

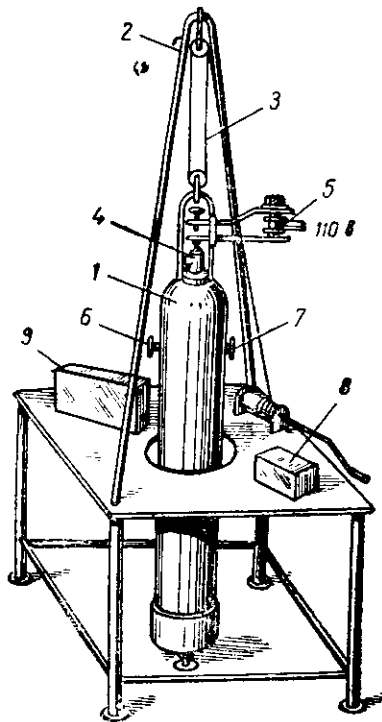


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1—стальной баллон; 2—стойка; 3—трос; 4—клапан с иглой и упорным винтом для выпуска пара; 5—электромагнит; 6—штуцер для присоединения манометра; 7—штуцер для введения термодары; 8—коллиматор с активированным серебром; 9—люминесцентный счетчик с фотоумножителем.

крахался и через некоторое время, необходимое для выравнивания температур стенки баллона и воды, одновременно с открытием клапана включались все измерительные приборы и кинокамера. При уменьшении давления вода в баллоне закипала. Опыты продолжались от 1 до 2,5 мин. За это время давление в баллоне снижалось до 5 ат.

В результате опытов была найдена зависимость доли сечения сосуда, занимаемой паром φ , от объемной скорости пара, рассчитанной на полное сечение сосуда при разных скоростях уменьшения

давления в баллоне. Доля сечения, занятая паром, вычислялась исходя из средней по диаметру баллона плотности пароводяной смеси. Вычисление объемной скорости производилось в предположении, что все тепло воды расходуется на парообразование. Кроме того, вводилась поправка на испарение воды за счет тепла, отдаваемого стенками баллона.

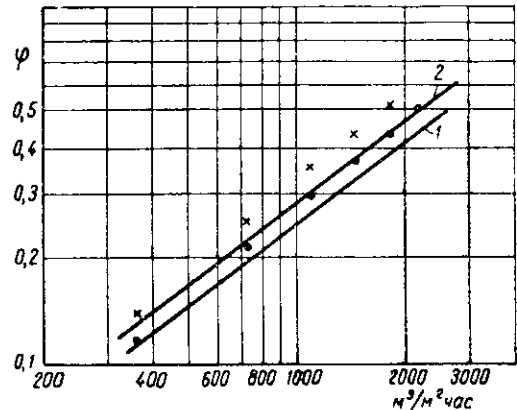


Рис. 2. Зависимость доли сечения, занятой паром φ , от объемной скорости пара.

●, x—данные авторов для давлений 20 и 40 ат соответственно; 1, 2—данные МЭИ и ЦКТИ для тех же давлений.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные, относящиеся к давлению 20 и 40 ат при различных скоростях уменьшения давления в баллоне*. Полученные данные близки к опубликованным**) для барботажа пара через воду при постоянном давлении.

Измерена также плотность пароводяной смеси в баллоне на разной глубине. Оказалось, что, за исключением верхнего слоя, содержащего пену, плотность пароводяной смеси при прочих равных условиях не зависит от глубины, если ниже места измерения выделяется одинаковое количество энергии.

Поступило в редакцию 28 X 1957 г.

*) Независимо от скорости снижения давления точки, относящиеся к одному давлению, хорошо укладываются на прямую в логарифмическом масштабе.

**) Т. Х. Маргунова. Методы получения чистого пара, Госэнергоиздат, 1955 г.

Температура регенеративного подогрева воды на атомной электростанции с реактором, охлаждаемым водой

И. А. Труб

Атомные электростанции с гетерогенными реакторами, в которых теплоносителем служит вода под давлением в настоящее время наиболее изучены. В то же время экономические стороны работы этих

станций еще неясны. Спорным является вопрос о наиболее выгодной температуре подогрева воды вторичного контура в регенеративном цикле.

