $0,305 \cdot 10^6 - (0,445 + 0,145 \cdot 10^6) = 2,46 \cdot 10^6$  руб., что дает возможность, исходя из десятилетней окупаемости, капитализировать сумму  $24,6 \cdot 10^6$  руб., и, следовательно, на один отпущенный *квт* утилизационной установки приходится

$$24,6 \cdot 10^6 / 29 \cdot 10^3 = 850 \text{ руб.}$$

Это отвечает, как мы видели выше в настоящей статье, допустимой стоимости установленного *квт* на крупных КЭС, что надо считать достаточным, имея в виду отсутствие здесь котельной со всем топливным хозяйством ее. Произведенные в 1939 г. во Франции экономические расчеты для описанной ниже установки в Абиджане показали, что при полезной мощности установки 7000 *квт* стоимость самой установки, включая здание, определилась в  $28,5 \cdot 10^6$  франков, т. е.  $28,5 \cdot 10^6 : 7000 = 4220$  франков/*квт*. Стоимость же установленного *квт* на КЭС составляла тогда во Франции [3] до 4000 франков/*квт*, т. е. и по этим данным получается тот же результат, как и выше.

Общеизвестны трудности конструирования последних ступеней сверхмощных турбин при глубоких вакуумах. Для борьбы с этими трудностями намечаются три пути, а именно: 1) увеличение числа выхлопов пара при ограниченной длине последних лопаток; 2) максимально возможное увеличение длины этих лопаток; 3) выполнение турбинных агрегатов в виде двухвальных с частью низкого давления, работающей на пониженном числе оборотов. Все эти пути удорожают сооружение турбоагрегатов. При наличии утилизационной установки все эти трудности отпадают. В турбинах сохраняется привычный вакуум 0,05 *ата*, а тепло отработавшей циркуляционной воды при температуре 25° С, если при входе в конденсаторы она имела 15° С, используется в утилизационной вакуумной турбине. Температура 15—18° С характерна для большинства рек нашей страны в период лишь летних месяцев, а также как среднегодовая в южной полосе СССР. В последнем случае надобности в утилизационной установке нет, так как в летние месяцы, когда вода из водоемов должна непосредственно подаваться в конденсаторы главных турбин. Дополнительных выгод от применения вакуумных турбин, кроме того, ожидать надо из-за ослабления возможности переохлаждения конденсата в конденсаторах главных турбин, а также из-за уменьшения расхода пара на эжекторы их вследствие дегазации циркуляционной воды в утилизационной установке. Последнее должно уменьшить попадание воздуха через неплотности конденсаторов главных турбин. Если пойти на химочистку добавки для возмещения испарившейся части циркуляционной воды в утилизационной установке, то удастся сократить количество промывок и чисток конденсаторов главных турбин. Все это вместе должно обеспечить некоторую экономию топлива.

Наконец, так как утилизационная установка некоторую часть расхода топлива берет на себя, удельный расход топлива на самой КЭС на эту долю снижается, что удешевит себестоимость *квтч*. Себестоимость удешевится также из-за переноса части расхода электроэнергии на собственные нужды КЭС на утилизационную установку.

Возможность выдачи в сеть дополнительных 28000 квтч тоже будет влиять на снижение себестоимости киловатт-часа. Кроме того, надо ожидать уменьшения расхода электроэнергии на перекачку циркуляционной воды главных турбин, так как уменьшенными окажутся нередко напор из-за уменьшения высоты и дальности ее подачи, а также и кратности охлаждения из-за менее глубокого вакуума в конденсаторах главных турбин.

Во французском проекте установки 7000 квт были выполнены расчеты удельных расходов главных потребных материалов в граммах на один годовой квтч по сравнению с гидростанциями, причем оказалось [4]:

Материалы	Установка 7000 квт	Гидростанции
Цемент	40	116—220
Металлы железистые	50	40—60
Металлы не железные	0,5	0,5—0,8

Отсюда видно, что удельный расход главных материалов для установки 7000 квт оказался не выше, чем для гидростанций.

Сравнение по удельному расходу главных материалов было сделано с гидростанциями, так как компоновка вакуумной установки для Абиджана напоминала как бы гидростанцию. На рис. 2 дана в разрезе установка в Абиджане. На рис. 2 надписями показаны отдельные части установки и направление движения теплой и холодной воды, пара из испарителя в смешивающий конденсатор, а также места фракционного удаления воздуха. Как видно из рис. 2, испарение теплой воды предусмотрено трехкратное. Слив неиспарившейся воды направляется в конденсатор главных турбин в качестве циркуляционной воды при температуре 15°С. Выгоды расположения, как на рис. 2, следующие:

