

сти и учитывая выражение (12), получаем

$$\int_{\psi_K^{(\infty)}}^{\psi_C^{(\infty)}} R(\psi, \alpha) \sqrt{\Phi_C^{(\infty)} - \Phi_\infty(\alpha)} d\alpha = 0; \quad (17)$$

$$\Phi_\infty(\psi) = \Phi_0(\psi) + \int_{\psi_K^{(\infty)}}^{\psi_C^{(\infty)}} R(\psi, \alpha) F_1(\alpha) d\alpha, \quad (18)$$

где $\Phi_\infty(\psi) = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \Phi(\psi)$ при $\lambda \rightarrow 0$. Из условия (18) следует: $\psi_C^{(\infty)} \neq \psi_K^{(\infty)}$. В самом деле, если предположить равенство $\psi_C^{(\infty)} = \psi_K^{(\infty)}$, то $\Phi_\infty(\psi) \equiv \Phi_0(\psi)$ и $\psi_C^{(\infty)} = -2\varphi_s$, $\psi_K^{(\infty)} \approx \varphi_s$, что противоречит предположению. Далее, условие (17) должно выполняться при любых значениях переменной ψ , что в силу импульсного характера ядра $R(\psi, \alpha)$ может иметь место только в том случае, если подынтегральное выражение тождественно равно нулю. Отсюда

$$\Phi_\infty(\psi) = \Phi_C^{(\infty)} \quad \text{при} \quad \psi_K^{(\infty)} \leq \psi \leq \psi_C^{(\infty)}.$$

Потенциальная функция $\Phi(\psi)$ при бесконечно большом значении кулоновского параметра h_ψ имеет плоский горизонтальный участок в конечном интервале фаз.

Таким образом, характер вырождения потенциальной ямы, определенный в работах [2, 3] численным решением для частных значений параметров ускорителя, сохраняется и в общем случае. Уменьшение глубины потенциальной ямы с ростом фазовой плотности тока происхо-

дит значительно быстрее, чем сокращение ее ширины, и в пределе (при $h_\psi \rightarrow \infty$) глубина ямы стремится к нулю, а ширина остается конечной. В предельном случае при указанных выше предположениях в режим ускорения захватываются только те частицы, энергия которых совпадает с энергией синхронной частицы. В этих условиях средний ток ускоряемого пучка растет с увеличением фазовой плотности тока инжекции и в пределе стремится к конечной величине [4].

Распределение (6) с постоянной $H_{\text{пр}}$ соответствующей сепаратрисе, сводится к случаю, при котором область внутри сепаратрисы равномерно заполнена частицами, а вне этой области фазовая плотность равна нулю. Отсюда видно, что при бесконечно большом значении h_ψ в ускоритель по условию инжектируются только частицы в интервале фаз $\psi_C^{(\infty)} - \psi_K^{(\infty)}$. Картина на фазовой плоскости в пределе соответствует безразличному равновесию в конечном интервале фаз.

Поступила в Редакцию 1/VIII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. В л а с о в. Теория линейных ускорителей. М., Атомиздат, 1965.
2. И. М. К а п ч и н с к и й, А. С. К р о н р о д. В кн. — «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 906.
3. Р. M o r t o n. Rev. Sci. Instrum., 36, 1826 (1965).
4. И. М. К а п ч и н с к и й. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М., Атомиздат, 1966.

К выбору начальных параметров пара на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах

Ю. Д. АРСЕНЬЕВ, А. Г. ЗАХАРИН, В. М. ЧАХОВСКИЙ

УДК 621.039.526.003

В теплоэнергетике процесс повышения начальных параметров пара в основном происходит скачкообразно, причем это обосновывается технико-экономическим расчетом. В настоящее время для строительства конденсационных электростанций приняты параметры пара 130 *ата*, 565/565° С для блоков 150 и 200 *Мвт*. Наряду с этим были разработаны новые турбоагрегаты повышенной мощности на параметры пара 240 *ата*, 580/565° С для блоков 300, 500 и 800 *Мвт*, затем начальная температура была снижена до 560° С. Начиная с 1963 г. вводятся блоки единичной мощностью 300 *Мвт* (на

240 *ата* и 560/565° С); строится ТЭС с блоком 500 *Мвт* (Назаровская ГРЭС) на те же параметры. В результате проведенных расчетов была показана экономическая нерентабельность параметров пара 300 *ата*, 650/565° С при обычной стоимости топлива [1].