Противоречивые выводы, приведенные в рабо-

тах [1]—[5], объясняются различием критериев, применяемых для оценки экономичности атомных электростанций.

Рассмотрим связь между температурой регенеративного подогрева воды вторичного контура (питательной воды) $t_{пв}$ и другими параметрами станции.

На электростанциях, работающих на угле, экономичность его использования определяется коэффициентом полезного действия электростанции $\eta_{ст}$:

$$\eta_{ст} = \eta_{ку} \eta_{т} \eta_{0э},$$

где $\eta_{ку}$ —к. п. д. котельной установки; $\eta_{т}$ —термический к. п. д.; $\eta_{0э}$ —относительный электрический к. п. д. турбогенератора.

На атомной электростанции

$$\eta_{ст} = \eta_{р} \eta_{пг} \eta_{т} \eta_{0э},$$

где $\eta_{р}$ —к. п. д. реактора; $\eta_{пг}$ —к. п. д. парогенератора.

Учитывая, что тепловые потери в реакторе и парогенераторе сравнительно малы, можно считать

$$\eta_{ст} \approx \eta_{т} \eta_{0э}. \quad (1)$$

При одинаковых параметрах пара условия достижения наивыгоднейшего $\eta_{0э}$ на атомных и угольных электростанциях одни и те же.

Иначе обстоит дело с коэффициентом $\eta_{т}$. На современных угольных электростанциях, котельные агрегаты которых, как правило, оборудованы воздухоподогревателями, наивыгоднейшее значение $\eta_{т}$ при принятых параметрах пара определяется регенеративным циклом турбинных установок. Экономичность таких котельных установок почти не зависит от коэффициента $\eta_{т}$.

На атомной электростанции экономичность использования реактора зависит от коэффициента $\eta_{т}$. В самом деле электрическая мощность атомной электростанции N определяется произведением $Q_p \eta_{т}$ (при неизменном $\eta_{0э}$), где Q_p —количество тепла, отводимое от реактора (ккал/час). Величина Q_p зависит от температуры воды t_1 , поступающей в реактор, а следовательно, и от температуры питательной воды $t_{пв}$, и связана с коэффициентом $\eta_{т}$, поскольку последний является функцией $t_{пв}$. В отличие от угольной станции максимальная электрическая мощность атомной станции N_{max} достигается не при максимальном значении $\eta_{т}$, а следовательно, и не при оптимальной величине $t_{пв}$, определяемой условием достижения максимального значения $\eta_{т}$.

Влияние $t_{пв}$ на экономичность атомных станций в известной мере можно сравнить с влиянием, оказываемым $t_{пв}$ на экономичность угольных станций, котлоагрегаты которых не имеют воздухоподогревателей.

Рассмотрим величины, определяющие значения Q_p и $\eta_{т}$ и их связь с температурой питательной воды $t_{пв}$.

Величины, определяющие Q_p . Передача тепла от поверхности оболочек тепловыделяющих элементов к теплоносителю описывается известным уравнением теплоотдачи

$$Q_p = F \alpha \Delta t.$$

В данном случае принимается, что в реакторе все тепло от тепловыделяющих элементов передается воде. Небольшое количество тепла, которое также отводится от замедлителя (для графитового замедлителя оно равно 7—8% [6]), учитывается соответствующим коэффициентом.

Поверхность оболочек тепловыделяющих элементов F в данном расчете принимается как исходная величина. Коэффициент теплоотдачи α от поверхности оболочек тепловыделяющих элементов к воде при неизменной скорости ее в каналах реактора зависит только от физических параметров воды λ , Pr и ν , которые в свою очередь зависят от температуры:

$$\alpha = f \left(\frac{\lambda Pr^{0,4}}{\nu^{0,8}} \right). \quad (2)$$

Температурный напор Δt —средняя разность температур поверхности оболочек тепловыделяющего элемента и воды—зависит от максимальной температуры тепловыделяющего элемента t_0 , от температуры воды на входе и выходе из рабочих каналов реактора t_1 и t_2 соответственно.

