

где c_1, c_2, c_3 — некоторые положительные постоянные, а

$$\Delta M[v] = M[v(x_{k+1}, \tau_{k+1})/x_k = x, \tau_k = \tau] - v(x, \tau)$$

является первой разностью математического ожидания функции v вдоль решений системы (4).

Стационарность случайного процесса позволяет выбрать v , не зависящей от случайного параметра τ , в виде квадратичной формы

$$v(x) = \tilde{x} B x. \quad (6)$$

Здесь B — действительная симметричная $N \times N$ -матрица с элементами b_{ij} .

В силу (4) с учетом выражения (6) первая разность математического ожидания v запишется в виде

$$\Delta M[v] = \tilde{x} [M(\tilde{D} B D - B)] x.$$

Оценки (5) эквивалентны матричным неравенствам [3]:

$$\left. \begin{aligned} B > 0; \\ B - M(\tilde{D} B D) > 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для примера остановимся более подробно на случае уравнений (1), рассмотренном в работе [1]. Числовые значения констант λ_i и λ_x , входящих в правую часть уравнения (1), возьмем из работы [4]. Область изменения параметров $\sigma_x b$ и $\sigma_x \Phi_0$ примем такой же, как и в работе [1]. Величину шага регулирования будем считать равновероятной в некотором интервале $[k_1 \bar{\tau}, k_2 \bar{\tau}]$. В этом случае для плотности вероятности спра-

ведлива формула

$$f(\tau) = \begin{cases} 0 & k_1 \bar{\tau} > \tau; \\ \frac{1}{(k_2 - k_1) \bar{\tau}} & k_1 \bar{\tau} \leq \tau \leq k_2 \bar{\tau}; \\ 0 & \tau > k_2 \bar{\tau}. \end{cases}$$

Удобно принять $k_1 + k_2 = 2$. Тогда $\bar{\tau}$ будем иметь смысл среднего значения шага регулирования.

Исследование устойчивости проводилось с помощью ЭЦВМ М-20 для двух случаев: 1) $k_1 = \frac{1}{2}, k_2 = \frac{3}{2}$; 2) $k_1 = 0, k_2 = 2$. При проведении расчетов параметры $\sigma_x b$ и $\sigma_x \Phi_0$ фиксировались и находилось максимально возможное значение шага регулирования $\bar{\tau}_{кр}$, при котором неравенства (7) еще выполняются. Критические значения параметра τ в зависимости от $\sigma_x b$ приведены на рисунке в сравнении с результатами, полученными в работе [1] для детерминированного случая.

Поступило в Редакцию 11/III 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Б. Ронжин, Е. Ф. Сабаяев. «Атомная энергия», 24, 269 (1968).
2. Т. Ахметкалиев. «Дифференциальные уравнения», 1, 8, 1016 (1965).
3. D. Randall, D. John. Nucleonics, 16, No. 3, 82 (1958).
4. Ф. Р. Гантмахер. Теория матриц. М., Гостехиздат, 1953.

Применение CO_2 в качестве теплоносителя и рабочего тела на АЭС

Д. П. ГОХШТЕЙН, Г. П. ВЕРХИВКЕР

УДК 621.039.534.34

Поскольку современные АЭС работают в основном на низких параметрах пара, проблема повышения единичной мощности турбоагрегатов АЭС является более сложной, чем на ТЭС.

Один из путей значительного повышения единичной мощности блока состоит в применении газожидкостного моноцикла на неводяных парах. В таком цикле обеспечивается высокая температура регенеративного подогрева, рабочее тело в турбине работает в состоянии перегрева и можно реализовать пониженные температуры охлаждающей воды, что более выгодно по сравнению с моноциклами на водяном паре. Моноцикл на неводянном паре может иметь более высокий к. п. д., чем какой-либо другой, а с конструктивной и эксплуатационной точек зрения он отличается наличием единого рабочего тела и простотой схемы. Предложения по использованию неводяных паров в энергетике были выдвинуты еще в 1940 г. [1], а с 1958—1960 гг. разрабатывается энергетическая установка на углекислоте в Одесском технологическом институте им. М. В. Ломоносова.