В случае дешевого топлива выбор параметров пара определяется главным образом минимумом удельных капиталовложений, а также степенью надежности и освоения оборудования при соответствующих параметрах пара. При оценке перспективных параметров пара на примере блока мощностью 1000 *Мвт* констатируется,

что переход от параметров 160 *ата*, 565/565° С к параметрам 240 *ата*, 535/535° С при дешевом топливе ($C_T = 2,5$ руб/т.у.т.) экономически не оправдывается [1].

Интересно отметить следующую закономерность выбора начальных параметров пара на зарубежных ТЭС [1].

1. В технически наиболее развитых капиталистических странах (США, ФРГ) достаточно четко выявилась тенденция к снижению начальной температуры пара до 540—525° С. Блоки с температурой пара 590—600° С и выше за рубежом не используются и ввод их до 1968 г. не планируется. Исключение составляют два опытно-промышленных блока в Англии на температуру пара 593° С.

2. Планируются к внедрению ТЭС на сверхкритические параметры пара лишь в США.

3. Работающие с 1957—1960 гг. в США блоки на сверхкритические давления к концу 1963 г. еще не вышли из стадии освоения и не достигли проектных экономических показателей.

Учет экономической эффективности, технической осуществимости и эксплуатационной надежности АЭС при выборе начальных параметров пара проявляется особым образом. Известно, что в обычной теплоэнергетике издержки на топливо составляют в большинстве случаев больше половины затрат на производство электроэнергии (60—75%), что и оправдывает повышение начальных параметров пара. В ядерной энергетике, и в первую очередь на АЭС с быстрыми реакторами, текущие издержки на топливный цикл ожидаются значительно меньшими.

Повышенные капиталовложения в АЭС с быстрыми реакторами в значительной степени обусловлены необходимостью увеличения надежности работы отдельных агрегатов и всей станции в целом. Важность повышения надежности работы АЭС необходимо связывать и с тем, что аварийная остановка АЭС может быть более длительной и вызывать большой ущерб от невыработки электроэнергии по сравнению с ущербом на ТЭС. Поэтому следует установить реальную область экономически оптимальных параметров для АЭС с быстрыми реакторами.

Предположим, что в районах с замыкающим топливом стоимостью C_T , равной 15, 12 и 6 руб/т. у. т., необходимо построить электростанцию мощностью $N_э = 1000$ Мвт. Потребность в электроэнергии может быть обеспечена как ТЭС, так и АЭС. При этом рассматриваются два возможных варианта АЭС и ТЭС: 1) пять блоков с турбоагрегатами по 200 Мвт каждый;

2) два блока с турбоагрегатами по 500 Мвт каждый. Эти варианты сопоставляются по приведенным затратам [2]:

$$Z = pK + I \text{ руб/год.} \quad (1)$$

где p — коэффициент приведения, равный 0,15. Текущие издержки представим как сумму двух составляющих:

$$I = I_T + I_e \text{ руб/год.} \quad (2)$$

Здесь I_e — постоянные издержки; I_T — издержки на топливо: $I_T = bN\tau C_T$ (где N — электрическая мощность станции; b — удельный расход условного топлива; τ — число часов работы станции в году).

Технико-экономические показатели АЭС с быстрым реактором определяются из равенства $Z_{АЭС} = Z_{ТЭС}$.

Используя условия (1) и (3), нетрудно получить за счет экономии на топливе допустимое увеличение или при перерасходе топлива необходимое снижение капиталовложений в ТЭС или АЭС по формуле

$$\Delta K = \frac{\Delta BC_T}{p + 2p_{к.р} + \frac{p}{(1+p)\frac{1}{p_p} - 1}} \text{ руб,} \quad (4)$$

где ΔB — экономия или перерасход топлива, т. у. т.; p_p — отчисления на реновацию; $p_{к.р}$ — средняя норма амортизационных отчислений на капитальный ремонт, принятая равной 0,048 (коэффициент 2 учитывает отчисления на текущий ремонт, общестанционные и прочие расходы).

Ежегодные расходы на топливный цикл АЭС определяются из соотношения

$$I_T^{АЭС} = \alpha I_T^{ТЭС} \text{ руб/год,} \quad (5)$$

где α — отношение стоимости тепла, полученного в ядерном реакторе, к стоимости тепла, полученного при сжигании органического топлива на ТЭС.

В работах [3—5] проведен анализ топливной составляющей себестоимости электроэнергии на АЭС, использование данных этих работ позволит получить точные значения α . Для АЭС на быстрых нейтронах диапазон изменения α равен 0—0,5.