Для определения Δt значение t_0 усредняется по высоте и по радиусу реактора:

$$t_0 = \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{r_1} r f(l, r) dl dr}{r_1^2 l_1}, \quad (3)$$

$$l_1 = t_{пв} + \delta t,$$

где δt —температурный напор на холодном конце подогревательной части парогенератора.

Выбор значения t_1 связан с Δt . Величина t_2 является заданной и из соображений надежности принимается на 30—35°С ниже температуры кипения воды, соответствующей ее давлению на выходе из каналов реактора. Изменение температуры воды по высоте тепловыделяющего элемента можно с достаточной точностью считать линейным.

Решая совместно уравнения теплопроводности и теплоотдачи, можно получить выражение для Δt :

$$\Delta t = \frac{t_0 - \frac{t_{пв} + \delta t + t_2}{2}}{1 + \alpha \left(\frac{B_1}{2\lambda_1} + \frac{B_2}{\lambda_2} \right)}, \quad (4)$$

где B_1 и B_2 —толщины сплошных или трубчатых урановых стержней и оболочек, а λ_1 и λ_2 —соответствующие коэффициенты теплопроводности.

Величины, определяющие $\eta_{т}$. Применяя известную методику приближенного определения $\eta_{т}$, запишем выражение

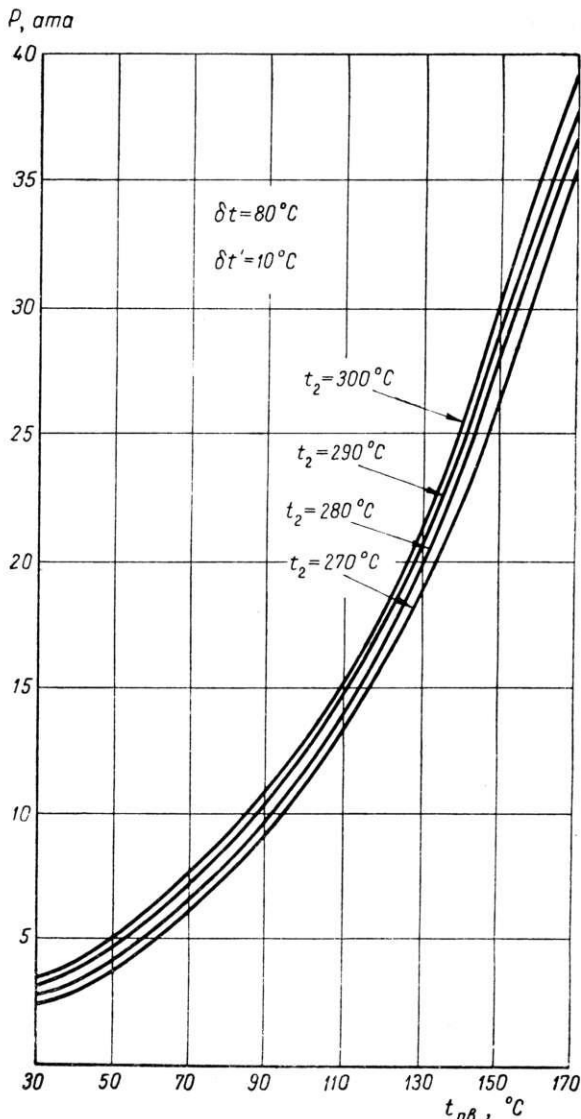
$$\eta_{т} = \varphi \left[1 - \frac{T_k (S_0 - S'_m)}{i_0 - i'_m} \right], \quad (5)$$

где φ —коэффициент, учитывающий степень совершенства регенеративного цикла и зависящий от точек отбора пара и числа подогревателей; T_k —температура пара, поступающего в конденсатор турбины (°K); S_0 и S'_m —энтропии пара, поступающего в турбину, и воды при температуре $t_{пв}$; i_0 и i'_m —соответствующие энтальпии.

