

УДК 621.039.55:003.12

Некоторые вопросы экономики исследовательского ядерного реактора

ЗЕЛЕНОВ В. И., КАРПЕЧКО С. Г., НИКИФОРОВ А. Д.

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам экономики исследовательского ядерного реактора и планированию экспериментов на нем [1—6]. В работах рассматриваются методики оценки стоимости эксперимента на реакторе и некоторые показатели эффективности его использования. При определении стоимости эксперимента полные затраты на реактор распределяются между экспериментами пропорционально эффективности экспериментального устройства [1], зависящей от произведения его объема на нейтронный поток.

Такой подход к распределению затрат, по нашему мнению, нуждается в уточнении. А именно: часть полных затрат на реактор, мало зависящих от мощности, целесообразнее распределять поровну между всеми экспериментами, а оставшуюся часть, непосредственно зависящую от мощности реактора, — пропорционально эффективности экспериментальных устройств.

В данной работе излагается методика оценки стоимости эксперимента на исследовательском ядерном реакторе с учетом указанного уточнения. Кроме того, сделана попытка выявить влияние показателей эффективности использования исследовательского реактора (в частности, коэффициента мощностного использования, средней рабочей мощности) на себестоимость нейтронов в экспериментальных устройствах.

Методика оценки стоимости экспериментов на исследовательском ядерном реакторе

Определим полные затраты на исследовательский ядерный реактор следующим образом:

$$Z_{\text{полн}} = Z_{\text{пост}} + Z_{\text{перем}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{полн}}$ — полные годовые затраты на реактор; $Z_{\text{пост}}$ — постоянная составляющая полных затрат; $Z_{\text{перем}}$ — переменная составляющая полных затрат.

К постоянным затратам отнесем те, которые незначительно зависят от мощности реактора:

$$Z_{\text{пост}} = Z_{\text{ам}} + Z_{\text{з.п}} + Z_{\text{с.п}} + Z_{\text{адм}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{ам}}$ — годовое фонд амортизационных отчислений на производственные помещения и силовое оборудование; $Z_{\text{з.п}}$ — годовое фонд заработной платы обслуживающего персонала;

$Z_{\text{с.п}}$ — затраты на потребление энергии для собственных нужд реактора; $Z_{\text{адм}}$ — затраты на содержание административно-управленческого персонала. К переменным затратам отнесем затраты, непосредственно зависящие от мощности, в частности затраты на горючее:

$$Z_{\text{перем}} = \frac{qC_{\text{г}}}{\varphi} \bar{N} k_{\text{исп}} 8760, \quad (3)$$

где q — коэффициент, учитывающий расход горючего на выработку единицы тепловой энергии; $C_{\text{г}}$ — удельная стоимость горючего в изделиях; φ — относительное среднее выгорание выгружаемого горючего; \bar{N} — средняя рабочая мощность реактора; $k_{\text{исп}}$ — коэффициент мощностного использования реактора, определяемый как отношение времени работы реактора на любом уровне мощности к календарному времени.

Стоимость эксперимента определяется как постоянной, так и переменной составляющими полных затрат на реактор. Поскольку постоянная составляющая мало зависит от мощности реактора, то и распределять ее между экспериментами следует поровну, без учета их индивидуальных характеристик (объема экспериментального устройства, потоков нейтронов в нем). Такое распределение позволяет получить минимальную стоимость эксперимента на данном реакторе. Назовем ее опорной. Распределение переменной составляющей полных затрат между экспериментами пропорционально их эффективности позволяет учитывать индивидуальные особенности экспериментальных устройств и получать добавочную стоимость эксперимента. Назовем ее физической стоимостью. Таким образом, полная стоимость эксперимента будет определяться опорной и физической стоимостями.

С учетом изложенного полную стоимость конкретного эксперимента на реакторе запишем следующим образом:

$$C_{\text{э. } i} = \frac{Z_{\text{пост}}}{n} + \frac{Z_{\text{перем}}}{n} \bar{\Phi}_i S_i, \quad (4)$$

где $C_{\text{э. } i}$ — годовая стоимость i -го эксперимента; $\bar{\Phi}_i$ — невозмущенный удельный поток нейтронов в ячейке активной зоны, предназначенной для установки экспериментального устрой-

ства [1]; S_i — рабочая поверхность экспериментального устройства (непосредственно соприкасающаяся с активной зоной). Здесь вместо рабочего объема в выражении для эффективности экспериментального устройства [1] используется рабочая поверхность, что уравнивает степень влияния физической (поток нейтронов) и геометрической (диаметр экспериментального устройства) составляющих эффективности на стоимость эксперимента.