При анализе влияния начального давления пара на эффективность дополнительных капиталовложений в ТЭС и АЭС были приняты следующие приемлемые допущения: 1) расходы на заработную плату на ТЭС и АЭС в обоих вариантах одинаковы, поэтому их не рассмат-

ривают; 2) различия в структуре основных фондов на ТЭС и АЭС не учитываются; 3) к. п. д. ТЭС и АЭС равны при одинаковых начальных параметрах пара (фактически к. п. д. нетто АЭС будет превышать к. п. д. нетто ТЭС приблизительно на 2—3%).

По данным института «Теплоэлектропроект», технико-экономические показатели ТЭС с блоками 200 и 500 Мвт с начальными параметрами пара 130 *ата*, 565/565° С и 240 *ата*, 560/565° С соответственно представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технико-экономические показатели ТЭС мощностью 1000 Мвт

Показатель	Первый вариант, 5×200 Мвт	Второй вариант, 2×500 Мвт
К. п. д. нетто $\eta_{ст}^H$, %	35,2	37,2
Удельные капиталовложения q_k , руб/квт	90,0	106,7
Удельный расход топлива b , кг/квт·ч	0,349	0,330

Таблица 2

Текущие издержки и допустимые увеличения капиталовложений на ТЭС и АЭС

Тип станции	Вариант	К. п. д. нетто	I_T , руб/год	$\frac{\Delta I_T \times 10^{-6}}{\text{руб/год}}$	$\Delta K \times 10^{-6}$, руб
ТЭС	Первый	0,352	36,6	1,9	8,04
	Второй	0,372	34,7		
АЭС *	Первый	0,352	9,15	0,475	2,01
	Второй	0,372	8,675		

* К. п. д. нетто АЭС фактически при тех же параметрах пара для первого и второго варианта составит 37,6 и 39,7 % соответственно.

В табл. 2 приведены результаты расчета текущих издержек на ТЭС и АЭС и допустимого увеличения капиталовложений при переходе от первого варианта ко второму в зоне замыкающего топлива стоимостью 15 руб/т. у. т. при $\alpha = 0,25$. Из табл. 2 следует, что для ТЭС при переходе от первого варианта ко второму допустимое увеличение капиталовложений составляет 8,04 млн. руб., а для АЭС — только 2,01 млн. руб. Цифры, характеризующие допустимое увеличение капиталовложений в АЭС

при переходе от первого варианта ко второму, представляются маловероятными. Действительно, при переходе на сверхкритическое давление (240 *ата*) фактическое увеличение капиталовложений в ТЭС мощностью 1000 Мвт даже при увеличении единичной мощности блока с 200 до 500 Мвт составляет 16,7 млн. руб., допустимое увеличение капиталовложений равно 8,0 млн. руб. (см. табл. 2). Учитывая, что различие в издержках на топливный цикл АЭС в двух вариантах меньше, чем на ТЭС, эффективность повышения начального давления пара для АЭС будет сводиться на нет.

Заметим также, что повышение начального давления со 130 до 240 *ата* происходит одновременно с увеличением единичной мощности блока. Поэтому при постоянной мощности блока эффект от увеличения начального давления будет еще меньшим. В этом нетрудно убедиться, если обратиться к работе [1], где установлено, что при увеличении давления острого пара со 130 до 240 *ата* для турбоагрегата мощностью 1000 Мвт к. п. д. его возрастает на 3,8% (в нашем примере 5,7%).

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что значения оптимальных давлений острого пара для АЭС с быстрыми реакторами следует искать в области докритических давлений.

При рассмотрении связи температуры острого пара и температуры промежуточного перегрева пара с эффективностью дополнительных капиталовложений проводится анализ термодинамического цикла. Выполненные расчеты основывались на следующих исходных данных и допущениях:

1. Температура регенеративного подогрева питательной воды и давление промежуточного перегрева пара принимались оптимальными с точки зрения термодинамической эффективности.

2. Конечное давление пара принималось во всех случаях постоянным, равным 0,035 *ата*.

3. Внутренние относительные к. п. д. частей высокого, среднего и нижнего давлений были приняты равными 0,85; 0,90; 0,89 соответственно.

4. Падение давления в тракте промежуточного перегрева пара составляло 10%.

5. Давление нагнетания, развиваемое питательным насосом, в 1,3 раза превышало давление пара перед турбиной, а к. п. д. питательного насоса составлял 80%.

6. Во всех случаях температура острого пара и температура промежуточного перегрева пара считались равными.

7. Потери от необратимости процессов сжатия и подачи питательной воды в насосах, от дросселирования и охлаждения пара в системе промежуточного перегрева и от влажности пара в последних ступенях турбины рассчитывались по формулам соответственно (1,28, а), (1,23), приведенным в работе [6], и (7-6) из работы [1].