Вычисляя значение

$$\alpha \Delta t \eta_T = c \frac{\lambda P r^{0,4}}{v^{0,8}} \left[\frac{t_0 - \frac{t_{пв} + \delta t + t_2}{2}}{1 + \alpha \left(\frac{B_1}{2\lambda_1} + \frac{B_2}{\lambda_2} \right)} \right] \times \varphi \left[1 - \frac{T_K (S_0 - S'_m)}{i_0 - i'_m} \right], \quad (6)$$

где $c = 0,023 \frac{W^{0,8}}{d_{эв}^{0,2}}$ (W — скорость воды в каналах, м/сек; $d_{эв}$ — эквивалентный диаметр канала, м).



Зависимость давления пара P , вырабатываемого парогенератором, от температуры питательной воды $t_{пв}$, поступающей в парогенератор, для различных температур воды t_2 на выходе из реактора.

При $t_{пв} = \text{var}$ находим значение температуры $t_{пв}$, при которой выражение (6) имеет максимум. Этому максимуму соответствует и $N_{\max}$.

Анализ выражения (6) показывает, что изменение $t_{пв}$ заметно влияет лишь на изменения Δt и η_T . Коэффициент α в большом интервале изменения значений $t_{пв}$ меняется незначительно (в пределах 1—3%). Поэтому при расчетах вариантов можно считать $\alpha = \text{const}$.

С ростом $t_{пв}$ температурный напор Δt в реакторе уменьшается, а термический к. п. д. η_T увеличивается. Зависимость η_T от $t_{пв}$ сложная. Коэффициент η_T зависит от давления пара, поступающего в турбину, которое в свою очередь зависит от соотношения количеств тепла, расходуемых в парогенераторе на подогрев питательной воды до температуры кипения t_K и на парообразование.

Поэтому можно написать, что

$$\frac{t_2 - (t_K + \delta t')}{(t_K + \delta t') - (t_{пв} + \delta t)} = \frac{i - ct_K}{c(t_K - t_{пв})}, \quad (7)$$

где $\delta t'$ — минимальный температурный напор в испарительной части парогенератора; i — энтальпия насыщенного пара.

В интервале давлений пара 2—50 атм и/с находится в пределах 645—655, в среднем и/с = 650. Поэтому правая часть выражения (7) может быть записана так:

$$\frac{650 - t_K}{t_K - t_{пв}}.$$

Тогда из выражения (7) следует

$$t_K = \frac{t_{пв} (650 - t_2 + \delta t') + 650 (\delta t - \delta t')}{650 - t_2 + \delta t}. \quad (8)$$

По значению t_K находим соответствующее давление пара P в парогенераторе.

На рисунке приведена зависимость P от $t_{пв}$ для различных значений t_2 . Ясно видна резкая зависимость давления пара P от температуры питательной воды $t_{пв}$, поступающей в парогенератор.

Температура регенеративного подогрева воды, соответствующая максимальной электрической мощности атомной станции, не тождественна экономически наивыгоднейшей температуре. Наивыгоднейшая температура регенеративного подогрева воды, равно как и наивыгоднейшие значения многих других параметров, в конечном итоге определяется тем или иным соотношением капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Поступило в редакцию 26 VI 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Traupel. Bull. techn. Suisse romande, № 22, 401 (1956).
2. H. Bachl. Energie, № 6, 207 (1957).
3. J. Simpson, M. Shaw, R. Donworth, W. Lyman, I. Mandil, N. Palladino. Description of the pressurized water reactor power plant at Shippingport (Доклад № 815, представленный США на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955 г.).

4. R. Anderson, A. Carson, J. Lowe. A graphite moderated nuclear power plant design (Доклад № 492, представленный США на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955 г.).
5. C. Starr. Sodium graphite reactor 75 000 electrical kilowatt power plant (Доклад № 493,

представленный США на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955 г.).

6. Д. И. Блохинцев, М. Е. Минашин, Ю. А. Сергеев. Атомная энергия I, № 1, 24 (1956).