Себестоимость нейтронов в экспериментальных устройствах

По затратам на эксперимент в реакторе и количеству нейтронов, рождаемых реактором в экспериментальном устройстве в течение года, легко определить себестоимость нейтронов для данного экспериментального устройства:

$$C_{н. i} = \frac{C_{э. i}}{\bar{\Phi}_i S_i \bar{N} k_{исп} 8760}, \quad (5)$$

где $C_{н. i}$ — себестоимость нейтронов в i -м экспериментальном устройстве. С учетом (4)

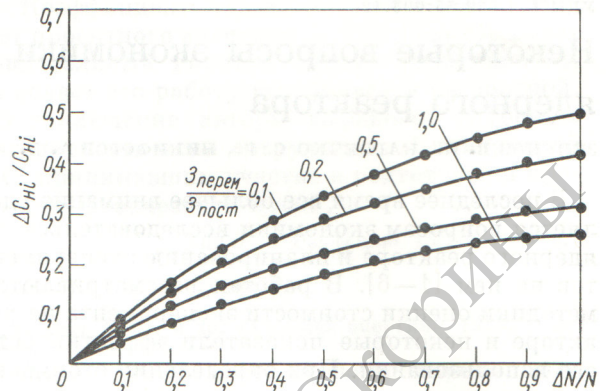
$$C_{н. i} = \frac{Z_{пост}}{n \bar{N} k_{исп} 8760 \bar{\Phi}_i S_i} + \frac{q C_{г. i}}{\varphi \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i S_i}. \quad (6)$$

Структура себестоимости нейтронов определяется структурой стоимости эксперимента. Себестоимость нейтронов также имеет две составляющие:

$$C_{н. i. пост} = \frac{Z_{пост}}{n \bar{N} k_{исп} 8760 \bar{\Phi}_i S_i}; \quad (7)$$

$$C_{н. i. перем} = \frac{q C_{г. i}}{\varphi \frac{n}{\sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i S_i}}. \quad (8)$$

Данное определение себестоимости нейтронов показывает, что в экспериментальных устройствах различного типа (канал в «ловушке», в тепловыделяющей сборке, в отражателе и за отражателем) она различна. Постоянная составляющая себестоимости нейтронов в i -м экспериментальном устройстве зависит от показателей эффективности использования реактора (\bar{N} , $k_{исп}$) и от характеристик экспериментального устройства ($\bar{\Phi}_i$, S_i), переменная — от производительности реактора $\sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i S_i$, от стоимости топлива и глубины выгорания выгружаемого горючего. Рассмотрим влияние показателей использования реактора на себестоимость нейтронов в экспериментальных устройствах.



Изменение себестоимости нейтронов в экспериментальных устройствах при увеличении средней мощности реактора

Несложные математические преобразования показывают:

$$\frac{\Delta C_{н. i}}{C_{н. i}} = \frac{\frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}}{1 + \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}} \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_{перем}}{Z_{пост}} \frac{\bar{\Phi}_i S_i}{\bar{\Phi}_i S_i}\right)}, \quad (9)$$

где $\bar{\Phi}_i S_i$ — средняя по всем экспериментальным устройствам эффективность; $\Delta C_{н. i} / C_{н. i}$ — относительное снижение себестоимости нейтронов в экспериментальном устройстве при относительном увеличении средней рабочей мощности реактора на $\Delta \bar{N} / \bar{N}$ без изменения остальных характеристик реактора.

На рисунке показана зависимость $\Delta C_{н. i} / C_{н. i}$ от $\Delta \bar{N} / \bar{N}$ для различных соотношений $Z_{перем} / Z_{пост}$ при постоянном $\bar{\Phi}_i S_i / \bar{\Phi}_i S_i = 1,0$. Из рисунка следует, что наибольший эффект при увеличении средней мощности реактора достигается при малых значениях отношения этих величин.

Абсолютная величина экономического эффекта при повышении средней мощности реактора составляет

$$\Delta C = Z_{пост} \frac{\frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}}{1 + \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}} \quad (10)$$

Следовательно, характер зависимости $\Delta C / Z_{пост}$ от $\Delta \bar{N} / \bar{N}$ одинаков для всех реакторов, а экономический эффект определяется постоянной составляющей затрат на реактор при постоянстве прочих параметров (φ , $C_{г. i}$, $\bar{\Phi}_i$, S_i). Очевидно, что повышение коэффициента использования реактора дает экономический эффект, определяемый выражением

$$\Delta C = Z_{пост} \frac{\Delta k_{исп} / k_{исп}}{1 + \Delta k_{исп} / k_{исп}}.$$

Ход зависимости $\Delta C/Z_{\text{пост}}$ от $\Delta k_{\text{исп}}/k_{\text{исп}}$ для всех реакторов также будет одинаков.