Рассмотрим эффективность применения рабочего тела на примере АЭС Великобритании «Данджнесс В» [2]. На этой АЭС реактор охлаждается углекислым газом, во втором контуре применяется водяной пар. Если применить схему, представленную на рисунке,

то на АЭС с таким реактором можно получить к. п. д. $\sim 45,0\%$ при тех же параметрах CO_2 на входе и выходе из реактора. В этой схеме теплоноситель используется в верхней ступени бинарного цикла. В нижней ступени этого цикла используется простой углекислотный цикл с конденсацией.

Расчет показанной схемы (см. рисунок) проведен при параметрах в узловых точках схемы, указанных в табл. 1. В расчете приняты следующие значения к. п. д.: для турбин $\eta_{oi} = 0,9$; компрессора $\eta_k = 0,88$; к. п. д. насоса $\eta_n = 0,82$; механические к. п. д. турбомашин и генератора $\eta_m = \eta_{ген} = 0,99$; теплового потока $\eta_{т.п} = 0,995$.

Недостатком рассматриваемой схемы являются большие поверхности нагрева. Ориентировочная оценка поверхностей нагрева схем АЭС «Данджнесс В» и АЭС со схемой, приведенной на рисунке, для блока мощностью 1200 Мвт дана в табл. 2. Однако в АЭС, выполненной по приведенной схеме, при мощности 1297 Мвт можно иметь четыре выхода в турбомашинах.

Учитывая небольшое число ступеней углекислотных турбин, можно считать, что длина основного вала установки без генератора составит менее 25 м. Представляется, что экономия, связанная с уменьшением габаритов турбомашин, перекроет рост стоимости поверхностей нагрева. Кроме того, значительно повышается

Параметры в узловых точках схемы, Таблица 1
приведенной на рисунке

Номер точки	P , бар	T , °К	i , ккал/кг
1	9,2	337	240
2	33	446	335
3	32	593	492
4	30	948	907
5	10	812	744
6	9,7	625	531
7	9,5	475	374
8	57,07	293	-38
9	250	317	-11
10	245	467	282
11	235	782	687
12	60	625	521
13	58	350	214
14	240	588	447
15	59	475	356

Некоторые показатели АЭС со схемой, Таблица 2
приведенной на рисунке (I), и «Данджнесс В» (II)

Наименование показателя	I	II
Полезная электрическая мощность, $M_{\text{эл}}$	1297	1200
Тепловая мощность, $M_{\text{т}}$	2890	2890
К. п. д. АЭС «нетто», %	44,5	41,5
Температура газа на выходе из реактора, °С	675	675
Расход газа через реактор, $m^3/ч$	25 050	25 050
Температура газа перед реактором, °С	320	320
Давление газа в реакторе, $атм$	32	32
Давление газа в парогенераторе, $атм$	10	30
Суммарная поверхность нагрева, m^2 *	207 000	121 000

* При расчете поверхности нагрева принималось продольное противоточное обтекание теплообменной поверхности, состоящей из трубок диаметром 8/6 мм с наружным продольным оребрением со стороны низкого давления. Коэффициент оребрения принимался равным шести.

надежность установки, так как АЭС работает на одном рабочем теле; не требуется химической очистки воды.

Интересно отметить, что попытка применить эту схему для низких температур не дала ожидаемых результатов. Это объясняется тем, что с понижением начальных температур перед турбиной понижается и эффективность газового цикла, являющегося верхней ступенью бинарной схемы. И, наоборот, с ростом начальных температур эффективность цикла, схема которого представлена на рисунке, будет расти.