Измерение спектров γ -лучей и нейтронов с помощью кристаллов CsJ(Tl), NaJ(Tl) и стильбена

Н. Г. Афанасьев, В. Ю. Гончар

Измерения спектров γ -лучей и нейтронов производились на установке, состоящей из следующих основных частей: кристалла с фотоумножителем, линейного усилителя импульсов, стабилизированного источника высокого напряжения для питания фотоумножителя и многоканального амплитудного анализатора импульсов. Использовался 55-канальный анализатор импульсов с ультразвуковой «памятью», разработанный нами в 1954 г. и мало отличающийся от анализатора, разработанного Хатчинсоном и Скэрротом [1].

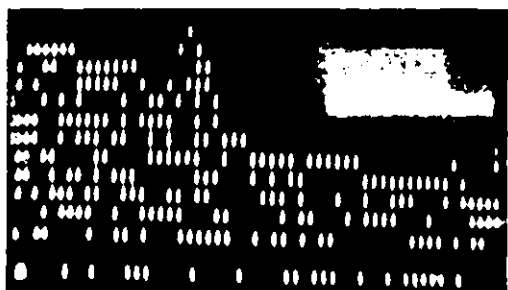


Рис. 1. Вид спектра на экране электронно-лучевой трубки.

Анализатор имеет следующие основные характеристики: разрешающее время—0,545 мсек, число каналов—55, емкость каждого из каналов—65 535 импульсов. Измеряемый спектр изображается на экране электронно-лучевой трубки, причем число импульсов в каждом канале записывается в двоичной системе (рис. 1). Эти свойства анализатора дают возможность за 1—2 мин. измерять спектр, что позволяет достаточно быстро исследовать свойства фотоумножителей и спонтаннолюминесцирующих кристаллов.

Нами разработана компактная схема усилителя «стабилизированного питания фотоумножителя» (рис. 2). Регулируемый источник высокого напряжения (700—1400 в) [2] имеет положительную полярность. Импульс после катодного повторителя формируется линией задержки и имеет длительность 3 мсек, что уменьшает искажение спектра за счет наложения импульсов. Все устройство смонтировано в одном блоке размерами 40×40×20 см³. Нами исследовалось несколько десятков фотоумножите-

лей ФЭУ-19 для нахождения распределения потенциалов первых электродов, дающего наилучшее разрешение по энергии. Удобным методом быстрого измерения разрешающей способности является измерение γ -линий Co^{60} , так как при этом одновременно контролируется линейность фотоумножителя. Оказалось, что для всех ФЭУ-19, дающих хорошую разрешающую способность (примерно 1 из 10 экземпляров), оптимальное распределение потенциалов обеспечивается указанным на рис. 2 делителем. Как показано на рис. 3, для отдельных экземпляров ФЭУ-19 могут быть получены удовлетворительные разрешающая способность и линейность.

В отличие от ФЭУ-19 все испытанные нами фотоумножители ФЭУ-С дают удовлетворительную разрешающую способность (рис. 4 и таблица).

Таблица

Разрешающая способность спектрометра (%)

Источник	Энергия γ -лучей Мэв	Разрешающая способность	
		CsJ(Tl)	NaJ(Tl)
Cs^{137}	0,662	11,5	9
Co^{60}	1,17 1,33	9	5,6

При измерениях мы пользовались кристаллом CsJ(Tl), изготовленным Институтом кристаллографии АН СССР, и кристаллами NaJ(Tl) и стильбена, изготовленными Харьковским заводом химических реактивов. Применялись кристаллы диаметром около 3 см и высотой около 2 см.

Мы проверили правильность воспроизведения спектра Co^{60} при сильной нагрузке спектрометра импульсами малой амплитуды (Cs^{137}), что соответствует часто встречающимся условиям при измерении γ -спектров. Оказалось, что положение максимумов Co^{60} и их разрешение практически не изменились даже при очень больших нагрузках импульсами малой амплитуды (до 685 имп/сек).