Таким образом, при распределении затрат по предложенной методике вводится понятие опорной стоимости эксперимента (определяемой постоянной составляющей затрат и числом экспериментальных устройств), которая является минимальной стоимостью эксперимента на реакторе. Очевидно, что стоимость любого эксперимента на исследовательском реакторе не может быть ниже опорной стоимости. Показано, что соотношение переменной и постоянной составляющих затрат на реактор сильно влияет на снижение себестоимости нейтронов в экспериментальных устройствах при улучшении показателей эффективности использования реактора. В частности, наиболее целесообразно повышать мощностные характеристики реактора с соотношением переменной и постоянной составляющих затрат в пределах 0,1—0,5.

Экономический эффект при изменении показателей эффективности использования реактора зависит только от постоянной составляющей затрат и не зависит от прочих характеристик реактора (φ , C_r , $\bar{\Phi}_i$, S_i).

Поступила в Редакцию 8/VIII 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыканов В. А. «Атомная энергия», 1963, т. 14, вып. 5, с. 469.
2. Коченов А. С. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 2, с. 97.
3. Ерыкалов А. Н., Петров Ю. В. «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 1, с. 52.
4. Цыканов В. А. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 1, с. 15.
5. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П. Исследовательские ядерные реакторы. М., Атомиздат, 1972.
6. Батов В. В., Корякин Ю. И. Экономика ядерной энергетики. М., Атомиздат, 1969.

Рецензии

Воробьев А. А., Кононов Б. А., Евстигнеев В. В. Электронные пучки бетатронов. М., Атомиздат, 1974, 9,5 л., 95 коп.

Интерес к ускорителям как источникам излучения для медицины, биологии, промышленности продолжает расти. Одним из наиболее простых и дешевых в эксплуатации ускорителей в диапазоне энергий 5—50 МэВ является бетатрон, выпускаемый серийно в течение многих лет. Авторы попытались осветить накопленный опыт относительно характеристик электронных пучков в процессе инжекции, ускорения, и, главным образом, их вывода и использования.

В книге 5 глав. Первые две посвящены теории классического бетатрона с переменным во времени азимутально-симметричным магнитным полем и динамике электронов при инжекции и в процессе ускорения.

В третьей и четвертой главах рассмотрены различные методы вывода пучка электронов, вопросы стабилизации параметров электронного пучка, приборы, применяемые при работе с пучком.

В пятой главе описываются вопросы практического применения электронных пучков бетатронов.

Авторы пытались охватить довольно широкий круг вопросов, касающихся движения электронного пучка в бетатроне. Главную ценность, на наш взгляд, представляет экспериментальный материал, накопленный при создании и эксплуатации бетатронов в Томском политехническом институте и разработанный там же инженерный подход к созданию устройств вывода пучка. Третья и четвертая главы составляют основу книги. Однако этот материал изложен весьма скато, а предположенная ему теоретическая часть (главы 1—3) является, по существу, изложением других широко известных руководств по теории бетатрона. Ценнее было бы подробнее изложить примеры практического применения теории в приближенных инженерных рас-

четах. Четвертая глава перегружена материалом, который мог бы явиться предметом отдельного и подробного рассмотрения (это относится, прежде всего, к разделам детектирования и спектрометрии, где дано лишь краткое перечисление методов и приборов для диагностики пучка).

К сожалению, в книге практически совсем не рассмотрены перспективы улучшения характеристик пучков бетатронов. Правда, авторы делают попытку описать перспективные, с их точки зрения, направления в такой последовательности: бетатрон с постоянным управляющим полем, бетатрон с винтовым магнитным полем, применение сверхпроводников, линейные индукционные ускорители, плазменный бетатрон. Рассмотрение перспектив по существу сводится к указанному перечислению. Однако линейный индукционный ускоритель уже давно применяется в ряде исследований и на основании накопленного опыта можно уже обоснованно судить о перспективах его использования; индукционный циклический ускоритель с постоянным полем, хорошо исследованный теоретически и на модельных экспериментах, позволит повысить интенсивность пучка по сравнению с обычным бетатроном на два-три порядка и сейчас перспективы его использования уже можно было бы оценить. Другие перечисленные направления находятся в стадии эксперимента (плазменный бетатрон) и первых теоретических предложений (винтовое поле) и о них можно было бы не упоминать в этой книге.

Несмотря на отмеченные недостатки, книга может быть полезна специалистам при разработке выводных устройств бетатронов различных применений. Кроме того, содержащаяся в книге библиография (126 названий) и краткое описание экспериментов позволит желающим подробно ознакомиться с работами, выполненными в этой области.

МИХАЛЕВ П. С.