При повышении начальной температуры выше 750—800° С возникает опасность взаимодействия углекислоты с металлом и графитом. Применение в первом конту-

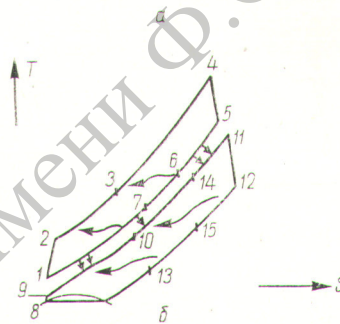
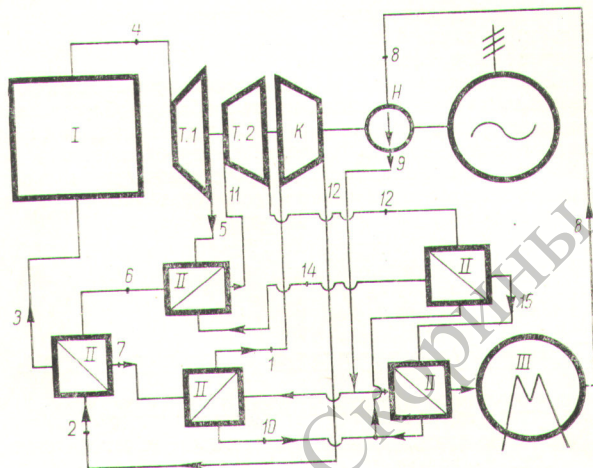


Схема (а) и цикл (б) бинарной АЭС на углекислоте с конденсацией и комбинированной регенерацией:

К — компрессор; Н — насос; Т.1 — цилиндр низкого давления; Т.2 — цилиндр высокого давления; I — реактор; II — регенераторы; III — конденсатор.

ре инертных газов, например, гелия, позволяет повысить температуру на выходе из реактора. Если гелий использовать в первом контуре только в качестве теплоносителя, а во втором контуре применять водяной пар при обычных параметрах, то термодинамические преимущества высокотемпературного подогрева гелия не реализуются. Значительное повышение экономичности может быть получено, если первый контур на гелии также будет силовой. Подобная схема предлагалась в работе [3]. Однако применение во втором контуре вместо водяного пара углекислоты сверхкритического давления уменьшает неэквидистантность изобар при передаче тепла из первого контура во второй, а следовательно, приводит к повышению к. п. д., кроме того, значительно сокращается стоимость и уменьшаются габариты турбомашин.

Переход на одноконтурную схему на той же АЭС «Данджнесс В» при температуре выхода CO_2 из реактора 675° С может поднять к. п. д. станции (брутто) до 52,0%. Главным препятствием является необходимость подъема давлений в реакторе до 200 $атм$.

Следует отметить, что применение углекислоты в качестве теплоносителя возможно и в реакторах на быстрых нейтронах; при этом, по-видимому, несколько повышается надежность и экономичность установки.

Применение одноконтурной схемы позволяет получить к. п. д. приблизительно на 10% выше, чем в двух- и трехконтурных схемах.

В настоящее время в СССР уже получены некоторые результаты конструктивных проработок оборудования углекислотных установок [4], указывающие на высокую компактность и к. п. д. турбомашин.

Учитывая изложенное, представляется целесообразным проведение научно-исследовательских и проектных проработок АЭС на углекислоте.

Поступило в Редакцию 8/II 1968 г.
В окончательной редакции 1/XI 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. П. Гохштейн. «Советское котлотурбостроение», № 10, 343 (1940).
2. Main design features of Dungeness «B». Nucl. Engng, 10, 347 (1965).
3. Е. Ф. Ратников. «Теплоэнергетика», № 4, 52 (1967).
4. В. Л. Дехтярев, Е. К. Олесевич, В. Н. Халайджиг. «Энергомашиностроение», № 11, 26 (1966).