8. Расчет оптимальных давлений при однократном промежуточном перегреве пара проводится по формулам (2,70) и (2,67) работы [6], а к. п. д. брутто — по формуле (3,14) работы [7].

Таблица 3

Показатели тепловой экономичности в зависимости от температуры острого пара и промперегрева

$t_0/t_{п}, ^\circ\text{C}$	450/450	500/500	530/530	565/565
$-\Delta\eta/\eta, \%$	5,52	3,04	1,66	0
$\eta_{\text{СТ}}^{\text{H}}, \%$	33,2	34,10	34,6	35,2

В табл. 3 приведены значения изменения тепловой экономичности турбоустановки и к. п. д. нетто электростанции в зависимости

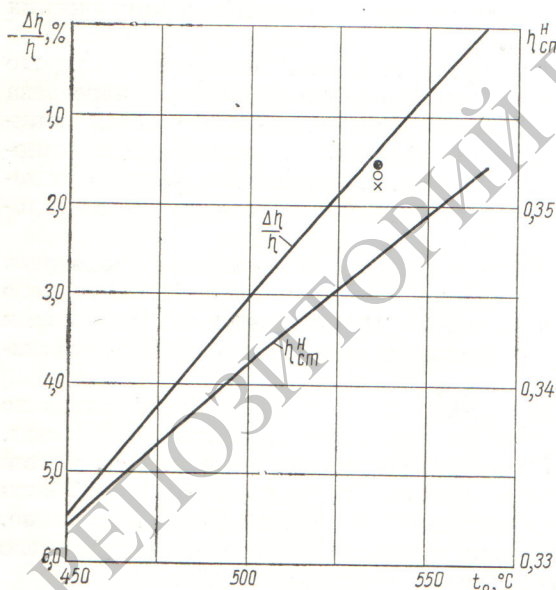


Рис. 1. Влияние начальной температуры острого пара и промперегрева ($t_0 = t_{п}$) на тепловую экономичность турбоустановки $\Delta\eta/\eta$ и к. п. д. нетто электростанции $\eta_{\text{СТ}}^{\text{H}}$ при постоянном начальном давлении пара $p_0 = 130 \text{ атм}$:

● — расчетные данные фирмы «Дженерал электрик»; ○ — расчетные данные фирмы «Вестингауз»; × — расчетные данные ЦКТИ.

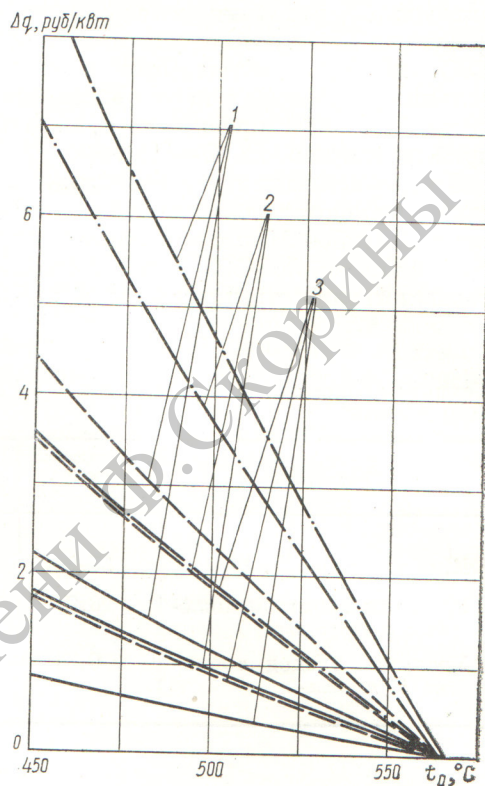


Рис. 2. Необходимое снижение удельных капиталовложений в АЭС и ТЭС при равенстве затрат на электроэнергию в конкурирующих вариантах в зависимости от температуры острого пара и промперегрева ($t_0 = t_{п}$):

— $\alpha = 0,25$; — — — $\alpha = 0,5$; — · — · — $\alpha = 1$ (ТЭС); 1 — $C_T = 15$ руб/т. у. т.; 2 — $C_T = 12$ руб/т. у. т.; 3 — $C_T = 6$ руб/т. у. т.

от начальной температуры пара при давлении его перед турбиной $p_0 = 130 \text{ атм}$. На рис. 1 представлены кривые к. п. д. электростанции и относительного изменения к. п. д. в зависимости от температуры острого пара, построенные по данным табл. 3.