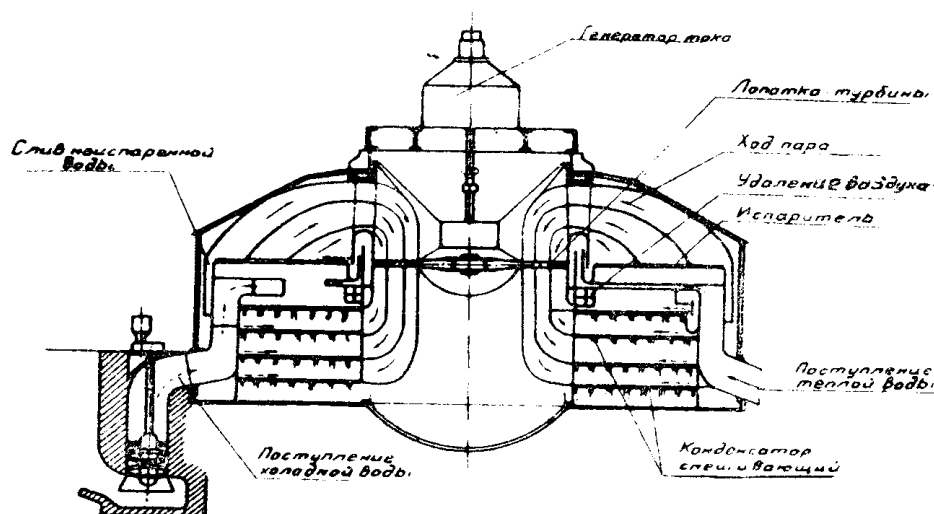


Рис. 2.

1) упрощение пути пара, в результате чего сведены к минимуму потери; 2) группировка в одномместилице всех устройств, находящихся под вакуумом, что позволяет уменьшить трудности создания необходимого уплотнения; 3) удобное расположение по высоте испарителя и конденсатора. Внешний кожух установки железобетонный.

с покрытием снаружи для плотности особой смесью на базе гудрона, каучука и синтетической резины. Железный кожух был отвергнут, как менее экономичный и представляющий серьезное неудобство при вертикальном расположении оси турбины из-за имеющихся вибраций. Отработавшая охлаждающая вода, нагревшаяся до  $7^{\circ}\text{C}$  после конденсации отработавшего пара вакуумной турбины, собирается внизу смешивающего конденсатора, откуда она спускается во внешний водоем самотеком, если конец спускной трубы разместить под уровень воды водоема, обеспечив тут действие сифона. Но вода эта, как деаэрированная, может быть с пользой направлена на соседние предприятия. Использование деаэрированной воды устраняет коррозию труб в водоводах, которая снижает пропускную способность последних, повышает расход энергии на перекачку, а также ведет к преждевременному ремонту водяной сети, связанному с трудными земляными работами. Во избежание этого в американской практике деаэрация холодной воды перед подачей ее в водопроводную сеть нашла применение и дала положительные результаты, несмотря на дополнительные затраты, связанные с сооружением специальных деаэрационных установок для этой цели [6]. Если это обстоятельство учесть при реализации утилизационных установок, то на счет предприятий, использующих сбросную воду конденсаторов, может быть отнесена часть денежных расходов на насосы и по сооружению напорного водовода охлаждающей воды для смешивающей конденсации пара после утилизационной установки, а также сюда же падает расход на сооружение сбросного водовода. Стоимость же насосов, забирающих деаэрированную воду после конденсаторов, должна быть, конечно, полностью отнесена на счет предприятий, ее утилизирующих.

Из всего сказанного о вакуумных утилизационных установках следует:

1) утилизационная установка типа Абиджана действительно может использовать часть тепла отработавшей циркуляционной воды главных турбин КЭС;

2) такая утилизация тепла дает возможность:

а) компенсировать в некоторой части тепловые потери от порчи вакуума в случае применения дешевых сортов топлива; б) сократить расход электроэнергии на собственные нужды главных агрегатов КЭС, высвободив тем дополнительную часть электроэнергии для внешних потребителей; в) уменьшить несколько удельный расход топлива и денежные расходы по топливной составляющей себестоимости квт на КЭС; г) улучшить работу конденсаторов главных турбин; д) устранить обезличку в хвостовой части мощных турбин, проектируемых на внедрение глубоких вакуумов независимо от стоимости топлива и климатических условий с применением нескольких выхлопов отработавшего пара и двухвальных турбин с разным числом оборотов; е) обеспечить водоснабжение соседних предприятий деаэрированной водой из смешивающих конденсаторов вакуумных утилизационных установок с устранением интенсивной коррозии труб водопроводов; ж) иметь утилизационную установку при удельной стоимости квт не выше стоимости установленного квт на КЭС.

Указанные выше утилизационные установки в виде ЭНД и в виде вакуумных турбин для использования более нагретой отработавшей циркуляционной воды главных турбин при менее глубоких вакуумах могут при дешевом топливе и не сооружаться, если неоправдаваемые экономические расходы на хвостовые поверхности котлов и на получение глубокого вакуума компенсировать увеличением мощности электростанций. Это видно из формулы (7), из которой ясно, что при низких значениях  $R_{\text{топл}}$  соответствующее увеличение  $\Sigma N_e$  может сохранить  $\eta_k$  таким же, как при дорогом топливе и меньшей мощности  $\Sigma N_e$ .