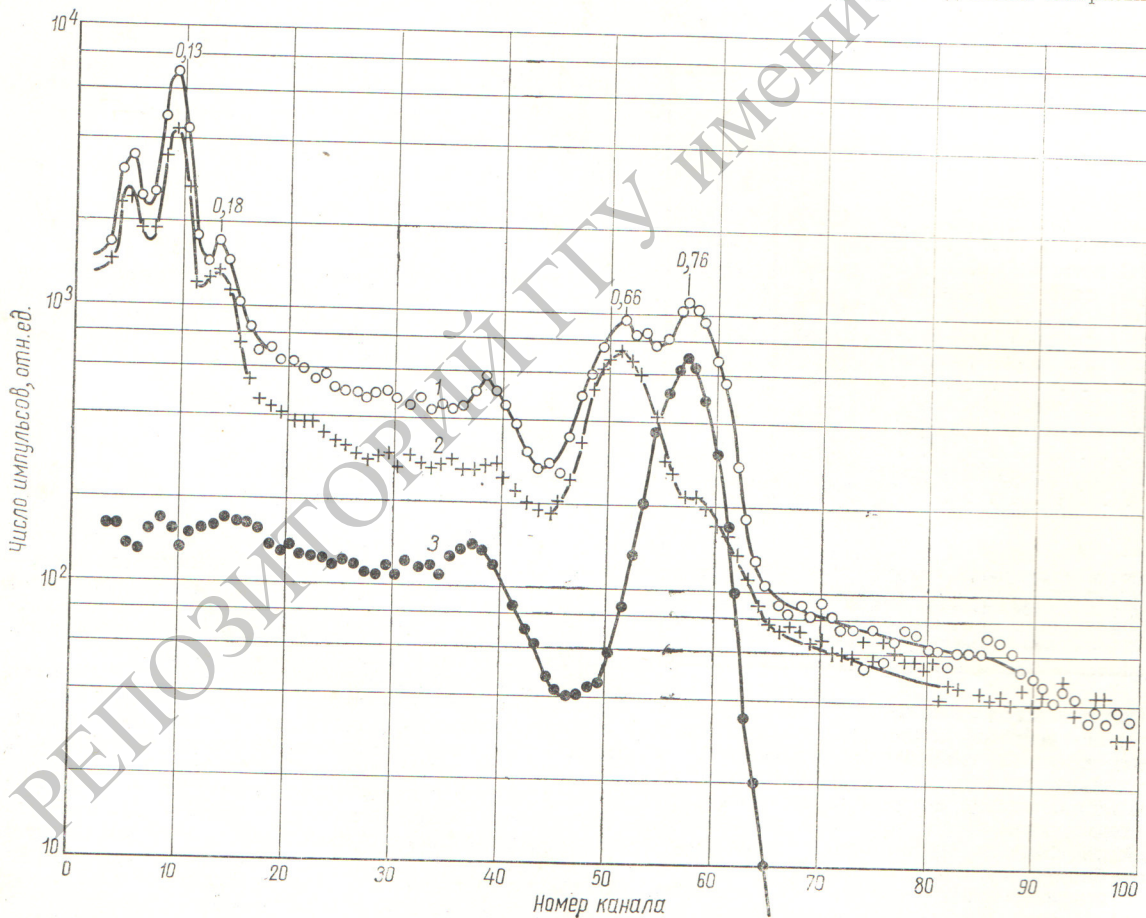
Длиннопериодная γ -активность осколков деления раствора уранилсульфата

А. М. ВОИНОВ, В. М. КУЛЬГАВЧУК, Г. Н. МАСЛОВ,
Ф. Х. НАСЫРОВ, Н. Ф. ПАШКИН, Л. А. САМОДУРОВ

В критических экспериментах раствор уранилсульфата UO_2SO_4 с ураном высокого обогащения в герметичном баке из нержавеющей стали проработал кам-

панию 424 дня. Подавляющая часть осколочных продуктов деления была сохранена, так как за кампанию газообразные продукты деления выбрасывались лишь

УДК 539.173.4



Аппаратурные γ -спектры (числа над кривыми — энергия γ -квантов в мегаэлектронвольтах):
1 — раствора после выдержки 338 дней; 2 — раствора после выдержки 488 дней; 3 — осадка раствора после выдержки 338 дней.