На рис. 2 приведены значения необходимого снижения удельных капиталовложений при переходе к более низким температурам острого пара и промперегрева по отношению к варианту с параметрами пара 565/565 °С для различных значений стоимостей замыкающего топлива (C_T) и отношения топливных составляющих на АЭС и ТЭС (α) при соблюдении равенства затрат в конкурирующих вариантах. Из рис. 2 следует, что при $C_T = 15$ руб/т. у. т. для перехода с $t_0/t_{п} = 565/565$ °С на $t_0/t_{п} = 535/535$ °С необходимо снижение удельных капиталовложений

для ТЭС $\Delta q = 1,62$ руб/квт, а для АЭС при $\alpha = 0,25$ $\Delta q = 0,4$ руб/квт.

По данным Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) снижение капиталовложений на ТЭС при переходе с $t_0/t_{II} = 565/565^\circ \text{C}$ на $t_0/t_{II} = 535/565^\circ \text{C}$ составляет $0,35$ руб/квт, поэтому такой переход при $C_T = 15$ руб/т. у. т. не оправдан.

Следует отметить, что более 50% величины фактического уменьшения капиталовложений приходится на машинный зал и паропроводы острого пара, т. е. $0,18$ руб/квт. Следовательно, для АЭС необходимо снизить капиталовложения на реакторную часть, парогенераторы и промперегреватели с паропроводами в размере $0,4 - 0,18 = 0,22$ руб/квт, что вполне осуществимо.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что экономический оптимум для АЭС с быстрыми реакторами сместится в область более низких температур $450 \div 540^\circ \text{C}$. Эта экономически оправданная возможность снижения начальной температуры пара позволяет уменьшить капиталовложения в оборудование АЭС и повысить надежность ее работы.

Выше рассматривался пример для электростанции с электрической мощностью 1000 Мвт. Расчеты, проведенные для больших мощностей (~ 3000 Мвт), подтвердили полученные выводы.

Выполненное технико-экономическое исследование при отношениях топливных составляющих себестоимости энергии на АЭС и ТЭС в диапазоне $0,25 - 0,50$ методом предельного анализа [8] позволяет сделать следующие выводы.

1. Повышение начального давления пара от 130 до 240 ата (с соответствующими увеличениями мощности агрегатов) позволяет увеличить значение предельно допустимых капиталовложений за счет экономии на топливе. Показано, что при этом допустимый для АЭС при-

рост капиталовложений в два — четыре раза меньше, чем для ТЭС.

2. При понижении температуры острого пара и промперегрева с $565/565^\circ \text{C}$ до $450/450^\circ \text{C}$ необходимо снизить капиталовложения для компенсации перерасхода топлива. Размер снижения капиталовложений для АЭС в два — четыре раза меньше, чем для ТЭС.

3. Для АЭС следует искать оптимальные решения в области начальных параметров пара: докритических давлений и температур в диапазоне $450 - 540^\circ \text{C}$.

4. Работа с пониженными начальными параметрами пара должна повысить надежность работы АЭС с реакторами на быстрых нейтронах и ускорить сроки их внедрения. Этот фактор трудно оценить в стоимостном выражении, но его большая экономическая значимость представляется несомненной.

Поступила в Редакцию 12/XII 1967 г.
В окончательной редакции 8/II 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Э. Гельтман, Д. М. Будняцкий, Л. Э. Апатовский. Блочные конденсационные электростанции большой мощности. М.—Л., «Энергия», 1964.
2. Методика технико-экономических расчетов в энергетике. М., 1966.
3. В. В. Батов, Ю. И. Корякин. «Атомная энергия», 20, 379 (1966).
4. О. Д. Казачковский, Е. В. Кириллов. «Атомная энергия», 22, 439 (1967).
5. В. Б. Лыткин, М. Ф. Троянов, А. И. Новожилов. «Атомная энергия», 21, 360 (1966).
6. А. И. Андрущенко. Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций. М., «Высшая школа», 1963.
7. В. Я. Рыжкин. Тепловые электрические станции. М., «Энергия», 1967.
8. Ю. Д. Арсеньев. Теория подобия в инженерных экономических расчетах. М., «Высшая школа», 1967.

Нейтронно-резонансный анализ элементного состава вещества

Р. Г. ГАМБАРЯН, А. С. ШТАНЬ

УДК 543.53

Использование источников излучений, позволяющих получать нейтроны с энергиями, при которых происходит их резонансное поглощение, может обеспечить весьма высокую селективность активационного анализа элементов, обладающих большими сечениями резонансного захвата. Однако ввиду сложности выделения моноэнергетических групп нейтронов это

направление активационного анализа не получило достаточного развития [1].

Опыт применения метода резонансных индикаторов для определения спектра нейтронов [2—4] дает основания полагать, что, выделяя эффект резонансного поглощения нейтронов в анализируемом веществе с помощью резонансных фильтров, можно повысить избиратель-